

UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI PADOVA

FACOLTÀ DI INGEGNERIA

Dipartimento di Principi e Impianti di Ingegneria Chimica "I. Sorgho"



TESI DI LAUREA IN INGEGNERIA CHIMICA

**INQUINAMENTO ATMOSFERICO INDOTTO
DA UNO SCALO AEROPORTUALE.
IL CASO DI STUDIO
DELL'AEROPORTO MARCO POLO DI VENEZIA TESSERA.
[ESTRATTI]**

Relatore: Prof. Ing. Everardo Gola

Correlatore: Prof. Ing. Gabriele Scaltriti

Laureando: Ivano Cressatti

ANNO ACCADEMICO 2003 – 2004

NOTA

Questo file fornisce una panoramica sul lavoro svolto presso l'aeroporto Marco Polo riportando alcuni estratti dei primi due capitoli della relativa Tesi di laurea.

Viene quindi offerta una dettagliata descrizione del modello matematico utilizzato e viene illustrato il modo in cui sono stati trattati i dati raccolti.

Per ulteriori dettagli si può contattare l'autore all'indirizzo e-mail:

`cressatti_i@libero.it`

Introduzione

L'aeroporto Marco Polo di Venezia unitamente allo scalo di Treviso si presenta attualmente come il terzo sistema aeroportuale italiano per numero di passeggeri serviti.

A seguito di un breve periodo di crisi del trasporto aereo susseguente ai tragici eventi dell'11 settembre 2001 si è assistito ad un progressivo aumento della domanda di voli di linea ed in particolare ad una vera e propria esplosione delle richieste di voli a basso costo da parte del pubblico. Ciò ha comportato la fioritura di nuove compagnie low-cost oltre che di nuove compagnie di gestione di voli charter. Se quindi presso lo scalo di Venezia negli anni precedenti al 2000 il traffico low-cost e charter costituiva soltanto una piccola percentuale del traffico totale, negli ultimi anni esso si è via via affermato con conseguente aumento del numero di passeggeri e del numero di movimenti aerei totali, come è possibile osservare in Tabella 1.

	Anno 2000	Anno 2001	Anno 2002	Anno 2003
Totale Passeggeri	4'135'608	4'178'285	4'216'398	5'304'597
Totale Movimenti	65'719	63'067	65'849	76'886

Tabella 1: Numero di passeggeri e movimenti presso l'aeroporto Marco Polo

L'aeroporto inoltre incontra le esigenze delle oltre cinquecentomila imprese che operano nel Nordest italiano offrendo collegamenti di linea giornalieri con mete intercontinentali (New York), nazionali ed europee, in particolare con l'Europa dell'Est (Timisoara, Bucarest, Budapest, Mosca) che anno dopo anno assumono via via maggiore importanza per le attività delle varie aziende.

Inoltre, l'aeroporto si presenta in posizione strategica per lo sfruttamento del flusso turistico verso i centri balneari, montani, artistici, storici e culturali veneti (tra questi, Venezia, Vicenza, Verona, Padova, Treviso, Dolomiti con Cortina d'Ampezzo, località termali...).

Da tutto ciò la previsione di un aumento continuo del traffico aereo nei prossimi anni.

Queste riflessioni si inseriscono poi in un contesto di più ampio respiro che prevede, come sottolineato dal rapporto "Aviation and the global atmosphere" a cura dell'Inter-

governmental Panel on Climate Change (IPCC, istituito nel 1998 dalla World Meteorological Organization, WMO, e dal United Nations Environment Programme, UNEP), un aumento medio annuo del 5% del traffico aereo fino al 2015 per l'America del Nord e l'Europa occidentale.

Se da un lato dunque, come posto in chiara evidenza dal suddetto rapporto, l'aumento del traffico aereo riflette un aumento dei contatti commerciali all'interno e tra singoli Paesi con conseguenti potenziali benefici di origine economica, dall'altro pone interrogativi sull'impatto che i movimenti aerei e le corrispondenti attività correlate a terra possono avere sull'ambiente.

Questo studio volge pertanto l'attenzione all'inquinamento atmosferico generato dalle attività dell'aeroporto Marco Polo e si prefigge di stimare le emissioni di inquinanti sullo scalo su base annuale e la loro dispersione mediante l'utilizzo di un modello matematico. La società di gestione dell'aeroporto SAVE S.p.A. ha così messo a disposizione i dati riguardanti:

- il traffico aereo;
- mezzi di supporto a terra per i velivoli (Ground Support Equipment, GSE);
- traffico stradale interno ed esterno all'aeroporto;
- attività correlate (sorgenti stazionarie).

Si è quindi scelto di volgere l'attenzione all'anno 2002 per completezza dei dati disponibili mentre per ciò che riguarda il modello matematico si è optato per Emission and Dispersion Modelling System, EDMS, sviluppato dalla statunitense Federal Aviation Administration (FAA) in collaborazione con la United States Air Force (USAF). Si sottolinea sin d'ora che EDMS sfrutta il modello AERMOD realizzato dalla statunitense Environmental Protection Agency (EPA) per la stima della dispersione degli inquinanti.

La scelta di EDMS è stata imposta dalla necessità da parte di SAVE S.p.A di disporre di dati direttamente confrontabili con quelli dei maggiori scali internazionali.

EDMS infatti è un programma specificamente sviluppato per le strutture aeroportuali ed è l'unico programma di modellazione matematica per emissione e dispersione di inquinanti atmosferici riconosciuto negli Stati Uniti dalla FAA¹, oltre ad essere considerato esplicitamente dall'EPA come il programma di riferimento. Ciò ha comportato una rapida diffusione di EDMS in tutti gli scali dell'America del Nord diffondendosi poi di riflesso anche in Europa (Inghilterra, Francia, Italia).

¹Fonte: "Select resource materials and annotated bibliography on the topics of hazardous pollutants associated with aircrafts, airports and aviation", rapporto redatto dalla URS Company per la FAA in data 1 giugno 2003

Si può inoltre ricordare, come evidenziato nel rapporto “The approximation of vertically stacked area sources with a single area source in AERMOD” portato a termine nel settembre del 2002 da C. T. Hall del U.S. Department of transportation per conto della FAA, che il binomio EDMS - AERMOD ha prodotto risultati molto fedeli ai dati misurati. Da prove realizzate presso scali aeroportuali statunitensi infatti, si è ottenuto che le concentrazioni calcolate per la dispersione in corrispondenza dei vari punti recettori sono affette da un errore, variabile a seconda della distanza dalle sorgenti emissive, ma comunque non superiore al 10% rispetto al valore reale. Ciò giustifica ulteriormente la scelta di EDMS come programma di modellazione per questo studio.

Capitolo 1

Il modello matematico

1.1 Una visione d'insieme del modello

Con la sigla EDMS ci si riferisce in realtà non ad un unico programma di simulazione ma a due programmi distinti, come già accennato nell'introduzione: un programma di simulazione per la valutazione complessiva su base annuale delle emissioni sullo scalo aeroportuale in oggetto ed un secondo programma mirato alla valutazione della concentrazione, mediata nell'arco temporale minimo di un'ora, di specifici inquinanti (CO , HC , SO_x , NO_x , $PM10$) in un determinato giorno dell'anno. Complessivamente quindi si può rappresentare il modello nel suo insieme come in Figura 1.1.

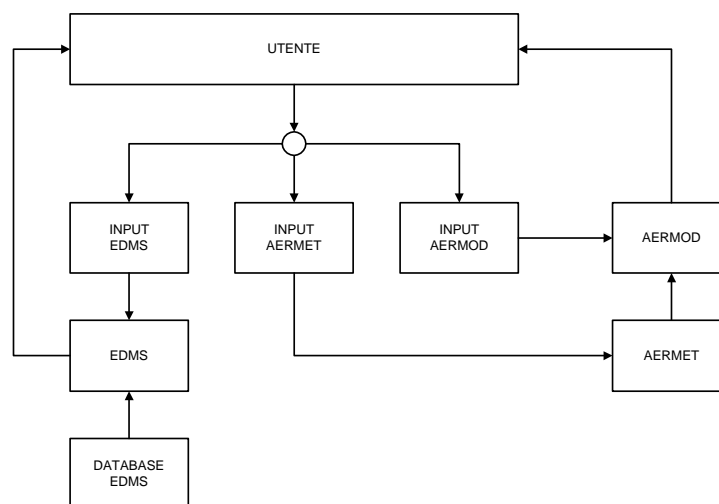


Figura 1.1: Schema generale EDMS - AERMOD

Si noti che AERMET in Figura 1.1 consiste in un preprocessore deputato alla realizzazione di un file di testo in cui i dati meteo da inviare ad AERMOD sono posti in una

forma direttamente utilizzabile dal programma. Per ulteriori informazioni sul ruolo di AERMET si rimanda ai paragrafi seguenti.

Inizialmente per l'utilizzo del modello sarà necessario indicare le caratteristiche generali dell'aeroporto quali le sue coordinate terrestri, l'altitudine sul livello del mare, l'altezza dello strato di rimescolamento e la temperatura media annuale. Successivamente si provvederà alla descrizione delle varie attività svolte individuando le sorgenti di inquinamento atmosferico e definendone i profili operativi orari, settimanali e mensili. Quindi si farà uso di opportune utilities per la caratterizzazione di sorgenti, velivoli e mezzi di trasporto terrestri, non direttamente supportate dal modello. A questo punto sarà possibile ottenere i risultati della simulazione di emissione, vedi Figura 1.2.

In un secondo momento si potranno sfruttare i dati inseriti per avviare una simulazione di dispersione; si renderà tuttavia necessario un loro completamento realizzando una completa digitalizzazione della pianta dell'aerostazione, la quale permetterà l'individuazione delle coordinate delle singole sorgenti inquinanti stazionarie, dei gate, dei parcheggi, delle strade di accesso all'aeroporto, dei percorsi interni ad esso. Sarà così possibile assegnare ad ogni velivolo una runway, una taxiway ed un gate e fissare la posizione dei punti recettori, ovvero i punti in cui si valuterà la concentrazione degli inquinanti. In input ad AERMET, infine, si forniranno gli opportuni dati meteorologici.

AERMOD sarà allora in grado di fornire i risultati di dispersione richiesti, vedi Figura 1.2.

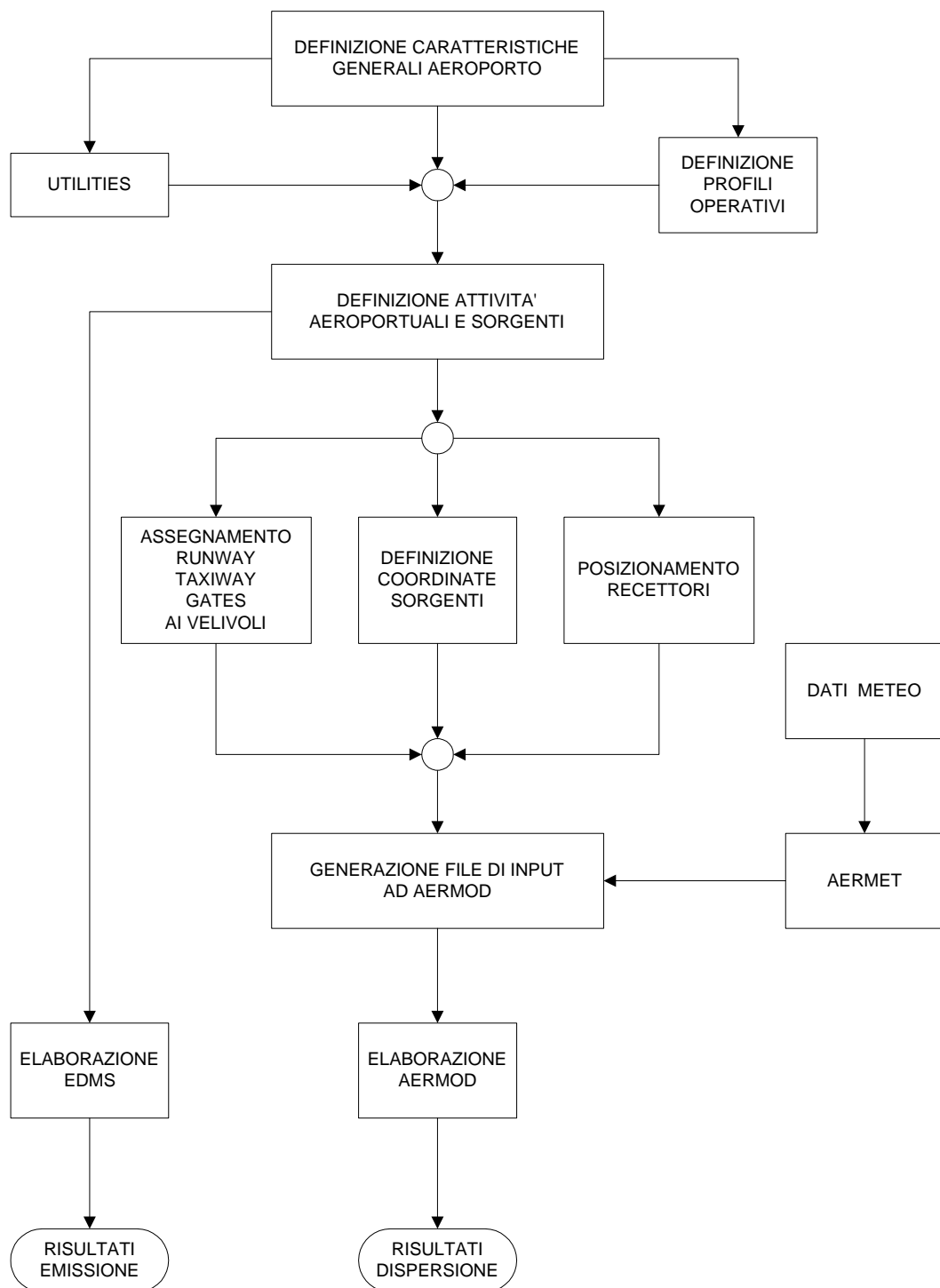


Figura 1.2: Diagramma di flusso EDMS - AERMOD

1.2 La simulazione di emissione

1.2.1 Il traffico aereo

Nella valutazione delle emissioni del traffico aereo EDMS non considera su base annuale l'insieme di tutti i singoli movimenti dei velivoli bensì l'insieme di tutti gli LTO compiuti. Per LTO (Landing and Takeoff cycle) si intende il ciclo completo di movimenti di un aereo su uno scalo, ovvero la somma di quello di decollo e quello di atterraggio ¹. In questo senso si può quindi concludere che il numero di LTO annuali per ciascun aereo sarà dato dalla metà dei movimenti complessivi. Tuttavia l'LTO può essere ulteriormente suddiviso in quattro fasi (termine tecnico: "modes") di fondamentale importanza per il computo delle emissioni:

1. takeoff;
2. climb out;
3. approach;
4. taxi/queue/idle.

Con il termine takeoff o decollo si intende il movimento compiuto dall'aereo dall'istante in cui comincia a spostarsi accelerando sulla pista (runway) a quando giunge all'altezza di 1000 ft. Si può notare che il takeoff è una procedura che in parte si svolge al suolo, in parte in volo.

Per climb out si intende invece una procedura che si svolge completamente in atmosfera durante la quale il velivolo, assistito dalla torre di controllo, compie un percorso la cui proiezione sul suolo terrestre costituisce un tracciato ben definito a priori; si parla in questo caso, seppure impropriamente, della fase di climb out come un percorso a terra del velivolo. In questo modo l'aereo viene guidato sino a raggiungere l'altezza media dello strato di rimescolamento (mixing height) e, trovandosi ormai lontano dall'aeroporto da cui è decollato, può seguire la rotta di crociera. Il climb out è allora terminato.

Approach è la fase di atterraggio del velivolo sulla runway e, come il takeoff, è una fase che in parte si svolge in atmosfera, in parte a terra. Per come viene condotto questo studio si considererà quindi il passaggio dai 3000 ft, considerata altezza di crociera nonchè nel nostro caso altezza media dello strato di rimescolamento, al suolo.

¹Per movimento complessivo di decollo si intende, impropriamente, la somma del movimento a terra dell'aereo sino alla runway, con eventuali code e attese, il decollo propriamente detto sino a 1000 ft e il successivo volo sino ai 3000 ft. Similmente per movimento complessivo di atterraggio si considera il volo dai 3000 ft sino al suolo e il successivo spostamento a terra sino al gate.

Una volta atterrato poi, il velivolo abbandona non appena possibile la runway mediante le apposite uscite e compie un percorso ben preciso sul piazzale dell'aerostazione. Tale percorso può essere diverso per uno stesso tipo di velivolo a seconda del punto in cui deve recarsi o a seconda del traffico. In ogni caso il pilota viene adeguatamente istruito dalla torre di controllo oppure segue un veicolo noto come followme. Il percorso seguito prende il nome di taxi o taxiway. Tutte le possibili taxi sono fisicamente tracciate sul piazzale dell'aerostazione e sono riportate in tutte le piantine dello scalo, quindi la loro individuazione e conseguente digitalizzazione ai fini di questo studio è estremamente precisa.

Si noti infine che il termine taxiway può generare ambiguità, in quanto esso può essere usato anche per indicare le runway di emergenza presenti all'interno degli aeroporti. Si premette pertanto che in questo studio con il termine taxi o taxiway verrà indicato sempre il percorso compiuto a terra da parte dell'aereo mentre le runway ausiliarie verranno nominate come tali o come piste di emergenza.

La fase di taxi rappresenta pertanto il movimento dell'aereo a terra dall'uscita della runway alla sua destinazione finale (gate) più il movimento opposto, ovvero dal gate al punto di decollo. Durante questi spostamenti il velivolo può tuttavia essere soggetto a code (queues) oppure può rimanere fermo al gate, per motivi di sicurezza, traffico o altro con i motori accesi (idle). Di ciò si dovrà tenere conto per il computo delle emissioni complessive.

La figura 1.3 schematizza le quattro fasi dell'LTO.

Per ciascun modello di aereo è definito a priori il tempo necessario per il completamento di ciascuna fase del ciclo LTO; tali tempi in linguaggio tecnico prendono il nome di "aircraft times in mode".

In particolare i times in mode per il takeoff, climb out e approach sono definiti dalle caratteristiche stesse dell'aereo quali l'avionica, il numero dei motori, la spinta sviluppata, il carico massimo al decollo e così via. Essi sono stati quindi accuratamente misurati e resi disponibili dall' ICAO, International Civil Aviation Organization.

Si noti, inoltre, che un medesimo tipo di aereo può alloggiare, a seconda degli allestimenti specifici richiesti dalle varie compagnie di trasporto, un modello o addirittura un tipo di motore diverso. Ad esempio, un velivolo realizzato dall'impresa costruttrice con un certo motore turbofan può subire, se richiesto dalla compagnia acquistante e compatibilmente con la struttura del velivolo, una sostituzione del motore con uno più performante ma sempre turbofan. Può capitare tuttavia, soprattutto con aerei di piccole dimensioni e noi ne vedremo un caso, che il tipo stesso di motore venga cambiato, ovvero che, ad esempio, un motore turboelica venga sostituito da un turbofan.

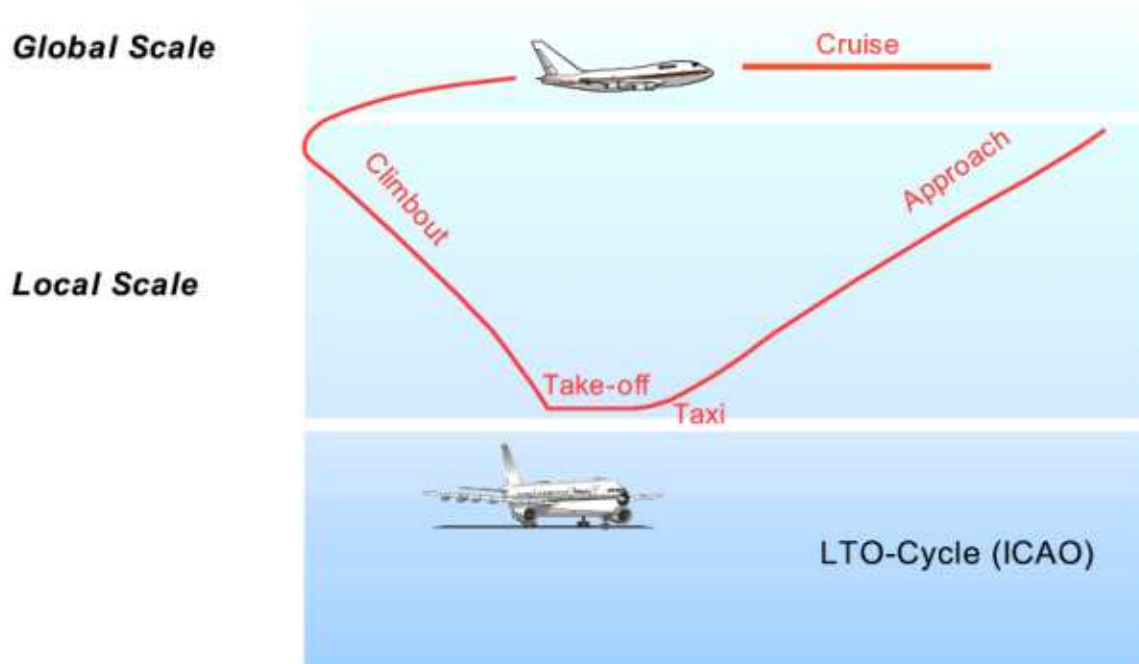


Figura 1.3: Schema di un LTO completo

Tipi e modelli di motore diversi possono portare a times in mode ed emissioni molto diversi tra loro e di ciò si terrà conto nel presente studio.

Il quarto time in mode, taxi/queue/idle, invece non dipende dalle caratteristiche dell'aereo ma da quelle dell'aeroporto.

Per il computo delle emissioni è sufficiente sommare tra loro il tempo necessario affinché la taxi sia percorsa, il tempo medio di permanenza in coda e quello di attesa.

Qualora il tempo di percorrenza della taxi non sia stato direttamente rilevato e archiviato dalle autorità aeroportuali, si può ricordare che sugli scali italiani, per ragioni di sicurezza, la velocità di percorrenza delle taxi è fissato a 30 km/h (negli USA tale velocità è leggermente superiore) e non solo: nessun mezzo a terra che percorre il piazzale può superare tale velocità. Nota la lunghezza della taxi e considerando, con buona approssimazione, i 30 km/h come la velocità media in assenza di code o di attese, si ottiene immediatamente il time in mode specifico per ciascun tipo di aereo, sull'aerostazione in oggetto, per questa fase.

L'importanza dei times in mode risulta evidente dalle considerazioni seguenti.

Nel 1993 l'ICAO ha fissato mediante il protocollo Ap-42 gli standard per la certificazione, obbligatoria, dei propulsori per gli aeromobili ad uso civile e commerciale. In particolare da tale protocollo fissa i seguenti valori standard:

$$HC : D_p/F_\infty = 19.6 \text{ g/kN}$$

$$CO : D_p/F_\infty = 118 \text{ g/kN}$$

$$NO_x : D_p/F_\infty = 40 + 2 * \pi \text{ g/kN} \text{ per motori costruiti prima del 31/12/1999}$$

$$NO_x : D_p/F_\infty = 32 + 1.6 * \pi \text{ g/kN} \text{ per motori costruiti dopo il 31/12/1999}$$

$$Smoke \ number = 83.6 * (F_\infty)^{-0.274} < 50$$

dove:

D_p è la massa in g di inquinante gassoso emesso durante la simulazione di un ciclo LTO

F_∞ è la spinta del motore in kN in condizioni statiche al livello del mare

π è il rapporto di compressione con il motore al massimo della spinta al livello del mare

Smoke number è un termine adimensionale indice delle emissioni di PM10 basato sulla riflettanza di un filtro posto allo scarico del motore rispetto al filtro pulito

I valori delle emissioni di inquinanti quali *CO*, *HC*, *NO_x* dei motori sottoposti a certificazione sono stati così catalogati e pubblicati dall'ICAO.

Da successive prove sperimentali al banco si è poi valutato il consumo di combustibile, per ciascun tipo e modello di motore nelle quattro fasi dell'LTO. Dalla combinazione dei risultati ottenuti si è infine giunti, per tutti i tipi di motore certificati, alla determinazione dei fattori di emissione (Emission Indexes, EI), i quali esprimono la massa in grammi di inquinante prodotto per ogni kg di combustibile consumato.

Si può osservare, per completezza, che ad ogni fase dell'LTO è associata una posizione di manetta dell'aereo, espressa generalmente come percentuale della massima spinta al decollo. In corrispondenza dei quattro modes si hanno così quattro posizioni di manetta predefinite, da cui gli stessi EI dipendono; si veda la Tabella 1.1.

Takeoff	100%
Climb out	85%
Approach	30%
Taxi/idle/queue	7%

Tabella 1.1: Posizione della manetta rispetto alla massima spinta al decollo

L'ICAO pubblica periodicamente tabelle in cui è possibile consultare i valori dei D_p/F_∞ , lo *Smoke number* e gli EI per tutti i motori certificati. Si veda a questo proposito l'Appendice A.

In questo modo sono però disponibili soltanto gli EI per CO , HC ed NO_x mentre mancano quelli per gli SO_x e per il PM_{10} . Lo Smoke number infatti, fornisce soltanto una indicazione qualitativa delle emissioni di particolato e, per quel che riguarda gli ossidi di zolfo, l'ICAO ritiene che l'emissione derivante dalla combustione del JET-A/JP8 (combustibile usato su aerei civili e militari) sia trascurabile.

Dallo studio condotto da G.P. Brasseur "European scientific assesment of the atmospheric effect of aircraft emissions" emerge che il valor medio per ciò che riguarda il biossido di zolfo è $EI_{SO_2} = 0.8 \text{ g/kg}_{fuel}$ mentre considera trascurabili le emissioni di PM_{10} .

Il nostro modello recepisce i risultati di questo studio e fissa per i motori turbofan $EI_{SO_x} = 1.0 \text{ g/kg}_{fuel}$ e per alcuni motori turboelica $EI_{SO_x} = 0.54 \text{ g/kg}_{fuel}$ (fonte: EPA).

Ogni motore è poi caratterizzato da una certa portata di carburante consumata variabile a seconda della fase in cui l'aereo si trova. Tali valori sono tabulati e pubblicati dall'ICAO.

A questo punto il nostro modello dispone di tutte le informazioni necessarie per il calcolo delle emissioni. Si veda l'equazione 1.1.

$$E_{ij} = \sum_k (TIM_{jk} * FF_{jk} * EI_{ijk} * NE_j) \quad (1.1)$$

dove:

E_{ij} è la quantità totale di inquinante i emesso dal velivolo di tipo j in 1 LTO

TIM_{jk} è il time in mode per la fase k (takeoff, climb out, approach o taxi/idle/queue) per il velivolo di tipo j

FF_{jk} è il flusso di carburante per il velivolo di tipo j nella fase k

EI_{ijk} è il fattore di emissione per l'inquinante i nella fase k per il velivolo tipo j

NE_j è il numero di motori che equipaggiano il velivolo j

L'emissione totale di inquinante i su base annuale per tutti i velivoli si calcola così come da equazione 1.2.

$$E_i = \sum_j (E_{ij} * N_j) \quad (1.2)$$

dove:

E_i è l'emissione totale di inquinante i su base annuale

N_j è il numero di LTO all'anno per il velivolo j

Per il calcolo del numero totale di LTO compiuti da un certo tipo di velivolo in un anno si può procedere in due modi distinti, a seconda dei dati resi disponibili dalle autorità aeroportuali. Qualora fosse disponibile il numero totale di movimenti in un anno, NM_j , per il velivolo j , il calcolo è immediato, come da equazione 1.3.

$$N_j = NM_j/2 \quad (1.3)$$

Tuttavia non sempre ciò accade ed in luogo di NM_j può essere disponibile il valore, su base annuale, del picco orario di LTO, P_{24} .

È doveroso precisare che il picco orario non esprime il numero massimo di LTO effettuati da j in un'ora di un ipotetico giorno dell'anno, ma esprime il numero totale massimo di LTO effettuati nell'arco dell'anno in un'ora.

Risulta evidente quindi che è necessario disporre dei profili operativi orari su base annuale per il velivolo j .

Il profilo operativo relativo ad una data fascia oraria e ad un determinato velivolo j rappresenta il numero totale su base annuale di LTO effettuati da j nell'intervallo di tempo considerato, rapportato al valore annuale massimo per fasce orarie di LTO effettuati.

Se quindi identifichiamo le fasce orarie con x e supponiamo che annualmente vengano eseguiti n_x LTO da parte di velivoli j nell'ora x , il profilo orario p_{x_i} per l'ora i -esima sarà espresso dall'equazione 1.4.

$$p_{x_i} = n_{x_i}/\max(n_x) \quad (1.4)$$

Ovviamente, le fasce orarie in cui si avrà il numero massimo di LTO avranno profilo orario unitario.

Il numero di LTO totali in un anno è così fornito semplicemente dall'equazione 1.5.

$$N_j = P_{24} * \sum_i p_{x_i} \quad (1.5)$$

Un esempio può chiarire ulteriormente il procedimento. Supponiamo che un velivolo presenti un picco orario di 100 (LTO/anno)/ora e che i profili orari siano del tipo rappresentato in Tabella 1.2 (per convenzione si ha che con ora 1 si considera la fascia oraria che va dalle 00:00 alle 00:59 del mattino).

ora	profilo	ora	profilo	ora	profilo
1	0	9	0.5	17	0
2	0	10	1	18	0
3	0	11	0.5	19	1
4	0	12	0.5	20	0
5	0	13	0	21	0
6	0	14	0	22	0
7	0	15	0	23	0
8	0.5	16	0	24	0

Tabella 1.2: Profili orari di esempio

Si ha immediatamente che il numero di LTO in un anno sarà dato da:

$$0.5 + 0.5 + 1 + 0.5 + 0.5 + 1 = 4$$

$$4 * 100 = 400 \text{ LTO/anno}$$

Quanto sin qui asserito vale ovviamente fintanto che la mixing height media rimane fissata ai 3000 ft. Qualora tale valore dovesse variare, cambierebbe l'altezza a cui ha fine il climb out e inizio l'approach e quindi varierebbero i times in mode e le corrispondenti emissioni.

Dall'analisi del comportamento dell'aeromobile in volo tuttavia, si può assumere che vi sia una dipendenza lineare tra l'altezza della mixing height media e il time in mode. Si possono così proporre (fonte: EPA-FAA) le seguenti equazioni 1.6 e 1.7.

$$TIM_{new} = TIM_{3000ft} * H/3000 \quad \text{Approach} \quad (1.6)$$

$$TIM_{new} = TIM_{3000ft} * (H - 1000)/2000 \quad \text{Climb out} \quad (1.7)$$

dove:

TIM_{new} è il nuovo time in mode

TIM_{3000ft} è il time in mode basato sull'altezza di 3000 ft

H è la mixing height media in ft

Si noti che le equazioni 1.6 e 1.7 trovano giustificazione nel fatto che l'approach comincia effettivamente alla mixing height media per concludersi al suolo, mentre il climb out comincia ai 1000 ft in cui ha termine il takeoff per concludersi poi alla mixing height media.

1.2.2 APU e GPU

Una volta che l'aereo ha concluso l'atterraggio e si è portato al gate, spegne i motori; da questo momento il fabbisogno di energia elettrica per il funzionamento della strumentazione di bordo, per la circolazione dell'aria condizionata e per ogni altra attività necessaria al corretto funzionamento dell'aeromobile è garantito dalla presenza a bordo di un generatore noto come APU (Auxiliary Power Unit).

Le APU sono motori turbofan del tutto analoghi ai motori stessi del velivolo, consumano il medesimo carburante (JET-A/JP8), ma sono di dimensioni molto più contenute. La potenza prodotta varia, a seconda del modello installato, dagli 80 hp degli esemplari più piccoli (alloggiabili su aerei quali l'MD-80) sino a 400 hp (alloggiabili su Boeing 747 o A330).

Aerei di piccole dimensioni possono tuttavia essere del tutto sprovvisti di APU. In questo caso il loro fabbisogno energetico viene assicurato mediante una GPU, Ground Power Unit. La GPU non è altro che un generatore diesel mobile o fisso messo a disposizione dall'aerostazione. Se fisso esso può essere alloggiato nella parte terminale di un finger, se mobile può essere trasportato, a seconda delle dimensioni, da carrelli elettrici o mezzi a motore diesel.

Sebbene APU e GPU siano strettamente connaturate con il corretto funzionamento dell'aeromobile, le loro emissioni non vengono riferite all'attività del velivolo e quindi non sono trattate come emissioni dovute al traffico aereo, bensì vengono formalmente imputate al gate.

Per il calcolo delle emissioni il presente studio segue quanto indicato nell'Appendice E del rapporto "Air quality procedures for civilian airports and air force bases" ad opera della CSSI Inc. per conto dello statunitense Office of Environment and Energy e dell'FAA.

La quantità di inquinante i emessa dalla APU installata sul velivolo di tipo j (o similmente da una GPU) riferita ad un LTO, E_{ij} , può quindi essere espressa come da equazione 1.8.

$$E_{ij} = T * FF_j * EI_{ij} \quad (1.8)$$

dove:

T è il tempo di funzionamento dell'APU (o GPU) riferito ad un LTO

FF_j è la portata di carburante consumato dalla APU (o GPU) del velivolo j

EI_{ij} è il fattore di emissione dell'inquinante i per l' APU (o GPU) del velivolo j

Analogamente a quanto accade per gli altri motori che equipaggiano gli aeromobili, anche le emissioni delle APU e GPU sono state raccolte e pubblicate e lo stesso si può dire per le portate di combustibile consumato. Questi dati sono resi disponibili nei documenti "Technical data to support FAA's advisory circular on reducing emissions from commercial aviation" e "Compilation of air pollutant emission factors" realizzati dalla FAA e dall'EPA, nonché nel "The engine handbook" ad opera della USAF.

Immediato è allora anche il calcolo delle emissioni totali di inquinante i al gate preso in considerazione, come da equazione 1.9.

$$E_{Ti} = \sum_j (E_{ij} * LTO_j) \quad (1.9)$$

dove:

E_{Ti} è la quantità totale di inquinante i emesso da APU e GPU al gate di riferimento

LTO_j è il numero totale di LTO realizzati dal velivolo j ed imputabili al gate di riferimento

Ovviamente, qualora l'aerostazione fosse dotata di più di un gate e si volessero ottenere le emissioni totali di inquinante i imputabili alle APU e GPU, si dovrebbero sommare tra loro i valori di E_{Ti} calcolati per ciascun gate.

Va infine ricordato che per aerei di dimensioni molto contenute, ovvero velivoli per aviazione civile con un numero di passeggeri pari a qualche unità, generalmente del tutto sprovvisti di APU, può non rendersi necessario neppure l'utilizzo delle GPU. Di ciò si è tenuto conto nel presente studio.

1.2.3 Ground Support Equipment

Una volta arrivato al gate e spenti i motori, l'aereo necessita di essere assistito dal personale di terra. Sono molte e diverse tra loro le operazioni cui può essere sottoposto e vasto è il dispiegamento di mezzi:

- generalmente è necessario rifornire i serbatoi di carburante e per questo vengono inviate una o più autobotti di grandezza diversa a seconda delle dimensioni stesse del velivolo. Talvolta può essere utilizzato anche un hydrant truck, una autobotte in grado di realizzare portate di carburante molto elevate e quindi diminuire i tempi di rifornimento.
- Vengono sempre inviate una o due automobili con tecnici, noti con il termine "motoristi", che hanno il compito di ispezionare la cabina e verificarne il perfetto funzionamento.
- Una o più automobili possono rendersi necessarie per l'invio del personale addetto alla sicurezza.
- Le scalette per permettere la salita e la discesa del personale di bordo e dei passeggeri vengono messe a disposizione dall'aerostazione qualora l'aereo non sia dotato di proprie. Si tratta di mezzi a motore diesel nel caso di aerei di grandi dimensioni (velivoli in grado di trasportare più di un centinaio di passeggeri) oppure di mezzi trascinati a mano per aerei più piccoli. Un caso particolare è costituito dagli aerei al finger in quanto il numero di scalette impiegate si riduce di almeno una unità.
- Per il trasporto dei passeggeri al gate si rende necessario l'utilizzo di autobus, quasi sempre a motore diesel. Anche in questo caso l'utilizzo del finger riduce il numero di mezzi di almeno una unità.
- Per il carico e scarico dei bagagli vengono usati nastri trasportatori e camioncini noti rispettivamente come belt loaders e baggage loaders; si tratta generalmente di mezzi elettrici. I cosiddetti cargo loaders vengono invece utilizzati soltanto con aerei di dimensioni elevate in grado di trasportare più di duecento passeggeri e sono generalmente diesel.
- Si rende spesso necessaria la presenza di mezzi per il rifornimento di alimenti, acqua e vettovaglie (catering e water service). Per aerei di grandi dimensioni si hanno camioncini con mansioni ben distinte tra loro, in altri casi può esserci un unico camioncino.

- Il servizio di svuotamento delle toilettes può essere effettuato regolarmente ad ogni LTO o saltuariamente a seconda delle dimensioni del velivolo.
- Alcuni mezzi noti con il nome di pushback, aircraft tug, aircraft tractor hanno il compito di muovere l'aereo da e verso la posizione di parcheggio.
- Qualora siano necessari si devono annoverare anche i trasportatori di GPU tra i mezzi di assistenza a terra del velivolo.
- Come evidenziato in precedenza, un pilota può essere adeguatamente istruito dalla torre di controllo per gli spostamenti a terra del velivolo o può seguire un followme. Si tratta di automobili diesel o a benzina comunemente presenti sul mercato. Qualora utilizzate devono venire annoverate nel computo dei mezzi di assistenza al gate.

In questo modo non è infrequente che un aereo venga servito, per ciascun LTO, da quattordici o più mezzi a motore.

Da quanto sin qui asserito tuttavia, emerge che a seconda delle dimensioni del velivolo cambia il tipo e il numero di servizi richiesti e di conseguenza, cambia il numero e il tipo di mezzi impiegati.

In questo senso riveste una notevole importanza anche il carattere del volo che deve essere effettuato: aeromobili tra loro identici ma destinati a voli di natura diversa richiedono un'assistenza diversa. Ad esempio, un aereo di linea di medie dimensioni avrà un'assistenza a terra del tutto analoga a quanto abbiamo visto sopra mentre, se il medesimo aereo fosse destinato a voli di aviazione generale (G.A.) quali voli di stato o privati, i servizi a terra potrebbero essere diversi. Si potrebbe pensare infatti ad una riduzione dei mezzi di catering se non addirittura una loro eliminazione, il servizio di sicurezza potrebbe essere aumentato, lo svuotamento delle toilettes potrebbe essere occasionale e così via. Analoghe differenze potrebbero poi essere evidenziate anche tra voli di linea o di G.A. e charter.

Infine si può notare che i servizi offerti sono anche strettamente connaturati con la struttura dell'aerostazione. Basti pensare che in alcuni aeroporti non è necessario ricorrere sempre al pushback per allontanare il velivolo dal gate ma esso è in grado di eseguire una manovra indipendente. In questo modo diventano superflui oltre al pushback anche i tugs o i tractors.

In Figura 1.4 è possibile osservare un Boeing 747 servito da un finger, un belt loader di grandi dimensioni, un cargo loader e alcuni mezzi di trasporto per i tecnici e addetti alla sicurezza.



Figura 1.4: GSE di servizio presso un Boeing 747-200 all'aeroporto di Fiumicino

Nel presente studio, per il computo del GSE, si è tenuto conto sia delle dimensioni degli aerei, sia del carattere del volo eseguito, sia delle caratteristiche specifiche dell'aerostazione.

Per il calcolo delle emissioni si è seguito quanto indicato nell'Appendice F del rapporto "Air quality procedures for civilian airports and air force bases".

In particolare si può procedere decidendo di imputare ogni mezzo del GSE ad un singolo LTO per ciascun tipo di aereo (si intende in questo caso far riferimento anche al carattere del volo) oppure considerare la popolazione complessiva di mezzi disponibili ed effettuare, noti i dati di utilizzo dei mezzi su base annuale, il calcolo complessivo delle emissioni.

Questo secondo metodo, preciso e rapido per il computo delle emissioni su base annuale, suscita qualche perplessità per il successivo calcolo di dispersione; perplessità legata al modo, statistico, con cui il GSE viene ripartito agli LTO delle varie tipologie di aereo.

Si può sin d'ora concludere che il presente studio utilizza il primo metodo noto come LTO-based.

I fattori di emissione per il GSE sono funzione del tipo di combustibile utilizzato, dalla potenza sviluppata dal motore e dalla sua cilindrata, dal fattore di carico del mezzo espresso come percentuale del massimo carico trasportabile. Essi sono espressi general-

mente in grammi di inquinante emesso su potenza sviluppata (in hp) per tempo (ore) di utilizzo, ovvero $g/(hp * h)$.

I fattori di emissione sono raccolti e resi disponibili nel rapporto “Technical data to support FAA’s advisory circular on reducing emissions from commercial aviation” a cura dell’FAA e dell’EPA le cui fonti però sono state il “Regulatory strategies for offhighway equipment” e il “Feasibility of controlling emissions from off-road, heavy-duty construction equipment” redatti dalla Energy and environmental analysis inc.

Il tempo di utilizzo invece è caratteristico di ogni singola aerostazione e quindi è preferibile utilizzare dati specifici on-site piuttosto che i valori offerti dal “Non-road engine and vehicle emission study” dell’EPA.

Allo stesso modo è necessaria una approfondita indagine sui mezzi a disposizione onde identificare per ognuno di essi il combustibile usato, la potenza sviluppata e la cilindrata del motore, il fattore di carico. In questo modo si ha un panorama preciso del GSE disponibile e la valutazione delle emissioni è più aderente al reale.

Qualora alcuni dati non fossero disponibili l’EPA mette a disposizione nei documenti sopra citati parametri standard. A ciò non si è fatto ricorso nel presente studio.

Il calcolo delle emissioni può essere allora condotto come in equazione 1.10.

$$E_{itLTO_j} = HP_t * LF_t * U_{tLTO_j} * EI_{it} \quad (1.10)$$

dove:

E_{itLTO_j} è la quantità di inquinante i emessa, per ciascun LTO del velivolo j ², dal mezzo di tipo t

HP_t è la potenza prodotta dal motore del mezzo di tipo t

LF_t è il fattore di carico del mezzo di tipo t

U_{tLTO_j} è il tempo di utilizzo, per ciascun LTO del velivolo j , del mezzo di tipo t

EI_{it} è il fattore di emissione dell’inquinante i per il mezzo t

Quindi, definito LTO_j il numero di LTO complessivi su base annuale per il velivolo j , le emissioni di inquinante i su base annuale per il velivolo di tipo j date dal mezzo t saranno espresse da E_{it_j} come da equazione 1.11.

²In questa formula e nelle seguenti due velivoli identici tra loro ma con caratteri di volo distinti sono identificati da j diverse.

$$E_{it_j} = E_{it_{LTO_j}} * LTO_j \quad (1.11)$$

Ma allora l'emissione E_i di inquinante i per tutti gli LTO (ovvero su base annuale) di tutti i velivoli e per tutti i mezzi a disposizione saranno subito determinabili come:

$$E_i = \sum_t \sum_j E_{it_j} \quad (1.12)$$

1.2.4 Il traffico veicolare su strada e nei parcheggi

Il traffico veicolare o Ground Access Vehicles, GAV, può essere suddiviso ai fini dell'elaborazione in due categorie:

- traffico veicolare su strada;
- traffico veicolare nei parcheggi.

Il primo è inteso come l'insieme dei mezzi che su base annuale transitano sulle strade di accesso all'aeroporto: sono veicoli pubblici o privati che trasportano non solo i viaggiatori ma anche il personale impiegato presso l'aerostazione.

Il traffico veicolare nei parcheggi invece, può essere inteso come un sottoinsieme del precedente: si tratta dei soli mezzi privati atti al trasporto di dipendenti o viaggiatori, i quali non hanno il permesso di sostare in alcun luogo dell'aerostazione che non sia un parcheggio. Al di fuori di queste aree è infatti consentita la sosta soltanto presso i gate e solo ai mezzi pubblici quali autobus, taxi e veicoli delle forze dell'ordine. Si precisa sin d'ora che, per quel che riguarda questi ultimi, nessun dato è disponibile in Italia, nè per ciò che riguarda il numero nè per ciò che riguarda il tipo dei mezzi impiegati. Il presente studio quindi non ne ha tenuto conto.

Per il calcolo delle emissioni dei GAV il modello sfrutta ancora il metodo dei coefficienti di emissione e prende come riferimento l'Appendice G del rapporto "Air quality procedures for civilian airports and air force bases" senza tuttavia applicarne completamente le direttive.

In tale rapporto infatti le emissioni relative al traffico veicolare su strada vengono suddivise in:

- emissioni dovute alla combustione;
- emissioni dovute all'evaporazione del combustibile.

Le prime sono ovviamente legate alla normale attività dei motori mentre le seconde sono imputabili a diverse cause:

Crankcase: percolamento e successiva evaporazione di combustibile dal basamento del motore imputabili a malfunzionamento o ad incidenti.

Refuelling losses: emissioni di combustibile in atmosfera causate da evaporazione o sversamenti accidentali durante le operazioni di rifornimento³.

Running losses: perdite di combustibile durante la marcia del veicolo dovute alla permeabilità di alcuni componenti del circuito di alimentazione.

Allo stesso modo anche per ciò che riguarda il traffico veicolare nei parcheggi si può parlare di emissioni dovute alla combustione ed emissioni dovute all'evaporazione di combustibile. Queste ultime possono essere classificate come:

Hot soak: perdite di combustibile legate alla permeabilità di alcuni componenti del veicolo che continuano, una volta parcheggiato il mezzo, anche a motore spento. Sono imputabili alle alte temperature che possono essere raggiunte in prossimità del motore. Sono analoghe alle Running losses.

Resting losses: perdite sempre imputabili alla permeabilità dei componenti del veicolo ma legate soprattutto alla temperatura esterna che può variare nell'arco di una giornata e nell'arco delle stagioni. Le parti interne di un veicolo in sosta a motore spento e ormai freddo, possono essere riscaldate dal sole con conseguente aumento della permeabilità al combustibile e dell'evaporazione.

Sia per la valutazione delle emissioni dovute alla combustione sia per quelle evaporative l'EPA ha sviluppato apposite equazioni che sfruttano fattori di emissione rigidamente calcolati secondo le specifiche raccolte nei rapporti "Procedures for emission inventory preparation" a cura dell'EPA stessa e "Calculation methods for criteria air pollutant emission inventories" a cura dell'USAF.

Il nostro modello tuttavia, come già accennato, non segue appieno queste direttive ed in particolare trascura completamente le emissioni evaporative, considerandole estremamente piccole rispetto a quelle dovute alla combustione.

Si può sin d'ora affermare che il presente studio concorda con questa scelta. Si ricorda infatti che tali direttive sono state realizzate dall'EPA alla fine degli anni ottanta (erano già pronte per il 1988), mentre il presente studio si riferisce all'anno 2002. La

³Tali perdite si verificano in realtà alla stazione di servizio e quindi si potrebbe considerare quest'ultima come una sorgente stazionaria di inquinanti; l'EPA tuttavia riferisce le refuelling losses al veicolo e fornisce fattori di emissione per unità di lunghezza percorsa.

tecnologia costruttiva nell'ultimo decennio si è notevolmente evoluta e la sicurezza del mezzo ha sempre avuto un ruolo di primo piano, basti pensare agli sforzi sostenuti per la prevenzione dell'incendio del mezzo anche a seguito di un incidente. Lo sversamento di carburante è così del tutto occasionale ed estremamente contenuto. In questa ottica il percolamento di carburante dal basamento del motore in condizioni normali può ritenersi nullo e così pure la permeabilità di manicotti o altri dispositivi nel circuito di alimentazione del mezzo.

Maggiori perplessità suscita invece il fatto che non siano contemplate le perdite alle stazioni di servizio, refuelling losses, ritenendo che in tali strutture gli sversamenti accidentali siano più frequenti rispetto agli altri casi sin qui esaminati e ritenendo che una certa quantità di combustibile comunque evapori durante il rifornimento. Se tuttavia tali perplessità sono giustificate pensando ai grandi scali internazionali dove il numero di automobili si conta in decine di milioni all'anno e proporzionalmente elevato è il numero di stazioni di servizio, nel caso del presente studio il problema non si pone in quanto nell'area interessata vi è una unica stazione di servizio di piccole dimensioni.

Si conclude pertanto che il contributo alla emissione di idrocarburi da parte della stazione di rifornimento presa in considerazione è trascurabile rispetto alla emissione dovuta alla combustione.

Un caso diverso è costituito dai serbatoi di carburante destinato ai velivoli e alle relative perdite per evaporazione, per le quali si rimanda al paragrafo seguente.

Per ciò che riguarda i coefficienti di emissione degli inquinanti CO , HC , NO_x , il rapporto dell'EPA stabilisce che essi devono essere determinati mediante il modello matematico MOBILE5a, mentre i coefficienti per PM_{10} ed SO_x devono essere calcolati mediante il modello PART5. I dati in input necessari alla elaborazione sono:

- la velocità media con cui i veicoli percorrono il tratto di strada di interesse;
- il Vehicle Fleet Year, ovvero l'anno di riferimento dello studio in corso. L'entrata in vigore di leggi via via più restrittive riguardo alla emissione di sostanze inquinanti in atmosfera e la maggiore attenzione ai consumi di combustibile hanno fatto sì che i veicoli più recenti presentino fattori di emissione decisamente diversi rispetto a quelli di dieci o più anni fa, quando questi modelli matematici cominciarono ad essere sviluppati;
- la temperatura media annuale;
- l'altezza sul livello del mare, ovvero la pressione.

Come risultato si ottengono i coefficienti di emissione espressi come massa di inquinante per unità di lunghezza del percorso e unità di veicolo, veh ; generalmente $g/(veh * m)$.

EDMS evita tuttavia il ricorso diretto a tali modelli offrendo un proprio database in cui sono raccolti i fattori precalcolati. In particolare la Vehicle Fleet, ovvero il mix di veicoli considerati, è determinata statisticamente sulla base delle scelte di mercato dei Paesi occidentali. La frazione di veicoli a metano ad esempio, viene considerata trascurabile rispetto al numero dei veicoli diesel o a benzina per tutti gli anni precedenti al 2003, anno di ultima release del database. Vi sono proiezioni che consentono di applicare il metodo per valutazioni preventive sino all'anno 2020 in cui il numero di tali mezzi diviene via via più rilevante, ma ciò esula dagli scopi del presente studio. Sono sufficienti a questo punto l'anno di riferimento, la temperatura media su base annuale, l'altitudine sul livello del mare e la velocità media di percorrenza del tratto interessato per rintracciare nel database il valore precalcolato.

Un estratto del database relativo ai dati calcolati con il MOBILE5a e il PART5 è disponibile in Appendice B.

La quantità di carburante i emessa su base annuale dal traffico veicolare su strada può quindi essere calcolata in accordo con le direttive dell'EPA secondo l'equazione 1.13.

$$E_{ir} = EI_{isy} * D_r * T_r \quad (1.13)$$

dove:

E_{ir} è la totale quantità di inquinante i emessa dal traffico veicolare nel periodo di interesse (di solito un anno) sul tratto di strada r , caratterizzato da una sua lunghezza e da una certa velocità media s di percorrenza

EI_{isy} è il fattore di emissione dell'inquinante i , riferito all'anno y , calcolato per una specifica velocità media s

D_r è la lunghezza del tratto r percorso dai veicoli, sia in andata che in ritorno, alla velocità media s

T_r è il numero di viaggi percorsi (Trips) sul tratto r nel periodo di riferimento, ovvero il numero di veicoli che percorrono tale tratto nello stesso periodo

Quindi la quantità E_i di inquinante i emesso su tutti i tratti di strada r che portano all'aerostazione può essere immediatamente calcolata come:

$$E_i = \sum_r E_{ir} \quad (1.14)$$

Per il computo delle emissioni nei parcheggi è necessario tenere conto dei diversi movimenti compiuti da parte di ciascun veicolo:

1. corsa del veicolo all'interno del parcheggio dall'ingresso sino al posto macchina libero;
2. assestamento del veicolo all'interno del proprio posto macchina all'inizio della sosta;
3. fase di spegnimento del motore;
4. fase di avvio e riscaldamento del motore;
5. allontanamento del veicolo dal proprio posto macchina al termine della sosta;
6. corsa del veicolo dal proprio posto macchina all'uscita.

Le fasi 2 e 5 si intendono compiute a velocità molto bassa, inferiore ai 4 km/h mentre le 3 e 4 si intendono compiute a veicolo fermo; il modello considera tuttavia che le emissioni per unità di tempo e a parità di veicolo siano uguali in entrambi i casi. I punti 2, 3, 4, 5 vengono quindi identificati globalmente come fase di idle.

Le fasi 1 e 6 invece sono del tutto equiparabili al movimento del veicolo su strada.

EDMS provvede preliminarmente al calcolo, mediante i modelli MOBILE5a e PART5, di due fattori di emissione riferiti rispettivamente alla velocità media s definita all'interno del parcheggio ed alla velocità di 4 km/h (2.5 mi/h): EI_{isy} ed $EI_{i2.5y}$.

Successivamente si procede alla determinazione dei fattori EI_{iy}^{mov} , moving factor, e EI_{iy}^{idle} , idle factor, relativi rispettivamente alle fasi 1 e 6 e alle fasi 2, 3, 4, 5 viste sopra, secondo le equazioni:

$$EI_{iy}^{mov} = EI_{isy} * D \quad (1.15)$$

$$EI_{iy}^{idle} = EI_{i2.5y} * v * t_{idle} \quad (1.16)$$

dove:

D è la distanza percorsa all'interno del parcheggio

t_{idle} è il tempo di idle del veicolo nel parcheggio

v è la velocità di idle espressa nelle opportune unità di misura: 4 km/h oppure 2.5 mi/h

È importante sottolineare che ogni parcheggio sarà caratterizzato, a seconda delle dimensioni e dall'accessibilità dei posti macchina, da una propria distanza percorsa D e da un proprio tempo di idle t_{idle} . I fattori di emissione calcolati si intendono pertanto specifici per un dato parcheggio.

Si può notare inoltre come i fattori di emissione ottenuti siano sempre riferiti all'anno di studio y e siano espressi in massa di inquinante i per unità di veicolo, generalmente g/veh .

Si perviene allora alla definizione di un fattore di emissione complessivo per tutte le fasi svolte all'interno del parcheggio, EI_i^{tot} :

$$EI_i^{tot} = EI_{iy}^{mov} + EI_{iy}^{idle} \quad (1.17)$$

Per il computo delle emissioni di inquinante i su base annuale all'interno del parcheggio di riferimento sarà allora sufficiente moltiplicare il fattore di emissione appena ottenuto per il numero totale di veicoli che hanno usufruito di tale area nell'arco dell'anno, come da equazione 1.18.

$$E_{ik} = EI_i^{tot} * T_{yk} \quad (1.18)$$

dove:

E_{ik} è la quantità di inquinante i prodotta dai veicoli all'interno del parcheggio k su base annuale

T_{yk} è il numero totale di veicoli che su base annuale hanno usufruito del parcheggio k

La quantità E_i di inquinante i emessa dai veicoli che hanno usufruito di tutti i parcheggi disponibili presso l'aerostazione sarà allora data da:

$$E_i = \sum_k E_{ik} \quad (1.19)$$

Si rende ora necessaria una precisazione per il computo di T_r nell'equazione 1.13 e di T_{yk} nell'equazione 1.18.

Le autorità dell'aerostazione possono fornire direttamente il numero complessivo di veicoli che hanno usufruito di un certo percorso o di un certo parcheggio nell'arco di tempo considerato (generalmente annuale) oppure possono fornire il picco orario oppure il picco settimanale o mensile. Si ricordano ora le definizioni dei vari picchi:

Picco orario è il numero massimo di veicoli, conteggiati su base annuale, che hanno parcheggiato o hanno percorso il tratto di strada in esame in una certa fascia oraria.

Picco settimanale è il numero massimo di veicoli, conteggiati su base annuale, che hanno parcheggiato o hanno percorso il tratto di strada in esame in un certo giorno della settimana.

Picco mensile è il numero massimo di veicoli che hanno parcheggiato o hanno percorso il tratto di strada in esame in un certo mese dell'anno.

Similmente a quanto visto a pagina 15 è quindi necessario disporre dei profili orari o settimanali o mensili.

Detto p_{x_i} il profilo, calcolato come da equazione 1.4 dove x_i può rappresentare l'ora o il giorno o il mese i -esimo, e P il relativo picco, il numero T di veicoli che hanno percorso un certo tratto di strada o hanno usufruito di un certo parcheggio è dato da:

$$T = P * \sum_i p_{x_i} \quad (1.20)$$

Si ricorda infine che, mentre nelle equazioni 1.15 e 1.16 la distanza percorsa dai veicoli nei parcheggi e il tempo di idle vengono sempre manualmente inseriti dall'operatore, nell'equazione 1.13 la distanza D_r viene calcolata dal modello una volta note le coordinate del punto iniziale e finale del tratto di strada considerato. La grandezza calcolata è doppia rispetto alla lunghezza del segmento indicato per tenere conto sia dei viaggi di andata che di ritorno.

Si evince pertanto che la digitalizzazione dei tratti di strada interni all'area di studio è necessaria alla simulazione di emissione oltre che alla successiva simulazione di dispersione; la digitalizzazione delle aree di parcheggio si renderà invece indispensabile soltanto in questa seconda fase.

1.2.5 Le sorgenti stazionarie

Con il termine sorgenti stazionarie si intendono tutte le fonti di inquinanti atmosferici presenti all'interno dell'area di studio che non si muovono nello spazio. Esse derivano da attività necessarie al corretto funzionamento dell'aerostazione.

Nel rapporto "Air quality procedures for civilian airports and air force bases" e nel relativo Appendice H tali sorgenti vengono divise in due sottoinsiemi:

- combustion sources, ovvero sorgenti le cui emissioni sono dovute alla combustione di derivati del petrolio;
- non-combustion sources, ovvero sorgenti le cui emissioni sono dovute all'evaporazione di solventi o di combustibili oppure dovute all'azione del vento.

Tra le prime si possono annoverare le seguenti fonti:

- centrali di riscaldamento;
- generatori di emergenza;
- inceneritori;
- strutture per i training fires (incendi di addestramento dei vigili);
- aree di test per i motori.

Tra le seconde si possono ricordare:

- serbatoi di stoccaggio per combustibili;
- aree dedicate alla verniciatura degli aerei;
- aree dedicate al deicing degli aerei;
- aree dedicate alla pulizia degli aerei con solventi;
- cumuli di sale derivanti da attività di desalinazione o altro.

Per ciascuna di queste attività il suddetto rapporto stabilisce le relazioni matematiche, recepite dal modello matematico usato per questo studio, atte alla valutazione delle emissioni.

É doveroso notare tuttavia che presso la stazione aeroportuale oggetto dello studio non sono svolte tutte le attività elencate e quindi si ritiene opportuno descrivere il comportamento del modello matematico relativamente alle sole sorgenti di interesse.

Per una trattazione approfondita sui dati raccolti e sulle scelte effettuate si rimanda al capitolo relativo alla raccolta dei dati.

Centrali di riscaldamento

Al pari di quanto è stato visto nei paragrafi precedenti anche per il computo delle emissioni da parte delle centrali di riscaldamento si sfrutta il metodo dei coefficienti di emissione. Per la sorgente stazionaria k -esima si può concludere che la quantità E_{ik} di inquinante i emessa nell'arco di tempo considerato (generalmente annuale) è data da:

$$E_{ik} = F_{jk} * EI_{ij} \quad (1.21)$$

dove:

F_{jk} è la portata di combustibile j espressa generalmente su base annuale utilizzata presso la sorgente stazionaria k

EI_{ij} è il fattore di emissione dell'inquinante i relativo al combustibile j utilizzato

La portata F_{jk} è specifica per ogni centrale e deve essere nota per poter eseguire il calcolo; essa rappresenta la quantità di combustibile bruciato nell'arco dell'anno ed in generale è facilmente reperibile. Anche in questo caso tuttavia, qualora fosse fornito soltanto il picco di consumo orario, settimanale o mensile la portata di combustibile annuale andrebbe determinata come da equazione 1.20 del paragrafo precedente.

Per quel che riguarda il fattore di emissione EI_{ij} esso è espresso come massa di inquinante emessa per unità di volume o unità di massa di combustibile bruciato. Le unità di misura sono generalmente $kg/1000l$ per combustibili liquidi, $kg/1000m^3$ per combustibili gassosi a $25^\circ C$ e 1 atm e kg/t per combustibili solidi.

Qualora i dati disponibili non fossero sufficienti al calcolo di EI_{ij} per una specifica sorgente il rapporto dell'EPA stabilisce che debbano essere utilizzati i fattori di emissione presenti nella raccolta "Compilation of air pollutant emission factors" realizzata dalla stessa EPA.

I fattori di emissione presenti nella suddetta raccolta sono stati a loro volta calcolati tenendo conto di vari contributi:

- tipo di combustibile;
- contenuto in zolfo del combustibile;
- contenuto di ceneri del combustibile;
- tipo di caldaia utilizzata.

Il fattore di emissione per l'inquinante i è così calcolato come:

$$EI_{ij} = UI_{ij} * FM_{ij} \quad (1.22)$$

dove:

UI_{ij} è un fattore di emissione noto come “uncontrolled emission factor” determinato in base al tipo di caldaia e al tipo di combustibile

FM_{ij} è un coefficiente correttivo diverso da 1 per SO_x e PM_{10} , pari ad 1 per CO , HC ed NO_x

Si evince immediatamente che per CO , HC ed NO_x si ha che $EI_{ij} \equiv UI_{ij}$.

A loro volta UI_{ij} e FM_{ij} sono determinati con metodi statistici da prove sperimentali eseguite su diversi tipi di caldaie e con diversi combustibili.

Qualora la caldaia fosse dotata di dispositivi atti alla riduzione delle emissioni inquinanti è possibile tenerne conto definendo un fattore correttivo, CF , che esprime la percentuale di inquinante trattenuto. Il calcolo dei fattori di emissione allora diviene:

$$EI_{ij} = UI_{ij} * FM_{ij} * (1 - CF/100) \quad (1.23)$$

EDMS evita il ricorso al calcolo dei fattori di emissione offrendo un database interno in cui sono disponibili gli EI_{ij} precalcolati.

Per le due tipologie di caldaia presenti nell'area di interesse si hanno gli E_{ij} riportati in Tabella 1.3 e in Tabella 1.4.

CALDAIE A METANO					
$j = CH_4$					
Potenza (Btu/h)	E_{COj}	E_{HCj}	E_{NO_xj}	E_{SO_xj}	$E_{PM_{10}j}$
< 10^7 utenze domestiche	0.320000	0.127000	1.600000	0.009600	0.048000
< 10^7 utenze commerciali	0.320000	0.127000	1.600000	0.009607	0.048030
> 10^7 utenze industriali	0.560000	0.925000	2.240000	0.009607	0.048030
> 10^8 grandi utenze ind.	0.640000	0.027800	8.800000	0.009607	0.048030

Tabella 1.3: Fattori di emissione E_{ij} in $kg/1000m^3$ per caldaie a metano

CALDAIE A GASOLIO					
<i>j = GO</i>					
Potenza (<i>Btu/h</i>)	E_{COj}	E_{HCj}	E_{NO_xj}	E_{SO_xj}	E_{PM10j}
< 10 ⁷ utenze domestiche	0.600400	0.299200	2.202000	17.240000	0.300200
< 10 ⁷ utenze commerciali	0.600400	0.030020	2.402000	17.240000	0.240200
> 10 ⁷ utenze industriali	0.600400	0.154100	6.605000	19.240000	1.251000
> 10 ⁸ grandi utenze ind.	0.640000	0.120100	8.005000	19.340000	1.251000

Tabella 1.4: Fattori di emissione E_{ij} in *kg/1000l* per caldaie a gasolio (GO)

Serbatoi di stoccaggio per combustibili

Ad ogni LTO è necessario reintegrare la quantità di carburante consumato dai velivoli e quindi, in aeroporti con elevata frequenza di voli, le operazioni di rifornimento sul piazzale sono pressochè continue.

Da ciò la necessità di disporre di serbatoi di combustibile, di dimensioni adeguate al numero di aerei serviti giornalmente, dislocati in apposite aree in prossimità dell'aerostazione.

Il modello matematico utilizzato nel presente studio riconosce le aree adibite allo stoccaggio come sorgenti stazionarie di inquinanti in quanto diverse sono le cause che, a seguito dell'evaporazione del carburante, possono portare all'emissione accidentale di idrocarburi in atmosfera.

Nell'Appendice H al rapporto "Air quality procedures for civilian airports and air force bases" l'EPA identifica alcune di queste cause e ne classifica le conseguenti emissioni:

- standing storage emissions note anche come breathing emissions. Sono dovute ad aumenti della temperatura del combustibile causate generalmente dall'irraggiamento solare sul serbatoio: il combustibile evapora producendo l'innalzamento della pressione interna e provocando l'apertura delle valvole di sfiato.
- working emissions ovvero emissioni dovute alle normali attività di lavoro presso i serbatoi. Possono essere a loro volta suddivise in:
 - displacement emissions: durante le operazioni di rifornimento del serbatoio il livello del liquido aumenta provocando un innalzamento della pressione esercitata dai vapori sulle valvole di sfiato con loro conseguente apertura.
 - air saturation emissions: durante le operazioni di prelievo di carburante una certa quantità di aria viene sempre accidentalmente introdotta nei serbatoi;

essa rapidamente si satura di idrocarburi e si espande provocando un aumento della pressione interna. Le valvole di sfiato quindi si aprono.

Per il calcolo della quantità di idrocarburi emessa nell'arco di tempo considerato è necessario conoscere il coefficiente di emissione EI_{HC} . L'EPA stabilisce i criteri, recepiti da EDMS, per la sua determinazione nel rapporto "Compilation of air pollutant emission factors" e fornisce un relativo modello matematico TANKS.

In particolare per il calcolo di EI_{HC} è necessario conoscere il tipo di serbatoio considerato, il tipo di combustibile e alcuni dati meteorologici tra cui la temperatura e la pressione atmosferica media annuale sul sito. Se poi l'architettura del serbatoio dovesse rivelarsi non-standard e fosse dotata di sistemi per il contenimento delle emissioni in atmosfera, possono essere definiti appositi fattori correttivi.

EDMS fornisce un database con i valori di EI_{HC} precalcolati ma soltanto per serbatoi standard e con copertura fissa.

In alcuni aeroporti possono essere utilizzati serbatoi con copertura flottante in grado di adattarsi sulla superficie del liquido: essa può essere a diretto contatto con l'esterno oppure protetta mediante una struttura fissa. In serbatoi di questo tipo le emissioni accidentali di idrocarburi sono estremamente contenute. EDMS non fornisce in questo caso nessun fattore precalcolato rendendosi necessaria quindi la sua determinazione mediante prove sperimentali e rilevamenti in situ oppure mediante il modello TANKS dell'EPA.

Il fattore di emissione EI_{HC} è generalmente espresso come quantità di idrocarburi emessi per unità di volume di combustibile immagazzinato, generalmente $kg/1000l$ e può essere inteso come somma di due contributi:

$$EI_{HC} = EI_s + EI_w \quad (1.24)$$

EI_s è il fattore di emissione imputabile alle standig storage emissions, EI_w alle working emissions.

La quantità di idrocarburi E_{HC} emessa da tutti i serbatoi k , aventi le medesime caratteristiche e contenenti il medesimo liquido, è quindi esprimibile come:

$$E_{HC} = \sum_k EI_{HC} * Q_k \quad (1.25)$$

dove Q_k è la quantità di combustibile contenuta in ciascun serbatoio k .

Si rimanda all'Appendice C per un estratto dei fattori di emissione precalcolati alle condizioni atmosferiche medie del presente studio.

1.3 La simulazione di dispersione

1.3.1 Concetti di base

L'atmosfera è caratterizzata da significativi gradienti di temperatura lungo la direzione normale alla superficie terrestre: questi gradienti di temperatura permettono la suddivisione dell'atmosfera in zone o strati (layers).

La troposfera è il layer più vicino alla superficie e si estende da 0 a circa 12 km di altezza a seconda della stagione e della latitudine considerata. Si può assumere che in questa zona si verifichi un abbassamento di temperatura, causato dall'allontanamento dalla superficie terrestre riscaldata dal sole, dai 15°C circa al suolo a -60°C circa a 12000 m. A causa dell'intenso scambio di energia termica tra suolo e atmosfera, la troposfera si presenta come un layer relativamente instabile, caratterizzato da variazioni diurne e stagionali di temperatura, copertura nuvolosa e precipitazioni, ovvero tutto ciò che noi identifichiamo con l'espressione tempo meteorologico.

Al di sopra della troposfera sino ad una altitudine di circa 18 km vi è uno strato noto come tropopausa in cui non si risente più del riscaldamento della superficie terrestre e quindi la temperatura si mantiene costante a circa -60°C.

Si possono ricordare, per completezza, anche gli strati via via superiori quali la stratosfera (da 18 a 45 km con un incremento di temperatura da circa -60°C a -2°C dovuto all'assorbimento dei raggi UV da parte dell'ozono), la stratopausa (da circa 45 a 55 km a temperatura costante), la mesosfera (da circa 55 a 80 km con un abbassamento di temperatura fino a -90°C), la mesopausa (da circa 80 a 90 km a temperatura costante) ed infine la termosfera (da circa 90 ad oltre 500 km con temperatura termodinamica delle particelle, estremamente rarefatte, di oltre 1200°C a 500 km). Si veda la Figura 1.5.

Oggetto del presente studio è tuttavia la sola tropopausa, il layer in cui si hanno le attività umane e biologiche. Essa può essere a sua volta suddivisa in due zone: una a diretto contatto con la superficie terrestre, il Planetary Boundary Layer (PBL) o strato limite planetario, la cui altezza è molto variabile nel tempo, e la troposfera libera che si estende al di sopra del PBL sino alla tropopausa. Si osservi la Figura 1.6.

Il moto delle masse d'aria nel PBL risulta fortemente influenzato dalla resistenza dovuta all'attrito con la crosta terrestre, dall'evapotraspirazione, dalle turbolenze meccaniche e termiche, dallo scambio di energia tra le masse d'aria e dall'emissione di sostanze inquinanti. Grazie all'attrito e alla turbolenza presenti nel PBL viene dissipata l'energia presente nell'alta atmosfera dove i venti geostrofici (venti non influenzati da attriti superficiali con la Terra) si muovono con velocità molto elevate, spesso dell'ordine di centinaia di chilometri orari (basti pensare ai jet streams). Se tale dissipazione di energia non avesse luogo, la superficie del pianeta sarebbe costantemente spazzata da violenti uragani.

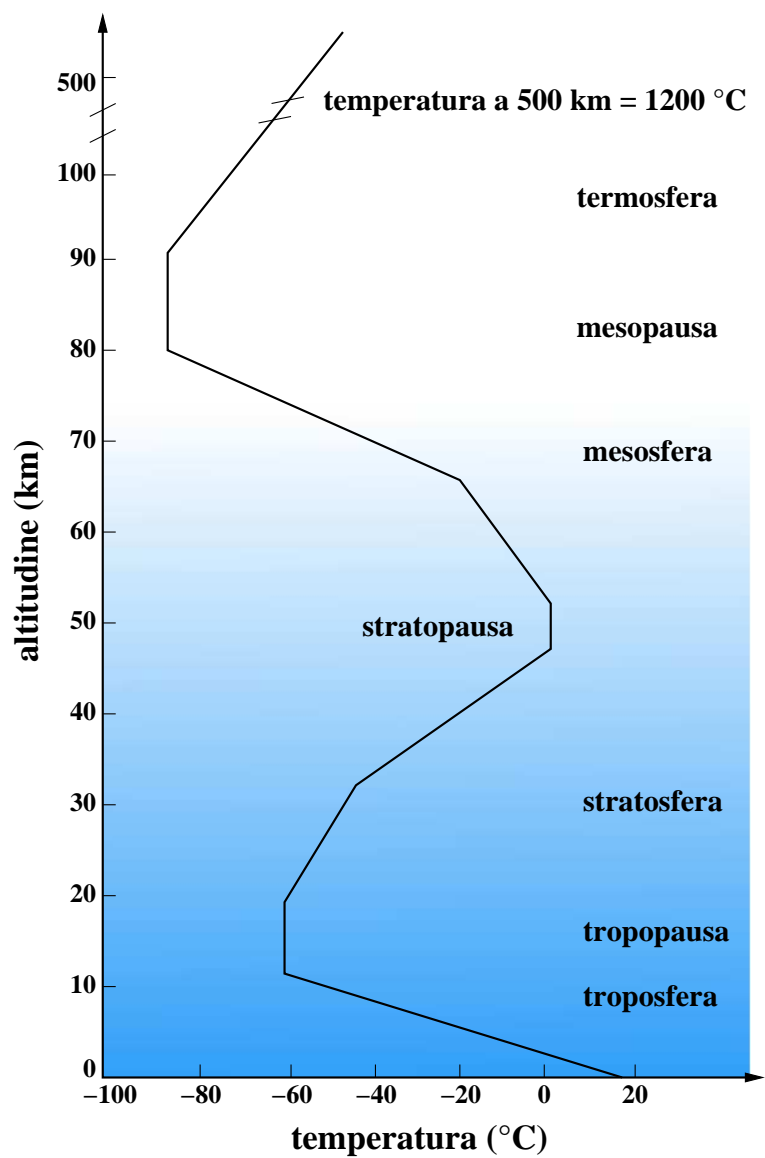


Figura 1.5: Profili di temperatura verticali e zone atmosferiche associate

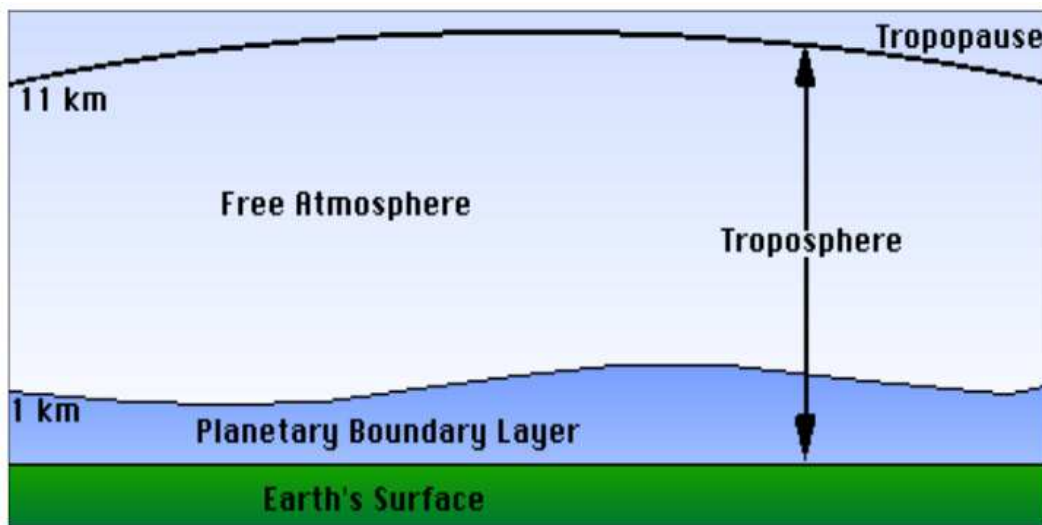


Figura 1.6: Suddivisione della troposfera in PBL e troposfera libera

La troposfera libera presente al di sopra del PBL invece non risente delle forze di attrito sottostanti e appunto per questo è definita libera. Un confronto tra i due strati che costituiscono la troposfera è realizzato in tabella 1.5.

Proprietà	PBL	Troposfera libera
Attrito	Elevato presso la superficie. Dissipazione di energia molto elevata.	Trascurabile. Dissipazione di energia pressochè nulla.
Turbolenza	Continua in tutto lo strato.	Solo in nuvole convettive ed in prossimità di jet streams.
Altezza	Da meno di 100 a oltre 3000 ft. Variazioni diurne molto marcate.	Fino a 12 km a seconda della stagione e della latitudine.
Mixing	Rapido mescolamento sia orizzontale che verticale.	Rapido mescolamento orizzontale e modesta diffusione molecolare.

Tabella 1.5: Confronto tra PBL e troposfera libera

A sua volta il PBL può essere suddiviso in quattro strati:

- strato superficiale o surface layer;
- strato di mescolamento convettivo o mixed layer o Convective Boundary Layer (CBL);
- strato stabile o stable layer o Stable Boundary Layer (SBL);
- Strato residuo o residual layer.

Lo strato superficiale

Si tratta del substrato più prossimo alla superficie terrestre, dove gli sforzi turbolenti possono essere considerati costanti (variano meno del 10% del loro valore medio). L'altezza complessiva di tutto il substrato si presenta come una modesta percentuale dell'altezza del PBL e per questo nel presente studio viene considerato come facente parte, a seconda del profilo termico, del CBL o dell' SBL e non viene quindi trattato separatamente.

Per completezza si può ricordare che all'interno del surface layer può essere identificato il microstrato, ovvero uno strato dello spessore di alcuni centimetri, in cui prevale la viscosità molecolare.

Lo strato di mescolamento (CBL)

Nel periodo in cui si trova al di sopra dell'orizzonte il sole riscalda la superficie terrestre e successivamente quest'ultima scambia calore con l'atmosfera soprastante. L'aria calda quindi si innalza a causa della sua minore densità mentre il raffreddamento radiativo generato dalle nuvole forma masse di aria fredda che tendono a scendere verso il basso. Ne risulta un movimento convettivo che porta a notevoli turbolenze con conseguente forte rimescolamento d'aria.

Sopra il mixing layer è presente uno strato stabile che impedisce alla turbolenza dello strato inferiore di raggiungere il PBL superiore. Tale strato è noto come zona di intrusione, entrainment zone, giacché è qui che l'aria che proviene dalla troposfera libera si introduce all'interno del CBL.

Durante il giorno il CBL può raggiungere altezze pari a qualche chilometro e costituisce l'intero strato del PBL al di sopra dello strato superficiale. Una volta tramontato il sole tuttavia, cessa il riscaldamento della terra facendo così terminare il moto convettivo delle masse d'aria: il CBL di conseguenza scompare rapidamente.

Lo strato stabile (SBL)

A partire dal tardo pomeriggio con il diminuire dell'irraggiamento diminuiscono i moti convettivi dell'atmosfera sino alla loro estinzione dopo il tramonto. La superficie del pianeta si raffredda e raffredda di conseguenza l'aria soprastante: si forma così uno strato limite stabile caratterizzato da venti leggeri ed occasionali turbolenze molto più deboli di quelle che si verificano nel CBL.

Di conseguenza l'altezza del PBL, che in questo caso coincide con l'altezza dell' SBL, decresce notevolmente durante le ore notturne raggiungendo, in caso di forti inversioni termiche, il valore di poche decine di metri.

Il limite superiore dell'SBL in genere non è ben definito, come invece lo è per il CBL, ma tende a confondersi con lo strato residuo.

Lo strato residuo

Dopo il tramonto, con il cessare dei moti convettivi, l'aria al di sopra dell'SBL tende a mantenere inalterati i valori delle variabili di stato raggiunti durante la persistenza del CBL. Si forma quindi uno strato residuo così denominato proprio perchè le sue proprietà sono residue dello strato mescolato. Inoltre, mentre nell'SBL si verifica una marcata inversione termica e si ha un profilo molto stabile, nel residual layer ci si avvicina notevolmente alle condizioni di neutralità⁴.

Lo strato residuo risulta chiuso nella sua parte superiore, ad una altezza pari a quella raggiunta dal CBL, da una cappa di inversione la quale evita intrusioni da parte degli strati d'aria superiori.

Va inoltre notato che lo strato residuo risulta non influenzato direttamente dalla superficie terrestre e quindi non è considerato come uno strato limite.

In Figura 1.7 viene schematicamente riassunta la struttura del PBL.

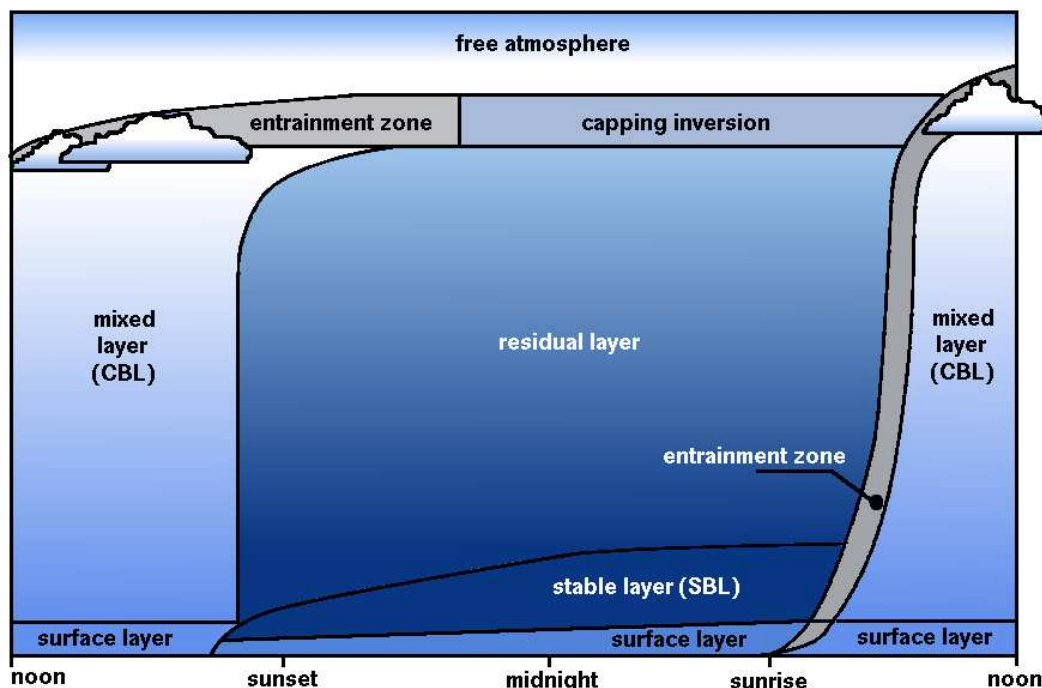


Figura 1.7: Struttura del PBL

Si sottolinea infine che con il termine altezza di mescolamento o mixing height si

⁴Sul concetto di neutralità atmosferica si ritornerà più diffusamente nei prossimi paragrafi ed in particolare al Paragrafo 1.3.3.

intende l'altezza del PBL: essa coincide con l'altezza del CBL durante il giorno e con l'altezza dell'SBL durante la notte, non considerando in quest'ultimo caso lo strato residuo.

1.3.2 Lo scambio di dati tra AERMOD e i preprocessori

Per meglio comprendere il funzionamento di AERMOD nel seguente paragrafo si illustrano le relazioni che intercorrono tra il programma principale e i suoi preprocessori.

AERMOD è un modello matematico gaussiano di dispersione per la determinazione della concentrazione di inquinanti in atmosfera. Tali inquinanti sono ritenuti inerti, ovvero non reagiscono chimicamente nè tra loro nè con i costituenti dell'atmosfera, non sono soggetti a decomposizione fotochimica e non interagiscono chimicamente con l'ambiente.

In generale i modelli gaussiani di dispersione si basano sull'assunzione che l'apertura del pennacchio e la conseguente dispersione di inquinanti siano un prodotto della diffusione molecolare e, di conseguenza, le concentrazioni di inquinanti in direzione ortogonale e parallela al suolo sono distribuite secondo una classica curva a campana. Questi modelli utilizzano i valori delle deviazioni standard delle curve gaussiane per rappresentare le caratteristiche di dispersione di un pennacchio ad una certa distanza sottovento dalla sorgente emissiva; ovviamente i valori delle deviazioni standard e di conseguenza la forma stessa del pennacchio variano a seconda delle condizioni meteorologiche.

Questi modelli fissano una terna cartesiana in cui l'asse x è parallelo alla direzione sottovento del pennacchio, l'asse y è ortogonale al precedente e parallelo al terreno, l'asse z è ortogonale ai precedenti e diretto verso l'alto; la regola della mano destra identifica immediatamente il verso di y . AERMOD utilizza una terna cartesiana di questo tipo.

Sovrapponendo le due distribuzioni gaussiane si ottiene una distribuzione doppiogaussiana e, immaginando di valutarla punto per punto lungo l'asse x , si ottiene lo spazio racchiuso all'interno del pennacchio. Ciò è rappresentato in Figura 1.8.

A mano a mano che il pennacchio si muove sottovento la sua estremità inferiore si avvicina al suolo sino ad entrarne in contatto. I modelli gaussiani assumono che non vi sia nè assorbimento nè deposizione di inquinanti al suolo e quindi ipotizzano che il pennacchio venga riflesso verso l'alto con conseguente aumento della concentrazione di inquinanti in prossimità della superficie terrestre.

Molti modelli sfruttano la seguente espressione per la determinazione della concentrazione di inquinanti:

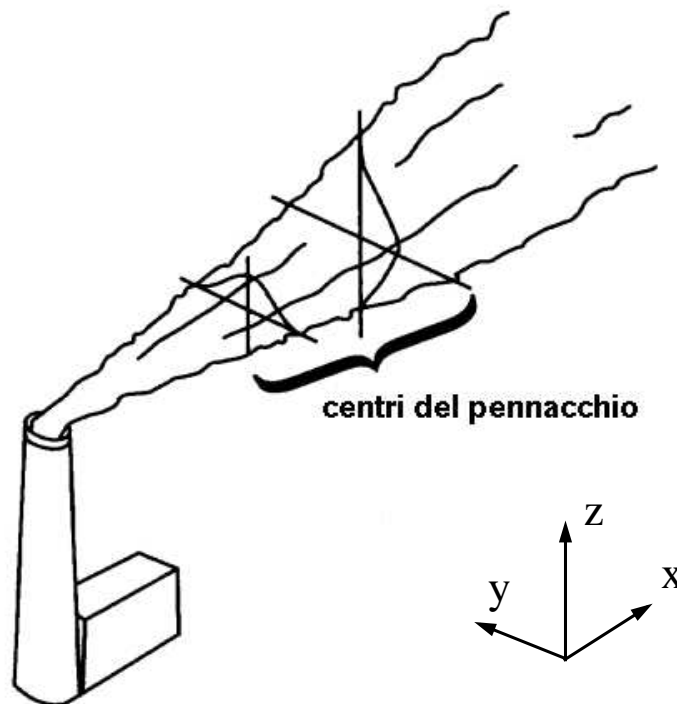


Figura 1.8: Apertura del pennacchio secondo la teoria gaussiana associata al movimento delle particelle sottovento

$$C(x, y, z, H) = \frac{Q}{2\pi\sigma_y\sigma_z u} * \exp \left[-\frac{1}{2} \left(\frac{y}{\sigma_y} \right)^2 \right] * \left\{ \exp \left[-\frac{1}{2} \left(\frac{z-H}{\sigma_z} \right)^2 \right] + \exp \left[-\frac{1}{2} \left(\frac{z+H}{\sigma_z} \right)^2 \right] \right\} \quad (1.26)$$

dove:

C è la concentrazione dell'inquinante al punto recettore, in genere espressa come $\mu g/m^3$

H è l'altezza di emissione, in genere espressa in m

Q è la portata di inquinanti emessa, in genere espressa in $\mu g/s$

u è la velocità del vento, in genere espressa in m/s

x, y, z indicano, al pedice, le coordinate del recettore, in genere espresse in m

σ_y è la deviazione standard della distribuzione di concentrazione del pennacchio sul piano orizzontale (dove giace l'asse y), in genere espressa in m

σ_z è la deviazione standard della distribuzione di concentrazione del pennacchio sul piano verticale (dove giace l'asse z), in genere espressa in m

Vedremo nei prossimi paragrafi che in realtà AERMOD non utilizza pedissequamente questa formulazione ma si avvale di espressioni, derivate da questa per mezzo di opportune rielaborazioni, le quali hanno dimostrato una maggiore aderenza al reale.

In particolare nello strato limite stabile (SBL) AERMOD considera gaussiana la distribuzione delle concentrazioni sia sul piano verticale sia sul piano orizzontale mentre nello strato limite convettivo (CBL) soltanto la distribuzione orizzontale è considerata gaussiana, quella verticale è considerata doppio-gaussiana. In quest'ultimo caso AERMOD dimostra di aver recepito i risultati degli studi di Deardoff e Briggs del 1981 e di Willis del 1993.

Inoltre, AERMOD permette di considerare anche il lofting del pennacchio: tiene infatti conto della possibilità che una sorgente prossima alla sommità del CBL emetta inquinanti più caldi rispetto all'atmosfera e quindi soggetti a buoyancy (o "galleggiamento") e ne descrive il successivo rientro per trascinarsi all'interno dei moti convettivi. Qualora poi una sorgente emetta direttamente nello strato stabile al di sopra del CBL, AERMOD con opportuni algoritmi permette il rientro degli inquinanti nello strato convettivo stabilendo se e quando ciò è consentito.

Il nostro modello si avvale come già accennato al Paragrafo 1.1 di preprocessori per l'elaborazione iniziale dei dati inseriti: essi prendono il nome di AERMET e AERMAP.

AERMET è deputato alla rielaborazione dei dati meteorologici richiesti in input: si tratta di dati di superficie e dati relativi agli strati superiori di atmosfera in genere disponibili in due file distinti.

I dati di superficie richiesti sono:

- codice NWS⁵ della stazione meteorologica di rilevamento (utile alla identificazione delle coordinate della stazione meteorologica);
- data e ora delle osservazioni;
- ceiling height, ovvero l'altezza a cui si trova il primo strato di nubi che si incontra a partire dalla superficie terrestre;
- direzione del vento all'altezza standard di rilevamento (10 m);
- velocità del vento all'altezza standard di rilevamento (10 m);
- temperatura ambiente a bulbo secco all'altezza standard di rilevamento (10 m);

⁵National Weather Service: agenzia per l'osservazione meteorologica statunitense

- copertura nuvolosa opaca e totale.

I dati relativi agli strati d'aria superiore richiesti sono:

- codice NOAA⁶ o altro codice indentificativo della stazione meteorologica di rilevamento (è comunque un dato di scarsa utilità);
- coordinate della stazione di rilevamento;
- altezza di rilevamento;
- pressione all'altezza di rilevamento (inutilizzata nel nostro caso);
- temperatura all'altezza di rilevamento;
- direzione del vento all'altezza di rilevamento;
- velocità del vento all'altezza di rilevamento.

Dai database di EDMS successivamente AERMET ricava dati relativi all'albedo e al rapporto di Bowen mentre viene richiesto un inserimento manuale da parte dell'operatore per ciò che riguarda la rugosità del terreno.

Il preprocessore non si limita a fornire questi dati in un formato direttamente accessibile al programma principale ma esegue anche una prima rielaborazione. Con i dati raccolti AERMET è infatti in grado di calcolare alcuni parametri che caratterizzano il PBL:

- la velocità di attrito o friction velocity, u_* ;
- la lunghezza di Monin-Obukhov, L ;
- la scala di velocità convettiva o convective velocity scale, w_* ;
- la scala di temperatura, θ_* ;
- la mixing height, z_i ;
- il flusso di calore superficiale, H .

Il significato di questi termini sarà chiarito e contestualizzato nei prossimi paragrafi.

Una volta disponibili i dati meteo vengono inviati ad AERMOD il quale sfrutta un sottoprogramma interno noto come INTERFACE per una loro ulteriore rielaborazione. INTERFACE calcola allora:

⁶National Oceanographic and Atmospheric Administration

- i profili verticali della velocità del vento u ;
- i profili verticali della direzione del vento δ ;
- le deviazioni standard laterali e verticali di velocità delle masse d'aria note in INTERFACE rispettivamente come σ_v e σ_w ;
- i gradienti di temperatura potenziale, $d\theta/dz$;
- la temperatura potenziale, θ ;
- la scala lagrangiana orizzontale dei tempi, T_{Ly} .

A questo punto AERMOD dispone di tutti i dati meteorologici necessari al calcolo delle concentrazioni.

AERMAP è il secondo preprocessore che costituisce la suite di calcolo di AERMOD ed è dedicato alla elaborazione dei dati relativi al terreno in cui si trovano i recettori. In particolare AERMAP per ogni recettore calcola la terrain-influence height, h_c , ovvero una altezza indice dell'influenza del terreno nella dispersione di inquinanti. Successivamente questo preprocessore fornisce ad AERMOD le coordinate (x_r, y_r) di ogni recettore e la sua altezza sul livello del mare z_r .

AERMAP tuttavia non è utilizzato direttamente in questo studio in quanto come vedremo parte delle sue funzionalità sono supplite da EDMS. In particolare però, se EDMS da un lato è effettivamente in grado di passare ad AERMOD i dati relativi alle griglie di recettori definite nell'area di studio, dall'altro non è in grado di eseguire il calcolo di h_c . Ciò trova giustificazione nel fatto che EDMS è realizzato specificamente per realtà aeroportuali mentre AERMOD può essere utilizzato anche per altri scopi: limitando quindi lo studio alle sole aree aeroportuali è difficile pensare alla possibilità che vi siano, al loro interno, colline, montagne o più in generale rilievi così consistenti da richiedere l'uso di AERMAP. Vedremo che nel nostro caso l'utilizzo di tale preprocessore sarebbe del tutto inutile.

Un utilizzo di AERMAP in combinazione con EDMS è comunque possibile procedendo a modifiche manuali dei file di scambio di dati.

Una volta ottenuti i dati meteorologici e i dati relativi ai recettori ed ai gate, AERMOD può procedere al calcolo delle concentrazioni. La figura 1.9 fornisce un quadro riassuntivo del funzionamento del modello.

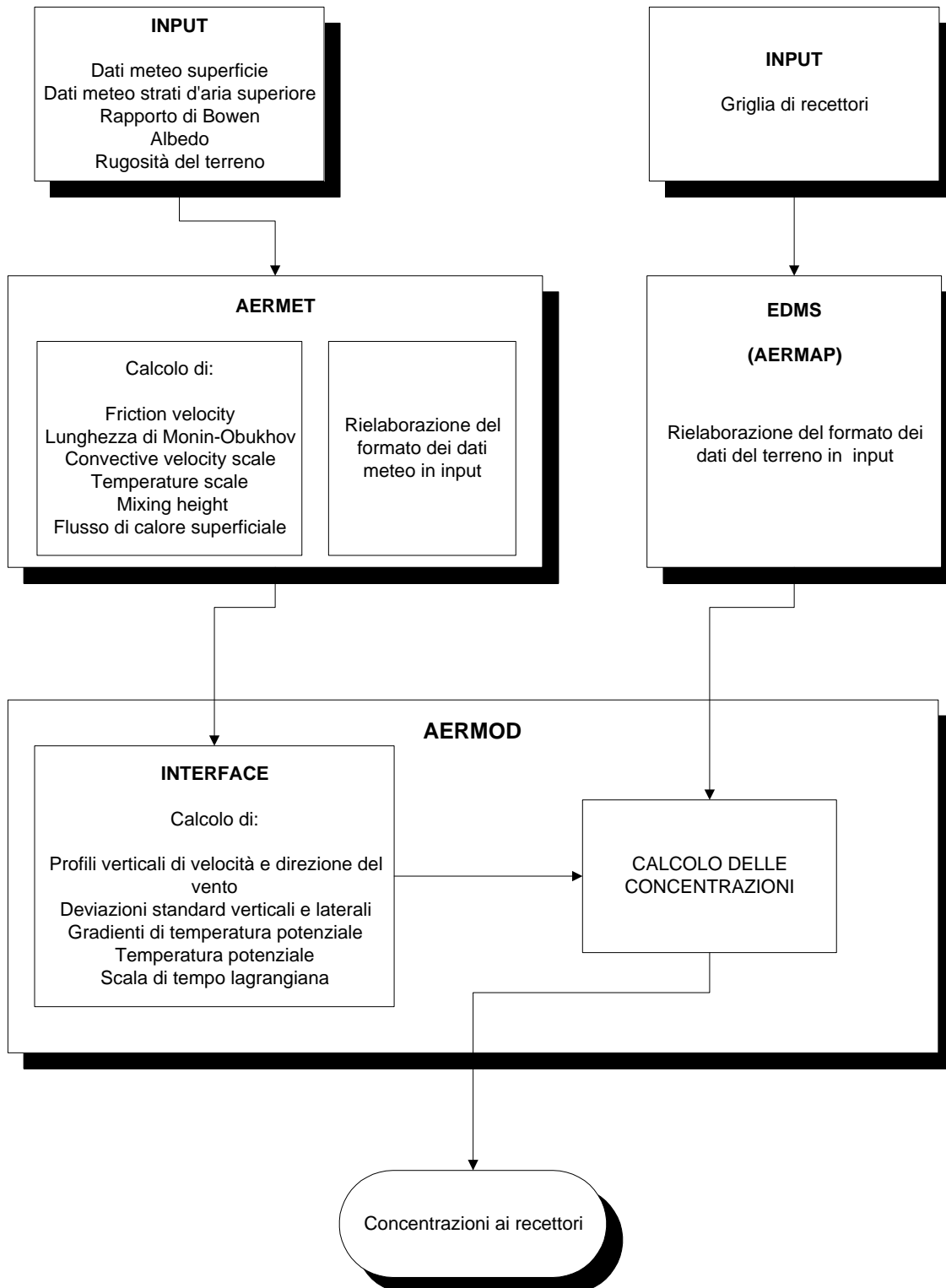


Figura 1.9: Relazioni intercorrenti tra AERMOD e i suoi preprocessori

1.3.3 AERMET e il calcolo dei parametri del CBL

Il flusso di calore sensibile nel CBL

A seguito dell'irraggiamento solare durante le ore diurne le masse d'aria a contatto con la superficie terrestre si riscaldano generando i moti convettivi di cui si è detto al Paragrafo 1.3.1. Si viene a formare quindi il CBL.

Il flusso di calore sensibile scambiato tra la terra e l'atmosfera viene stimato da AERMET secondo l'equazione 1.27.

$$H = \frac{0.9 * R_n}{1 + \frac{1}{B_0}} \quad (1.27)$$

dove:

R_n è la radiazione netta

B_0 è il rapporto di Bowen

Per radiazione netta, R_n , si intende la totale quantità di energia elettromagnetica per unità di tempo e di superficie di origine solare che non abbandona la Terra e non viene quindi dispersa dal pianeta verso lo spazio.

Il rapporto di Bowen, B_0 , invece rappresenta il rapporto tra il calore sensibile e il calore latente di evaporazione per la porzione di superficie terrestre che stiamo considerando.

L'equazione 1.27 risulta quindi di immediata interpretazione se si considera che AERMET assume che il 90% della radiazione netta è assorbito dall'atmosfera e il rimanente 10% è trattenuto dal terreno.

B_0 viene ricavato dal database del NWS di EDMS mentre R_n necessita di essere calcolato.

Per il calcolo della radiazione netta il modello si avvale dell'espressione semiempirica di Holtslag e Van Ulden:

$$R_n = \frac{[1 - r\{\phi\}] * R + c_1 * T_{ref}^6 - \sigma_{SB} * T_{ref}^4 + c_2 * n}{1 + c_3} \quad (1.28)$$

dove:

$r\{\phi\}$ è l'albedo

R è la radiazione solare, espressa in W/m^2 , che tiene conto della copertura nuvolosa

T_{ref} è la temperatura a bulbo secco dell'atmosfera all'altezza di riferimento, in genere 10 m

σ_{SB} è la costante di Stephan-Boltzman ($5.67 * 10^{-8} Wm^{-2}K^{-4}$)

n è la copertura nuvolosa opaca espressa come frazione dell'unità (0.0 – 1.0)

$c_1 * T_{ref}^6$ è un termine correttivo dipendente dalla temperatura dove c_1 è pari a $5.31 * 10^{-13} Wm^{-2}K^{-6}$

$c_2 * n$ è un termine correttivo dipendente dalla copertura nuvolosa opaca dove c_2 è pari a $60 W/m^2$

c_3 è un termine correttivo pari a 0.12

Si nota immediatamente che l'equazione 1.28 non è altro che una rielaborazione empirica del bilancio energetico:

$$R_n = [1 - r(\phi)] * R - \sigma_{SB} * T_{ref}^4 \quad (1.29)$$

dove il primo termine a secondo membro tiene conto dell'albedo planetaria sul valore di R e il secondo tiene conto della perdita di energia dovuta ad irraggiamento dell'atmosfera verso lo spazio.

Si ricorda che in generale il termine albedo esprime il rapporto tra l'energia elettromagnetica riflessa e l'energia elettromagnetica totale ricevuta da una superficie. Nel nostro caso essa esprime quindi il rapporto tra l'energia solare riflessa dalla Terra e dalla sua atmosfera e la totale energia ricevuta.

AERMET esegue il calcolo di R mediante l'equazione empirica di Kasten e Czeplak:

$$R = R_0 * (1 - 0.75 * n^{3.4}) \quad (1.30)$$

Tale espressione tiene conto del fatto che la copertura nuvolosa opaca impedisce alle radiazioni elettromagnetiche di giungere sul pianeta. R_0 esprime la radiazione solare in caso di cielo perfettamente chiaro e quindi privo di copertura opaca ($n = 0$).

R_0 viene determinato a sua volta mediante l'espressione empirica di Collier e Rockwood:

$$R_0 = 990 * \sin\phi - 30 \quad (1.31)$$

dove ϕ è l'angolo di elevazione solare sopra l'orizzonte. I calcoli di concentrazione determinati mediante AERMOD sono mediati nell'arco temporale minimo di un'ora e quindi il valore stesso di ϕ deve essere mediato:

$$\phi = \frac{\phi(t_p) + \phi(t)}{2} \quad (1.32)$$

dove $\phi(t_p)$ rappresenta il valore di ϕ all'ora precedente t_p e $\phi(t)$ rappresenta il valore di ϕ all'ora attuale t .

Il valore dell'albedo $r(\phi)$ viene determinato come funzione dell'albedo per $\phi = 90^\circ$:

$$r(\phi) = r' + (1 - r') * \exp(a * \phi + b) \quad (1.33a)$$

$$a = -0.1 \quad (1.33b)$$

$$b = -0.5 * (1 - r')^2 \quad (1.33c)$$

$$r' = r(90^\circ) \quad (1.33d)$$

Il valore di r' è ricavato dal database del NWS di EDMS.

Si può infine notare che l'equazione 1.31 per valori di $\phi < 1.736^\circ$ fornisce valori di R_0 negativi e quindi privi di significato fisico.

Per evitare questo problema AERMET non utilizza l'equazione 1.31 per valori di ϕ inferiori a 10° ma realizza una linearizzazione tra il valore di $R_0 = 0 \text{ W/m}^2$ per $\phi = 0^\circ$ ed $R_0 = 141.91 \text{ W/m}^2$ per $\phi = 10^\circ$. Ovvero:

$$R_0 = 14.191 * \phi \quad (1.34)$$

La friction velocity e la lunghezza di Monin-Obukhov nel CBL

La friction velocity u_* è una grandezza di scala che fornisce indicazioni sull'entità della turbolenza generata da soli fattori meccanici vicino alla superficie. In particolare in questo senso riveste un ruolo fondamentale il gradiente della velocità del vento in direzione normale al suolo.

La friction velocity viene calcolata mediante l'espressione di Panofsky e Dutton:

$$u_* = \frac{k * u_{ref}}{\ln\left(\frac{z_{ref}}{z_0}\right) - \Psi_m\left(\frac{z_{ref}}{L}\right) + \Psi_m\left(\frac{z_0}{L}\right)} \quad (1.35)$$

dove:

k è la costante di Von Karman ($k = 0.4$)

u_{ref} è la velocità del vento all'altezza di riferimento

z_{ref} è l'altezza di riferimento a cui è misurato il vento (in genere 10 m)

z_0 è la rugosità del terreno

L è la lunghezza di Monin-Obukhov

$\Psi_m\left(\frac{z_{ref}}{L}\right)$ e $\Psi_m\left(\frac{z_0}{L}\right)$ sono due funzioni che vengono espresse come:

$$\Psi_m\left(\frac{z_{ref}}{L}\right) = 2 * \ln\left(\frac{1 + \mu}{2}\right) + \ln\left(\frac{1 + \mu^2}{2}\right) - 2 * \tan^{-1} \mu + \frac{\pi}{2} \quad (1.36a)$$

$$\Psi_m\left(\frac{z_0}{L}\right) = 2 * \ln\left(\frac{1 + \mu_0}{2}\right) + \ln\left(\frac{1 + \mu_0^2}{2}\right) - 2 * \tan^{-1} \mu_0 + \frac{\pi}{2} \quad (1.36b)$$

$$\mu = \left(1 - 16 * \frac{z_{ref}}{L}\right)^{\frac{1}{4}} \quad (1.36c)$$

$$\mu_0 = \left(1 - 16 * \frac{z_0}{L}\right)^{\frac{1}{4}} \quad (1.36d)$$

Osservando le equazioni 1.35 e 1.36 si può notare che u_* è funzione della lunghezza di Monin-Obukhov.

Quest'ultima è un parametro di scala definito come l'altezza alla quale il numero di Richardson assume valore unitario. Il numero di Richardson, Ri , esprime a sua volta il rapporto tra la spinta di Archimede (o buoyancy) cui è soggetta la particella di aria (o, più precisamente, nel nostro caso, la particella del pennacchio) che stiamo considerando e le forze inerziali. Con quest'ultimo termine si intendono identificare le forze generate dagli sforzi di taglio (shear) del vento:

$$Ri = \frac{F_{buoyancy}}{F_{inerziale}} = -\frac{g * k * H * z}{\rho * C_p * T_{ref} * u_*^3} \quad (1.37)$$

Si ha in particolare che per $Ri \gg 1$ la convezione è naturale, per $Ri \ll 1$ la convezione è forzata.

Dall'equazione 1.37 si ricava immediatamente l'espressione della lunghezza di Monin-Obukhov, L , dalla sua stessa definizione:

$$L = -\frac{\rho * C_p * T_{ref} * u_*^3}{g * k * H} \quad (1.38)$$

dove:

g è l'accelerazione di gravità

C_p è il calore specifico dell'aria a pressione costante riferito all'unità di massa

ρ è la densità dell'aria⁷

H è il flusso di calore sensibile calcolato precedentemente

All'altezza L le forze inerziali a cui è soggetta la particella e la buoyancy si eguagliano.

Si può notare che u_* ed L sono tra loro interdipendenti e quindi risulta impossibile un calcolo immediato di entrambi. AERMET genera pertanto un ciclo.

Inizialmente si assumono condizioni di neutralità atmosferica: in queste condizioni si registra, a partire dalla superficie terrestre, una moderata diminuzione della temperatura con l'altezza e quindi il comportamento di una particella d'aria presa come riferimento risulta essere molto prossimo a quello perfettamente adiabatico.

La neutralità atmosferica si verifica in presenza di:

⁷Ai fini del presente studio si è assunto che il prodotto $\rho * C_p$ sia costante e pari a $1.2 \text{ kJm}^{-3}\text{K}^{-1}$.

- forte copertura nuvolosa che impedisce un efficace riscaldamento della superficie terrestre e al tempo stesso limita la dispersione di energia elettromagnetica nello spazio oltre l'atmosfera;
- forte vento che rimescola efficacemente l'atmosfera a contatto con la superficie terrestre;
- condizioni di transizione in prossimità dell'alba o del tramonto in cui si verificano variazioni della stabilità atmosferica.

In condizioni di neutralità si può assumere che la spinta di Archimede sia piuttosto moderata rispetto alle forze generate dai wind shears e quindi si può ritenere che Ri raggiunga il valore unitario ad altezze molto elevate. Ne consegue che $L \gg z_{ref}$ ed $L \gg z_0$ ed in definitiva $\mu \rightarrow 1$ e $\mu_0 \rightarrow 1$. Ricordando ora le espressioni 1.36 si conclude che in condizioni di neutralità $\Psi_m \left(\frac{z_{ref}}{L} \right) = 0$ e $\Psi_m \left(\frac{z_0}{L} \right) = 0$.

L'equazione 1.35 si riduce a:

$$u_* = \frac{k * u_{ref}}{\ln \left(\frac{z_{ref}}{z_0} \right)} \quad (1.39)$$

per la quale un calcolo immediato è possibile. Il valore di u_* ottenuto viene allora utilizzato per il calcolo di L secondo l'espressione 1.38. Il valore di L a sua volta è utilizzato per calcolare nuovamente u_* . Il ciclo ha termine quando due valori consecutivi di u_* e di L differiscono tra loro di meno dell'1%.

La mixing height convettiva

Il calcolo dell'altezza dello strato di mescolamento dovuta a moti convettivi all'interno del CBL, mixing height convettiva, viene realizzato mediante l'espressione semiempirica di Weil e Brower:

$$z_{ic} * \Theta(z_{ic}) - \int_0^{z_{ic}} \Theta(z) dz = (1 + 2 * A) * \int_0^t \frac{H(t')}{\rho * C_p} dt' \quad (1.40)$$

dove:

Θ è la temperatura potenziale

A è un coefficiente correttivo introdotto da Deardorff, $A = 0.2$

z_{ic} è la mixing height convettiva

t è una certa ora diurna conteggiata a partire dall'alba

La temperatura potenziale Θ è definita come la temperatura che assumerebbe una particella d'aria presa come riferimento se, con un processo adiabatico, fosse portata dallo stato iniziale caratterizzato da una certa temperatura T_i e pressione p_i alla pressione di 1000 *mbar*. Si ha quindi che per la definizione stessa Θ può essere espressa come:

$$\Theta = T_i * \left(\frac{1000}{p_i} \right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} \quad (1.41)$$

dove p_i si intende espressa in *mbar* e T_i e, di conseguenza, Θ in Kelvin. γ è il rapporto tra il calore specifico a pressione e a volume costante, $\gamma = C_p/C_v$, ed in generale per l'aria, come per i gas biatomici, può essere assunto pari a 1.4.

Nei modelli matematici tuttavia la temperatura potenziale non viene espressa in funzione di p_i : ciò necessiterebbe della misurazione della pressione alle varie altezze di interesse e non sempre questi dati sono disponibili, come nel caso del presente studio. Si preferisce utilizzare la seguente espressione approssimata:

$$\Theta = T_i + \Gamma * z \quad (1.42)$$

dove z è l'altezza alla quale si trova la particella d'aria in esame e Γ è un coefficiente noto come gradiente adiabatico secco.

L'equazione 1.42 trova giustificazione nei passaggi seguenti.

Per il primo principio della termodinamica applicato ad una trasformazione adiabatica si ha:

$$dQ = dU + dW = 0 \quad (1.43a)$$

$$dU = -dW \quad (1.43b)$$

$$dW = pdV = -C_v^{mol} dT \quad (1.43c)$$

dove C_v^{mol} è il calore specifico a volume costante per unità di mole e dW è il lavoro svolto dal sistema sull'ambiente circostante come risultato delle forze di volume.

Supponendo poi l'aria un gas perfetto e ricordando che $C_v^{mol} + R = C_p^{mol}$:

$$d(pV) = pdV + Vdp = RdT \quad (1.44a)$$

$$pdV = RdT - Vdp \quad (1.44b)$$

$$\frac{dT}{dp} = \frac{V}{C_p^{mol}} \quad (1.44c)$$

Se si considera allora che la pressione alla quota z è determinata dal peso dell'aria sovrastante, si può considerare l'equazione fondamentale idrostatica:

$$dp = -\rho * g * dz \quad (1.45)$$

con ρ pari alla densità dell'aria e g all'accelerazione di gravità.

Ne consegue che, detto M il peso molecolare dell'aria e sempre nell'ipotesi di gas perfetto:

$$\frac{dp}{dz} = -\frac{g * M * p}{R * T} \quad (1.46)$$

Combinando allora l'espressione 1.44c e 1.46 si ottiene:

$$\frac{dT}{dz} = -\frac{g * M * p * V}{R * T * C_p^{mol}} = -\frac{g}{C_p} = -\Gamma \quad (1.47)$$

Γ esprime perciò la variazione di temperatura della particella con l'altezza a seguito di un processo adiabatico. Si giustifica quindi l'equazione 1.42.

Eseguendo allora il calcolo si ottiene:

$$\Gamma = \frac{9.8}{1.005} \frac{ms^{-2}}{kJkg^{-1}K^{-1}} \simeq 0.0098 \frac{K}{m} \quad (1.48)$$

Ritornando ora all'equazione di 1.40 si nota immediatamente che essa, al di là del termine correttivo A , non è altro che un bilancio energetico che esprime l'uguaglianza tra l'energia posseduta dalle masse d'aria che salgono sino a z_{ic} e il calore scambiato con il suolo, il tutto riferito all'unità di superficie terrestre.

Per eseguire il calcolo il modello approssima gli integrali a sommatorie valutando i vari termini alle altezze (e corrispondenti ore) disponibili nei dati in input.

La convective velocity scale

La convective velocity scale, w_* , è una grandezza di scala utile in condizioni di PBL instabile, tanto più grande quanto maggiori sono l'altezza di rimescolamento e il flusso di calore dalla superficie. Essa fornisce indicazioni sulle velocità verticali che possono essere generate dai moti convettivi del PBL.

w_* è stata definita da Wyngaard a seguito di prove sperimentali, misurazioni in atmosfera e modellazioni matematiche secondo la seguente espressione:

$$w_* = \left(\frac{g * H * z_{ic}}{\rho * C_p * T_{ref}} \right)^{\frac{1}{3}} \quad (1.49)$$

Wyngaard ha dimostrato la proporzionalità tra la velocità dei moti turbolenti nel CBL e w_* .

La mixing height meccanica

Durante le primissime ore che seguono l'alba la superficie terrestre è scarsamente irraggiata dal sole e quindi i moti convettivi indotti in atmosfera sono di modesta entità. Ne consegue che procedendo al calcolo di z_{ic} in queste condizioni si ottiene un valore estremamente contenuto.

In presenza di vento tuttavia si possono generare vortici in atmosfera che innalzano il PBL oltre il livello di z_{ic} : si conclude che l'altezza del PBL in questi frangenti è controllata da fattori meccanici e non convettivi e si perviene quindi alla definizione della mechanical mixing height, z_{im} .

Per non sottostimare l'altezza effettiva del CBL AERMET sceglie come valore di z_i , mixing height, il massimo tra z_{ic} e z_{im} :

$$z_{i_{CBL}} = \max [z_{ic}; z_{im}] \quad (1.50)$$

Per giungere ad un'espressione atta all'ottenimento di z_{im} AERMET procede preliminarmente al calcolo dell'altezza di mescolamento nel CBL sfruttando la medesima espressione utilizzata per z_{im} nell'SBL. Il valore ottenuto prende il nome di mixing height di equilibrio z_{ie} . In base alla definizione di z_{im} per l'SBL:

$$z_{ie} = 0.4 * \frac{u_* * L}{f} \quad (1.51)$$

AERMET dispone già, come visto nei paragrafi precedenti, del valore di u_* , friction velocity, e di L , lunghezza di Monin-Obukhov. f è invece il coefficiente di Coriolis:

$$f = -2 * m * \omega * v * \sin(\phi) \quad (1.52)$$

dove:

m è la massa del corpo oggetto dello studio (particella d'aria)

v è la velocità del corpo oggetto dello studio (particella d'aria)

ω è la velocità di rotazione della Terra

ϕ è la latitudine del punto in cui si trova il corpo

Il calcolo di z_{ie} secondo l'equazione 1.51 risulta perciò molto complesso a causa della necessità di determinare f .

A seguito di studi condotti da Venkatram si è però giunti ad una formulazione empirica di z_{im} per l'SBL e quindi per z_{ie} :

$$z_{ie} = 2300 * u_*^{\frac{1}{3}} \quad (1.53)$$

dove u_* si intende espresso in m/s e z_{ie} in m .

Il valore di z_{im} nel CBL non è posto semplicemente pari a z_{ie} in quanto, tenendo conto dei risultati di precedenti modellazioni matematiche in cui ciò accadeva, questo porterebbe all'ottenimento di bruschi e poco realistici innalzamenti o abbassamenti del valore di z_{im} durante le ore di transizione tra la notte e il giorno o durante periodi in cui si hanno rilevanti variazioni di velocità del vento.

AERMET assume allora la seguente espressione:

$$\frac{dz_{im}}{dt} = \frac{(z_{ie} - z_{im})}{\tau} \quad (1.54)$$

dove τ rappresenta l'intervallo di tempo impiegato da z_{im} per giungere al valore di z_{ie} calcolato mediante l'equazione 1.53. AERMET esprime τ mediante una espressione empirica come funzione della friction velocity:

$$\tau = \frac{z_{im}}{\beta_\tau * u_*} \quad (1.55)$$

dove β_τ è una costante empirica, $\beta_\tau = 2$, e z_{im} si intende espressa in m , u_* in m/s e τ in s .

Sostituendo l'equazione 1.55 nella 1.54 si ottiene, a seguito dell'integrazione, l'espressione di z_{im} . Va tuttavia tenuto conto che u_* varia nel tempo e quindi AERMET propone un'integrazione numerica:

$$z_{im}(t + \Delta t) = z_{im}(t) * \exp\left(-\frac{\Delta t}{\bar{\tau}}\right) + z_{ie}(t + \Delta t) * \left[1 - \exp\left(-\frac{\Delta t}{\bar{\tau}}\right)\right] \quad (1.56)$$

dove $\bar{\tau}$ è il valore di τ calcolato come:

$$\bar{\tau} = \frac{z_{im}(t)}{\beta_{\tau} * u_*(t + \Delta t)} \quad (1.57)$$

t rappresenta l'ora precedente alla quale si è eseguito il calcolo, $t + \Delta t$ l'ora attuale. Ovviamente all'ora iniziale $t = 0$ si ha $z_{im}(0) = z_{ie}(0)$ con $z_{ie}(0)$ calcolato secondo l'equazione 1.53.

1.3.4 AERMET e il calcolo dei parametri dell' SBL

La friction velocity e la lunghezza di Monin-Obukhov nell'SBL

Per il calcolo della friction velocity AERMET procede preliminarmente alla determinazione della temperature scale, un parametro di scala definito come:

$$\Theta_* = -\frac{H}{\rho * C_p * u_*} \quad (1.58)$$

Il presente modello matematico ha recepito gli studi di Venkatram, il quale ha dimostrato mediante misure sperimentali che Θ_* può essere ritenuto costante durante le ore notturne.

Ricavando il flusso di calore H dalla equazione 1.58 e sostituendolo nella 1.38, definizione di lunghezza di Monin-Obukhov, si ottiene l'espressione di L per lo strato stabile:

$$L = \frac{T_{ref}}{k * g * \Theta_*} * u_*^2 \quad (1.59)$$

o più sinteticamente:

$$L = A * u_*^2 \quad \text{con} \quad A = \frac{T_{ref}}{k * g * \Theta_*} \quad (1.60)$$

Il profilo di velocità del vento nell'SBL può essere espresso mediante la legge di Prandtl:

$$u = \frac{u_*}{k} * \ln \left(\frac{z}{z_0} \right) \quad (1.61)$$

dove si ricorda che z_0 è la rugosità del terreno e k la costante di Von Karman.

AERMET tuttavia non utilizza direttamente l'espressione di Prandtl ma una sua derivazione empirica ricavata da Panofsky e Dutton:

$$u = \frac{u_*}{k} * \left[\ln \left(\frac{z}{z_0} \right) + \frac{\beta_m * z_{ref}}{L} \right] \quad (1.62)$$

con $\beta_m = 5$ e z_{ref} pari all'altezza di riferimento a cui si misura la velocità del vento. Sostituendo nella 1.62 l'espressione 1.60 si ottiene:

$$\frac{u}{u_*} = \frac{1}{C_D} + \frac{\beta_m * z_{ref}}{k * A * u_*^2} \quad (1.63a)$$

$$C_D = \frac{k}{\ln\left(\frac{z}{z_0}\right)} \quad (1.63b)$$

Moltiplicando ora il primo e il secondo membro della 1.63a per u_*^2 e rielaborando si ricava:

$$u_*^2 - C_D * u * u_* + C_D * u_0^2 = 0 \quad (1.64a)$$

$$u_0^2 = \frac{\beta_m * z_{ref}}{k * A} \quad (1.64b)$$

L'equazione 1.64a presenta due soluzioni in u_* :

$$u_{*,I,II} = \frac{C_D * u \pm \sqrt{C_D^2 * u^2 - 4 * C_D * u_0^2}}{2} \quad (1.65)$$

Sperimentalmente si dimostra che la seconda soluzione non produce un valore di u_* utile.

Si ottiene quindi che:

$$u_* = \frac{C_D * u}{2} * \left(1 + \sqrt{1 - \left(\frac{2 * u_0}{C_D^{\frac{1}{2}} * u} \right)^2} \right) \quad (1.66)$$

Questa espressione tuttavia fornisce un risultato reale soltanto se:

$$\frac{C_D^2 * u^2}{4} \geq C_D * u_0^2 \quad (1.67)$$

da cui:

$$u \geq \sqrt{\frac{4 * \beta_m * z_{ref} * g * \Theta_*}{T_{ref} * C_D}} = u_{cr} \quad (1.68)$$

dove il valore critico della velocità del vento u_{cr} è il valore minimo al quale la 1.66 fornisce un valore reale.

Per velocità inferiori, $u < u_{cr}$ il modello presuppone la validità delle seguenti relazioni di proporzionalità:

$$u_* = u_*(u_{cr}) * \frac{u}{u_{cr}} \quad (1.69a)$$

$$\Theta_* = \Theta_*(u_{cr}) * \frac{u}{u_{cr}} \quad (1.69b)$$

Va infine sottolineato che AERMET per l'effettivo calcolo di Θ_* non utilizza l'espressione 1.58, qui introdotta ai soli fini della comprensione del background matematico, ma sfrutta l'equazione empirica di Van Ulden e Holtslag:

$$\Theta_* = 0.09 * (1 - 0.5 * n^2) \quad (1.70)$$

dove n è la copertura nuvolosa totale fornita in input e Θ_* si intende espressa in K .

Il flusso di calore sensibile nell'SBL

Una volta calcolata la friction velocity u_* all'altezza di riferimento z_{ref} per $u = u_{ref}$ secondo l'equazione 1.66 e la temperature scale secondo la 1.70 il valore del flusso di calore sensibile nell'SBL si ottiene immediatamente dalla definizione stessa di temperature scale, equazione 1.58:

$$H = -\rho * C_p * u_* * \Theta_* \quad (1.71)$$

AERMET, recependo i risultati degli studi condotti da Hanna e Weil, fissa il valore massimo del prodotto ($\Theta_* * u_*$):

$$[\Theta_* * u_*]_{max} = 0.05 \text{ mK s}^{-1} \quad (1.72)$$

Ricordando quindi che il presente studio assume come costante il prodotto ($\rho * C_p$), $\rho * C_p = 1.2 \text{ kJm}^{-3}\text{K}^{-1}$, si ottiene che il valore massimo del flusso di calore scambiato sarà:

$$H_{max} = 60 \text{ Wm}^{-2} \quad (1.73)$$

Nel caso in cui si ottengano valori per la friction velocity e per la temperature scale tali che $\Theta_* * u_* > 0.05 \text{ mK s}^{-1}$, AERMET ricalcola Θ_* come $\Theta_* = 0.05/u_*$ ed utilizza quest'ultimo valore per la determinazione di u_* secondo l'equazione 1.66. Ricavata la friction velocity, la temperature scale viene ricalcolata dalla 1.72 come $\Theta_* = 0.05/u_*$.

Il flusso di calore scambiato in questo caso è pari al flusso massimo H_{max} .

La mixing height meccanica

L'altezza di mescolamento nello strato stabile è determinata esclusivamente da fattori meccanici quali gli sforzi di taglio del vento. Essa viene determinata da AERMET in modo del tutto analogo al calcolo di z_{im} nel CBL mediante le equazioni 1.53 e 1.56.

1.3.5 INTERFACE e il calcolo dei parametri per CBL ed SBL

Profili di velocità del vento

Per il calcolo dei profili di velocità del vento INTERFACE si avvale delle seguenti espressioni di derivazione semiempirica:

$$u = \begin{cases} u(7 * z_0) * \left[\frac{z}{7 * z_0} \right] & \text{per } z < 7 * z_0 \\ \frac{u_*}{k} * \left[\ln \left(\frac{z}{z_0} \right) - \Psi_m \left(\frac{z}{L} \right) - \Psi_m \left(\frac{z_0}{L} \right) \right] & \text{per } 7 * z_0 \leq z \leq z_i \\ u(z_i) & \text{per } z > z_i \end{cases} \quad (1.74)$$

dove le Ψ_m per il CBL sono calcolate secondo le equazioni 1.36 mentre per l'SBL si utilizzano le seguenti espressioni empiriche:

$$\Psi_m \left(\frac{z}{L} \right) = -17 * \left[1 - \exp \left(-0.29 * \frac{z}{L} \right) \right] \quad (1.75)$$

$$\Psi_m \left(\frac{z_0}{L} \right) = -17 * \left[1 - \exp \left(-0.29 * \frac{z_0}{L} \right) \right] \quad (1.76)$$

É possibile notare che secondo le 1.74 per valori di z inferiori a sette volte la rugosità del terreno si assume che la velocità del vento sia direttamente proporzionale all'altezza. $u(7 * z_0)$ è ovviamente calcolato con la seconda delle 1.74.

Per valori di z superiori all'altezza di mescolamento z_i si assume invece che la velocità del vento sia costante mentre per altezze comprese tra sette volte il valore della rugosità e la mixing height si utilizza un'espressione che, come si nota immediatamente, è una derivazione semiempirica dell'equazione di Prandtl 1.61.

Per piccoli valori del rapporto z/L la 1.74 si riduce alla 1.62 mentre per valori più elevati e con $z > 200 \text{ m}$ nell'SBL si dimostra sperimentalmente che la 1.74 presenta una maggiore aderenza al reale.

La mixing height viene determinata da AERMET come visto ai Paragrafi 1.3.3 e 1.3.4, e successivamente viene inviata ad INTERFACE.

Si può pertanto concludere che:

$$z_i = \begin{cases} \max [z_{ic}; z_{im}] & \text{per il CBL} \\ z_{im} & \text{per l'SBL} \end{cases} \quad (1.77)$$

Ne consegue che INTERFACE deve prima stabilire se ad una certa ora in cui si esegue la simulazione il PBL è stabile (SBL) o caratterizzato da moti convettivi (CBL).

Si può notare tuttavia che durante le ore notturne i termini convettivi nelle espressioni 1.37 e 1.38 divengono negativi e quindi cambia il segno di L . INTERFACE conclude pertanto che se $L < 0$ il moto delle masse d'aria è convettivo e quindi si è instaurato il Convective Boundary Layer, se $L > 0$ si ha lo strato stabile.

Le Figure 1.10 e 1.11 rappresentano rispettivamente il profilo di velocità del vento nel CBL avendo ipotizzato $z_i = 1000 \text{ m}$, $z_0 = 0.1 \text{ m}$ ed $L = -10 \text{ m}$ e il profilo nell'SBL con $z_i = 100 \text{ m}$, $z_0 = 0.1 \text{ m}$ ed $L = 10 \text{ m}$.

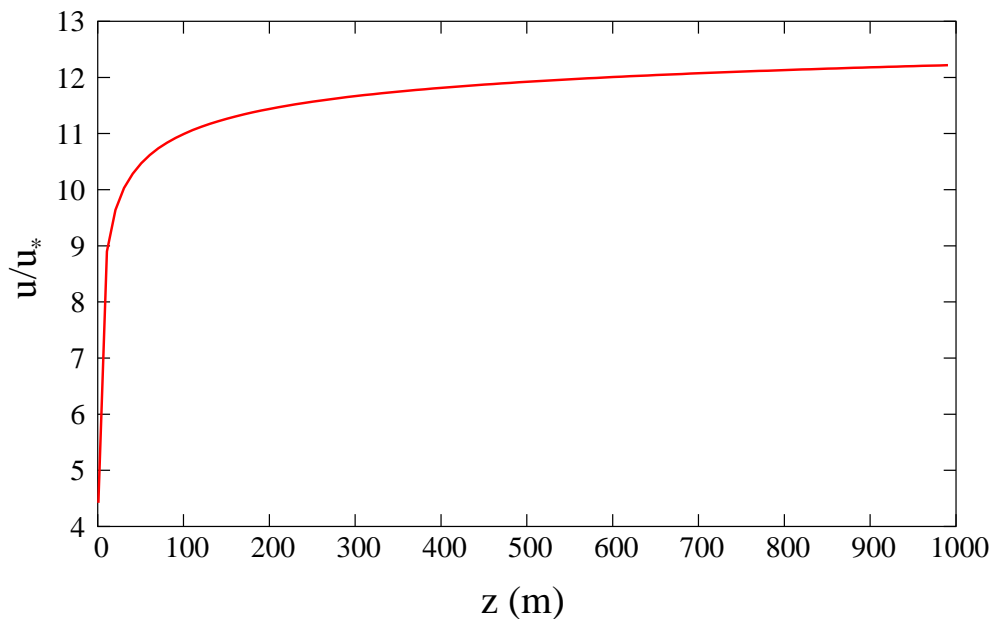


Figura 1.10: Profilo di velocità del vento nel CBL

La Figura 1.12 presenta invece un confronto tra il profilo di velocità nell' SBL e nel CBL nei primi 100 metri di altitudine.

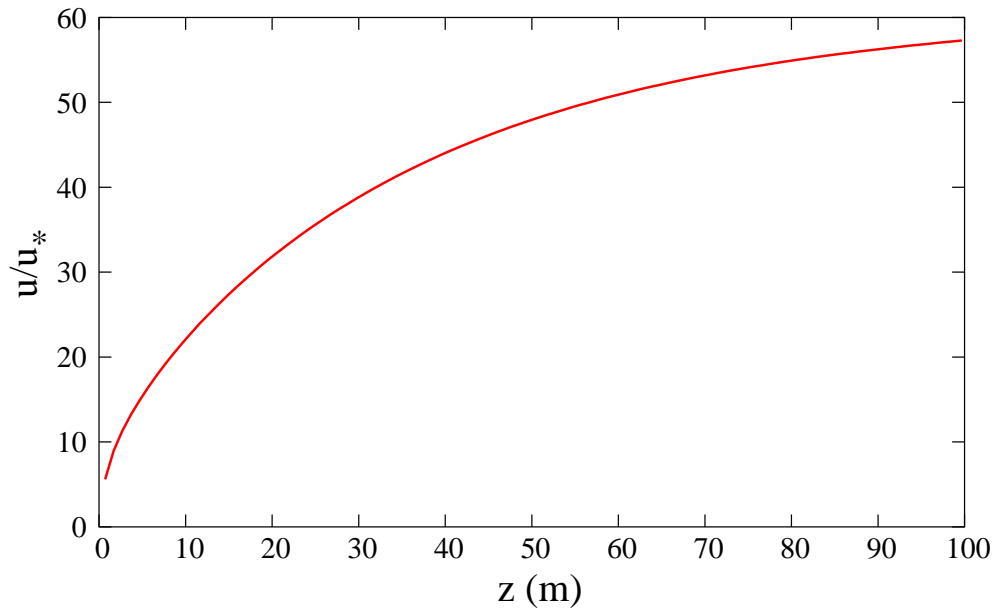


Figura 1.11: Profilo di velocità del vento nell'SBL

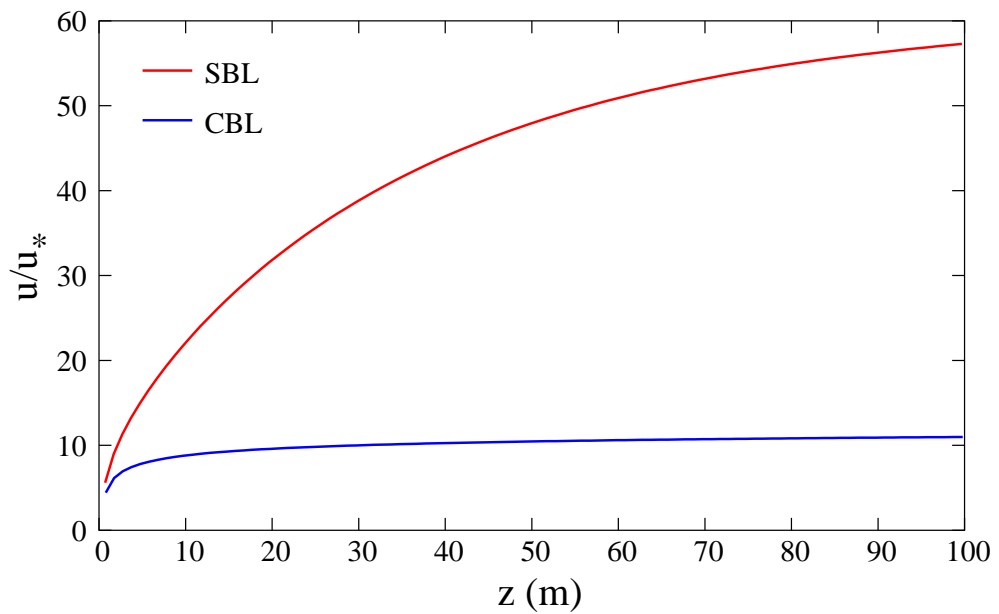


Figura 1.12: Profilo di velocità del vento nell'SBL e nel CBL a confronto

Profili di direzione del vento

Sia per il CBL che per l'SBL INTERFACE assume che la direzione del vento sia costante al di sopra e al di sotto rispettivamente della massima e della minima altitudine a cui essa è rilevata sperimentalmente. Per altitudini intermedie viene eseguita un'interpolazione lineare.

Come evidenziato nei paragrafi precedenti in input ad AERMET vengono forniti due file di dati meteorologici: l'uno relativo agli strati d'aria superficiali, l'altro agli strati superiori. Sono quindi disponibili almeno due rilevamenti per ciò che riguarda la direzione del vento e vengono passati direttamente da AERMET ad INTERFACE.

In simboli, detta z_{min} la minima altitudine a cui viene rilevata la direzione del vento $d_{z_{min}}$ e z_{max} l'altitudine massima a cui viene rilevata $d_{z_{max}}$, si ha:

$$d_z = \begin{cases} d_{z_{min}} & \text{per } z \leq z_{min} \\ \frac{d_{z_{max}} - d_{z_{min}}}{z_{max} - z_{min}} * z + \frac{d_{z_{min}} * z_{max} - d_{z_{max}} * z_{min}}{z_{max} - z_{min}} & \text{per } z_{min} < z < z_{max} \\ d_{z_{max}} & \text{per } z \geq z_{max} \end{cases} \quad (1.78)$$

Si ricorda infine che la direzione del vento viene espressa come angolo rispetto alla direzione Nord.

Il profilo del gradiente di temperatura potenziale

Per ciò che riguarda il CBL INTERFACE assume che il profilo del gradiente di temperatura potenziale sia esprimibile secondo la seguente formulazione:

$$\frac{d\Theta}{dz} = \begin{cases} 0 & \text{per } z \leq z_i \\ \frac{\Delta T}{\Delta z} + \Gamma & \text{per } z_i < z \leq z_i + 500 \text{ m} \\ 0.005 \text{ K/m} & \text{per } z > z_i + 500 \text{ m} \end{cases} \quad (1.79)$$

z_i è ovviamente la mixing height determinata secondo l'equazione 1.77.

L'espressione 1.79 assume che il gradiente di temperatura potenziale al di sotto della mixing height sia nullo (e quindi Θ è ritenuta costante con l'altezza): ciò è giustificato dal fatto che il CBL è caratterizzato da intensi moti convettivi e quindi è ben miscelato.

Al di sopra del CBL è individuabile uno strato stabile noto come zona di intrusione, si veda la Figura 1.7, la cui altezza può essere ritenuta costante durante l'arco della giornata: INTERFACE ne fissa il valore a 500 m e calcola il profilo del gradiente di temperatura potenziale mediante la seconda delle 1.79. Questa espressione viene ricavata per derivazione della 1.42:

$$\frac{d\Theta}{dz} = \frac{dT}{dz} + \Gamma \simeq \frac{\Delta T}{\Delta z} + \Gamma \quad (1.80)$$

In particolare $\Delta T/\Delta z$ viene determinato in base ai valori di temperatura rilevati durante le prime ore del mattino in cui si è instaurato il CBL e successivamente è ritenuto costante. Ovvero si assume che in questo strato non ci sia un significativo scambio di aria calda o fredda con i layer superiori e inferiori.

Per gli strati d'aria superiori INTERFACE recepisce i risultati delle prove sperimentali condotte da Hanna e Chang secondo i quali $d\Theta/dz$ assume un valore costante pari a 0.005 K/m.

Per l'SBL INTERFACE determina il profilo del gradiente di temperatura potenziale mediante le seguenti espressioni empiriche ricavate da Businger, Stull Van Ulden e Holt-slag:

$$\frac{d\Theta}{dz} = \begin{cases} \frac{\Theta_*}{2 * k} * \left[1 + 5 * \frac{2}{L} \right] & \text{per } z \leq 2 \text{ m} \\ \frac{\Theta_*}{z * k} * \left[1 + 5 * \frac{z}{L} \right] & \text{per } 2 \text{ m} < z \leq 100 \text{ m} \\ \frac{d\Theta}{dz}(100 \text{ m}) * \exp \left[-\frac{z - 100}{0.44 * z_{i\Theta}} \right] & \text{per } z > 100 \text{ m} \end{cases} \quad (1.81)$$

$$z_{i\Theta} = \max[z_{im}; 100 \text{ m}] \quad (1.82)$$

Nelle espressioni 1.81 Θ_* si intende calcolata mediante la 1.70 mentre z ed L si intendono espresse in metri.

Il profilo di temperatura potenziale

INTERFACE calcola il profilo della temperatura potenziale a partire dal valore che essa assume all'altezza standard $z_{T_{ref}}$ a cui viene misurata la temperatura T_{ref} negli strati d'aria inferiori. Nel nostro caso si ha $z_{T_{ref}} = 10 \text{ m}$.

Secondo l'equazione 1.42:

$$\Theta(z_{T_{ref}}) = T_{ref} + \Gamma * z_{MSL} \quad (1.83)$$

$$z_{MSL} = z_{T_{ref}} + \overline{z_{SB}} \quad (1.84)$$

$\overline{z_{SB}}$ è il valor medio delle altitudini sul livello del mare di tutti i rilievi presenti nell'area di studio sui quali è presente una sorgente inquinante. In altre parole $\overline{z_{SB}}$ "livella" il terreno al di sopra del quale viene condotto lo studio.

Nel nostro caso l'area di studio è di dimensioni limitate ed è priva di rilievi di interesse: $\overline{z_{SB}}$ rappresenta quindi l'altezza dell'aeroporto sul livello del mare.

Sia per il CBL che per l'SBL INTERFACE procede al seguente calcolo approssimato:

$$\Theta(z + \Delta z) = \begin{cases} \Theta(z_{T_{ref}}) + \left(\frac{d\Theta}{dz}\right)_{\bar{z}} * \Delta z & \text{per } z \leq z_{T_{ref}} \\ \Theta(z) + \left(\frac{d\Theta}{dz}\right)_{\bar{z}} * \Delta z & \text{per } z > z_{T_{ref}} \end{cases} \quad (1.85)$$

$$\bar{z} = z + \frac{\Delta z}{2} = z + \frac{z - z_{T_{ref}}}{2} \quad (1.86)$$

Nelle espressioni 1.85 $d\Theta/dz$ si intende calcolato secondo le 1.79 e 1.81.

Si trova dunque conferma di quanto asserito nel paragrafo precedente a proposito della costanza di Θ nel CBL:

$$\Theta(z) = \Theta(z_{T_{ref}}) \quad \forall z \leq z_i$$

La varianza della velocità verticale

Come asserito al Paragrafo 1.3.2, INTERFACE calcola la varianza della distribuzione di velocità delle masse d'aria che si muovono ortogonalmente e parallelamente al suolo. Il calcolo della deviazione standard è immediato essendo essa definita come la radice quadrata della varianza.

Considerando ora una terna triortogonale di riferimento tale per cui gli assi x e y sono paralleli al suolo ed ortogonali tra loro, l'asse z è normale agli altri due e diretto dal suolo verso lo spazio che circonda la Terra, si conclude che si stanno considerando le masse d'aria che si muovono parallelamente all'asse z. Il vettore velocità risulta sempre parallelo all'asse z e viene identificato brevemente con l'espressione velocità verticale.

Nel CBL la varianza totale della velocità verticale, σ_{wT}^2 , viene assunta pari alla somma di due termini, σ_{wc}^2 e σ_{wm}^2 , che esprimono rispettivamente il contributo convettivo dovuto alla buoyancy e il contributo meccanico dovuto agli sforzi di taglio del vento:

$$\sigma_{wT}^2 = \sigma_{wc}^2 + \sigma_{wm}^2 \quad (1.87)$$

σ_{wc}^2 è determinato in base ad espressioni empiriche ad opera di Panofsky e Dutton per $z \leq 0.1 * z_{ic}$ e ad opera di Hicks per $z > 0.1 * z_{ic}$:

$$\sigma_{wc}^2 = \begin{cases} 1.6 * \left(\frac{z}{z_{ic}}\right)^{\frac{2}{3}} * w_*^2 & \text{per } z \leq 0.1 * z_{ic} \\ 0.35 * w_*^2 & \text{per } 0.1 * z_{ic} < z \leq z_{ic} \\ 0.35 * w_*^2 * \exp\left[-\frac{6 * (z - z_{ic})}{z_{ic}}\right] & \text{per } z > z_{ic} \end{cases} \quad (1.88)$$

La convective velocity scale w_* si intende calcolata ovviamente secondo l'espressione 1.49.

Le equazioni 1.88 dimostrano di aver acquisito i risultati degli studi di Wyngaard cui si è accennato al Paragrafo 1.3.3.

La Figura 1.13 rappresenta l'andamento di σ_{wc}^2/w_*^2 in funzione di z/z_i .

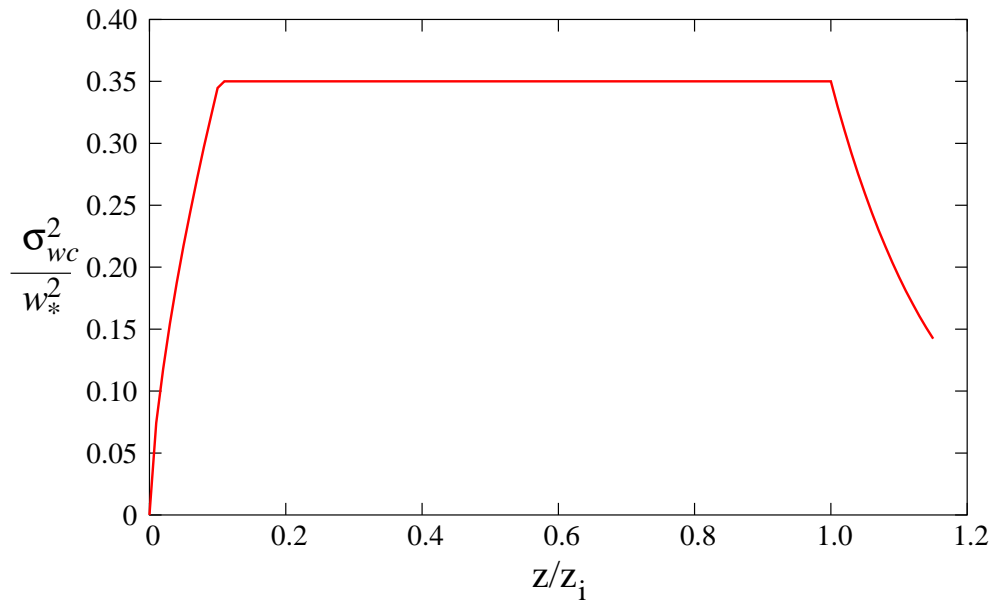


Figura 1.13: Andamento di σ_{wc}^2/w_*^2 nel CBL in funzione di z/z_i

σ_{wm}^2 è ottenuto dalla somma di due termini, σ_{wml}^2 e σ_{wmr}^2 , che esprimono rispettivamente il contributo alla varianza della velocità verticale dato dal CBL stesso e dallo strato stabile, zona di intrusione, presente al di sopra di esso:

$$\sigma_{wm}^2 = \sigma_{wml}^2 + \sigma_{wmr}^2 \quad (1.89)$$

Questa formulazione è stata recentemente introdotta da AERMOD al fine di evitare le poco realistiche discontinuità del valore di σ_{wT}^2 nel passaggio da CBL a capping inversion che si ottengono con altri modelli matematici.

Per il calcolo di σ_{wml}^2 INTERFACE ricorre di nuovo a formulazioni empiriche ricavate da Panofsky e Dutton in cui si nota la proporzionalità con il quadrato della friction velocity come era stato brevemente anticipato al Paragrafo 1.3.3:

$$\sigma_{wml}^2 = \begin{cases} (1.3 * u_*)^2 * \left(1 - \frac{z}{z_i}\right) & \text{per } z < z_i \\ 0 & \text{per } z \geq z_i \end{cases} \quad (1.90)$$

Il termine σ_{wml}^2 per $z \geq z_i$ è nullo per la sua stessa definizione.

σ_{wmr}^2 nello strato stabile al di sopra del CBL, $z \geq z_i$, è considerato costante e pari a σ_{wmx}^2 :

$$\sigma_{wmr}^2 = \sigma_{wmx}^2 = (i_z * u(z_i))^2 \quad (1.91)$$

i_z è un termine noto come “intensità della turbolenza” ed è assunto pari a 0.02 in condizioni di stabilità o neutralità atmosferica; $u(z_i)$ è calcolata come visto nei paragrafi precedenti.

All’interno del CBL e quindi per $z < z_i$ si assume che σ_{wmr} decresca proporzionalmente a z :

$$\sigma_{wmr} = \sigma_{wmx} * \frac{z}{z_i} \quad (1.92)$$

La Figura 1.14 mostra l’andamento di σ_{wm}^2/u_*^2 , σ_{wml}^2/u_*^2 e σ_{wmr}^2/u_*^2 in funzione di z/z_i avendo assunto $\sigma_{wmx}^2/u_*^2 = 0.22$.

Nell’SBL c’è solo il contributo meccanico alla varianza totale di velocità verticale e quindi:

$$\sigma_{wT}^2 = \sigma_{wm}^2 \quad (1.93)$$

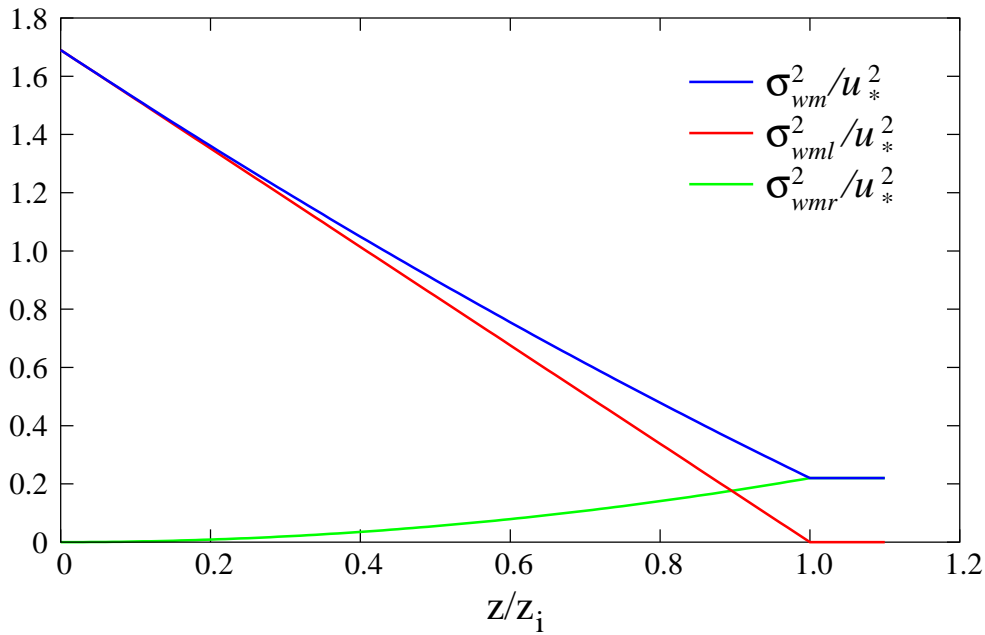


Figura 1.14: Andamento di σ_{wm}^2/u_*^2 nel CBL in funzione di z/z_i

dove σ_{wm}^2 si intende ancora calcolato secondo le equazioni 1.89, 1.90 e 1.92.

L'utilizzo delle medesime espressioni per il calcolo della varianza nel CBL e nell'SBL è giustificato dalla necessità di garantire una certa continuità nel passaggio, all'alba e al tramonto, da CBL ad SBL e viceversa.

La varianza della velocità laterale

Considerata la terna triortogonale definita nel paragrafo precedente e supponendo che l'asse x sia diretto nella direzione in cui si propaga il pennacchio, si prendono ora in esame le masse d'aria che si muovono parallelamente a quest'asse. Il vettore velocità di tali masse d'aria risulta anch'esso parallelo ad x e viene brevemente identificato con l'espressione velocità laterale.

Nel CBL la varianza totale della velocità laterale viene espressa come somma di due contributi in modo del tutto analogo a quanto visto per la velocità verticale:

$$\sigma_{vT}^2 = \sigma_{vc}^2 + \sigma_{vm}^2 \quad (1.94)$$

σ_{vT}^2 è la varianza totale, σ_{vc}^2 è il contributo dovuto alla buoyancy, σ_{vm}^2 è il contributo dovuto agli sforzi di taglio del vento.

INTERFACE assume che σ_{vm}^2 vari esclusivamente con l'altezza e che sia ad essa di-

rettamente proporzionale. Per $z = 0$ Panofsky e Dutton hanno proposto la seguente espressione empirica:

$$(\sigma_{vm}^2)_{z=0} = C * u_*^2 \quad (1.95)$$

La friction velocity u_* si intende espressa secondo l'equazione 1.35 mentre C è una costante il cui valore viene fissato da Hicks a 3.6.

A seguito di studi condotti da Hanna e Hicks è stato dimostrato che il valore minimo che può assumere $(\sigma_{vm}^2)_{z=0}$ è pari a $0.04 \text{ m}^2/\text{s}^2$ mentre per $z = z_{im}$, mixing height meccanica, si ha il valore massimo $(\sigma_{vm}^2)_{z=z_{im}} = 0.25 \text{ m}^2/\text{s}^2$.

INTERFACE tiene conto di questi studi e calcola la varianza laterale meccanica secondo la seguente formulazione:

$$\sigma_{vm}^2 = \begin{cases} \left[\frac{\sigma_{vm}^2(z_{im}) - (\sigma_{vm}^2)_{z=0}}{z_{im}} \right] * z + (\sigma_{vm}^2)_{z=0} & \text{per } z \leq z_{im} \\ \sigma_{vm}^2(z_{im}) & \text{per } z > z_{im} \end{cases} \quad (1.96)$$

dove:

$$\sigma_{vm}^2(z_{im}) = \min \left[(\sigma_{vm}^2)_{z=z_{im}} ; 0.25 \text{ m}^2/\text{s}^2 \right] \quad (1.97)$$

Il valore di σ_{vm}^2 calcolato viene poi sottoposto a verifica:

$$\sigma_{vm}^2 = \max \left[\sigma_{vm}^2 ; 0.04 \text{ m}^2/\text{s}^2 ; 0.0025 * u^2 \right] \quad (1.98)$$

Il valore limite $0.0025 * u^2$, dove u si intende valutato alla stessa altezza a cui si valuta σ_{vm}^2 , è stato posto dal team di sviluppo di AERMOD ed è stato ottenuto confrontando i risultati delle simulazioni con dati reali raccolti in situ.

La varianza laterale convettiva, σ_{vc}^2 , viene invece determinata secondo l'espressione di Hicks:

$$\sigma_{vc}^2 = 0.35 * w_*^2 \quad \text{per } z \leq z_{ic} \quad (1.99)$$

Il modello considera la presenza dello strato stabile, zona di intrusione, al di sopra della mixing height convettiva, z_{ic} , e suppone che ivi σ_{vc}^2 decresca linearmente sino al valore di $0.25 \text{ m}^2/\text{s}^2$. Per valori di $z > 1.2 * z_{ic}$ si ritiene invece che σ_{vc}^2 rimanga costante e pari a $0.25 \text{ m}^2/\text{s}^2$. In formule:

$$\sigma_{vc}^2 = \begin{cases} \frac{0.25 - \sigma_{vc}^2(z_{ic})}{0.2 * z_{ic}} * z + \frac{1.2 * \sigma_{vc}^2(z_{ic}) - 0.25}{0.2} & \text{per } z_{ic} < z \leq 1.2 * z_{ic} \\ 0.25 \text{ m}^2/\text{s}^2 & \text{per } z > 1.2 * z_{ic} \end{cases} \quad (1.100)$$

Se il valore calcolato di $\sigma_{vc}^2(z_{ic})$ è tale che $\sigma_{vc}^2(z_{ic}) \leq 0.25 \text{ m}^2/\text{s}^2$ INTERFACE assume che esso rimanga costante al di sopra di z_{ic} . In formule:

$$\sigma_{vc}^2(z_{ic}) \leq 0.25 \text{ m}^2/\text{s}^2 \Rightarrow \sigma_{vc}^2 = \sigma_{vc}^2(z_{ic}) \quad \forall z \geq z_{ic}$$

Nell'SBL la varianza totale della velocità laterale presenta il solo termine meccanico e quindi:

$$\sigma_{vT}^2 = \sigma_{vm}^2 \quad (1.101)$$

σ_{vm}^2 si intende calcolato secondo le equazioni 1.96, 1.97 e 1.98 ovvero come nel CBL. Questo consente di mantenere una certa continuità dei valori di σ_{vT}^2 nel passaggio da CBL ad SBL e viceversa.

La caratterizzazione delle sorgenti

Nei prossimi paragrafi si farà sempre riferimento, per completezza della trattazione e per non generare confusione, a sorgenti stazionarie puntiformi di inquinanti e come tali verranno rappresentate nelle figure.

AERMOD tuttavia tratta le sorgenti volumetriche e superficiali con le stesse espressioni utilizzate per quelle puntiformi: cambiano unicamente i dati in input al programma (tra cui le parole chiave di identificazione) che caratterizzano una sorgente come puntiforme, superficiale o volumetrica.

Se quindi una sorgente presenta soltanto le coordinate di un punto essa viene rilevata come puntiforme. È il caso di tutte le sorgenti stazionarie presenti nell'area di studio: camini delle centrali di riscaldamento o di produzione di energia elettrica, cisterne di stoccaggio dei combustibili, siti di addestramento antincendio e così via.

Qualora una sorgente presenti come coordinate una serie di punti giacenti sul medesimo piano essa viene identificata come sorgente superficiale; EDMS calcola le emissioni di inquinanti relative alla sorgente e le invia in input ad INTERFACE il quale assume che l'emissione sia costante in ogni punto interno al contorno. I parcheggi, le strade e le taxi degli aerei fanno parte di questa categoria di sorgenti.

Le strade e le taxi in particolare vengono suddivise in tronconi della lunghezza di 20 m, ognuno dei quali è considerato una sorgente superficiale. I valori di emissione vengono ancora calcolati da EDMS ora per ora (l'ora è l'intervallo minimo di tempo in EDMS-AERMOD) ed inviati ad INTERFACE.

Anche il percorso degli aerei in volo e a terra sulla runway può essere considerato come una sorgente superficiale ma di questo si tratterà a parte.

AERMOD presenta anche la possibilità di trattare le sorgenti volumetriche, ovvero sorgenti caratterizzate da una serie di punti che non giacciono tutti sul medesimo piano. Anche in questo caso EDMS considera costante l'emissione di inquinanti in ciascun punto interno al volume. L'insieme APU - GSE al gate rappresenta una sorgente volumetrica di inquinanti.

Gli stessi termini calcolati da AERMOD ed INTERFACE per le sorgenti puntiformi vengono parallelamente calcolati per le altre sorgenti, con alcune eccezioni. Ad esempio, quando nei prossimi paragrafi si farà riferimento all'altezza effettiva del camino per una sorgente stazionaria, essa rappresenterà l'altezza reale del camino più la plume rise, ovvero l'innalzamento del pennacchio verso l'alto prima della sua stabilizzazione. Si procederà dunque alla descrizione degli algoritmi che portano alla determinazione della plume rise. Nel caso delle sorgenti superficiali e volumetriche invece, la plume rise non viene calcolata e l'altezza effettiva di rilascio coincide con l'altezza reale indicata in input.

Nel caso in cui il parallelismo nella trattazione dei diversi tipi di sorgenti non sia immediatamente intuibile si addurranno le dovute precisazioni.

Si noti infine che la definizione di una sorgente come superficiale o volumetrica esclude ogni possibilità di indagine microlocale all'interno di essa. Le emissioni sono infatti sempre ritenute costanti, punto per punto, al di là di quella che è la realtà.

Si può infatti pensare che a causa della presenza o dell'assenza di piccoli ostacoli naturali o edifici nei pressi della sorgente la concentrazione di inquinanti in alcune aree interne ad essa sia molto maggiore o molto minore rispetto alla concentrazione media. Di questo il modello matematico non tiene conto e il team di sviluppo di EDMS raccomanda semplicemente di non collocare recettori all'interno delle sorgenti.

Ciò tuttavia non significa che AERMOD non sia in grado di condurre simulazioni con recettori collocati all'interno delle sorgenti: il risultato viene comunque ottenuto ma spetta all'utente definirne l'esatto significato fisico.

Il calcolo dei “valori effettivi”

AERMOD tiene conto degli effetti sulla dispersione degli inquinanti causati dalla variazione verticale di velocità del vento mediante l'utilizzo dei valori di u , σ_{vT} e σ_{wT} opportunamente mediati. Tali quantità prendono il nome di “valori effettivi” e vengono determinati dal sottoprogramma INTERFACE. In particolare vengono utilizzati per il trattamento di emissioni prossime alla superficie terrestre, dove i gradienti di velocità del vento sono maggiori, ed emissioni che avvengono oltre la mixing height e che successivamente rientrano nello strato limite inferiore.

INTERFACE assume che il layer in cui il pennacchio raggiunge direttamente il recettore è l'unico layer che deve essere preso in considerazione per il calcolo dei valori effettivi. Si trascura pertanto il contributo di altri pennacchi il cui materiale raggiunge il recettore passando prima per i layer superiori: tale assunzione è giustificata da prove sperimentali.

INTERFACE definisce il valore effettivo di una generica entità α come:

$$\underline{\alpha} = \frac{1}{h_t - h_b} * \int_{h_b}^{h_t} \alpha(z) dz \quad (1.102)$$

dove:

$$h_b = \begin{cases} H_p(x_r, y_r) & \text{se } H_p \leq z_r \\ \max[(H_p(x_r, y_r) - 2.15 * \sigma_z(x_r)); z_r] & \text{se } H_p > z_r \end{cases} \quad (1.103a)$$

$$h_t = \begin{cases} \min[(H_p(x_r, y_r) + 2.15 * \sigma_z(x_r)); z_r] & \text{se } H_p < z_r \\ H_p(x_r, y_r) & \text{se } H_p \geq z_r \end{cases} \quad (1.103b)$$

H_p è l'altezza del centroide geometrico del pennacchio, assunto con approssimazione come il centro di massa, σ_z è la deviazione standard della distribuzione verticale di concentrazioni del pennacchio.

Il valore effettivo viene quindi calcolato come il valor medio compreso tra il centroide del pennacchio e l'altezza del recettore. Nel caso in cui la propaggine estrema del pennacchio, superiore o inferiore, non giunga al recettore, l'altezza di tale propaggine estrema è assunta come valore limite. La Figura 1.15, in cui per semplicità si è assunta costante H_p , raffigura i due casi limite.

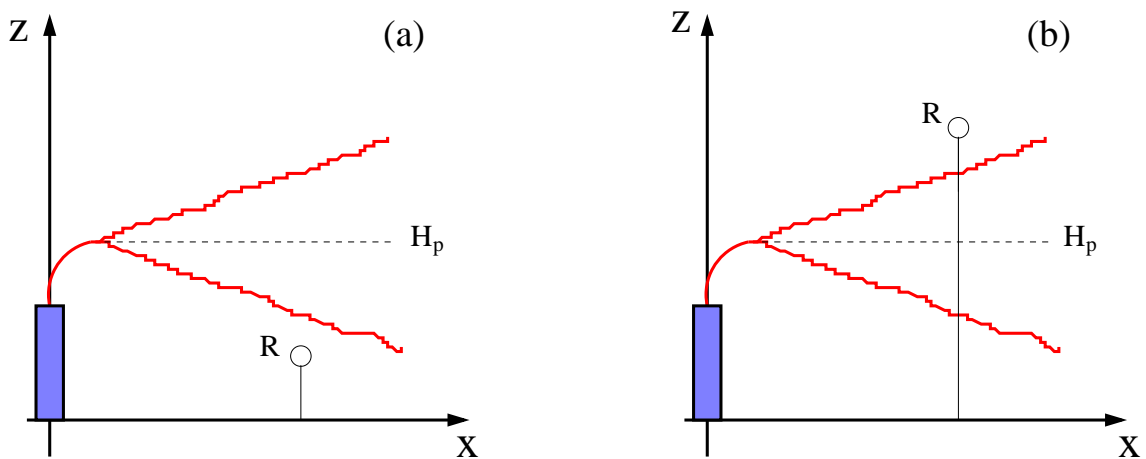


Figura 1.15: (a) La propaggine inferiore del pennacchio non giunge al recettore R
(b) La propaggine superiore del pennacchio non giunge al recettore R

σ_z è quindi un valore necessario al calcolo dei valori effettivi e al tempo stesso quest'ultimi sono necessari alla determinazione di σ_z . INTERFACE richiama allora le routines di AERMOD deputate al calcolo di σ_z sfruttando come dati in input i valori $\sigma_{wT}(H_p)$ e $u(H_p)$ precedentemente calcolati anzichè $\underline{\sigma}_{wT}$ e \underline{u} ed esegue la determinazione dei valori

effettivi. Questi ultimi verranno successivamente inviati ad AERMOD per il calcolo del valore finale di σ_z .

Le routines che portano alla determinazione di σ_z verranno descritte nei prossimi paragrafi.

Nell'SBL, una volta stabilizzato il pennacchio, H_p viene ritenuta costante e pari all'altezza di stabilizzazione:

$$H_p = \Delta h_s + h_s \quad (1.104)$$

h_s è l'altezza di rilascio degli inquinanti da parte della sorgente (l'altezza del camino per una sorgente stazionaria), Δh_s è la plume rise di cui si è detto al paragrafo precedente.

Quest'ultimo termine viene calcolato soltanto per sorgenti stazionarie puntiformi; le routines di AERMOD utilizzate a questo scopo verranno descritte nei paragrafi seguenti.

Nel CBL, a causa dei moti che caratterizzano questo strato atmosferico, si adottano le seguenti assunzioni:

- nelle vicinanze della sorgente H_p è pari all'altezza di stabilizzazione del pennacchio;
- a grandi distanze dalla sorgente il pennacchio è ben miscelato nel PBL e quindi H_p è pari alla metà della mixing height, z_i ;
- per distanze intermedie dalla sorgente H_p varia linearmente tra l'altezza di stabilizzazione del pennacchio e $z_i/2$.

Supponendo allora di fissare la terna cartesiana di riferimento al centro della sorgente ed indicando con x_f la distanza a cui il pennacchio si stabilizza e con x_m la distanza a cui si realizza il perfetto mescolamento, si ha:

$$H_p = \begin{cases} h_s + \Delta h_d = H(x_f) & \text{per } x \leq x_f \\ H(x_f) + \left(\frac{z_i}{2} - H(x_f)\right) * \frac{x - x_f}{x_m - x_f} & \text{per } x_f < x < x_m \\ \frac{z_i}{2} & \text{per } x \geq x_m \end{cases} \quad (1.105)$$

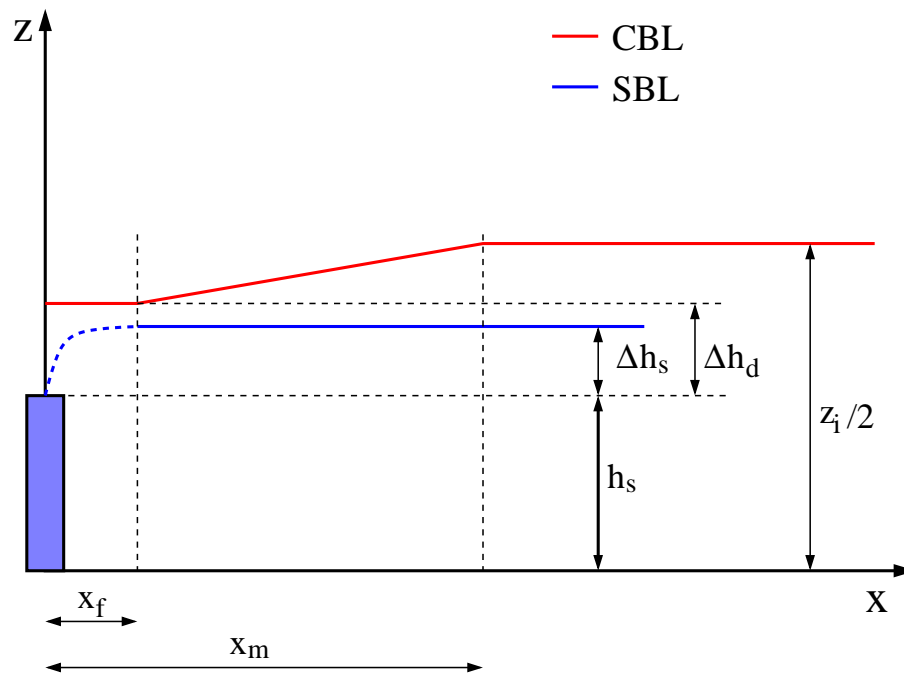


Figura 1.16: Andamento di H_p nel CBL e nell'SBL

In Figura 1.16, dove Δh_d rappresenta la plume rise nel CBL, viene visualizzato l'andamento di H_p in funzione di x nel CBL e nell'SBL.

Per il calcolo di x_f si sfruttano le seguenti espressioni empiriche:

$$x_f = \begin{cases} \frac{8 * r_s * (w_s + 3 * u_p)^2}{w_s * u_p} & \text{per } F_b = 0 \\ 49 * F_b^{\frac{5}{8}} & \text{per } 0 < F_b < 55 \\ 119 * F_b^{\frac{2}{5}} & \text{per } F_b \geq 55 \end{cases} \quad (1.106)$$

r_s è il raggio della sorgente, w_s è la velocità dei gas in uscita, u_p è la velocità del vento all'altezza di rilascio degli inquinanti.

F_b è una costante nota come buoyancy flux ed è pari a:

$$F_b = g * w_s * r_s^2 * \frac{\Delta T_s}{T_s} = g * w_s * r_s^2 * \frac{T_s - T}{T_s} \quad (1.107)$$

T_s è la temperatura dei gas in uscita, T è la temperatura ambiente all'altezza di emissione.

La distanza x_m alla quale si assume che il pennacchio sia perfettamente miscelato nel CBL è determinata moltiplicando la velocità del vento u per il tempo necessario al mescolamento verticale z_i/σ_{wT} . Per u e σ_{wT} si utilizzano i valori medi relativi all'intero strato:

$$x_m = \frac{\bar{u} * z_i}{\bar{\sigma}_{wT}} \quad (1.108)$$

\bar{u} e $\bar{\sigma}_{wT}$ sono dati dalla media aritmetica dei valori precedentemente calcolati da INTERFACE.

Si noti infine che AERMOD pone un limite massimo, pari a z_i , al valore di h_t nelle equazioni 1.103. Nel caso in cui si verifichi dunque che il valore di h_t calcolato sia maggiore di z_i , viene posto $h_t = z_i$. Inoltre, se $h_b \geq z_i$ si ha che $\underline{\alpha} = \alpha(z_i)$. Questo è il caso della "sorgente penetrata", ovvero il materiale del pennacchio che esce dalla sorgente a causa della buoyancy giunge in parte al di sopra dello strato limite e va a costituire un pennacchio a se stante. In questo caso si ha:

$$H_p = h_{ep} \quad (1.109)$$

h_{ep} , altezza effettiva della sorgente penetrata, viene calcolata mediante apposite routines descritte in seguito.

1.3.6 Le relazioni intercorrenti tra AERMOD e AERMAP

Nel caso in cui nell'area di studio siano presenti rilievi quali colline o montagne, AERMOD affronta il problema dell'influenza del terreno sulla dispersione degli inquinanti dividendo il pennacchio in due layer mediante un piano ideale: tale piano, situato all'altezza H_c , si intende parallelo al suolo ed è noto come "dividing streamline".

Nel caso di condizioni atmosferiche stabili il layer inferiore si mantiene sempre parallelo al suolo e tende ad impattare il rilievo; al massimo può distribuirsi sul piano su cui giace e aggirare l'ostacolo. Il layer superiore invece tende a seguire la conformazione del terreno e quindi sale verso l'alto.

In condizioni di neutralità o instabilità atmosferica entrambi i layer tendono ad innalzarsi sormontando l'ostacolo.

Va sottolineato che, al contrario di modelli matematici appositamente dedicati quali CTDMPLUS, AERMOD non è in grado di tenere conto dello spostamento laterale dei layer ma considera soltanto lo spostamento verticale: si trascurano pertanto gli effetti di channelling o canyon presso i rilievi.

AERMOD assume che la concentrazione presso un recettore collocato in un certo punto di una collina o montagna sia compresa tra due valori limite: il primo valore si ottiene nel caso di assoluta stabilità atmosferica ossia quando l'intero pennacchio è costretto a mantenersi orizzontale, mentre il secondo valore si ottiene nel caso di assoluta instabilità atmosferica ovvero quando tutto il pennacchio risale il rilievo. AERMOD utilizza allora la seguente espressione per il calcolo della concentrazione al recettore $R(x_r, y_r, z_r)$:

$$C_{TCBL}(x_r, y_r, z_r) = f * C_{CBL}(x_r, y_r, z_r) + (1 - f) * C_{CBL}(x_r, y_r, z_p) \quad (1.110)$$

$$C_{TSBL}(x_r, y_r, z_r) = f * C_{SBL}(x_r, y_r, z_r) + (1 - f) * C_{SBL}(x_r, y_r, z_p) \quad (1.111)$$

dove:

$C_{TCBL}(x_r, y_r, z_r)$ è la concentrazione totale al recettore nel caso in cui si sia instaurato il CBL

$C_{TSBL}(x_r, y_r, z_r)$ è la concentrazione totale al recettore nel caso in cui si sia instaurato l'SBL

$C_{CBL}(x_r, y_r, z_r)$ è la concentrazione al recettore, nel caso di assoluta stabilità atmosferica, riferita poi al CBL

$C_{SBL}(x_r, y_r, z_r)$ è la concentrazione al recettore, nel caso di assoluta stabilità atmosferica, riferita poi all'SBL

$C_{CBL}(x_r, y_r, z_p)$ è la concentrazione al recettore, nel caso di assoluta instabilità atmosferica, riferita poi al CBL

$C_{SBL}(x_r, y_r, z_p)$ è la concentrazione al recettore, nel caso di assoluta instabilità atmosferica, riferita poi all'SBL

z_p è l'altezza del recettore rispetto al terreno

z_r è l'altezza del recettore rispetto al piano su cui giace la base della sorgente

f è la funzione peso

Ovviamente in caso di forte stabilità atmosferica $f * C_{SBL}(x_r, y_r, z_r)$ tenderà a prevalere su $(1 - f) * C_{SBL}(x_r, y_r, z_p)$, in modo opposto si ragiona nel caso di forte instabilità.

La Figura 1.17 rappresenta graficamente il metodo applicato.

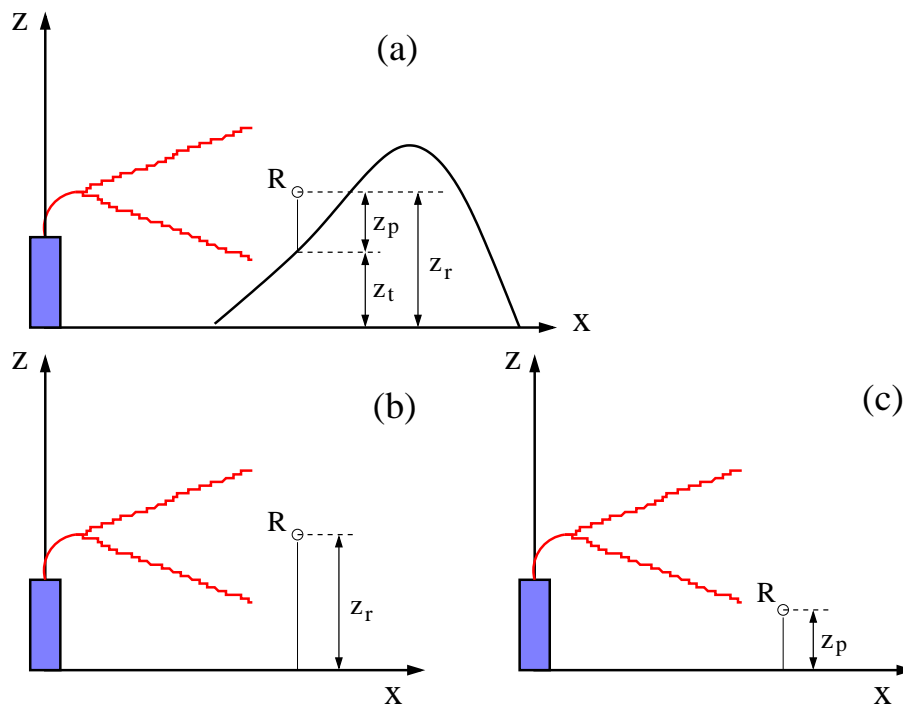


Figura 1.17: AERMOD e il trattamento di conformazioni complesse del terreno

(a) Il caso reale

(b) Il caso di assoluta stabilità atmosferica

(c) Il caso di assoluta instabilità atmosferica

Nel nostro caso l'area di studio è costituita da un terreno piano e quindi $z_p \equiv z_r$ e quindi dalle equazioni 1.110 e 1.111 discendono le identità:

$$C_{TCBL}(x_r, y_r, z_r) = C_{CBL}(x_r, y_r, z_r) \quad (1.112)$$

$$C_{TSBL}(x_r, y_r, z_r) = C_{SBL}(x_r, y_r, z_r) \quad (1.113)$$

Non vengono perciò utilizzate le routines di AERMOD per terreni complessi.

Per completezza si può notare che AERMAP richiede all'utente i seguenti dati in input:

- le coordinate delle sorgenti inquinanti;
- le coordinate dei recettori;
- le coordinate di punti t , spaziate tra loro a discrezione dell'utente, atti a rappresentare il suolo nell'area di studio.

Al fine di conferire una certa omogeneità al terreno AERMAP calcola per ogni recettore l'altezza effettiva definita come segue:

$$h_{eff}(x_t, y_t) = z_t * f_t \left(\frac{r_{rt}}{r_0} \right) \quad (1.114)$$

dove:

$$f_t \left(\frac{r_{rt}}{r_0} \right) = \exp \left(-\frac{r_{rt}}{r_0} \right) \quad (1.115)$$

$$r_{rt} = \sqrt{(x_r - x_t)^2 + (y_r - y_t)^2} \quad (1.116)$$

$$r_0 = 10 * \Delta h_{max} \quad (1.117)$$

f_t è dunque una funzione peso, r_{rt} è la distanza tra ogni singolo punto t e il recettore in oggetto, e Δh_{max} è la differenza tra la z_t del punto più alto e la z_t di quello più basso, ovvero è il massimo dislivello verticale.

Per ciascun recettore allora si definisce la height scale, h_c , come:

$$h_c(x_r, y_r) = \frac{\max[h_{eff}]}{f_t \left(\frac{r_{rt}}{r_0} \right)} \quad (1.118)$$

h_c è a sua volta utilizzata per il calcolo di f , la funzione peso che compare nelle 1.110 e 1.111, che però, come abbiamo visto, si elide.

Nel nostro caso inoltre si conclude immediatamente che $\Delta h_{max} = 0$ e da ciò discende che $h_c = 0$ e a questo risultato si giunge sempre per qualsiasi studio venga condotto su un'area piana. Ne consegue che lo scopo di AERMAP si riduce a passare ad AERMOD le coordinate delle sorgenti e dei recettori: ciò è perfettamente realizzato mediante EDMS.

Si è quindi dimostrato che l'esclusione di AERMAP dal pacchetto software AERMOD-EDMS è giustificata.

1.3.7 Il calcolo delle concentrazioni nel CBL

AERMOD presuppone che in condizioni di instabilità atmosferica il pennacchio sia soggetto al fenomeno noto come looping, ovvero un movimento alterno verso il suolo e verso l'alto. Rilevamenti in situ hanno evidenziato che il movimento verso il basso interessa zone molto più estese rispetto a quello verso l'alto. Tutto ciò porta a ripercussioni sulla distribuzione delle concentrazioni di inquinante.

In particolare la distribuzione delle concentrazioni lungo l'asse verticale viene ottenuta sovrapponendo le distribuzioni gaussiane dovute al solo movimento del pennacchio verso l'alto e al solo movimento verso il basso, realizzando in questo modo un profilo doppio-gaussiano. La distribuzione delle concentrazioni lungo l'asse orizzontale è invece ritenuta gaussiana. Questo porta alla definizione di un pennacchio rielaborato, schematizzato in Figura 1.18; z_c è l'altezza del centroide geometrico assunto coincidente con il centro di massa.

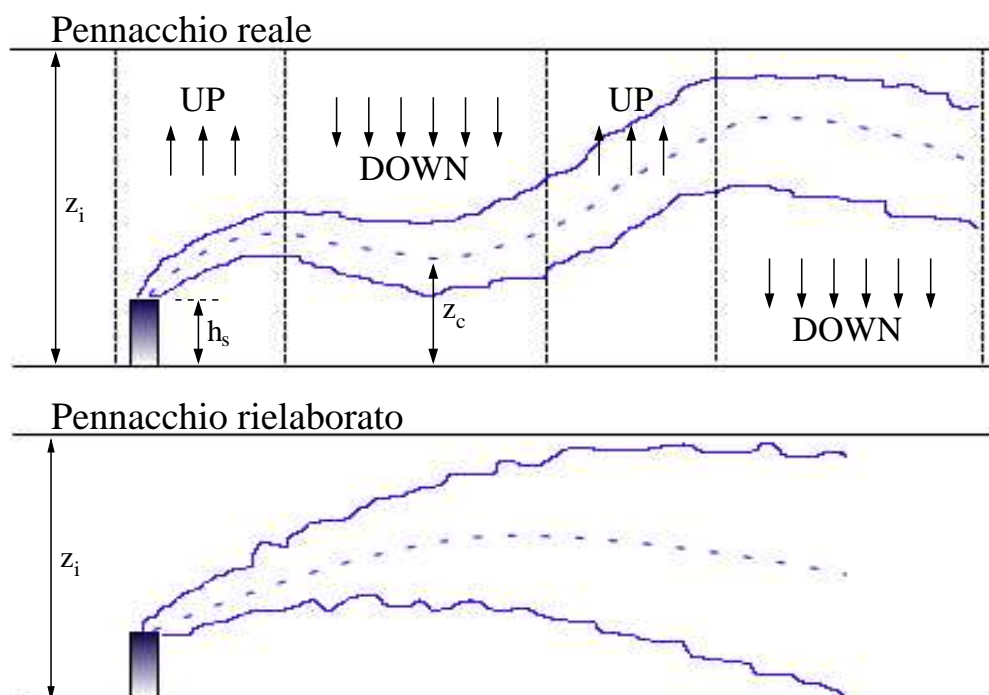


Figura 1.18: Il looping del pennacchio e la sua rielaborazione

Il modello tiene conto anche della possibilità che parte del materiale del pennacchio, raggiunta la sommità del CBL, venga riflessa verso il basso con conseguente aumento del-

la concentrazione di inquinante. Tale materiale può tuttavia permanere per qualche tempo, a causa della buoyancy, al limite superiore del CBL prima di ricadere definitivamente nello strato inferiore; in questo caso AERMOD ne ritarda il rientro.

Inoltre, parte del materiale del pennacchio può, sempre a causa della buoyancy, penetrare all'interno dello strato stabile presente al di sopra del CBL, noto come zona di intrusione, e successivamente ritornare nel layer inferiore.

Per tenere conto di questi diversi comportamenti del materiale di cui è costituito il pennacchio AERMOD definisce per ogni sorgente reale tre sorgenti fittizie:

sorgente diretta è la sorgente le cui emissioni raggiungono direttamente il recettore senza passare per altri layer. Il suo pennacchio è soggetto a looping e viene rielaborato come visto in Figura 1.18;

sorgente indiretta è la sorgente che emette la parte del pennacchio reale che viene riflessa all'interno del CBL e che può essere soggetta a lofting ad una altezza pari a z_i . AERMOD la rappresenta come una sorgente del tutto analoga alla sorgente diretta ma speculare ad essa rispetto al piano parallelo al suolo e passante per z_i ;

sorgente penetrata è la sorgente che emette la parte del pennacchio reale che penetra nella zona di intrusione e successivamente rientra nel CBL. AERMOD suppone che la sorgente penetrata giaccia in un layer, il cui spessore è pari alla plume rise della sorgente indiretta Δh_i , posto al di sopra del CBL.

La Figura 1.19 schematizza le tre sorgenti ideali definite da AERMOD.

La concentrazione di inquinante al recettore $R(x_r, y_r, z_r)$ risulta quindi dalla somma di tre contributi, uno per ogni sorgente fittizia:

$$C_c(x_r, y_r, z_r) = C_d(x_r, y_r, z_r) + C_r(x_r, y_r, z_r) + C_p(x_r, y_r, z_r) \quad (1.119)$$

dove:

$C_c(x_r, y_r, z_r)$ è la concentrazione totale di un certo inquinante nel CBL presso il recettore R

$C_d(x_r, y_r, z_r)$ è il contributo alla concentrazione totale dato dalla sorgente diretta

$C_r(x_r, y_r, z_r)$ è il contributo alla concentrazione totale dato dalla sorgente indiretta

$C_p(x_r, y_r, z_r)$ è il contributo alla concentrazione totale dato dalla sorgente penetrata

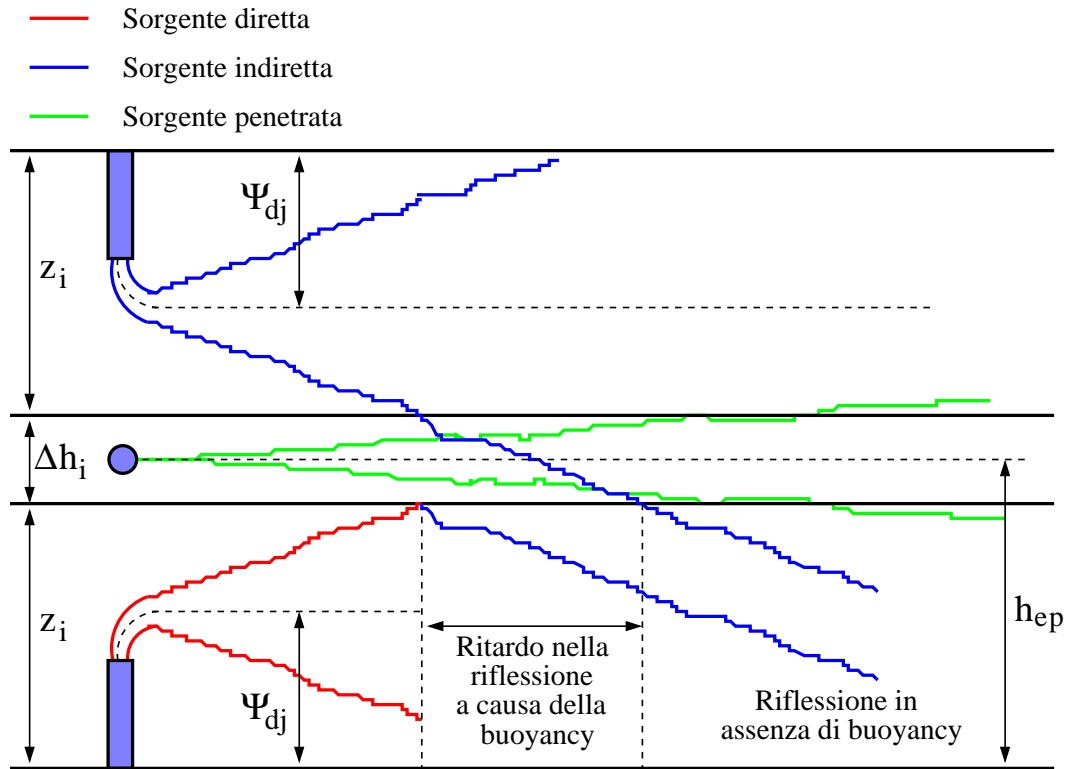


Figura 1.19: Le tre sorgenti fittizie definite da AERMOD

La frazione f_p di materiale del pennacchio che permane all'interno e sulla sommità del CBL, ovvero la frazione di materiale imputabile alle sorgenti diretta e indiretta, viene calcolata mediante le equazioni empiriche di Berkowicz:

$$f_p = \begin{cases} 0 & \text{se } \Delta h_h < 0.5 * \Delta h_{eq} \\ \frac{\Delta h_h}{\Delta h_{eq}} - 0.5 & \text{se } 0.5 * \Delta h_{eq} \leq \Delta h_h \leq 1.5 * \Delta h_{eq} \\ 1 & \text{se } \Delta h_h > 1.5 * \Delta h_{eq} \end{cases} \quad (1.120)$$

dove $\Delta h_h = z_i - h_s$ è la differenza tra la mixing height e l'altezza di emissione, Δh_{eq} è la plume rise che secondo Berkowicz può essere espressa come:

$$\Delta h_{eq} = \left(2.6^3 * P_s + \left(\frac{2}{3} \right)^3 \right)^{\frac{1}{3}} * \Delta h_h \quad (1.121)$$

con:

$$P_s = \frac{F_b}{u_p * \Delta h_h^3 * \frac{g}{\Theta(z_i)} * 0.005} \quad (1.122)$$

$$F_b = g * w_s * r_s^2 * \frac{\Delta T_s}{T_s} \quad (1.123)$$

F_b è il buoyancy flux, già incontrato nei precedenti paragrafi, mentre u_p è la velocità all'altezza h_s espressa in m/s . Si nota inoltre che l'accelerazione di gravità g si intende espressa in m/s^2 , la temperatura potenziale Θ , la temperatura T_s e ΔT_s in K , Δh_h ed r_s in m , w_s in m/s .

Dall'equazione 1.120 discende che AERMOD considera trascurabile la frazione di materiale che permane nel CBL quando la distanza tra il punto di emissione e la mixing height è inferiore alla metà della plume rise. In questo caso si avrà soltanto il contributo della sorgente penetrata.

Se invece la distanza tra il punto di emissione e z_i è superiore ad una volta e mezza la plume rise si trascura completamente la quantità di inquinante che penetra nella zona di intrusione. Si avrà quindi soltanto il contributo della sorgente diretta e di quella indiretta.

Nel caso particolare in cui $\Delta h_h = z_i - h_s = \Delta h_{eq}$ si osserva che la quantità di materiale del pennacchio che penetra nella zona di intrusione e quella che permane nel CBL sono uguali.

Dalla stessa definizione di f_p discende che in generale la frazione di inquinante che penetra nella zona di intrusione è pari a $(1 - f_p)$.

Si sottolinea infine che quanto sin qui asserito vale unicamente per sorgenti stazionarie puntiformi. Nel caso di sorgenti superficiali o volumetriche non vengono definite dal modello le sorgenti fittizie indirette e penetrate ma si hanno unicamente quelle dirette. Allo stato attuale questo appare come un evidente limite del modello per tutte quelle aree di studio in cui le sorgenti stazionarie puntiformi, per numero o per quantità di inquinanti emessa, risultino confrontabili con le sorgenti superficiali e volumetriche.

Il contributo della sorgente diretta

Il contributo della sorgente diretta alla concentrazione totale di inquinante viene calcolato mediante l'equazione di Weil che consiste in una rielaborazione semiempirica della generica 1.26:

$$C_d(x_r, y_r, z_r) = \frac{Q f_p}{2\pi \sigma_y u} \exp \left[-\frac{1}{2} \left(\frac{y_r}{\sigma_y} \right)^2 \right] \sum_{j=1}^2 \sum_{m=0}^{\infty} \frac{\lambda_j}{\sigma_{zj}} * \left\{ \exp \left[-\frac{1}{2} \left(\frac{z_r - \Psi_{dj} - 2mz_i}{\sigma_{zj}} \right)^2 \right] + \exp \left[-\frac{1}{2} \left(\frac{z_r + \Psi_{dj} + 2mz_i}{\sigma_{zj}} \right)^2 \right] \right\} \quad (1.124)$$

In questa espressione Q identifica la portata di inquinante emessa dalla sorgente e quindi $Q * f_p$ è la portata di inquinante che rimane all'interno del CBL. Ovviamente Q è determinato da EDMS come visto nei paragrafi dedicati alla simulazione di emissione.

La velocità del vento u è intesa in questa espressione come velocità effettiva, calcolata secondo quanto asserito al Paragrafo 1.3.5. Osservando la sommatoria in j , si distinguono i due termini dovuti alla rielaborazione del pennacchio: $j = 1$ tiene conto della distribuzione gaussiana imputabile al solo spostamento del pennacchio verso l'alto, $j = 2$ al solo spostamento verso il basso mentre i λ_j sono i corrispondenti coefficienti peso. m è un termine di compensazione che evita discontinuità nella distribuzione di concentrazioni. Come si può osservare, per una esatta compensazione m dovrebbe variare da zero ad infinito; non disponendo ovviamente di un tempo illimitato per giungere al risultato, la sommatoria si interrompe quando due valori consecutivi di C_d per un certo recettore differiscono di meno dell'1%.

I coefficienti peso λ_j sono proporzionali alla velocità media verticale:

$$\lambda_1 = \frac{\bar{w}_2}{\bar{w}_2 - \bar{w}_1} \quad (1.125)$$

$$\lambda_2 = \frac{\bar{w}_1}{\bar{w}_1 - \bar{w}_2} \quad (1.126)$$

$$(1.127)$$

Si nota che essendo sempre, come dimostrato sperimentalmente, $|\bar{w}_2| < |\bar{w}_1|$, nonchè $\bar{w}_2 < 0$ perchè diretto con verso opposto all'asse z , si ottiene $\lambda_j > 0$ per $j = 1, 2$.

A loro volta le velocità verticali medie vengono determinate dalle espressioni empiriche:

$$\bar{w}_j = a_j * w_* \quad \text{per } j = 1, 2 \quad (1.128)$$

$$a_1 = \frac{\sigma_{wT}}{w_*} * \frac{1}{w_*} * \frac{\alpha * S}{2} + \frac{1}{2} * \sqrt{\alpha^2 * S^2 + \frac{4}{\beta}} \quad (1.129)$$

$$a_2 = \frac{\sigma_{wT}}{w_*} * \frac{1}{w_*} * \frac{\alpha * S}{2} - \frac{1}{2} * \sqrt{\alpha^2 * S^2 + \frac{4}{\beta}} \quad (1.130)$$

avendosi $\alpha = 5/13$, $\beta = 5$, mentre per S :

$$S = \begin{cases} 0.125 * \left(\frac{w_*}{\sigma_{wT}} \right)^3 & \text{se } H_p(x_r) > 0.1z_i \\ 1.25 * \frac{H_p x_r}{z_i} * \left(\frac{w_*}{\sigma_{wT}} \right)^3 & \text{se } H_p(x_r) \leq 0.1z_i \end{cases} \quad (1.131)$$

Il termine Ψ_{dj} presente nella 1.124 è l'altezza effettiva della sorgente diretta. Essa viene espressa come somma di tre termini:

$$\Psi_{dj} = h_s + \Delta h_d + \frac{\bar{w}_j * x_r}{\underline{u}} \quad \text{per } j = 1, 2 \quad (1.132)$$

dove:

h_s è l'altezza di rilascio dell'inquinante

Δh_d è la plume rise per la sorgente diretta e viene calcolata per le sole sorgenti stazionarie puntiformi

$\bar{w}_j * x_r / \underline{u}$ è un termine correttivo che tiene conto dei moti convettivi cui è soggetto il CBL

Per il calcolo di Δh_d e delle deviazioni standard σ_y e σ_{zj} si rimanda ai paragrafi seguenti.

Il contributo della sorgente indiretta

Il contributo alla concentrazione totale da parte della sorgente indiretta è valutato in modo del tutto analogo a quello per la sorgente diretta:

$$C_r(x_r, y_r, z_r) = \frac{Qf_p}{2\pi\sigma_y\underline{u}} \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{y_r}{\sigma_y}\right)^2\right] \sum_{j=1}^2 \sum_{m=0}^{\infty} \frac{\lambda_j}{\sigma_{zj}} * \left\{ \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{z_r + \Psi_{rj} - 2mz_i}{\sigma_{zj}}\right)^2\right] + \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{z_r - \Psi_{rj} + 2mz_i}{\sigma_{zj}}\right)^2\right] \right\} \quad (1.133)$$

I coefficienti peso λ_j sono ottenuti in modo del tutto analogo al caso della sorgente diretta mentre Ψ_{rj} non è semplicemente l'altezza effettiva della sorgente indiretta in quanto si deve tenere conto del rovesciamento di tale sorgente rispetto al piano passante per z_i e parallelo al suolo.

Si ottiene in questo modo:

$$\Psi_{rj} = h_s + \Delta h_r + \frac{\overline{w}_j * x_r}{\underline{u}} \quad (1.134)$$

$$\Delta h_r = \Delta h_d - \Delta h_i \quad (1.135)$$

Δh_d è la plume rise per la sorgente diretta, Δh_i è la plume rise per la sorgente indiretta per la cui determinazione si rimanda ai paragrafi seguenti e così pure per le deviazioni standard σ_y e σ_{zj} . La quantità $\overline{w}_j * x_r / \underline{u}$ tiene conto della buoyancy.

Il contributo della sorgente penetrata

L'equazione che esprime il contributo della sorgente penetrata alla concentrazione totale di inquinante presenta una forma semplicemente gaussiana:

$$C_p(x_r, y_r, z_r) = \frac{Q * (1 - f_p)}{2\pi u * \sigma_{yp} * \sigma_{zp}} \exp \left[-\frac{1}{2} \left(\frac{y_r}{\sigma_{yp}} \right)^2 \right] * \sum_{m=-\infty}^{\infty} \left\{ \exp \left[-\frac{(z_r - h_{ep} - 2mz_{ieff})^2}{2 * \sigma_{zp}^2} \right] + \exp \left[-\frac{(z_r + h_{ep} + 2mz_{ieff})^2}{2 * \sigma_{zp}^2} \right] \right\} \quad (1.136)$$

La sorgente penetrata è presente all'interno della zona di intrusione, uno strato stabile, e quindi nella 1.136 non compaiono i termini dovuti al looping del pennacchio.

h_{ep} è l'altezza della sorgente penetrata definita da Weil come:

$$h_{ep} = \begin{cases} h_s + \Delta h_{eq} & \text{se } f_p = 0 \\ \frac{h_s + z_i}{2} + 0.75 * \Delta h_{eq} & \text{se } f_p > 0 \end{cases} \quad (1.137)$$

Δh_{eq} si intende calcolato secondo l'espressione di Berkowicz 1.121 mentre h_s è ovviamente l'altezza di emissione per la sorgente diretta.

z_{ieff} è invece l'altezza del layer in cui si trova la sorgente penetrata. Trattandosi di uno strato stabile AERMOD assume che si possano applicare ad esso le medesime equazioni dell'SBL:

$$z_{ieff} = \max[(h_{ep} + 2.15 * \sigma_{zs}(h_{ep} - z_i)); z_{im}^p] \quad (1.138)$$

Il modello richiama dunque le equazioni 1.53 e 1.56 e addiziona al valore di z_{im} ottenuto la quantità z_i in quanto la sorgente penetrata non si trova in un layer a contatto con il suolo ma al di sopra della mixing height. Ciò porta al valore di z_{im}^p .

Si noti tuttavia che σ_{zs} viene determinata, mediante le stesse espressioni utilizzate per l'SBL che saranno descritte nel seguito, ad una altezza pari a $h_{ep} - z_i$ ovvero come se il layer fosse adagiato al suolo. Una sua valutazione all'altezza h_{ep} porterebbe infatti a un risultato falsato in quanto ciò equivarrebbe ad assumere stabile tutto lo strato sino ad h_{ep} ; in realtà sino a z_i si ha il CBL.

Si rimanda ai paragrafi seguenti il calcolo di σ_{yp} e σ_{zp} .

Ovviamente la sommatoria presente nella 1.136 richiede un tempo di elaborazione infinito; essa in realtà procede da 0 a infinito e da 0 a $-\infty$ sino a quando si ottengono due valori consecutivi di C_p che differiscono tra loro di meno dell'1%.

1.3.8 Il calcolo delle concentrazioni nell'SBL

Anche per il calcolo delle concentrazioni nell'SBL AERMOD sfrutta una rielaborazione, del tutto analoga a quella utilizzata dal noto programma di simulazione ISC3, dell'equazione generica 1.26.

In particolare AERMOD tiene conto del fatto che l'SBL, a differenza del CBL, non presenta un vero e proprio limite superiore ben definito e sarebbe poco realistico supporre che il materiale del pennacchio si disperda sino a raggiungere l'estremità superiore dello strato residuo. Il modello ha sviluppato quindi un approccio al problema definito "quasi-lid": inizialmente viene determinata l'altezza effettiva, h_{es} , del pennacchio una volta che si è stabilizzato, e successivamente quest'ultima viene confrontata con la mixing height meccanica z_{im} .

Se h_{es} è minore di z_{im} si assume che il pennacchio non possa penetrare negli strati atmosferici superiori e qualora raggiunga z_{im} si rifletta verso il basso. Se invece h_{es} è maggiore di z_{im} allora il pennacchio ha già di fatto raggiunto lo strato residuo ed è necessario ridefinire una altezza limite oltre la quale esso non si propaga. Tale altezza limite viene identificata con z_{ieff} ed è pari a h_{es} addizionato di 2.15 volte la deviazione standard della distribuzione verticale di concentrazioni σ_{zs} . Questa definizione di altezza limite è stata sviluppata interamente su base empirica dal team di sviluppo del modello.

Per il calcolo di σ_{zs} si rimanda ai paragrafi seguenti ma si anticipa sin d'ora che essa dipende da σ_w , la deviazione standard della distribuzione di velocità verticali. Inoltre, essendo lo strato residuo caratterizzato da condizioni molto prossime alla neutralità atmosferica, i valori di σ_w calcolati per questo layer sono molto modesti e di conseguenza sono relativamente piccoli anche i valori di σ_{zs} . Si conclude che la riflessione del pennacchio in queste condizioni comporta un aumento della concentrazione di inquinante estremamente contenuta e non paragonabile a quanto accade nel CBL.

L'espressione utilizzata per il calcolo delle concentrazioni è dunque:

$$C_s(x_r, y_r, z_r) = \frac{Q}{\sqrt{2\pi} * \underline{u} * \sigma_{zs}} * F_y * \sum_{m=-\infty}^{\infty} \left\{ \exp \left[-\frac{(z_r - h_{es} - 2mz_{ieff})^2}{2 * \sigma_{zs}^2} \right] + \exp \left[-\frac{(z_r + h_{es} + 2mz_{ieff})^2}{2 * \sigma_{zs}^2} \right] \right\} \quad (1.139)$$

Inoltre per quanto asserito:

$$z_{ieff} = \max [h_{es} + 2.15 * \sigma_{zs}(h_{es}); z_{im}] \quad (1.140)$$

Si può notare che nell'equazione 1.139 compare il termine F_y che tiene conto della presenza nell'SBL di vortici non diffusivi, noti come "meanders". La presenza dei "meanders" nel CBL è ritenuta trascurabile.

Questi vortici non diffusivi producono uno spostamento laterale degli inquinanti nella direzione in cui spirava il vento, compromettendo la coerenza di forma del pennacchio a grandi distanze dalla sorgente. F_y viene ottenuta interpolando i risultati relativi a due condizioni limite.

Se i vortici sono del tutto assenti si ottiene che la 1.139 diviene un' espressione del tutto analoga a quella per il CBL, da cui:

$$F_{yc} = \frac{1}{\sqrt{2\pi} * \sigma_y} * \exp \left(-\frac{y}{2\sigma_y} \right)^2 \quad (1.141)$$

Nel caso in cui i vortici siano molto intensi AERMOD assume che il materiale del pennacchio venga uniformemente distribuito in ogni direzione, ovvero su un angolo pari a 2π , pervenendo a:

$$F_{yr} = \frac{1}{2\pi * x_r} \quad (1.142)$$

Si nota tuttavia che per recettori prossimi alla sorgente o comunque prossimi all'origine degli assi, $x_r \rightarrow 0$, l'espressione 1.142 tende ad infinito, $F_{yr} \rightarrow \infty$, perdendo di significato fisico. Per evitare che ciò accada si ridefinisce F_{yr} come:

$$F_{yr} = \min \left[\frac{1}{2\pi * x_r}; F_{yc} \right] \quad (1.143)$$

Per interpolare tra i due valori estremi di F_{yc} ed F_{yr} AERMOD considera l'energia cinetica del vento. In particolare, si può pensare che vicino alla sorgente su un piano parallelo al suolo, la velocità del vento sia costituita da un termine medio \bar{u} , una componente casuale diretta lungo u , σ_u , e una componente casuale laterale σ_v . Il calcolo di u e di σ_v

è già stato affrontato nei paragrafi precedenti, mentre nulla si può dire per σ_u . AERMOD suppone tuttavia che $\sigma_u = \sigma_v$ e conclude che l'energia cinetica del vento è proporzionale a σ_h^2 :

$$\sigma_h^2 = 2 * \sigma_v^2 + \bar{u}^2 \quad (1.144)$$

Il termine medio \bar{u} è inteso da AERMOD come:

$$\bar{u} = \sqrt{\underline{u}^2 - 2 * \sigma_v^2} \quad (1.145)$$

Per periodi di tempo molto piccoli, il che nel nostro caso si traduce in un arco temporale di poche ore, si può pensare che il termine casuale e il termine medio della velocità siano tra loro confrontabili, mentre per periodi di tempo più lunghi, dell'ordine cioè delle 24 ore, il termine casuale sia preponderante su quello medio. In altre parole, in periodi di tempo lunghi si assiste ad una distribuzione dell'inquinante in ogni direzione dello spazio, mentre per periodi più brevi si deve tenere conto del contributo, in una specifica direzione, del termine medio. Di ciò si tiene conto nella seguente formulazione:

$$\sigma_r^2 = 2 * \sigma_v^2 + \bar{u}^2 * \left[1 - \exp\left(-\frac{x_r}{\underline{u} * T_r}\right) \right] \quad (1.146)$$

T_r è in questo caso una scala temporale che varia da 1 a 24 ore e viene fissata dall'operatore a seconda dell'arco temporale in cui desidera svolgere la simulazione. Ovviamente è possibile specificare anche archi temporali superiori ma il risultato non cambia: il materiale si intende comunque uniformemente distribuito in ogni direzione dello spazio (possono tuttavia cambiare i valori di emissione e le relative concentrazioni al recettore).

Si nota quindi dalla 1.146 che per piccoli valori di T_r si ottiene $\sigma_r^2 \simeq \sigma_h^2$, per elevati valori di T_r , $\sigma_r^2 \simeq 2 * \sigma_v^2$.

σ_r^2 / σ_h^2 può essere inteso come il rapporto tra l'energia cinetica dovuta a moti casuali e l'energia cinetica totale, ovvero la percentuale di energia cinetica dovuta a moti casuali posseduta dalle masse d'aria in movimento.

AERMOD interpola allora F_y secondo la seguente espressione:

$$F_y = F_{yc} * \left(1 - \frac{\sigma_r^2}{\sigma_h^2} \right) + F_{yr} * \frac{\sigma_r^2}{\sigma_h^2} \quad (1.147)$$

1.3.9 Le deviazioni standard per sorgenti stazionarie puntiformi

Nel CBL le deviazioni standard delle distribuzioni laterali e verticali di concentrazione per sorgenti stazionarie puntiformi vengono espresse come somma di tre contributi:

- il contributo dovuto alla turbolenza ambientale, σ_{ya} e σ_{zaj} , dove $j = 1, 2$ tiene conto del looping del pennacchio per le sorgenti dirette;
- il contributo dovuto alla buoyancy, σ_b ;
- il contributo dovuto al building downwash, ovvero il downwash causato dalla presenza di ostacoli quali alti palazzi e grandi costruzioni in genere, σ_{yd} e σ_{zd} .

Il termine dovuto al building downwash viene calcolato soltanto per le sorgenti dirette e quindi si può concludere che per questo tipo di sorgenti si ha:

$$\sigma_y^2 = \sigma_{ya}^2 + \sigma_b^2 + \sigma_{yd}^2 \quad (1.148)$$

$$\sigma_z^2 = \sigma_{zaj}^2 + \sigma_b^2 + \sigma_{zd}^2 \quad (1.149)$$

Per una sorgente indiretta:

$$\sigma_y^2 = \sigma_{ya}^2 + \sigma_b^2 \quad (1.150)$$

$$\sigma_z^2 = \sigma_{zaj}^2 + \sigma_b^2 \quad (1.151)$$

Per una sorgente penetrata cambia soltanto la notazione rispetto alla sorgente indiretta:

$$\sigma_{yp}^2 = \sigma_{yap}^2 + \sigma_b^2 \quad (1.152)$$

$$\sigma_{zp}^2 = \sigma_{zap}^2 + \sigma_b^2 \quad (1.153)$$

Nell'SBL non si ha la distinzione tra sorgenti dirette, indirette e penetrate ma si ha una unica sorgente diretta e quindi rispetto alle 1.148 e 1.149 cambia soltanto la notazione:

$$\sigma_{ys}^2 = \sigma_{yas}^2 + \sigma_{bs}^2 + \sigma_{yd}^2 \quad (1.154)$$

$$\sigma_{zs}^2 = \sigma_{zas}^2 + \sigma_{bs}^2 + \sigma_{zd}^2 \quad (1.155)$$

Si noti tuttavia che EDMS non tiene conto del building downwash e non offre la possibilità di immissione di dati da parte dell'utente relativamente alla presenza di edifici di grandi dimensioni nell'area di interesse. Si conclude pertanto che nel nostro caso $\sigma_{yd} = \sigma_{zd} = 0$. Questa caratteristica può essere ritenuta accettabile per il presente studio in quanto l'aeroporto non è inserito in un contesto metropolitano e non sono presenti grattacieli o altre costruzioni di notevole altezza nell'area di studio.

Il contributo della turbolenza ambientale

Nel CBL per sorgenti dirette e indirette la deviazione standard della distribuzione laterale di concentrazioni viene determinata mediante un adattamento empirico dell'equazione sviluppata a seguito dell'esperienza di Prairie Grass ⁸ :

$$\sigma_{ya} = \frac{\sigma_{vT} * x}{\underline{u} * (1 + \alpha * X)^{0.3}} \quad (1.156a)$$

$$X = \frac{\sigma_{vT} * x}{\underline{u} * z_i} \quad (1.156b)$$

Nell'ambito di tale esperienza il coefficiente α viene definito come il rapporto tra la mixing height e l'altezza effettiva del pennacchio stabilizzato, $\alpha = z_i/h_{ed}$. Si noti che h_{ed} differisce dall'altezza effettiva del pennacchio stabilizzato che si può osservare nell'equazione 1.132 e che viene effettivamente utilizzata da AERMOD. h_{ed} è definita come:

$$h_{ed} = h_s + \Delta h_d \quad (1.157)$$

⁸Con il termine "esperienza di Prairie Grass" o "esperienza della prateria" ci si riferisce in realtà ad una serie di esperienze condotte a partire dalla metà degli anni ottanta finalizzate alla determinazione della quantità di inquinanti assorbita dalla vegetazione nelle praterie americane. Recentemente i risultati di questi studi sono stati impiegati per la valutazione degli effetti di tali inquinanti sugli animali erbivori di allevamento.

L'equazione 1.156 è stata rielaborata da Barad il quale ha posto $\alpha = 78$ mentre il team di sviluppo di AERMOD, a seguito del confronto tra le simulazioni e le misurazioni in situ, ha preferito utilizzare la seguente espressione:

$$\alpha = \max \left[78 * \frac{z_{PG}}{h_s}; 0.7 \right] \quad (1.158)$$

z_{PG} è l'altezza di rilascio nel caso dell'esperienza di Prairie Grass, ovvero $z_{PG} = 0.46 \text{ m}$.

Nell'SBL, in cui si ricorda che si considerano solo le sorgenti dirette, si sfrutta un'equazione del tutto analoga a quella per il CBL e sempre derivata dall'esperienza di Prairie Grass:

$$\sigma_{yas} = \frac{\underline{\sigma}_{vT} * x}{\underline{u} * \left(1 + \frac{x}{2 * \underline{u} * \underline{T}_{Lys}} \right)^{0.3}} \quad (1.159)$$

dove \underline{T}_{Lys} è il valore effettivo della scala dei tempi lagrangiana per l'SBL definita come:

$$\underline{T}_{Lys} = \frac{z_{im} * z_{max}}{z_{PG} * 156 * \underline{\sigma}_{vm}} \quad (1.160a)$$

$$z_{max} = \max[z; z_{PG}] \quad (1.160b)$$

Per la sorgente penetrata nel CBL le espressioni utilizzate sono del tutto analoghe a quelle per la sorgente diretta nell'SBL.

Nelle precedenti espressioni x e z identificano ovviamente le coordinate del punto in cui si intende valutare la deviazione standard.

Per il calcolo della deviazione standard della distribuzione verticale di concentrazioni nell'SBL, σ_{zas} , AERMOD interpola tra due valori limite: la deviazione standard presso la superficie σ_{zss} e la deviazione standard in quota presso la mixing height σ_{zes} :

$$\sigma_{zas} = \left(1 - \frac{h_{es}}{z_{im}} \right) * \sigma_{zss} + \left(\frac{h_{es}}{z_{im}} \right) * \sigma_{zes} \quad (1.161)$$

σ_{zes} è definita secondo Venkatram come:

$$\sigma_{zes} = \frac{\underline{\sigma}_{wT} * x}{\underline{u} * \left(1 + \frac{x}{2 * \underline{u} * T_{Lzs}}\right)^{\frac{1}{2}}} \quad (1.162)$$

La definizione di scala dei tempi lagrangiana per l'SBL, T_{Lzs} , è la stessa utilizzata dal modello CTDMPLUS:

$$T_{Lzs} = \frac{l * x}{4 * \underline{u} * \underline{\sigma}_{wT}} \quad (1.163)$$

$$\frac{1}{l} = \frac{1}{l_n} + \frac{1}{l_s} \quad (1.164)$$

$$l_n = 0.36 * h_{es} \quad (1.165)$$

$$l_s = 0.27 * \frac{\underline{\sigma}_{wT}}{N} \quad (1.166)$$

N è la frequenza di Brunt-Vaisala, espressa in s^{-1} , definita come la frequenza con cui oscilla, nel piano verticale, una particella d'aria spostata dalla sua posizione di equilibrio:

$$N = \sqrt{\frac{g}{\Theta} * \frac{d\Theta}{dz}} \quad (1.167)$$

Si è già visto al Paragrafo 1.3.5 come procedere al calcolo della temperatura potenziale e del suo gradiente.

Per condizioni prossime alla neutralità atmosferica N diviene molto piccola e quindi $l \simeq l_n$; in condizioni di forte stabilità atmosferica si ottiene invece $l \simeq l_s$.

Sostituendo l'equazione 1.163 nella 1.162 si ha:

$$\sigma_{zes} = \frac{\underline{\sigma}_{wT} * x}{\underline{u} * \left[1 + 2 * \underline{\sigma}_{wT} * \left(\frac{1}{0.36 * h_{es}} + \frac{N}{0.27 * \underline{\sigma}_{wT}}\right)\right]^{\frac{1}{2}}} \quad (1.168)$$

σ_{zss} viene invece definita da Venkatram come:

$$\sigma_{z_{ss}} = \sqrt{\frac{2}{\pi}} * \frac{u_* * x}{\underline{u}} * \left(1 + 0.7 * \frac{x}{L}\right)^{-\frac{1}{3}} \quad (1.169)$$

Si ricorda che L è la lunghezza di Monin-Obukhov definita secondo l'equazione 1.38.

Anche per il calcolo delle deviazioni standard delle distribuzioni verticali di concentrazione nel CBL, $\sigma_{z_{aj}}$, per sorgenti dirette e indirette, AERMOD ricorre alla definizione di un termine valutato presso la superficie, $\sigma_{S_{z_{aj}}}$, ed uno in quota presso la mixing height, $\sigma_{E_{z_{aj}}}$:

$$\sigma_{z_{aj}}^2 = \sigma_{S_{z_{aj}}}^2 + \sigma_{E_{z_{aj}}}^2 \quad (1.170)$$

$\sigma_{E_{z_{aj}}}$ viene fornito dalla seguente espressione empirica:

$$\sigma_{E_{z_{aj}}} = \alpha_b * \left[b_j * \frac{w_* * x}{\underline{u}} \right] \quad (1.171a)$$

$$b_j = \begin{cases} 2 * a_j & \text{se } j = 1 \\ -2 * a_j & \text{se } j = 2 \end{cases} \quad (1.171b)$$

Le a_j sono determinate mediante le espressioni 1.129 e 1.130, mentre α_b è definita secondo:

$$\alpha_b = \begin{cases} 0.6 + 0.4 * \left(\frac{H_p}{0.1 * z_i} \right) & \text{per } H_p < 0.1 * z_i \\ 1.0 & \text{per } H_p \geq 0.1 * z_i \end{cases} \quad (1.172)$$

In particolare il termine 0.6 presente in questa espressione è stato introdotto per dare una certa continuità dei valori per le deviazioni standard nel passaggio da CBL ad SBL e viceversa, ovvero in condizioni di neutralità atmosferica. In questo caso infatti $\sigma_{S_{z_{aj}}}$ tende ad annullarsi e complessivamente $\sigma_{z_{aj}}$ tende a $0.6 * b_j * w_* * x / \underline{u}$. Parallelamente in condizioni di neutralità il termine $0.7 * x / L$ presente nella 1.169 diviene trascurabile rispetto all'unità e così pure h_{es} / z_{im} ; dalla 1.161 discende allora che:

$$\sigma_{zas} \simeq \sqrt{\frac{2}{\pi}} * \frac{u_* * x}{\underline{u}} \simeq 0.8 * \frac{u_* * x}{\underline{u}}$$

I valori ottenuti dalle due espressioni per σ_{zaj} e σ_{zas} sono tra loro prossimi e da ciò la continuità.

L'espressione utilizzata per il computo di σ_{Sza_j} discende dalla relazione di proporzionalità definita da Venkatram:

$$\sigma_{Sza_j} \propto \left(\frac{u_*}{\underline{u}} \right)^2 * \frac{x^2}{|L|} \quad (1.173)$$

Il team di sviluppo di AERMOD ha poi rielaborato questa espressione giungendo alla definitiva:

$$\sigma_{Sza_j} = \begin{cases} 0.5 * \left[1 - 10 * \frac{H_p}{z_i} \right] * \left(\frac{u_*}{\underline{u}} \right)^2 * \frac{x^2}{|L|} & \text{per } \frac{H_p}{z_i} < 0.1 \\ 0 & \text{per } \frac{H_p}{z_i} \geq 0.1 \end{cases} \quad (1.174)$$

Ciò in accordo col fatto che si tratta di un termine superficiale, e quindi deve tendere ad annullarsi all'aumentare dell'altezza della sorgente e di conseguenza all'aumentare di H_p/z_i .

La sorgente penetrata è una sorgente che giace in un layer stabile, la zona di intrusione, molto lontano dal suolo terrestre e quindi la deviazione standard della distribuzione verticale delle concentrazioni σ_{zap} non risente del termine superficiale:

$$\sigma_{zap} = \sigma_{Ezap} \quad (1.175)$$

σ_{Ezap} è valutato in modo del tutto analogo alla σ_{zes} della equazione 1.168:

$$\sigma_{zap} = \frac{\underline{\sigma}_{wT} * x}{\underline{u} * \left[1 + 2 * \underline{\sigma}_{wT} * \frac{1}{0.36 * h_{ep}} \right]^{\frac{1}{2}}} \quad (1.176)$$

Si noti che in questa espressione si assiste all'annullamento della frequenza di Brunt-Vaisala, $N = 0$, come nel caso di neutralità atmosferica (in cui $d\Theta/dz = 0$). Ciò è giustificato dal fatto che le particelle inquinanti della sorgente penetrata passano da CBL, strato instabile, a zona di intrusione, strato stabile, e viceversa e quindi sono ritenute dal modello in condizioni intermedie, ovvero di neutralità.

Il contributo della buoyancy

Per determinare il contributo dovuto alla buoyancy, σ_b , AERMOD utilizza le formule empiriche di Weil. Per le sorgenti dirette e indirette nel CBL si ha:

$$\sigma_b = \frac{0.4 * \Delta h_d}{\sqrt{2}} \quad (1.177)$$

Similmente si ottiene per l'SBL:

$$\sigma_b = \frac{0.4 * \Delta h_s}{\sqrt{2}} \quad (1.178)$$

Generalmente $\Delta h_d > \Delta h_s$ e quindi il valore di σ_b per l'SBL sarà piccolo rispetto a quello per il CBL.

L'espressione per la sorgente penetrata è del tutto analoga alle precedenti anche se in questo caso viene ridefinita la plume rise:

$$\Delta h_p = h_{ep} - h_s \quad (1.179)$$

dove h_{ep} è l'altezza della sorgente penetrata definita secondo l'equazione 1.137. L'espressione di σ_p viene allora corretta con il termine $(1 - f_p)$ che esprime la frazione di materiale del pennacchio che effettivamente giunge alla zona di intrusione:

$$\sigma_{bp} = \frac{0.4 * (1 - f_p) \Delta h_p}{\sqrt{2}} \quad (1.180)$$

1.3.10 Il calcolo della plume rise

La plume rise nel CBL

Per il calcolo della plume rise nel CBL per le sorgenti dirette, Δh_d , AERMOD si avvale dell'espressione empirica di Briggs:

$$\Delta h_d = \left(\frac{3 * F_m * x}{0.36 * u_p^2} + \frac{1.5 * F_b * x^2}{0.36 * u_p^3} \right)^{\frac{1}{3}} \quad (1.181)$$

u_p è la velocità del vento calcolata, secondo le espressioni viste al Paragrafo 1.3.5, all'altezza h_s di emissione, $u_p = u(h_s)$, mentre F_b è il buoyancy flux definito secondo l'equazione 1.107.

F_m è invece un secondo coefficiente definito come momentum flux ed è espresso come:

$$F_m = \frac{T}{T_s} * w_s^2 * r_s^2 \quad (1.182)$$

Come per l'equazione 1.107 T è la temperatura ambiente, T_s è la temperatura dei gas all'uscita del camino, w_s è la velocità di uscita di tali gas ed r_s è il raggio interno del camino.

L'espressione per la sorgente indiretta fornita da Briggs è stata modificata da Weil e quindi adottata dal team di sviluppo di AERMOD:

$$\Delta h_i = \frac{x}{u_p} * \sqrt{\frac{2 * F_b * z_i}{1.4 * u_p * R_i}} \quad (1.183)$$

$$R_i = 0.16 * (z_i - h_s)^2 + 0.0872 * \frac{w_*^2 * x^2}{u_p^2} \quad (1.184)$$

Per la sorgente penetrata si è già definito Δh_p mediante l'equazione 1.179.

Si noti che AERMOD suppone che nel CBL a causa dell'intenso rimescolamento i valori di Δh_d , Δh_i e Δh_p vengano raggiunti subito, non appena il materiale del pennacchio esce dalla sorgente. Ciò è in perfetto accordo con l'equazione 1.105 e con la Figura 1.16.

Plume rise nell'SBL

Quando un pennacchio si muove in uno strato in cui si è instaurato un gradiente di temperatura potenziale positivo, l'effetto della buoyancy sul pennacchio diviene via via meno consistente man mano che il pennacchio sale: i valori di temperatura potenziale infatti aumentano verso l'alto. Il team di sviluppo di AERMOD ha così sviluppato, a seguito dell'elaborazione di espressioni fornite da Weil e da Briggs, una propria espressione per la plume rise nell'SBL per tenere conto anche di questo fenomeno:

$$\Delta h_s = 2.66 * \left(\frac{F_b}{N^2 * u} \right)^{\frac{1}{3}} * \left[\frac{0.7 * N * F_m}{F_b} * \sin(\gamma) + 1 - \cos(\gamma) \right] \quad (1.185)$$

$$\gamma = \frac{0.7 * N * x}{u} \quad (1.186)$$

Queste espressioni tuttavia vengono utilizzate da AERMOD soltanto per valori di x inferiori a x_f , ovvero sino a quando il pennacchio si stabilizza; in altre parole si assume che il valore finale di Δh_s non venga raggiunto immediatamente come invece accade nel CBL. Ciò è in accordo con la Figura 1.16.

In particolare il valore di x al quale si ha la massima Δh_s viene identificato con la distanza di stabilizzazione x_f per l'SBL:

$$x_f = \frac{u}{0.7 * N} * \arctan \left(\frac{F_m * 0.7 * N}{F_b} \right) \quad (1.187)$$

Sostituendo quindi la 1.187 nell'equazione 1.185 si ottiene:

$$(\Delta h_s)_{max} = 2.66 * \left(\frac{F_b}{N^2 * u} \right)^{\frac{1}{3}} \quad (1.188)$$

In queste equazioni i valori di N , frequenza di Brunt-Vaisala, e di u , entrambe funzioni di z , sono determinati in base ad un processo iterativo: per $z = h_s$, valore iniziale, si calcolano $N(h_s)$ e $u(h_s)$. Quindi, per la x in oggetto si può procedere alla determinazione della Δh_s . Successivamente si determina $z = h_s + \Delta h_s/2$ e si ricalcolano i corrispondenti valori di N ed u ricominciando da capo. Il ciclo ha termine quando due valori consecutivi di Δh_s relativi alla coordinata x di interesse differiscono tra loro di meno dell'1%.

Quando le condizioni atmosferiche sono prossime alla neutralità la frequenza di Brunt-Vaisala tende a zero e questo, secondo l'equazione 1.185, porta alla determinazione di valori talmente elevati per la plume rise da essere ritenuti poco realistici.

Per queste condizioni il gruppo di sviluppo di AERMOD ha realizzato un'espressione empirica più adatta:

$$(\Delta h_s)_{neutral} = 1.2 * \left(\frac{F_b}{u * u_*} \right)^{\frac{3}{5}} * \left(h_s + 1.2 * \frac{F_b}{u * u_*} \right)^{\frac{2}{5}} \quad (1.189)$$

Anche nel caso di velocità del vento prossime a zero (calm condition) l'equazione 1.185 produce risultati troppo elevati per essere realistici e quindi anche in questo caso si è sviluppata una espressione apposita:

$$(\Delta h_s)_{calm} = \frac{4 * F_b^{\frac{1}{4}}}{N^{\frac{3}{4}}} \quad (1.190)$$

Complessivamente quindi il valore adatto di Δh_s viene scelto come il minore tra tutti quelli calcolati:

$$\Delta h_s = \min [\Delta h_s; (\Delta h_s)_{max}; (\Delta h_s)_{neutral}; (\Delta h_s)_{calm}] \quad (1.191)$$

Inoltre, se si annulla il coefficiente buoyancy flux, $F_b = 0$, AERMOD assume che non vi sia alcuna plume rise e pone $\Delta h_s = 0$ per ogni valore di x .

Complessivamente l'altezza effettiva h_{es} del pennacchio è data da:

$$h_{es} = h_s + \Delta h_s \quad (1.192)$$

1.3.11 Il calcolo delle concentrazioni per sorgenti non puntiformi

Nel caso di sorgenti volumetriche e superficiali AERMOD utilizza per il calcolo delle concentrazioni ai recettori le medesime espressioni utilizzate per le sorgenti puntiformi, considerando però, nel CBL, le sole sorgenti dirette:

$$C_c(x_r, y_r, z_r) = \begin{cases} C_d(x_r, y_r, z_r) & \text{nel CBL} \\ C_s(x_r, y_r, z_r) & \text{nell'SBL} \end{cases} \quad (1.193)$$

$C_d(x_r, y_r, z_r)$ si intende calcolata secondo l'equazione 1.124 e $C_s(x_r, y_r, z_r)$ secondo la 1.139.

Va inoltre considerato che, non essendoci le sorgenti indiretta e penetrata, AERMOD assume che tutto il materiale del pennacchio permanga nel CBL e quindi nella 1.124 pone $f_p = 1$.

Per le sorgenti non puntiformi non viene valutata la plume rise, scelta che trova giustificazione nella diversa modalità con cui vengono rilasciati gli inquinanti dalle sorgenti superficiali e volumetriche (ad esempio parcheggi o gates) rispetto a quelle puntiformi (camini). Si assume pertanto:

$$(\Delta h_d)_{sup} = 0 \quad (1.194)$$

$$(\Delta h_s)_{sup} = 0 \quad (1.195)$$

$$(\Delta h_d)_{vol} = 0 \quad (1.196)$$

$$(\Delta h_s)_{vol} = 0 \quad (1.197)$$

Di ciò si tiene conto nel calcolo di Ψ_{dj} nell'equazione 1.132, di H_p nella 1.104, di h_{es} nella 1.192 e di h_{ed} nella 1.157.

Da questo discende immediatamente che, secondo le equazioni 1.177 e 1.178, per le sorgenti non puntiformi il contributo dovuto alla buoyancy nel calcolo delle deviazioni standard è nullo. Ricordando poi che non si procede al calcolo del contributo dovuto al building downwash si può concludere per le sorgenti superficiali:

$$\sigma_y^2 = \sigma_{ya}^2 \quad (1.198)$$

$$\sigma_z^2 = \sigma_{zaj}^2 \quad (1.199)$$

$$\sigma_{ys}^2 = \sigma_{yas}^2 \quad (1.200)$$

$$\sigma_{zs}^2 = \sigma_{zas}^2 \quad (1.201)$$

σ_{ya} , σ_{zaj} , σ_{yas} e σ_{zas} si intendono calcolati con le medesime espressioni utilizzate per le sorgenti puntiformi.

Per le sorgenti volumetriche il confronto tra i valori di concentrazione calcolati e quelli misurati ha suggerito una diversa espressione per le deviazioni standard:

$$\sigma_y^2 = \sigma_{ya}^2 + \sigma_{y0}^2 \quad (1.202)$$

$$\sigma_z^2 = \sigma_{zaj}^2 + \sigma_{z0}^2 \quad (1.203)$$

$$\sigma_{ys}^2 = \sigma_{yas}^2 + \sigma_{y0}^2 \quad (1.204)$$

$$\sigma_{zs}^2 = \sigma_{zas}^2 + \sigma_{z0}^2 \quad (1.205)$$

Le deviazioni standard iniziali σ_{y0} e σ_{z0} vengono richieste in input dall'utente e devono essere determinate mediante le seguenti regole definite dal team di sviluppo di AERMOD:

$$\sigma_{y0} = \frac{l_y}{4.3} \quad (1.206)$$

$$\sigma_{z0} = \frac{h_z}{2.15} \quad (1.207)$$

l_y è la distanza misurata secondo l'asse y tra i due punti estremi del volume considerato e si intende espressa in metri, mentre h_z è l'altezza di rilascio dell'inquinante definita

pari alla metà dell'altezza del volume (le sorgenti volumetriche sono sempre definite come prismi retti) e si intende sempre espressa in metri.

l_y e h_z devono essere forniti dall'utente.

In realtà nel presente studio l'utente non si interfaccia direttamente con AERMOD (a meno di non editare manualmente i file di scambio tra EDMS ed AERMOD) ma è EDMS stesso che provvede al calcolo di entrambi i valori. In particolare EDMS non permette la definizione di una terna triortogonale arbitraria ma fissa la direzione e il verso degli assi: l'asse x è diretto da Ovest a Est con verso rivolto ad Est, l'asse y è diretto da Nord a Sud con verso rivolto a Nord. l'utente definisce soltanto l'origine degli assi che deve giacere sul piano su cui giace l'intero aeroporto.

Per le sorgenti volumetriche viene quindi richiesta l'altezza e le coordinate dei punti della base: immediatamente si ottengono h_z ed l_y .

1.3.12 La dispersione di inquinanti emessi dai velivoli

Lo studio della dispersione di inquinanti emessi da velivoli in movimento è molto recente e i programmi di simulazione vengono continuamente aggiornati.

Inizialmente il team di sviluppo di AERMOD in collaborazione con l'FAA ha provato a considerare il moto di un velivolo sulla runway e in volo come una serie di sorgenti volumetriche. I risultati, confrontati con le misurazioni effettuate, non sono stati soddisfacenti e si è quindi pensato di sostituire le sorgenti volumetriche con una serie di sorgenti superficiali con diversa altezza di emissione. Per questa soluzione si sono utilizzate sorgenti superficiali di larghezza pari alla larghezza della runway e lunghezza pari a 50 m. Le simulazioni hanno portato a risultati concordi con i dati reali ma, non appena il modello è stato applicato ad aeroporti di medie e grandi dimensioni, si è profilato un problema ulteriore.

Le sorgenti superficiali sono sorgenti stazionarie le cui emissioni variano nel tempo a seconda del tipo di aereo e a seconda della fase operativa in cui il velivolo si trova (decollo, atterraggio); tipi di aerei molto diversi tra loro possono impegnare la stessa superficie e quindi una stessa sorgente può presentare altezze di rilascio degli inquinanti molto diverse a seconda del caso. Si ottiene quindi che ogni settore in cui viene scomposto il percorso diviene sede di una serie di sorgenti stazionarie superficiali, ognuna caratterizzata da una propria altezza di emissione e da una propria portata di inquinante emessa, che si sovrappongono tra loro. Di tutto questo il modello può ovviamente tenere conto e l'interfaccia di EDMS solleva l'utente finale dal dover compilare a mano i file di input ad AERMOD. Ciò non toglie tuttavia che il compilatore è costretto ad eseguire un numero molto elevato di operazioni. L'utilizzo del programma rimarrebbe in questo modo ristretto ai soli centri di calcolo che dispongono di macchine multiprocessore e sistemi operativi adatti.

EDMS è stato però sviluppato dall'FAA al fine di fornire alle strutture aeroportuali un modello facilmente utilizzabile ed in grado di stabilire con una certa velocità e precisione se lo scalo rispetta le norme di sicurezza e protezione ambientale fissate dall'EPA. Si è resa necessaria pertanto la ricerca di una soluzione di compromesso tale da non penalizzare in modo inaccettabile (oltre il 10% del valore misurato) la precisione e al tempo stesso permettere un utilizzo di EDMS-AERMOD sui personal computer. Si è pertanto deciso di condensare tutte le sorgenti superficiali che impegnano la stessa porzione di superficie in una unica sorgente: quest'ultima nel presente studio viene indicata per semplicità come ξ .

AERMOD prevede di utilizzare per il calcolo delle concentrazioni le medesime espressioni utilizzate per le altre sorgenti superficiali, ovvero le 1.193.

Per la determinazione delle deviazioni standard della sorgente tuttavia, si utilizzano le seguenti espressioni:

$$(\sigma_y^2)_\xi = (\sigma_{ya}^2)_\xi \quad (1.208)$$

$$(\sigma_z^2)_\xi = (\sigma_{zaj}^2)_\xi + (\sigma_{z0}^2)_\xi \quad (1.209)$$

$$(\sigma_{ys}^2)_\xi = (\sigma_{yas}^2)_\xi \quad (1.210)$$

$$(\sigma_{zs}^2)_\xi = (\sigma_{zas}^2)_\xi + (\sigma_{z0}^2)_\xi \quad (1.211)$$

dove le σ_{z0} sono definite in modo diverso rispetto al caso delle sorgenti volumetriche.

Se si considerano le distribuzioni gaussiane incontrate in AERMOD si può notare che esse sono distribuzioni normalizzate, ovvero l'area totale sottesa dalla curva è unitaria. Il modello definisce quindi la distribuzione di concentrazioni della sorgente superficiale risultante ξ come la somma pesata delle distribuzioni delle singole sorgenti che impegnano la medesima porzione di superficie reale. I pesi inoltre sono definiti in modo tale che la loro somma fornisca ancora un valore unitario. Si conclude che la distribuzione risultante è ancora una distribuzione normalizzata.

Ogni distribuzione gaussiana è caratterizzata da un suo valor medio e dalla deviazione standard. Definita come $f_i(x)$ la distribuzione gaussiana di una sorgente superficiale i e μ_i il valor medio si ottiene per definizione:

$$\mu_i = \int_{-\infty}^{\infty} f_i(x)x dx \quad (1.212)$$

Ricordando che la distribuzione è normalizzata si può identificare il valore atteso per μ_i come:

$$\mu_i = \langle x \rangle_{f_i} \quad (1.213)$$

Per definizione la varianza verticale è:

$$\sigma_{zi}^2 = \int_{-\infty}^{\infty} f_i(x)(x - \mu_i)^2 dx \quad (1.214)$$

e similmente:

$$\sigma_{zi}^2 = \langle (x - \mu_i)^2 \rangle_{f_i} \quad (1.215)$$

Per quanto asserito precedentemente, detto w_i il peso, si ottiene che la distribuzione gaussiana che tiene conto delle N sorgenti superficiali che impegnano la medesima superficie reale è:

$$f(x) = \sum_{i=1}^N w_i * f_i(x) \quad (1.216)$$

$$\sum_{i=1}^N w_i = 1 \quad (1.217)$$

Si avrà inoltre $w_i > 0$ per qualsiasi i .

Il valor medio μ della distribuzione complessiva $f(x)$ può quindi essere determinato come:

$$\mu = \int_{-\infty}^{\infty} \sum_{i=1}^N w_i f_i(x) x dx = \sum_{i=1}^N w_i \mu_i \quad (1.218)$$

Il valore di μ può essere allora identificato come:

$$\mu = \langle x \rangle_f \quad (1.219)$$

Similmente per la varianza verticale σ_z^2 :

$$\sigma_z^2 = \sum_{i=1}^N w_i \int_{-\infty}^{\infty} f_i(x) * (x - \mu)^2 dx \quad (1.220)$$

e quindi:

$$\sigma_z^2 = \langle (x - \mu)^2 \rangle_f = \sum_{i=1}^N w_i \langle (x - \mu)^2 \rangle_{f_i} \quad (1.221)$$

Si può tuttavia asserire che:

$$\begin{aligned} \langle (x - \mu)^2 \rangle_{f_i} &= \langle x^2 - 2x\mu + \mu^2 \rangle_{f_i} = \\ &= \langle x^2 - 2x\mu + \mu^2 + \mu_i^2 - \mu_i^2 + 2x\mu_i - 2x\mu_i \rangle_{f_i} = \\ &= \langle (x - \mu_i)^2 \rangle_{f_i} + \langle 2x\mu_i \rangle_{f_i} - \langle 2x\mu \rangle_{f_i} + \langle \mu^2 \rangle_{f_i} - \langle \mu_i^2 \rangle_{f_i} = \\ &= \sigma_{zi}^2 + 2\mu_i \langle x \rangle_{f_i} - 2\mu \langle x \rangle_{f_i} + \mu^2 - \mu_i^2 = \\ &= \sigma_{zi}^2 + 2\mu_i^2 - 2\mu\mu_i + \mu^2 - \mu_i^2 = \\ &= \sigma_{zi}^2 + \mu_i^2 - 2\mu\mu_i + \mu^2 \end{aligned} \quad (1.222)$$

Sostituendo quindi la 1.222 nella 1.221 si ottiene:

$$\begin{aligned} \sigma_z^2 &= \sum_{i=1}^N w_i (\sigma_{zi}^2 + \mu_i^2 - 2\mu\mu_i + \mu^2) = \\ &= \sum_{i=1}^N w_i (\sigma_{zi}^2 + \mu_i^2) - 2\mu \sum_{i=1}^N w_i \mu_i + \mu^2 \sum_{i=1}^N w_i = \\ &= \sum_{i=1}^N w_i (\sigma_{zi}^2 + \mu_i^2) - \mu^2 \end{aligned} \quad (1.223)$$

In questo modo è stata definita la σ_z che rappresenta, a seconda dei valori di σ_{zi} per cui viene eseguito il calcolo, la $(\sigma_{zas})_\xi$ o la $(\sigma_{zaj})_\xi$ o la $(\sigma_{z0})_\xi$.

Si noti inoltre che, essendo μ il valor medio della distribuzione verticale di concentrazioni, esso rappresenta l'altezza effettiva $(h_s)_\xi$ di rilascio degli inquinanti, che viene quindi ridefinita mediante la 1.218.

Le altezze di rilascio di ogni singola sorgente (ovvero le altezze di rilascio per ogni singolo aereo che nel periodo di tempo considerato impegna la sorgente superficiale in oggetto) e le relative deviazioni standard iniziali σ_{z0} sono fornite da EDMS ed è quindi possibile procedere, mediante le espressioni viste al Paragrafo 1.3.9 e la 1.209 o la 1.211 a seconda del caso, al calcolo delle singole σ_{zi} e poi determinare la σ_z definitiva mediante la 1.223.

Inoltre, AERMOD calcola $(\sigma_y)_\xi = (\sigma_{ya})_\xi$ e $(\sigma_y)_\xi = (\sigma_{ys})_\xi$ con le stesse espressioni viste al Paragrafo 1.3.9 per le sorgenti superficiali una volta nota l'altezza effettiva finale $\mu = (h_s)_\xi$. Quindi, contrariamente a quanto visto sinora per $(\sigma_z)_\xi$, non si effettua per $(\sigma_y)_\xi$ una valutazione pesata sui singoli valori σ_{yi} per ogni sorgente che impegna la medesima porzione di superficie reale.

Si dispone allora di tutti i dati necessari per il calcolo delle concentrazioni una volta che si siano definiti i pesi w_i .

Inizialmente i pesi sono stati definiti dal team di sviluppo di AERMOD come il rapporto tra il numero di LTO annuali compiuti da un certo tipo⁹ di aereo e il numero totale di LTO effettuati annualmente da tutti gli N velivoli che vi hanno fatto scalo:

$$w_i = \frac{LTO_i}{\sum_{k=1}^N LTO_k} \quad (1.224)$$

Recentemente tuttavia si è preferito ridefinire il peso in base alle emissioni del singolo velivolo tenendo conto che si ha un'emissione diversa a seconda della fase in cui si trova e al tempo impiegato per il completamento di tale fase:

$$w_i = \frac{\sum_j n_{ij} * t_{ij} * I_{ij}}{\sum_{i=1}^N \sum_j n_{ij} * t_{ij} * I_{ij}} \quad (1.225)$$

j identifica la fase in cui il velivolo si trova, n_{ij} è il numero di fasi j compiute dal velivolo i in un anno, t_{ij} è il tempo di cui necessita i per completare la fase j e I_{ij} è il corrispondente fattore di emissione.

⁹Si consideri che in questo caso con l'espressione "tipo di aereo" non si intende soltanto diversificare gli aerei in base all'avionica e al modello di motore ma anche a seconda del tipo di volo che viene effettuato.

Esempio

Lo scopo del presente esempio è puramente illustrativo e quindi i dati inseriti non devono essere intesi come dati reali.

Si supponga che presso un certo aeroporto facciano scalo solo tre tipi di aerei:

Modello	Tipo di motore	Numero di motori	LTO annuali
A320-200	CFM56-5A1	2	1000
737-300	CFM56-3-B1	2	500
Cessna 172 Skyhawk	O-320	1	100

Si supponga inoltre, per semplicità, che la simulazione interessi soltanto i primi 50 metri di runway, ovvero si considera un'unica sorgente superficiale ξ .

EDMS fornisce allora i seguenti dati (puramente indicativi):

- ogni motore CFM56-5A1 emette 28.09322 g/s di inquinante durante le operazioni di decollo;
- ogni motore CFM56-5A1 emette 2.42644 g/s di inquinante durante le operazioni di atterraggio;
- ogni motore CFM56-3-B1 emette 18.57944 g/s di inquinante durante le operazioni di decollo;
- ogni motore CFM56-3-B1 emette 4.74012 g/s di inquinante durante le operazioni di atterraggio;
- ogni motore O-320 emette 12.25393 g/s di inquinante durante le operazioni di decollo;
- ogni motore O-320 emette 1.32965 g/s di inquinante durante le operazioni di atterraggio.

Inoltre:

- l'A320 impiega 2.459 s per il decollo e 0.712 s per l'atterraggio;
- il 737 impiega 2.409 s per il decollo e 0.709 s per l'atterraggio;
- il Cessna impiega 2.509 s per il decollo e 1.799 s per l'atterraggio.

Infine EDMS fornisce anche l'altezza di rilascio e la deviazione standard iniziale:

Modello	h_s (m)	σ_{z0} (m)
A320-200	3	4
737-300	2	2.5
Cessna 172 Skyhawk	1	1

Si ottiene quindi che le emissioni complessive attribuibili ai vari aerei sono:

$$\begin{aligned}
 E_{A320} &= 28.09322 * 2.459 * 2 * 1000 + 2.42644 * 0.712 * 2 * 1000 = \\
 &= 141.6 \frac{kg}{anno}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 E_{737} &= 18.57944 * 2.409 * 2 * 500 + 4.74012 * 0.709 * 2 * 500 = \\
 &= 48.12 \frac{kg}{anno}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 E_{Cessna} &= 12.25393 * 2.509 * 1 * 100 + 1.32965 * 1.799 * 1 * 100 = \\
 &= 33.13 \frac{kg}{anno}
 \end{aligned}$$

Dall'equazione 1.225 si ottengono subito i coefficienti peso:

$$\begin{aligned}
 w_{A320} &= \frac{141.6}{141.6 + 48.12 + 33.13} = 0.6354 \\
 w_{737} &= \frac{48.12}{141.6 + 48.12 + 33.13} = 0.2159 \\
 w_{Cessna} &= \frac{33.13}{141.6 + 48.12 + 33.13} = 0.1487
 \end{aligned}$$

Dall'equazione 1.218 si ottiene la nuova altezza di rilascio $\mu = (h_s)_\xi$:

$$(h_s)_\xi = 0.6354 * 3 + 0.2159 * 2 + 0.1487 * 1 = 2.4867 \text{ m}$$

mentre dalla 1.223 si calcola la $(\sigma_{z0}^2)_\xi$:

$$\begin{aligned}(\sigma_{z0}^2)_\xi &= 0.6354 * (4^2 + 3^2) + 0.2159 * (2.5^2 + 2^2) + 0.1487 * (1^2 + 1^2) - 2.4867 = \\ &= 12.2117 \text{ m}\end{aligned}$$

A questo punto si conoscono tutti i dati necessari al computo delle concentrazioni secondo le 1.208, 1.209, 1.210 e 1.211.

Capitolo 2

La raccolta dei dati

Per completezza dei dati si è riferito il presente studio all'anno 2002 in quanto la raccolta degli stessi è iniziata nel mese di giugno dell'anno 2003 e si è conclusa nei primi mesi del 2004. Inoltre, il 2003 può essere considerato un periodo di svolta dal punto di vista commerciale per l'aeroporto Marco Polo in quanto v'è stata una notevole apertura, a seguito delle mutate esigenze dei passeggeri, verso il traffico charter. Il reperimento dei dati relativi a questo tipo di voli risulta piuttosto problematico e ciò può influire negativamente sulla precisione dei risultati della simulazione. Nell'anno 2002 invece il traffico charter rappresenta una modesta percentuale di quello complessivo e quindi minori sono le incertezze sui risultati.

Le informazioni contenute in questo capitolo sono state interamente fornite dalla SAVE S.p.A., società di gestione dell'aerostazione, e, per ciò che riguarda i dati meteorologici, dall'ENAV, l'Ente Nazionale per l'Assistenza al Volo.

Si premette sin d'ora che il presente studio considera le sole sorgenti inquinanti interne all'aeroporto, ovvero le sole di diretta competenza della SAVE S.p.A. trascurando ciò che si trova al suo esterno. Non si sono potute inoltre tenere in considerazione le emissioni dei velivoli della Guardia di Finanza e della Polizia di Stato: la composizione della flotta, il numero e l'orario dei voli sono in questo caso coperti da segreto militare. Allo stesso modo sono stati trattati i voli di stato a meno che essi non rientrino nel computo dei voli di aviazione generale.

Sono state pertanto prese in considerazione le seguenti sorgenti emmissive:

1. traffico aereo;
2. traffico stradale interno all'aeroporto (GSE) ed APU;
3. traffico stradale esterno all'aeroporto;
4. utilizzazione delle aree di parcheggio;

5. centrali termiche;
6. aree di stoccaggio dei combustibili.

Si premette che ai fini della simulazione di dispersione, come visto al capitolo precedente, è stato necessario provvedere alla completa digitalizzazione della pianta dell'aeroporto. In particolare EDMS fissa un sistema di assi cartesiani in cui l'asse y è parallelo al suolo e diretto da Nord a Sud con verso rivolto a Nord, l'asse x è perpendicolare all'asse y , parallelo al suolo e diretto da Ovest a Est con verso rivolto ad Est, l'asse z è normale agli altri due e con verso rivolto allo spazio che circonda il pianeta.

L'origine degli assi viene fissata dall'operatore in un punto in cui siano note con esattezza le coordinate e l'altezza sul livello del mare. Un punto che soddisfa a queste condizioni è presente presso ogni scalo in quanto in passato ciò era di notevole utilità per la ritaratura di strumenti in avaria. Nel caso dell'aeroporto Marco Polo si tratta del punto medio della runway per il quale la SAVE S.p.A. ha fornito i seguenti dati:

- altezza sul livello del mare: 2.13 m (circa 7 ft);
- coordinate: $45^{\circ} 30' 16''\text{ N}$, $12^{\circ} 21' 07''\text{ E}$;

Risulta quindi fissata la terna cartesiana rispetto alla quale vengono definite le coordinate di ogni sorgente e ogni recettore presente nell'area di studio. Si suppone ovviamente che l'aeroporto giaccia sul piano generato dagli assi x e y .

In Figura 2.1 si può osservare la mappa dell'aeroporto mentre nella 2.2 viene riportata l'immagine digitalizzata che visualizza le strade di accesso, i gates, i parcheggi, le taxiways e la runway. Nei paragrafi seguenti si utilizzeranno figure più dettagliate.

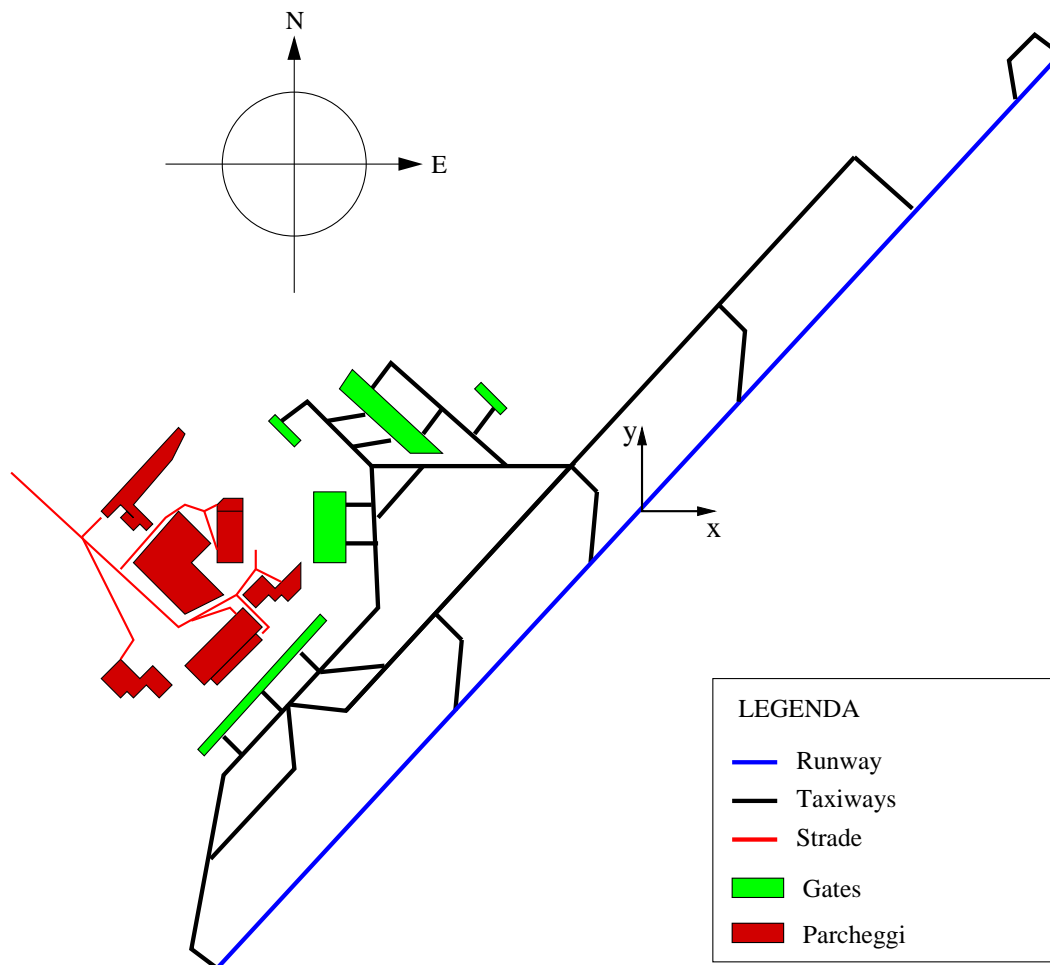


Figura 2.2: Immagine digitalizzata dell'aeroporto Marco Polo di Venezia

2.1 Il traffico aereo

Durante l'anno 2002 presso l'aeroporto Marco Polo si sono verificati 62059 movimenti aerei dovuti all'aviazione commerciale, ovvero voli di linea e voli charter, più 3699¹ movimenti di Aviazione Generale, G.A., ovvero voli privati di varia natura.

Dai tabulati orari forniti dalla SAVE S.p.A. si è quindi provveduto ad identificare i vari modelli di aereo che hanno fatto scalo presso l'aeroporto in oggetto e per ognuno di essi si è identificato il numero e il tipo di motori impiegati e il numero di LTO effettuati nell'arco del 2002. L'insieme di questi dati è stato raccolto nelle tabelle 2.1, 2.2 e 2.3.

Costruttore	Modello	Tipo motore	Numero motori	LTO nel 2002
Airbus	A300-600	CF6-80C2A5F	2	44
Airbus	A319	CFM56-5B6/P	2	4
Airbus	A320	V2527-A5	2	41
Airbus	A321	CFM56-5B3/P	2	2
Airbus	A330-300	PW4168A	2	64
Avro	RJ-100	LF507	4	21
Boeing	717-200	BR700-715C1-30	2	2
Boeing	737-300	CFM56-3B-1	2	275
Boeing	747-400	PW4056	4	27
Boeing	757-200	PW2037	2	53
Boeing	767-300	CF6-80A2	2	12
Canadair	Reg-100	CF34-3B	2	45
British Aerospace	BAe146-300	ALF502R-5	4	83
Fokker	Fokker 100	TAY650-15	2	23
McDonnell-Douglas	MD-80	JT8D-219	2	63
Tupolev	Tu-134	D-30 (II serie)	2	1
Tupolev	Tu-154	NK-8-2U	3	15

Tabella 2.1: Aerei charter che hanno fatto scalo all'aeroporto Marco Polo nel 2002

Il numero di LTO compiuto da ciascun tipo di velivolo è stato ottenuto, dalla definizione stessa di LTO, sommando tutte le partenze e tutti gli atterraggi effettuati e dividendo il risultato ottenuto per due. EDMS accetta in input solo valori interi per ciò che riguarda il numero di LTO compiuti e quindi, quando la somma del numero di decolli e del numero di atterraggi è stata dispari, il risultato ottenuto è stato arrotondato per eccesso. Ciò nel rispetto delle raccomandazioni del team di sviluppo di EDMS e dell'FAA di condurre lo studio nelle ipotesi più pessimistiche.

¹Dati forniti dalla SAVE S.p.A che trovano conferma nei valori riportati dall'Annuario 2002 redatto dall'ENAC, Ente Nazionale per l'Aviazione Civile, e dal Ministero delle Infrastrutture e dei Trasporti. Questi dati sono in lieve disaccordo con quelli ufficiali reperibili presso l'Assaeroporti.

Costruttore	Modello	Tipo motore	Numero motori	LTO nel 2002
Airbus	A319	CFM56-5B6/P	2	406
Airbus	A320	V2527-A5	2	2554
Airbus	A320 (*)	V2527-A5	2	1076
Airbus	A321	CFM56-5B3/P	2	864
Avro	RJ-100	LF507	4	789
Avro	RJ-85	LF507	4	210
ATR	ATR72-210	PT6A-45	2	2035
Boeing	737-200	JT8D-15A	2	19
Boeing	737-300	CFM56-3B-1	2	1854
Boeing	737-300 (*)	CFM56-3B-1	2	912
Boeing	737-400	CFM56-3B-2	2	688
Boeing	737-500	CFM56-3C-1	2	1226
Boeing	737-700 (*)	CFM56-7B22	2	425
Boeing	767-300	CF6-80A2	2	309
Canadair	Reg-100	CF34-3B	2	578
Canadair	Reg-700	CF34-8C1	2	588
De Havilland	DHC-8-300	PW123	2	198
De Havilland	DHC-8-400	PW127-A	2	897
Dornier	DO-328	PW119-B	2	332
Embraer	ERJ 135	AE3007A3	2	615
Embraer	ERJ 145	AE3007A	2	171
Fokker	Fokker 70	TAY620-15	2	901
Fokker	Fokker 100	TAY650-15	2	5320
McDonnell-Douglas	MD-80	JT8D-219	2	1865
McDonnell-Douglas	MD-80-82	JT8D-217A	2	2937
McDonnell-Douglas	MD-80-83	JT8D-219	2	66
McDonnell-Douglas	MD-80-87	JT8D-217	2	278
McDonnell-Douglas	MD-80-88	JT8D-219	2	719
Tupolev	Tu-154	NK-8-2U	3	104

Tabella 2.2: Aerei di linea che hanno fatto scalo all'aeroporto Marco Polo nel 2002. Il simbolo (*) indica i voli low-cost.

Costruttore	Modello	Tipo motore	Numero motori	LTO nel 2002
Airbus	A310	CF6-80A3	2	43
Beech	King Air 90	PT6A-28	2	93
Boeing	737-300	CFM56-3B-1	2	43
Bombardier	BD-700	BR700-710A2-20	2	185
Canadair	CL600	CF34-3B	2	185
Cessna	Citation II	JT15D-4	2	93
Cessna	Citation V	JT15D-5	2	90
Cessna	Citation VII	TFE731-3	2	93
Cessna	Citation X	AE3007C	2	92
Dassault	Falcon 50	TFE731-3	3	129
Dassault	Falcon 100	TFE731-2	2	126
Gulfstream Aerospace	Gulfstream IV	TAY Mk611-8	2	185
Gulfstream Aerospace	Gulfstream V	BR700-710A1-10 GulfV	2	182
Piper	PA-28	IO-320-DIAD	1	182

Tabella 2.3: Aerei di aviazione generale che hanno fatto scalo all'aeroporto Marco Polo nel 2002

Non è stato sempre possibile rintracciare il tipo di motore per gli aerei charter e di aviazione generale e, in tali casi, si è assunto che i motori siano analoghi a quelli utilizzati sugli aerei di linea. Ciò trova parziale giustificazione nel fatto che spesso le compagnie charter non dispongono di una flotta di proprietà ma affittano aerei da grandi compagnie che effettuano generalmente voli di linea.

Per ogni tipo di aereo si è successivamente determinato il profilo di volo, ovvero si è fissato l'angolo di rientro nella fase di approach e si è fissato il peso del velivolo. Per ciò che riguarda l'angolo di rientro si sono sempre assunti i valori standard fissati da EDMS in quanto non è stato possibile rintracciare i valori reali. Le fasi di volo sono comunque altamente standardizzate e quindi è improbabile che i valori reali differiscano significativamente da quelli preimpostati. Per quanto riguarda il peso esso è stato sempre fissato pari al peso massimo consentito quando non sono stati resi disponibili i dati reali, ovvero si è di nuovo scelta la condizione più pessimistica.

Il profilo del volo influisce direttamente sui times in mode dei velivoli, ovvero sul tempo necessario al completamento di ciascuna fase di un LTO. Si noti tuttavia che i times in mode si mantengono relativamente costanti in un'ampia finestra di pesi. Ad esempio, in Tabella 2.4 viene riportato il tempo necessario al completamento del takeoff da parte di un Airbus A319 al variare del suo peso. Si osserva che esistono ampi intervalli in cui il tempo non varia, ad esempio da 60917 *kg* a 63503 *kg*, una variazione di peso di

2586 *kg*, il time in mode si mantiene costante e pari a 0.91 *min*, mentre tra il peso minimo, 58060 *kg*, e quello massimo consentito, 64002 *kg*, si ha una variazione di soli 0.11 *min* pari al 12% del tempo massimo.

Airbus A319 - Takeoff		
Peso (lb)	Peso (kg)	Tempo (min)
141100	64002	0.92
140000	63503	0.91
134300	60917	0.86
128000	58060	0.81

Tabella 2.4: La variazione del time in mode per il takeoff per un Airbus A319

Una volta definito il profilo del volo si determinano immediatamente dal database di EDMS i times in mode per ciascun tipo di velivolo. Nel caso di un Airbus A319 si ottiene ad esempio la Tabella 2.5.

Airbus A319 - Times in mode	
Fase (mode)	Tempo (min)
Takeoff	0.92
Climb out	0.94
Approach	3.79
Landing	0.59

Tabella 2.5: Times in mode per l'Airbus di linea A319

Con il termine "landing" si identifica la fase in cui il velivolo ha ormai toccato terra e percorre un tratto di runway prima di giungere alla taxiway che lo porterà al gate.

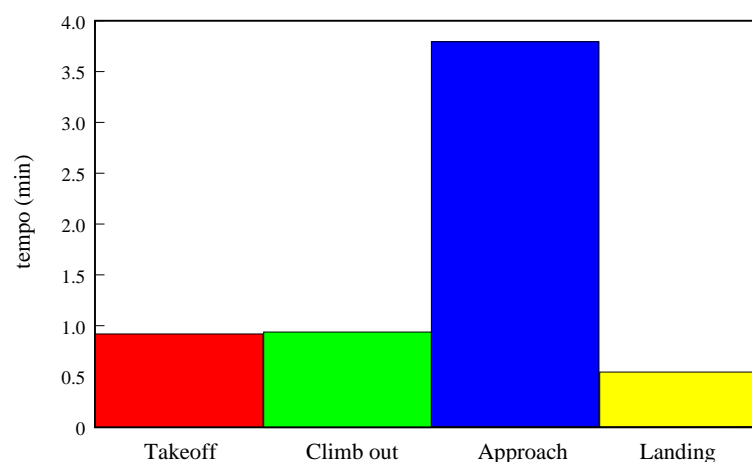


Figura 2.3: Times in mode per l'Airbus di linea A319

La figura 2.3 riassume visivamente il contenuto della Tabella 2.5 e si nota come la fase indiscutibilmente più lunga sia l'approach. Questa caratteristica si riscontra in tutti gli altri velivoli esaminati.

Per ciascuna fase dell'LTO l'ICAO rende disponibili i valori della portata di combustibile al motore. Questi dati vengono forniti dalle aziende costruttrici (General Electric, Pratt&Witney, Rolls Royce...) a seguito di prove al banco rese recentemente obbligatorie per conseguire l'omologazione del motore stesso. Per l'Airbus A319 si ottengono la Tabella 2.6 e la Figura 2.4.

Airbus A319 - Consumo di carburante	
Fase (mode)	kg/s
Takeoff	0.961000
Climb out	0.799000
Approach	0.275000
Landing	0.097000

Tabella 2.6: Consumo di carburante al secondo in funzione della fase di LTO per l'Airbus di linea A319

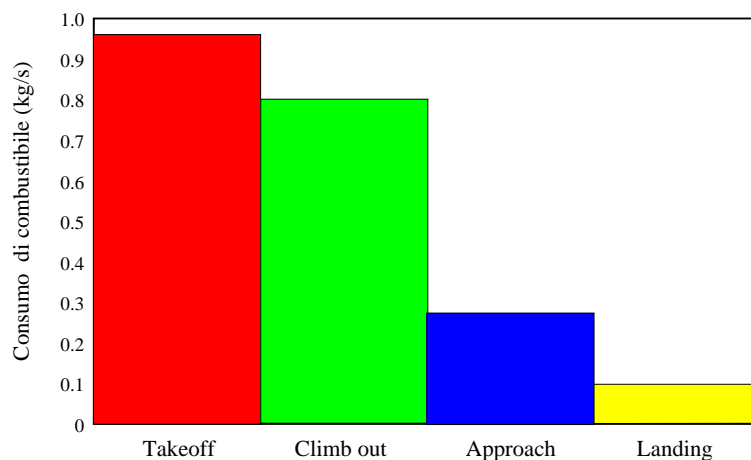


Figura 2.4: Consumo di carburante al secondo in funzione della fase di LTO per l'Airbus di linea A319

Si nota che durante la fase di approach il consumo di carburante al secondo è notevolmente inferiore rispetto alle fasi di takeoff e climbout. In particolare, esprimendo il consumo al secondo delle varie fasi rispetto al consumo al secondo durante il takeoff si ottengono i valori in Tabella 2.7.

Si trova così conferma, con buona approssimazione, di quanto asserito nel capitolo precedente e in particolare di quanto riportato in Tabella 1.1.

Airbus A319 - Consumo di carburante	
Fase (mode)	%
Takeoff	100
Climb out	83.14
Approach	28.61
Landing	10.09

Tabella 2.7: Il consumo di carburante al secondo espresso come percentuale del consumo al takeoff

Si può a questo punto procedere, disponendo dei dati presenti nelle tabelle 2.5 e 2.6, al calcolo del consumo di carburante necessario al completamento di ciascuna fase dell'LTO, ottenendo in questo modo i risultati in Tabella 2.8 rappresentati in Figura 2.5.

Airbus A319 - Consumo di carburante per il completamento delle fasi di LTO	
Fase (mode)	kg
Takeoff	53.0472
Climb out	45.0636
Approach	62.535
Landing	3.4338

Tabella 2.8: Consumo di carburante per il completamento di ciascuna fase di LTO per l'Airbus di linea A319

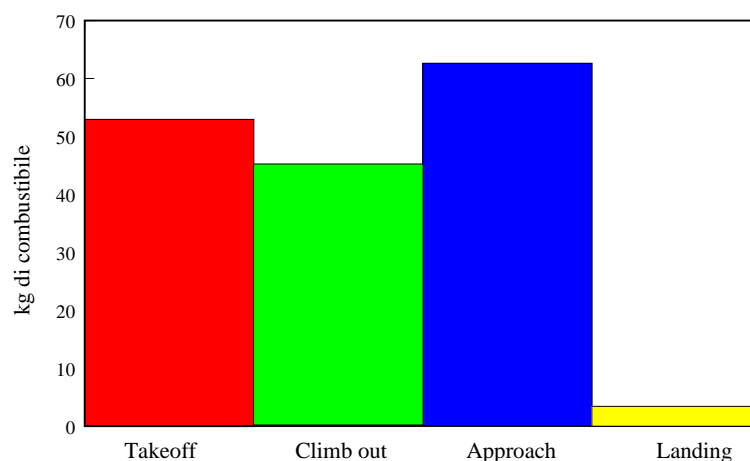


Figura 2.5: Consumo di carburante per il completamento di ciascuna fase di LTO per l'Airbus di linea A319

La fase di approach risulta essere la più dispendiosa in termini di consumo di carburante, seguita dal takeoff, dal climb out e dal landing. È possibile infatti notare che

sebbene il consumo di carburante durante la fase in volo dell'atterraggio sia pari a 0.275 *kg/s* ovvero pari a circa il 28.62% del consumo durante il decollo, il tempo per la conclusione dell'approach è pari al 411.96% di quello dal takeoff.

Queste conclusioni, ottenute nel caso specifico dell'Airbus A319 di linea oggetto del presente studio, si ripetono, pur con differenti valori e rapporti, anche per gli altri velivoli esaminati: il massimo consumo di carburante è sempre imputabile all'approach, seguito, nell'ordine, dal takeoff, dal climb out e dal landing.

É a questo punto doveroso precisare che nelle tabelle 2.1, 2.2 e 2.3 non sono stati annoverati tre tipi di velivoli che hanno però fatto scalo presso l'aeroporto di Venezia: si tratta del Saab 2000, del Falcon 2000 e del Fairchild Dornier 328 Jet le cui caratteristiche sono riassunte in Tabella 2.9.

Costruttore	Modello	Tipo motore	Numero motori	LTO nel 2002
Dassault	Falcon 2000	CFE738-1-1B	2	129
Fairchild Dornier	328 Jet	PW306B	2	313
Saab	Saab 2000	GMA 2100	2	1006

Tabella 2.9: Caratteristiche degli aerei che hanno fatto scalo all'aeroporto Marco Polo ma che non sono ancora supportati da EDMS

Per questi aerei l'ICAO non ha ancora provveduto a rilevare i times in mode ed inoltre non ha ancora provveduto alla raccolta dei dati relativi al consumo di carburante da parte dei motori; conseguenza di ciò è che EDMS non supporta direttamente questi velivoli.

Nel presente studio non si è ritenuto opportuno trascurare la presenza di tali aeromobili, sebbene il numero complessivo di LTO da essi compiuto, 1448, rappresenti soltanto il 4.66% del totale, ma si è pensato di provvedere alla definizione di tre aerei fittizi con caratteristiche opportunamente scelte tra i velivoli supportati. Si è in questo modo consci di indurre un certo errore nella valutazione delle emissioni totali ma si ritiene che tale errore sia inferiore rispetto a quello conseguente alla scelta di trascurare tali LTO.

In particolare, per ognuno di questi tre velivoli si sono scelti i times in mode dell'aereo supportato da EDMS più simile per dimensioni, forma e destinazione d'uso (in tutti e tre i casi si tratta di aerei destinati al trasporto passeggeri) mentre per quanto riguarda i motori si è utilizzato il motore supportato più simile per tipo (si è sostituito un turboelica con un turboelica, un motore jet con un jet), per potenza erogata e per periodo di produzione.

Dal punto di vista strutturale il Fairchild Dornier 328 Jet (FRJ) è del tutto analogo al Dornier 328 (Do328) tranne che per il tipo di motore alloggiato sotto le ali: un jet nel primo caso, un turboelica nel secondo. Si è comunque ritenuto opportuno utilizzare per l'FRJ gli stessi times in mode del Do328. I motori Pratt&Whitney PW306B da

6050 *lb/s* di spinta commercializzati nella seconda metà degli anni '90 sono stati idealmente sostituiti con gli Allison AE3007C da 6400 *lb/s* commercializzati nel medesimo periodo.

Per ciò che riguarda i times in mode del Saab 2000 si è ritenuto opportuno utilizzare quelli dell'ATR-72 in quanto i due aerei presentano dimensioni e peso confrontabili tra loro e trasportano entrambi un numero di passeggeri intorno alle 60 unità. Le caratteristiche di entrambi gli aeromobili sono riportate in Tabella 2.10.

Tipo velivolo	Lunghezza (m)	Apertura alare (m)	Altezza (m)	Peso min-max (kg)	Numero passeggeri
ATR-72	27.05	27.17	7.65	12400-22000	60-70
SAAB 2000	24.76	27.28	7.73	13800-22800	58

Tabella 2.10: Caratteristiche dell'ATR-72 e del Saab 2000 a confronto

Per ciò che riguarda i motori, i turboelica GMA 2100 da 4152 HP realmente utilizzati dal Saab 2000 sono stati idealmente sostituiti con i turboelica Allison T56-A-15LFE da 4508 HP.

Per il Falcon 2000 si sono utilizzati i times in mode del Falcon 100 simile per dimensioni e peso come riportato in Tabella 2.11 mentre i motori jet CFE Company CFE738-1-1B da 2600 *kg/s* di spinta sono stati idealmente sostituiti con gli Allison AE-3007C da 2900 *kg/s*.

Tipo velivolo	Lunghezza (m)	Apertura alare (m)	Altezza (m)	Peso min-max (kg)	Numero passeggeri
Falcon 100	18.86	18.52	6.98	9150-18005	12
Falcon 2000	19.33	20.23	7.06	9405-16238	12

Tabella 2.11: Caratteristiche del Falcon 100 e del Falcon 2000 a confronto

Si dispone a questo punto di tre aerei fittizi perfettamente supportati i cui dati sono riassunti nelle tabelle 2.12, 2.13 e 2.14.

Velivolo	Fairchild Dornier 328 (FRJ)	
Dimensione	Small	
Designazione	Aereo civile	
Utilizzo	Trasporto passeggeri	
Tipo di motore	Jet	
Profilo fittizio	Dornier 328	
Motore fittizio	AE3007C	
Fase di LTO	Tempo (min)	Consumo (kg/s)
Takeoff	0.81	0.280000
Climb out	1.08	0.234000
Approach	5.78	0.091000
Landing	0.29	0.039000

Tabella 2.12: Caratteristiche del Fairchild Dornier 328 Jet fittizio

Velivolo	Dassault Falcon 2000	
Dimensione	Small	
Designazione	Aereo civile	
Utilizzo	Trasporto passeggeri	
Tipo di motore	Jet	
Profilo fittizio	Dassault Falcon 100	
Motore fittizio	AE3007C	
Fase di LTO	Tempo (min)	Consumo (kg/s)
Takeoff	0.81	0.280000
Climb out	0.61	0.234000
Approach	3.7	0.091000
Landing	0.16	0.039000

Tabella 2.13: Caratteristiche del Falcon 2000 fittizio

Velivolo	Saab 2000	
Dimensione	Large	
Designazione	Aereo civile	
Utilizzo	Trasporto passeggeri	
Tipo di motore	Turboelica	
Profilo fittizio	ATR-72	
Motore fittizio	T56-A-15LFE	
Fase di LTO	Tempo (min)	Consumo (kg/s)
Takeoff	0.81	0.309500
Climb out	1.08	0.274700
Approach	5.78	0.156200
Landing	0.29	0.113000

Tabella 2.14: Caratteristiche del Saab 2000 fittizio

Per quanto riguarda la voce “dimensione” nelle tabelle soprastanti si fa riferimento alla classificazione degli aereomobili in base al peso eseguita dall’FAA per l’INM², Integrated Noise Model, e riportata in Tabella 2.15.

Categoria	Peso (lb)	Peso (kg)	Abbreviazione
Heavy	≥ 255000	≥ 115666.050	H
Large	> 41000	> 18597.287	L
	< 255000	< 115666.050	
Small	≤ 41000	≤ 18597.287	S

Tabella 2.15: Classificazione degli aerei in base al peso

Il numero di tutti i movimenti effettivamente eseguiti presso lo scalo Marco Polo nel 2002 è pari a:

$$62059 \text{ linea e charter} + 3699 \text{ G.A.} = 65758 \text{ movimenti totali}$$

corrispondenti a 32879 LTO. A causa degli arrotondamenti (un velivolo in EDMS può compiere solo un numero intero di LTO, come asserito precedentemente) la somma di tutti gli LTO riportati nelle tabelle 2.1, 2.2, 2.3 e 2.9 è pari a 32880 LTO. Tale valore è stato ritenuto accettabile.

Per ragioni di sicurezza, una volta atterrato un velivolo abbandona la runway quanto prima e quindi l’intervallo di tempo che intercorre tra l’istante in cui le ruote sono venute a contatto col suolo e l’istante in cui esso comincia a percorrere la taxi, ovvero il tempo necessario a concludere il landing, è generalmente molto contenuto, di gran lunga inferiore al tempo di takeoff, di climb out e di approach. Nel caso specifico dell’A319 il tempo di landing, secondo la Tabella 2.5, è pari a circa il 64% del tempo per il takeoff, al 63% di quello per il climb out e al 16% di quello per l’approach. Il consumo di carburante inoltre è in questa fase estremamente contenuto, come visto in Tabella 2.7 e, di conseguenza, saranno relativamente contenute anche le emissioni. Per queste ragioni il landing non viene trattato come una fase a se stante ma viene inglobata nella più generale taxi/idle/queue di cui si è detto nel capitolo precedente.

In particolare EDMS assume che il consumo di carburante sia del tutto analogo durante il landing, durante la percorrenza delle taxi e durante gli idles. Per ogni velivolo si è quindi dovuto provvedere alla definizione del tempo necessario affinché esso si sposti

²Ulteriori dati su questo argomento, di relativo interesse per il presente studio, sono reperibili nel rapporto “FAA’s air traffic control”, classificato FAA-7110.65M, del 10 agosto 2000.

dalla runway al gate e viceversa, tenendo conto dei tempi di attesa e delle code. EDMS considera trascurabili code di durata inferiore ai 20 minuti.

È stato quindi necessario interpellare l'Ufficio Sicurezza in Pista della SAVE S.p.A. e, a seguito di ripetuti incontri, si è giunti alle seguenti conclusioni:

- non è possibile realizzare, per mancanza di dati, un'analisi dettagliata caso per caso del tempo trascorso in coda da parte dei velivoli che si preparano al decollo;
- i responsabili della sicurezza in pista assicurano che durante le ore di intenso traffico la durata delle code è al massimo di 10 minuti mentre è nulla o comunque trascurabile nelle ore di traffico moderato;
- i massimi picchi di attività dello scalo si registrano tra le ore 9:00 e le ore 13:00 e tra le 16:00 e le 18:00; durante queste ore nei mesi di gennaio e febbraio 2004, in diversi giorni settimanali, si è provveduto a rilevare il tempo trascorso in coda dai velivoli e si è verificato che, sebbene l'attività dello scalo sia molto aumentata rispetto al 2002, il tempo massimo di coda è inferiore ai 10 minuti;
- i tempi di idle sono molto inferiori ai tempi di percorrenza della taxi e quindi trascurabili.

Si è giunti alla conclusione che il tempo necessario per la realizzazione della fase di taxi/idle/queue è pari al tempo di landing più il tempo necessario alla percorrenza della taxi e si sono di conseguenza ottenuti i dati riportati nelle tabelle 2.16, 2.17 e 2.18.

Tali valori sono stati determinati tenendo conto che la velocità massima consentita sul piazzale dell'aeroporto per qualsiasi mezzo è posta pari a 30 km/h , ossia circa 19 mi/h . Si è quindi provveduto, come già anticipato nell'introduzione a questo capitolo, ad una completa digitalizzazione delle taxi. Ognuna di esse è stata suddivisa in segmenti, le cui coordinate sono espresse in riferimento della terna cartesiana precedentemente definita, di varia lunghezza, la cui combinazione fornisce una fedele rappresentazione del percorso compiuto dal velivolo dal gate alla runway e viceversa.

Modello di aereo	Tipo di volo	Tempo di taxi (min)
A300-600	Charter	7
A319	Charter	7
A320	Charter	6
A321	Charter	7
A330-300	Charter	8
RJ-100	Charter	5
717-200	Charter	7
737-300	Charter	6
747-400	Charter	9
757-200	Charter	7
767-300	Charter	7
Reg-100	Charter	5
BAe146-300	Charter	5
Fokker 100	Charter	7
MD-80	Charter	6
Tu-134	Charter	5
Tu-154	Charter	5

Tabella 2.16: Tempi necessari alla percorrenza della taxi da parte di aerei charter

Modello di aereo	Tipo di volo	Tempo di taxi (min)
A310	G. A.	6
King Air 90	G. A.	7
737-300	G. A.	6
BD-700	G. A.	7
CL-600	G. A.	7
Citation II	G. A.	4
Citation V	G. A.	4
Citation VII	G. A.	4
Citation X	G. A.	4
Falcon 50	G. A.	6
Falcon 100	G. A.	6
Falcon 2000	G. A.	4
Gulfstream IV	G. A.	4
Gulfstream V	G. A.	4
PA-28	G. A.	6

Tabella 2.17: Tempi necessari alla percorrenza della taxi da parte di aerei G. A.

Modello di aereo	Tipo di volo	Tempo di taxi (min)
A319	linea	6
A320	linea	6
A320	linea-low cost	6
A321	linea	6
RJ-100	linea	6
RJ-85	linea	5
ATR72-210	linea	5
737-200	linea	7
737-300	linea	6
737-300	linea-low cost	6
737-400	linea	6
737-500	linea	6
737-700	linea-low cost	7
767-300	linea	7
Reg-100	linea	5
Reg-700	linea	5
DHC-8-300	linea	5
DHC-8-400	linea	5
Do-328	linea	5
ERJ 135	linea	5
ERJ 145	linea	5
FRJ	linea	6
Fokker 70	linea	6
Fokker 100	linea	7
MD-80	linea	6
MD-80-82	linea	6
MD-80-83	linea	7
MD-80-87	linea	6
MD-80-88	linea	6
SAAB 2000	linea	5
Tu-154	linea	5

Tabella 2.18: Tempi necessari alla percorrenza della taxi da parte di aerei di linea

Per l'Airbus A319 di linea considerato precedentemente, ad esempio, si ottiene che il percorso di taxi può essere considerato come costituito dai segmenti riportati in Tabella 2.19 dove i nomi sono stati assegnati in modo da essere il più possibile fedeli alle label di identificazione reali delle taxi stesse.

A319 - Taxi assegnate				
Segmento	Primo estremo		Secondo estremo	
	x (m)	y (m)	x (m)	y (m)
ACC-OUT	-1060.00	-1180.00	-1129.00	-1117.87
B2-OUT	-1129.00	-1117.87	-1081.50	-896.93
B7-IN	251.50	282.50	289.00	468.50
B7a-IN	212.50	540.18	289.00	468.50
D0-OUT	-1034.00	-675.98	-646.00	-245.07
E1-OUT	-646.00	-245.07	-655.00	-73.82
E2-OUT	-655.00	-73.82	-658.50	-7.22
E3-OUT	-658.50	-7.22	-661.00	40.35
E4-IN	-661.00	40.35	-665.00	116.46
MAIN2-IN	-661.00	40.35	-739.00	36.45
MAIN2-OUT	-661.00	40.35	-739.00	36.45
R1-OUT	-1081.50	-896.93	-1034.00	-675.98
T5-IN	-171.00	114.27	-152.39	134.93
T6-IN	212.50	540.18	-152.39	134.93
W0-IN	-171.00	114.27	-665.00	116.46

Tabella 2.19: Segmenti di taxi percorsi dall'Airbus A319 di linea durante ogni LTO

Per una migliore lettura del percorso seguito si può considerare la Figura 2.6.

Si può facilmente determinare la lunghezza di ogni segmento di taxi e quindi, nota la velocità con cui viene percorso, determinare il tempo necessario al completamento di questa fase per ciascun LTO. Si noti che la velocità viene sempre ritenuta costante e pari ai 30 *km/h* massimi senza quindi considerare eventuali accelerazioni e decelerazioni necessarie, ad esempio, per accedere ed abbandonare il gate. Nel caso specifico dell'A319 si ottiene in questo modo un tempo di taxi pari a 6.22 minuti, arrotondati da EDMS a 6.

Si noti che nella Tabella 2.19 le diciture "IN" e "OUT" indicano semplicemente il verso di percorrenza di uno stesso segmento di taxi: si ha quindi, ad esempio, che MAIN2-IN e MAIN2-OUT sono lo stesso tratto di taxi ma percorso, rispettivamente, all'ingresso al gate e alla sua uscita.

Ovviamente non esistono taxi riservate ad un preciso tipo di aereo e non c'è modo di stabilire se un determinato velivolo ha usufruito di un certo gate o meno per mancanza di dati. Per una corretta attribuzione ai gates e alle conseguenti taxi si è tenuto conto delle osservazioni effettuate in pista nei mesi di gennaio e febbraio 2004 e del fatto che i servizi

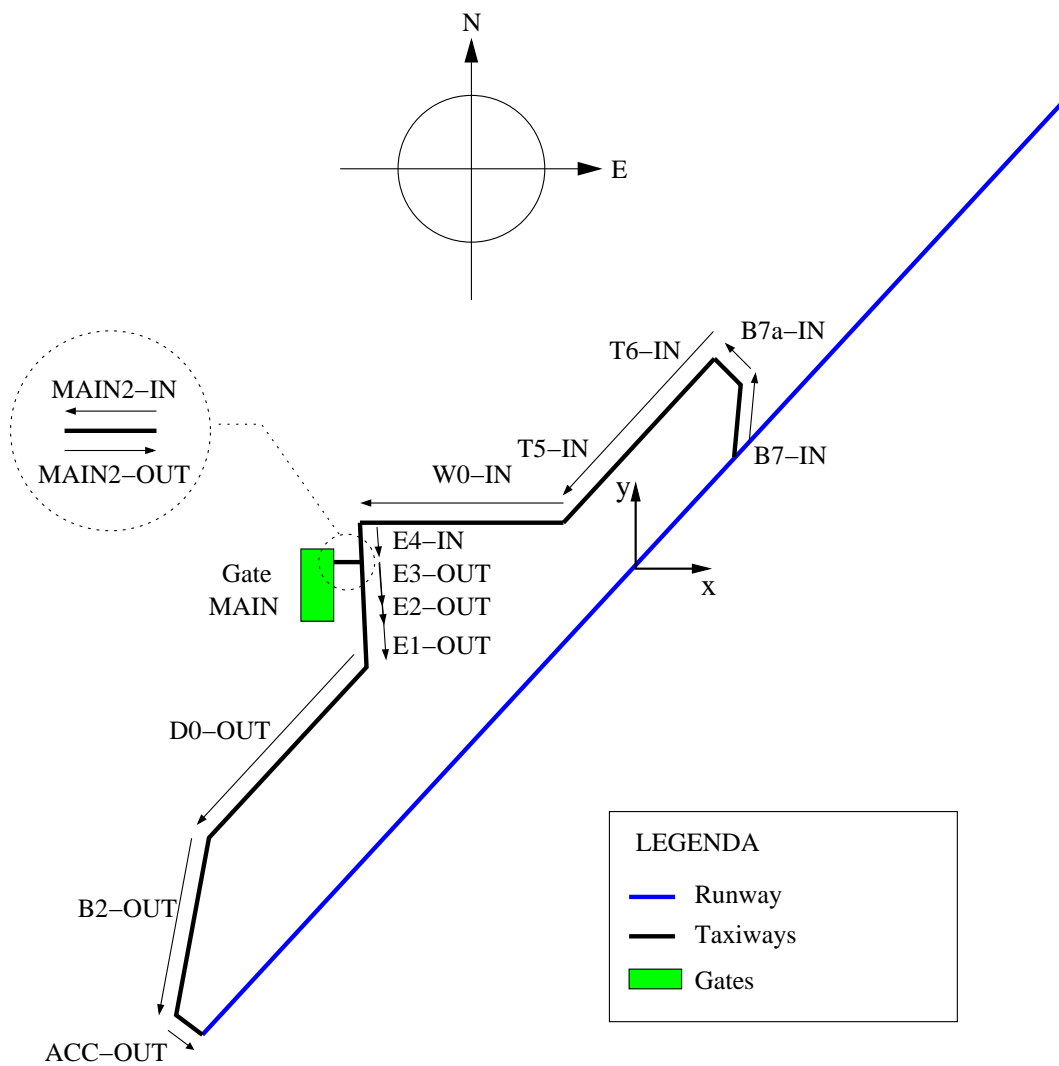


Figura 2.6: Segmenti di taxi percorsi dall'Airbus A319 di linea durante ogni LTO

di *fingering* al gate main, ovvero al gate principale, sono a pagamento: ne consegue che i voli charter e low cost, ovvero voli per i quali le compagnie commerciali tendono a contenere i costi, non sono stati quasi mai indirizzati verso questo gate. Per ulteriori dettagli riguardo a questo argomento si rimanda ai prossimi paragrafi.

Si può ulteriormente notare che la runway, caratterizzata dalle sigle 04R/22L, della lunghezza di 3300 metri e larga 45 m, viene percorsa dagli aerei in decollo e in atterraggio sempre nel medesimo verso, ovvero dall'estremità a Sud-Ovest (04R) a quella a Nord-Est (22L): ciò risulta ovviamente di fondamentale importanza nell'assegnamento dei segmenti delle taxi ai velivoli.

Una volta assegnate le taxi e calcolati i relativi tempi a ciascun tipo di velivolo compreso nello studio, è possibile procedere al calcolo delle emissioni su base annuale mediante i coefficienti di emissione messi a disposizione dell'ICAO di cui si è detto al Paragrafo 1.2. Tali coefficienti di emissione sono espressi in g/kg , ovvero grammi di sostanza inquinante su chilogrammi di combustibile consumato.

Nel caso specifico dell'A319 equipaggiato da due motori General Electric CFM56-5B6/P si ottengono i valori riportati in Tabella 2.20.

General Electric CFM56-5B6/P				
	Coefficienti di emissione-g/kg			
Fase	CO	HC	NO_x	SO_x
Takeoff	0.900000	0.200000	23.600000	1.000000
Climb out	1.000000	0.200000	19.600000	1.000000
Approach	2.900000	0.600000	9.200000	1.000000
Idle	27.700000	5.500000	4.000000	1.000000

Tabella 2.20: Coefficienti di emissione forniti dall'ICAO per il motore General Electric CFM56-5B6/P che equipaggia l'Airbus A319 di linea

Un motore di tipo aeronautico, come quello in Figura 2.7, è costituito principalmente da:

- una camera di combustione dove vengono iniettati il combustibile, mediante un atomizzatore, e l'aria compressa, mediante un dispositivo noto come *swirler*: quest'ultimo ha lo scopo di imprimere un moto vorticoso al fluido in modo tale da favorire la miscelazione dei reagenti e la ricircolazione. Lo *swirler* ha anche lo scopo di stabilizzare la fiamma e permettere un maggiore controllo sulla sua lunghezza. Il combustibile, JET-A/JP8, e l'aria si trovano in proporzioni stechiometriche. In questa camera si ha quindi lo sviluppo di reazioni esotermiche di combustione con produzione di una fiamma non premiscelata e con conseguente aumento della temperatura dei gas in uscita;

- i gas in uscita dalla camera di combustione si espandono in una turbina che pone in movimento l'albero dell'elica;
- i gas in uscita dalla turbina si espandono ulteriormente in un ugello di scarico ed entrano in atmosfera.

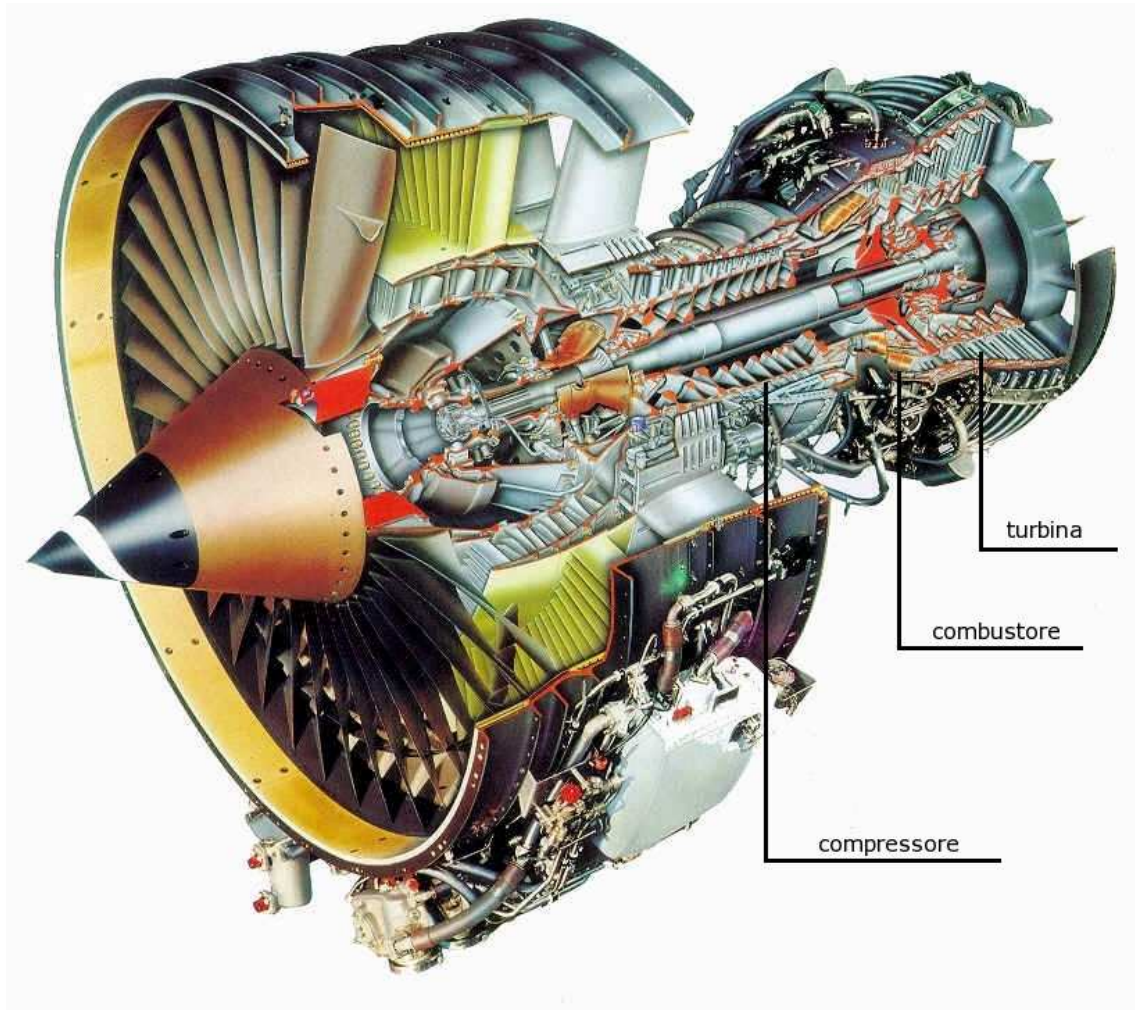


Figura 2.7: Schema di un motore aeronautico della classe General Electric CFM56

Nei turboreattori moderni vi è anche un flusso d'aria secondario esterno alla camera di combustione che, oltre a servire come fluido di raffreddamento, attenua il rumore generato dal motore e completa le reazioni. La camera di combustione può essere infatti suddivisa in tre zone:

1. zona primaria: è la zona di sviluppo della fiamma dove, grazie alle condizioni stechiometriche e a vortici di ricircolo che aumentano il tempo di residenza della miscela, si raggiungono temperature molto elevate, circa 2300 K ;

2. zona secondaria: nella zona primaria a causa delle alte temperature si ha la produzione di una notevole quantità di CO il quale rappresenta di fatto un combustibile. Nella zona secondaria si ha un abbassamento della temperatura di lavoro e una successiva riossidazione del monossido di carbonio grazie all'iniezione di aria di raffreddamento;
3. zona di diluizione: in quest'ultima zona viene ancora iniettata aria con conseguente abbassamento delle temperature sino a 1400 K . Si può assumere che in queste condizioni le reazioni esotermiche di combustione non abbiano più luogo e che quindi la composizione chimica dei gas di scarico si mantenga costante. L'iniezione d'aria ha anche lo scopo di rendere omogeneo il profilo di velocità prima dell'ingresso dei gas in turbina.

Si osservi la Figura 2.8 per una rappresentazione schematica.

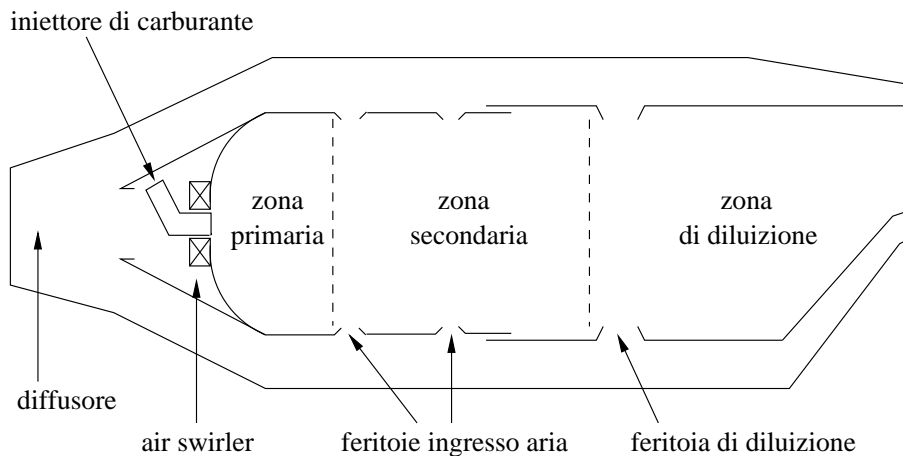
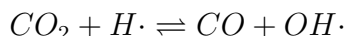


Figura 2.8: Rappresentazione schematica della camera di combustione di un motore jet

Nelle camere di combustione degli attuali motori aeronautici queste tre zone non sono fisicamente distinguibili e ciò influisce negativamente sul controllo delle reazioni chimiche che vi si verificano. Attualmente i progettisti dei nuovi motori aeronautici tendono invece a delegare i vari processi a zone distinte e ben separate con conseguente diminuzione dei consumi e delle emissioni inquinanti. Si può complessivamente asserire che il progetto della camera di combustione, oltre ovviamente alla composizione chimica del carburante, determina il livello dei prodotti secondari quali CO , idrocarburi incombusti, NO_x , SO_x e particolato.

Si può quindi concludere che:

CO : si forma nella zona primaria della camera di combustione a causa di una non uniforme concentrazione di O_2 e a causa delle alte temperature che portano alla reazione radicalica:

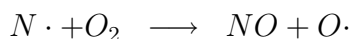
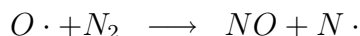
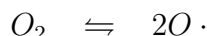


HC: si tratta di idrocarburi costituiti da:

- particelle o vapori di carburante incombusto che fuoriescono dal motore a causa della non corretta miscelazione dei reagenti o di un non corretto rapporto di combustione a livello microlocale;
- prodotti della degradazione termica del carburante

All'aumentare della potenza del motore aumenta la temperatura e la pressione in camera di combustione; ciò influisce sul rapporto di combustione con conseguente diminuzione delle emissioni di idrocarburi.

NO_x: si possono formare per ossidazione dell'azoto contenuto nel carburante o per ossidazione dell'*N₂* atmosferico. In quest'ultimo caso si può distinguere tra reazioni estremamente veloci che avvengono sul fronte di fiamma, di difficile studio ³, e reazioni nei gas post fiamma per le quali Zeldovich ha proposto il seguente meccanismo:



La seconda reazione, che porta alla formazione del radicale *N·*, è molto lenta mentre la terza è estremamente veloce: si conclude che la concentrazione istantanea di radicale *N·* è trascurabile rispetto a quelle di reagenti e prodotti. Per questo motivo non si annovera il radicale di azoto tra i prodotti della combustione.

³Le reazioni sul fronte di fiamma sono in genere estremamente veloci e, nel nostro caso, trattandosi di un combustibile con composizione chimica molto complessa, sono caratterizzate da meccanismi di reazione molto articolati la cui descrizione esula dagli scopi del presente studio. Si rimanda pertanto alla letteratura specializzata, ad esempio "An introduction to combustion" di S.R. Turns, per ogni ulteriore approfondimento.

SO_x : si ottengono per ossidazione in camera di combustione dello zolfo contenuto nel carburante. I tenori di zolfo nel JET-A/JP8, come si è già detto al Capitolo 1, sono estremamente contenuti e di conseguenza le emissioni di ossidi di zolfo sono parimenti modeste.

PM_{10} : si tratta di particelle di fuliggine che si formano principalmente nella zona primaria della camera di combustione ed in particolare in corrispondenza di aree dove la miscelazione è inadeguata e si verifica un eccesso di combustibile. Sono costituite prevalentemente da carbonio, 96%, e da idrogeno e ossigeno; la maggior parte del particolato viene consumato nella zona secondaria. I principali fattori che influiscono sulla quantità di particolato prodotta sono la composizione chimica del carburante, la pressione e la temperatura in camera di combustione e la modalità di iniezione del carburante. Complessivamente nei motori aeronautici la quantità di PM_{10} prodotta è così piccola da essere ritenuta trascurabile per tutte le fasi dell'LTO.

Alla luce di quanto asserito nella fase di idle si attendono valori modesti della concentrazione di ossidi di azoto e ossidi di zolfo mentre si attendono valori elevati per il monossido di carbonio e gli idrocarburi.

Contrariamente, nella fase di takeoff, quando la potenza del motore è al massimo, si hanno valori modesti della concentrazione di CO e HC e valori elevati per gli NO_x . Gli SO_x si mantengono comunque modesti a causa del basso tenore di zolfo del combustibile.

Per le fasi di climb out e approach si ottengono valori intermedi tra i due casi estremi rappresentati dal takeoff e dall'idle.

Nel caso specifico dell'Airbus A319 di linea si osserva che tali attese sono perfettamente rispettate e ciò è stato visivamente illustrato in Figura 2.9 che rappresenta un confronto tra i coefficienti di emissione.

La produzione di CO nella fase di takeoff per chilogrammo di combustibile consumato rappresenta il 3.25% di quella nel caso dell'idle. Per il climb out e l'approach la percentuale sale rispettivamente al 3.61% e al 10.47%. Per gli idrocarburi sono del tutto analoghe, 3.63% per il takeoff e il climb out, 10.91% per il climb out.

Al contrario gli NO_x vengono prodotti in percentuale del 16.95% nell'idle rispetto al takeoff mentre per il climb out e l'approach si sale al 38.98% e all'83.05%.

Per gli altri velivoli le conclusioni sono del tutto analoghe pur con diversi valori e rapporti.

Un caso particolare tuttavia è rappresentato dal Piper PA-28. Si tratta di un aereo di piccole dimensioni dotato di motore a pistoni, un Textron Lycoming IO-320-DIAD di potenza massima estremamente contenuta, intorno ai 200 *hp*. In questo caso, la mancanza

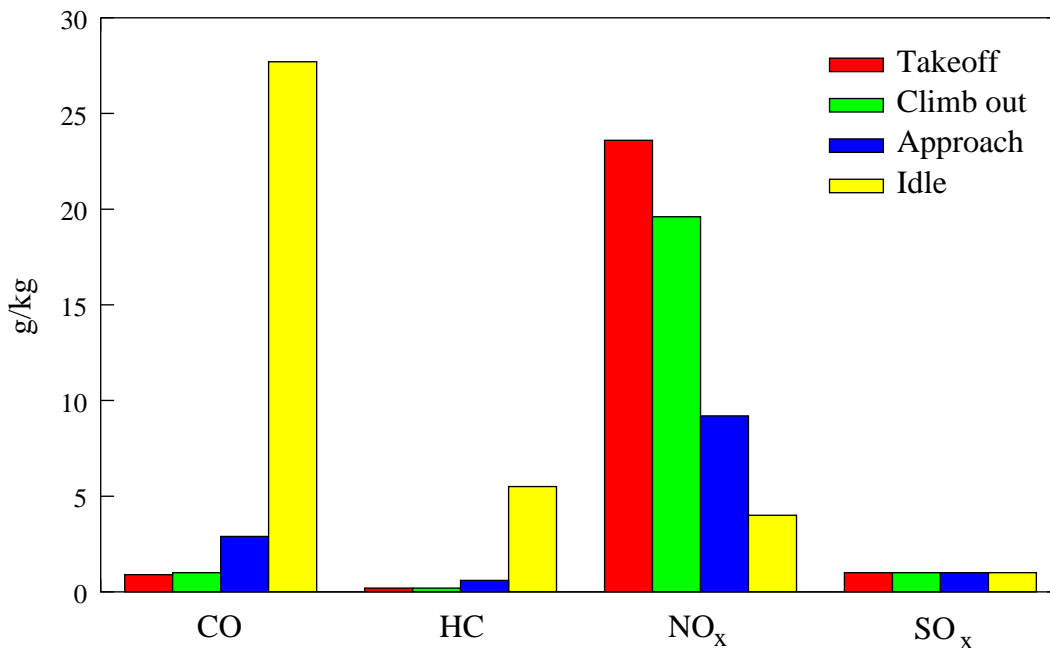


Figura 2.9: Confronto visivo tra i coefficienti di emissione del motore General Electric CFM56-5B6/P che equipaggia l'A319 di linea

di una camera in cui si possa verificare la riossidazione del monossido di carbonio fa sì che le emissioni di CO aumentino all'aumentare della potenza del motore.

Si ottengono così i fattori di emissione riportati in Tabella 2.21.

Textronic Lycoming IO-320-DIAD				
	Coefficienti di emissione (g/kg)			
Fase	CO	HC	NO _x	SO _x
Takeoff	1192.00	11.42	1.82	0.11
Climb out	888.30	9.63	5.60	0.11
Approach	944.40	12.20	3.40	0.11
Idle	618.00	31.10	1.00	0.11

Tabella 2.21: Coefficienti di emissione per il motore Textronic Lycoming IO-320-DIAD che equipaggia il Piper PA-28 di G.A.

Il coefficiente di emissione del CO nella fase di idle rappresenta il 51.85% del coefficiente per il takeoff; per il climb out e per l'approach si hanno invece rispettivamente il 75.52% e il 79.23%.

Ciò che più impressiona tuttavia sono i valori dei coefficienti di emissione del monossido di carbonio confrontati con quelli di un motore turbofan quale può essere il General Electric CFM56-5B6/P che equipaggia l'A319 (si noti che l'A319 è un bimotore mentre il PA-28 è un monomotore). Il confronto è stato realizzato in Tabella 2.22.

Fattori di emissione-CO (g_{CO}/kg_{fuel})		
Fase	IO-320-DIAD	CFM56-5B6/P
Takeoff	1192.00	0.90
Climb out	888.30	1.00
Approach	944.40	2.90
Idle	618.00	27.70

Tabella 2.22: Confronto tra i fattori di emissione per il monossido di carbonio di un motore Textronic Lycoming IO-320-DIAD e un General Electric CFM56-5B6/P

La massa di monossido di carbonio emessa dal motore dell'A319 per unità di massa di carburante durante il takeoff rappresenta circa lo 0.076% di quella emessa dal motore del Piper. La percentuale sale al 4.482% nella fase di idle.

Va tuttavia ricordato che il consumo di carburante nel caso del Piper è notevolmente inferiore rispetto all'A319. In Tabella 2.23 si sono riportati i consumi nei due casi.

Consumo di carburante (kg/s)		
Fase	PA-28	A319
Takeoff	0.011550	0.961000
Climb out	0.007736	0.799000
Approach	0.004744	0.275000
Idle	0.000989	0.097000

Tabella 2.23: Confronto tra i fattori di emissione di un motore Textronic Lycoming IO-320-DIAD e un General Electric CFM56-5B6/P

Si può osservare che il consumo nel caso dell'A319 è sempre uno o due ordini di grandezza superiore rispetto al Piper.

Per nessun altro aereo del presente studio si sono rilevati coefficienti di emissione confrontabili con quelli del Textronic Lycoming IO-320-DIAD che equipaggia il PA-28. Per ulteriori dettagli si rimanda all'Appendice D.

A questo punto EDMS dispone di tutti i dati necessari al calcolo delle emissioni su base annuale; tuttavia, come visto al Paragrafo 1.3, AERMOD necessita di conoscere le emissioni di carburante ora per ora, giorno per giorno o mese per mese a seconda dell'intervallo di tempo minimo considerato.

Si è quindi provveduto alla determinazione del numero di voli eseguito da ciascun tipo di aereo per ogni fascia oraria del giorno, per ogni giorno della settimana e per ogni mese e si è provveduto alla determinazione dei profili orari, settimanali e mensili come indicato al Paragrafo 1.2.1. Si può notare che le autorità aeroportuali non dispongono di dati in formato digitale direttamente utilizzabili a questo scopo e quindi la determinazione

dei valori in oggetto è avvenuta inserendo quelli forniti su supporto cartaceo in fogli elettronici e provvedendo poi alla definizione dei filtri opportuni.

In questo modo, per l'Airbus A319 di linea, ad esempio, si sono ottenuti i valori riportati nelle tabelle 2.24, 2.25 e 2.26.

A319		
Fascia oraria	Movimenti	LTO
Dalle 00 alle 01	0	0
Dalle 01 alle 02	0	0
Dalle 02 alle 03	0	0
Dalle 03 alle 04	0	0
Dalle 04 alle 05	0	0
Dalle 05 alle 06	0	0
Dalle 06 alle 07	12	6
Dalle 07 alle 08	77	39
Dalle 08 alle 09	0	0
Dalle 09 alle 10	0	0
Dalle 10 alle 11	66	33
Dalle 11 alle 12	66	33
Dalle 12 alle 13	137	69
Dalle 13 alle 14	47	24
Dalle 14 alle 15	0	0
Dalle 15 alle 16	0	0
Dalle 16 alle 17	150	75
Dalle 17 alle 18	0	0
Dalle 18 alle 19	0	0
Dalle 19 alle 20	180	90
Dalle 20 alle 21	76	38
Dalle 21 alle 22	0	0
Dalle 22 alle 23	0	0
Dalle 23 alle 00	0	0

Tabella 2.24: Movimenti ed LTO per ciascuna fascia oraria per l'Airbus A319

Gli LTO sono posti pari alla metà dei movimenti e quindi, a causa degli inevitabili arrotondamenti, si può osservare che il numero di LTO complessivi calcolati sommando quelli di tutte le fasce orarie è pari a 407 mentre il valore reale, precedentemente calcolato, è 406. Il valore 407 è stato comunque ritenuto accettabile. Lo stesso si può dire per la somma degli LTO su base mensile, mentre la somma degli LTO su base settimanale è esatta.

A319		
Giorno settimanale	Movimenti	LTO
lunedì	142	71
martedì	144	72
mercoledì	140	70
giovedì	140	70
venerdì	140	70
sabato	61	31
domenica	44	22

Tabella 2.25: Movimenti ed LTO per ciascun giorno settimanale per l'Airbus A319

A319		
Mese	Movimenti	LTO
gennaio	58	29
febbraio	52	26
marzo	55	28
aprile	48	24
maggio	50	25
giugno	45	23
luglio	50	25
agosto	59	30
settembre	88	44
ottobre	98	49
novembre	102	51
dicembre	106	53

Tabella 2.26: Movimenti ed LTO per ogni mese per l'Airbus A319

Si può a questo punto determinare il numero massimo di LTO effettuati per ogni fascia temporale:

- il picco orario per l'A319 si verifica tra le ore 19:00 e le ore 20:00 con 90 LTO;
- il picco settimanale si verifica di martedì con 72 LTO;
- il picco mensile si verifica in dicembre con 53 LTO.

Si ricorda che i picchi orari e settimanali sono sempre riferiti su base annuale. Ovvero, dire che vi è un picco orario tra le 19:00 e le 20:00 pari a 90 LTO significa che in tutto il 2002 gli A319 hanno effettuato 90 LTO tra le ore 19:00 e le 20:00. Similmente si ha per i picchi settimanali.

A questo punto si possono definire i profili orari, settimanali e mensili dividendo ogni valore relativo ad una certa fascia temporale per il valore massimo. Si ottengono quindi le tabelle 2.27, 2.28 e 2.29.

A319	
Giorno settimanale	Profilo
lunedì	0.9861
martedì	1.0000
mercoledì	0.9722
giovedì	0.9722
venerdì	0.9722
sabato	0.4306
domenica	0.3056

Tabella 2.27: Profilo settimanale per l'Airbus A319

In input ad EDMS vengono quindi forniti i profili temporali e il numero di LTO totali eseguiti nel 2002. In questo modo è possibile risalire al numero di LTO effettuati nella fascia temporale di interesse.

Si supponga ad esempio di voler effettuare una simulazione di dispersione relativamente alla fascia oraria compresa tra le 20:00 e le 21:00 del 15 ottobre 2002. Le emissioni dipendono ovviamente dal numero di LTO effettuati e tale valore viene determinato da EDMS nel modo seguente:

- innanzitutto si determina il numero di LTO effettuati nel mese di interesse, in questo caso ottobre. Si sommano quindi i profili di tutti i mesi:

A319	
Mese	Profilo
gennaio	0.5472
febbraio	0.4906
marzo	0.5283
aprile	0.4528
maggio	0.4717
giugno	0.4340
luglio	0.4717
agosto	0.5660
settembre	0.8302
ottobre	0.9245
novembre	0.9623
dicembre	1.0000

Tabella 2.28: Profilo mensile per l' Airbus A319

$$0.5472 + 0.4906 + 0.5283 + 0.4528 + 0.4717 + 0.4340 + 0.4717 + \\ + 0.5660 + 0.8302 + 0.9245 + 0.9623 + 1.0000 = 7.6792 LTO/LTO_{max}$$

Quindi si divide il numero di LTO annuali, 406, per il valore ottenuto, determinando il numero di LTO massimi mensili:

$$406/7.6792 \simeq 53 LTO_{max}$$

Per il mese di ottobre allora si ottengono:

$$53 * 0.9245 \simeq 49 LTO$$

- dal calendario di EDMS si ha che il 15 ottobre 2002 è un martedì. Si calcola allora la somma dei profili di tutte le fasce dei giorni della settimana:

$$0.9861 + 1.0000 + 0.9722 + 0.9722 + 0.9722 + 0.4306 + 0.3056 = \\ = 5.6389 LTO/LTO_{maxsett}$$

Quindi si divide il numero di LTO mensile per quest'ultimo valore calcolato:

A319	
Fascia oraria	Profilo
Dalle 00 alle 01	0.0000
Dalle 01 alle 02	0.0000
Dalle 02 alle 03	0.0000
Dalle 03 alle 04	0.0000
Dalle 04 alle 05	0.0000
Dalle 05 alle 06	0.0000
Dalle 06 alle 07	0.0667
Dalle 07 alle 08	0.4333
Dalle 08 alle 09	0.0000
Dalle 09 alle 10	0.0000
Dalle 10 alle 11	0.3667
Dalle 11 alle 12	0.3667
Dalle 12 alle 13	0.7667
Dalle 13 alle 14	0.2667
Dalle 14 alle 15	0.0000
Dalle 15 alle 16	0.0000
Dalle 16 alle 17	0.8333
Dalle 17 alle 18	0.0000
Dalle 18 alle 19	0.0000
Dalle 19 alle 20	1.0000
Dalle 20 alle 21	0.4222
Dalle 21 alle 22	0.0000
Dalle 22 alle 23	0.0000
Dalle 23 alle 00	0.0000

Tabella 2.29: Profilo orario per l'Airbus A319

$$53/5.6389 \simeq 9 LTO_{maxsett}$$

e il valore ottenuto viene moltiplicato per il profilo del martedì:

$$9 * 1.0000 = 9 LTO$$

Questi sono però gli LTO compiuti in tutti i martedì di ottobre. Dividendo allora per 5, ovvero il per il numero di martedì che ci sono in ottobre si hanno gli LTO effettuati nel giorno desiderato:

$$9/5 \simeq 2 LTO_{mar}$$

- si determina a questo punto la somma di tutti i profili per fasce orarie:

$$0.0667 + 0.4333 + 0.3667 + 0.3667 + 0.7667 + 0.2667 + 0.8333 + \\ + 1.0000 + 0.4222 = 4.5223 LTO/LTO_{maxg}$$

Quindi similmente a quanto visto sinora:

$$2/4.5223 * 0.4222 = 0.1867 LTO$$

LTO effettuati dall'A319 nella fascia oraria considerata. Questo valore ovviamente non ha significato fisico, un aereo non può effettuare una frazione di LTO, ma è comunque utile per il calcolo delle emissioni.

Si può osservare che con il metodo esposto non si determina con esattezza il numero di LTO effettuati nella fascia temporale indicata ma si determina un valore medio. Infatti, se è vero ad esempio che nel mese di ottobre vengono effettuati 9 LTO nei giorni di martedì, non c'è modo di determinare come essi sono distribuiti: la Tabella 2.30 rappresenta tre ipotetiche distribuzioni di LTO completamente diverse tra loro ma trattate da EDMS allo stesso modo.

Data	Giorno settimanale	Prima distribuzione	Seconda distribuzione	Terza distribuzione
01/10/2002	martedì	1	2	0
08/10/2002	martedì	1	5	0
15/10/2002	martedì	1	2	0
22/10/2002	martedì	1	0	0
29/10/2002	martedì	5	0	9
Totale		9	9	9

Tabella 2.30: Tre distribuzioni di LTO trattate da EDMS in modo identico

Va tuttavia considerato che la maggior parte dei voli effettuati nel 2002 presso lo scalo in oggetto erano voli di linea a cadenza giornaliera e con orari fissi. La distribuzione degli LTO si può ritenere perciò complessivamente omogenea, falsata soltanto dal relativamente modesto contributo dei voli charter e di aviazione generale.

2.2 Le emissioni ai gates

Nella terminologia aeroportuale il termine gate identifica uno spazio fisico ben individuabile, in genere un edificio, in cui si trovano i passeggeri che, dopo essere stati accettati dalle autorità aeroportuali, sono in attesa di lasciare l'aeroporto o di salire sull'aereo.

Il gate così definito è quindi fisicamente molto prossimo al luogo in cui sostano gli aeromobili dal momento in cui arrivano al momento in cui ripartono. Ai fini dello studio delle emissioni in atmosfera il termine gate è stato perciò ridefinito in modo da indicare proprio queste aree in cui l'aereo è fermo e viene assistito dai mezzi e dal personale aeroportuale.

Nel presente studio sono stati così individuati cinque gates ovvero cinque zone sul piazzale dell'aeroporto in cui sono presenti i parcheggi dei velivoli. Essi possono essere distinti in un gate principale, gate main, e quattro gate remoti: il primo si differenzia da questi ultimi in quanto esso è fisicamente molto vicino al gate propriamente detto.

Dal Paragrafo 1.3.11 si evince che i gates vengono trattati da AERMOD come sorgenti volumetriche, ovvero come prismi retti, per i quali è necessario quindi definire base ed altezza. I punti che definiscono la base sono stati riportati in Tabella 2.31.

In Figura 2.10 si può osservare che per ogni gate sono state individuate una o più aree in cui si può parcheggiare un velivolo, ognuna delle quali è identificata da un segmento di taxi di uscita e di ingresso. Si può ad esempio notare che al main sono state identificate due aree caratterizzate dalle taxi MAIN1-IN/OUT e MAIN2-IN/OUT mentre al rem1 ne sono state individuate 4 caratterizzate dalle taxi REM1a-IN/OUT, REM1b-IN/OUT, REM1c-IN/OUT, REM1d-IN/OUT.

Queste aree corrispondono a parcheggi reali ma rispetto a questi ultimi sono in numero decisamente inferiore. Ad esempio, al rem1 sono presenti 12 parcheggi reali dei quali quelli in posizione centrale costituiscono le aree definite nel presente studio.

Sarebbe stato infatti inutile, non avendo dati a disposizione che permettano una certa attribuzione di un velivolo al parcheggio specifico di un certo gate, considerare l'insieme di tutti i parcheggi reali, tanto più che, come visto al capitolo precedente, AERMOD considera i gates come sorgenti volumetriche con concentrazione di inquinante costante in ogni punto: il fatto che quindi un velivolo venga sempre attribuito ad una certa area interna ad un gate o ad un'altra non conta nulla ai fini dell'elaborazione.

L'attribuzione di un certo tipo di velivolo ad una precisa zona influisce invece direttamente sul tempo di percorrenza della taxi e sulle relative emissioni. È per questo motivo che le aree individuate coincidono con i parcheggi reali più centrali: essi definiscono infatti un percorso medio da e per la runway.

Non è stato possibile reperire dati relativi alla distribuzione degli aerei ai gates e per questo motivo si sono effettuate varie visite sul piazzale dell'aeroporto durante i mesi di

Gate	Punto	Coordinate (m)	
		x	y
main	1	-820.00	52.50
	2	-740.00	56.50
	3	-731.43	-115.00
	4	-811.42	-119.00
rem1	1	-725.00	370.00
	2	-757.50	302.50
	3	-586.50	145.00
	4	-494.50	160.00
rem2	1	-387.50	326.50
	2	-405.50	307.04
	3	-345.50	251.54
	4	-327.50	271.00
rem3	1	-925.00	257.50
	2	-944.40	234.00
	3	-861.40	165.50
	4	842.00	189.00
rem4	1	-806.00	-269.00
	2	-1112.00	-610.00
	3	-1092.00	-627.95
	4	-786.00	-286.95

Tabella 2.31: Coordinate dei punti delle basi dei gates

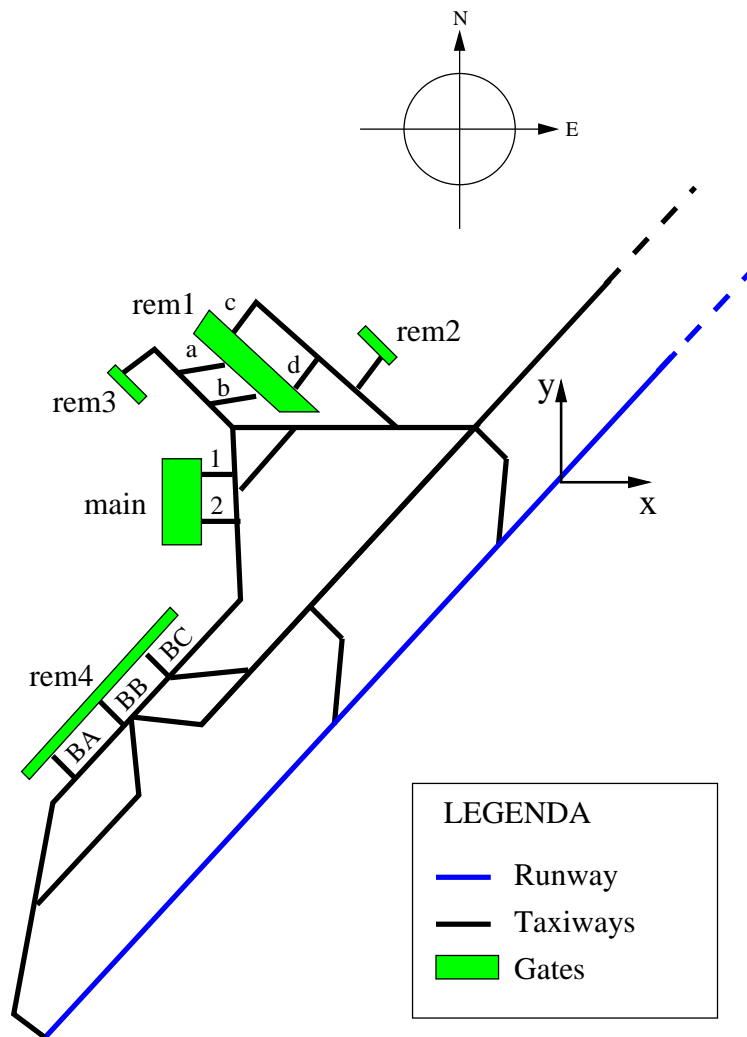


Figura 2.10: Mappa dei gates dell'aeroporto Marco Polo di Venezia

gennaio e febbraio 2004 e si sono effettuati incontri con i responsabili della sicurezza in pista, a seguito dei quali si è giunti alle seguenti conclusioni:

- le compagnie charter e low-cost tendono a contenere i costi e quindi, trattandosi di un servizio a pagamento, generalmente non utilizzano il finger. Quest'ultimo è una pedana mobile, dotata di copertura, in grado di portarsi a contatto con l'uscita anteriore di un velivolo fermo al gate facilitando così gli spostamenti dei passeggeri. L'aeroporto di Venezia dispone di fingers solo al main e quindi i velivoli che effettuano voli low-cost o charter non vengono in genere indirizzati a questo gate;
- gli aeromobili di notevoli dimensioni che effettuano voli charter transcontinentali, quali ad esempio Boeing 747 o Airbus A330, sono stati indirizzati al gate main sia per ragioni di ingombro spaziale sia perchè sono spesso gestiti da grandi compagnie che puntano sul comfort dei passeggeri;
- ai gates remoti rem2 e rem3 sono stati attribuiti solo aerei di piccole dimensioni e quindi di modesto ingombro.

A seguito di queste considerazioni si è giunti all'attribuzione dei velivoli ai gates secondo quanto riportato nelle tabelle 2.32, 2.33, 2.34, 2.35 e 2.36.

Al gate in genere i velivoli utilizzano un generatore di energia elettrica necessaria per il funzionamento dell'impianto di condizionamento e per mantenere attiva la strumentazione di bordo. Negli aerei di dimensioni medio-grandi questo generatore è rappresentato da una APU, Auxiliary Power Unit, ovvero un motore del tutto simile ai motori di tipo aeronautico, alimentato con lo stesso carburante JET-A/JP8, di dimensioni molto ridotte e, in genere, di potenza compresa tra gli 80 e i 400 *hp*. Da quanto indicato dai responsabili della sicurezza in pista si è concluso che l'APU rimane attiva mediamente per 30 minuti ad ogni LTO. L'ICAO fornisce i coefficienti di emissione per ciascun modello di APU ed essi sono stati riportati in Tabella 2.37. Si può notare che, come per i motori aeronautici deputati al movimento del velivolo, anche nel caso delle APU non sono previste emissioni di particolato.

Gate main		
Velivolo	Tipo di volo	Taxi (IN/OUT)
A330	Charter	MAIN1
A300-600	Charter	MAIN1
737-300	Charter	MAIN1
747-438	Charter	MAIN2
757-200	Charter	MAIN2
767-300	Charter	MAIN2
A310	G.A.	MAIN1
737-300	Linea	MAIN1
737-400	Linea	MAIN1
737-500	Linea	MAIN1
767-300	Linea	MAIN2
A319	Linea	MAIN2
A320	Linea	MAIN2
A321	Linea	MAIN1
MD-80	Linea	MAIN2
MD-80-82	Linea	MAIN1
MD-80-88	Linea	MAIN2

Tabella 2.32: Velivoli assegnati al gate main

Gate rem1		
Velivolo	Tipo di volo	Taxi (IN/OUT)
A319	Charter	REM1a
A320	Charter	REM1b
A321	Charter	REM1c
717-200	Charter	REM1c
Fokker 100	Charter	REM1a
MD-80	Charter	REM1d
737-300	G.A.	REM1b
737-200	Linea	REM1a
737-300(*)	Linea	REM1b
737-700	Linea	REM1a
A320	Linea	REM1b
RJ-100	Linea	REM1c
RJ-85	Linea	REM1d
Fokker 70	Linea	REM1b
Fokker 100	Linea	REM1a
MD-80-83	Linea	REM1c
MD-80-87	Linea	REM1d

Tabella 2.33: Velivoli assegnati al gate remoto rem1. L'asterisco (*) indica i voli low-cost.

Gate rem2		
Velivolo	Tipo di volo	Taxi (IN/OUT)
Falcon 50	G.A.	REM2
Falcon 100	G.A.	REM2
PA-28	G.A.	REM2
FRJ	Linea	REM2

Tabella 2.34: Velivoli assegnati al gate remoto rem2

Gate rem3		
Velivolo	Tipo di volo	Taxi (IN/OUT)
King Air 90	G.A.	REM3
CL600	G.A.	REM3
BD-700	G.A.	REM3

Tabella 2.35: Velivoli assegnati al gate remoto rem3

Gate rem4		
Velivolo	Tipo di volo	Taxi (IN/OUT)
BAe 146-300	Charter	REM4BB
RJ-100	Charter	REM4BA
Reg-100	Charter	REM4BB
Tu-134	Charter	REM4BA
Tu-154	Charter	REM4BC
Citation II	G.A.	REM4BB
Citation V	G.A.	REM1BC
Citation VII	G.A.	REM4BA
Citation X	G.A.	REM4BA
ATR-72	Linea	REM4BA
Reg-100	Linea	REM4BB
Reg-700	Linea	REM4BC
Do-328	Linea	REM4BA
DHC-8-300	Linea	REM4BB
DHC-8-400	Linea	REM4BC
ERJ-135	Linea	REM4BA
ERJ-145	Linea	REM4BB
Saab 2000	Linea	REM4BA
Tu-154	Linea	REM4BC

Tabella 2.36: Velivoli assegnati al gate remoto rem4

Coefficients di emissione per le APU				
Modello	CO (kg/h)	HC (kg/h)	NO _x (kg/h)	SO _x (kg/h)
APU GTCP 331 (143 HP)	0.501900	0.052250	1.155730	0.12152
APU GTCP 331-200ER (143 HP)	0.501900	0.052250	1.155730	0.12152
APU GTCP 331-500 (143 HP)	0.459510	0.048620	2.774090	0.24312
APU GTCP 660 (300 HP)	3.009410	0.097410	1.854360	0.34790
APU TSCP 700 (142 HP)	0.783350	0.077700	1.728430	0.21001
APU TSCP 700-4B (142 HP)	0.783350	0.077700	1.728430	0.21001
APU ST-6	0.009970	0.003990	1.776290	0.19958
APU T-62T-47C1	4.290240	0.016000	0.458900	0.10672
APU T-62T-27 (100 HP)	1.978830	0.360410	0.182290	0.04626
APU WR27-1	0.358910	0.013310	0.293600	0.06341
APU GTCP 30-300	0.000000	0.025600	1.292850	0.12800
APU GTCP 36 (80HP)	0.205500	0.015030	1.012470	0.10024
APU GTCP 85 (200 HP)	1.920100	0.109930	0.506970	0.10673
APU GTCP 85 (200 HP)	1.920100	0.109930	0.506970	0.10673
APU GTC 85	1.920100	0.109930	0.506970	0.10673
APU GTC 85-72(200HP)	1.412640	0.012380	0.369590	0.09525
APU GTCP 85-129 (200 HP)	1.920100	0.109930	0.506970	0.10673
APU GTCP 95-2 (300 HP)	0.425000	0.047810	0.750390	0.13281
APU GTCP 100-544(400 HP)	1.102870	0.029950	1.114110	0.18724
APU GTCP 85-98 (200 HP)	1.920100	0.109930	0.506970	0.10673
APU GTCP 36-300 (80HP)	0.205500	0.015030	1.012470	0.10024
APU GTCP 331-350	0.382190	0.047260	2.034250	0.20547
APU GTCP 36-4A	0.818730	0.021880	0.309980	0.06078
APU GTCP 36-100	2.059600	0.037740	0.352980	0.06622
APU GTCP 36-150[]	0.435920	0.041220	0.309980	0.06758
APU GTCP 36-150[RR]	0.602640	0.040670	0.439110	0.08300
APU GTCP 30-54	1.136120	0.134890	0.111730	0.03129
APU 131-9	0.564450	0.042790	0.768030	0.11566
APU PW901A	6.567990	0.587120	1.232970	0.39141

Tabella 2.37: Coefficienti di emissione per i vari modelli di APU

Per gli aerei che sono sprovvisti di APU l'aeroporto mette a disposizione una GPU, ovvero una Ground Power Unit, un generatore diesel identificato mediante la sigla 28VDC, della potenza di 71 hp. Per tale generatore l'EPA e la FAA forniscono i coefficienti di emissione espressi, in questo caso, per unità di tempo e di potenza. Essi sono disponibili in Tabella 2.38.

Coefficienti di emissione per GPU				
Modello: GPU 28VDC 71 hp Diesel				
CO (kg/(h*hp))	HC (kg/(h*hp))	NO_x (kg/(h*hp))	SO_x (kg/(h*hp))	PM10 (kg/(h*hp))
3.140720	0.927270	11.148280	0.809120	0.863700

Tabella 2.38: Coefficienti di emissione per il modello di GPU utilizzato in questo studio

Si noti che in questo caso, essendo il carburante diesel e il motore a pistoni, si prevede la produzione di particolato. Complessivamente si ritiene che per motivi di gestione del servizio la GPU rimanga attiva per un tempo leggermente superiore rispetto alla APU, 40 minuti per ogni LTO anzichè 30. Gli aerei sprovvisti di APU che utilizzano la GPU nel presente studio sono: il Falcon 50, Falcon 100, Falcon 2000, Saab 2000, ATR-72, King Air 90, Citation II, Citation V, Citation VII, Citation X, CL-600, DHC-8-300, DHC-8-400, ERJ-135, PA-28.

Per ulteriori dettagli sul modello di APU utilizzato dai rimanenti velivoli si rimanda all'Appendice D.

L'APU è alloggiata sulla coda dei velivoli e quindi essa rappresenta la sorgente di inquinanti in posizione più elevata presente all'interno del gate. L'altezza di quest'ultimo è stata quindi determinata come media, pesata sul numero di LTO effettuati annualmente, delle altezze dei velivoli che vi accedono. Si ha quindi:

$$h_{gate} = \frac{\sum_{j=1}^N h_j * LTO_j}{\sum_{j=1}^N LTO_j}$$

dove h_j indica l'altezza del velivolo j e LTO_j indica il numero di LTO effettuati. Si ottengono così i valori ⁴ riportati in Tabella 2.39.

⁴Non si riportano in questo studio le altezze dei singoli aerei; esse sono facilmente reperibili in siti internet specializzati quale, ad esempio, <http://www.airliners.net>, o in libri come Aerei di R. Niccoli, casa ed. De Agostini.

Gate	Altezza (m)
main	10.66
rem1	9.32
rem2	6.86
rem3	6.44
rem4	7.43

Tabella 2.39: Altezze calcolate per i gates di questo studio

L'APU e la GPU non rappresentano le sole sorgenti inquinanti presenti al gate. EDMS infatti imputa a quest'ultimo anche tutte le emissioni dei mezzi (GSE) impiegati dagli operatori per assistere l'aereo in sosta. Il modello prevede pertanto di assegnare un tempo operativo a ciascun mezzo ed utilizza i coefficienti messi a disposizione dall'EPA per il calcolo delle emissioni nell'intervallo di tempo desiderato. Quindi dal punto di vista del modello se un mezzo raggiunge il gate impiegando un tempo pari a n minuti per compiere il percorso sul piazzale, esso equivale ad un mezzo che è rimasto fermo con il motore acceso per n minuti accanto all'aeromobile; i coefficienti di emissione però sono quelli del velivolo in movimento.

Si è resa quindi necessaria una approfondita analisi del GSE impiegato per l'assistenza di un velivolo al gate giungendo così alla definizione di un parco veicoli specifico per ciascun aereo. Per ogni veicolo si sono dovute poi specificare le caratteristiche essenziali quali il carico, espresso come percentuale del carico massimo, la potenza del motore, il combustibile utilizzato, il tempo di attività per ogni LTO. Per l'Airbus A319 di linea si è così ottenuto quanto riportato in Tabella 2.40.

Si noti che i mezzi elettrici sono stati riportati solo per completezza in quanto non sono responsabili di alcuna emissione di inquinanti in atmosfera presso il gate.

Nella definizione del GSE di servizio presso un velivolo si è tenuto conto non solo del tipo di aereo in oggetto ma anche del gate in cui si trova e del tipo di volo effettuato. Per i velivoli al main grazie al finger si rende infatti necessaria una scaletta in meno rispetto agli altri gates e, nel caso di aerei di grandi dimensioni, anche di un bus per il trasporto dei passeggeri in meno. Inoltre, per aerei identici che effettuano voli charter e low-cost si sono utilizzate configurazioni di GSE mirate al contenimento dei costi. Per un confronto si possono considerare le tabelle 2.40, 2.41 e 2.42.

A319 - GSE					
Veicolo	Numero veicoli	Combustibile	Tempo (min)	Potenza (hp)	Carico %
Bus	1	Diesel	10	210	80
FollowMe	1	Diesel	10	110	53
Auto motoristi	2	Benzina	10	54	50
Auto security	1	Benzina	10	54	50
Air starter	1	Diesel	7	425	90
Aircraft tractor narrow body	1	Diesel	8	88	80
Baggage tractor narrow body	1	Elettrico	75	0	55
Belt loader narrow body	1	Elettrico	48	0	50
Catering truck narrow body	1	Diesel	15	210	53
Fuel truck mid-size	1	Diesel	15	175	25
Lavatory truck narrow body	1	Diesel	15	56	25
Passenger stand	1	Diesel	10	65	57
Service truck	1	Diesel	15	235	20
Water service	1	Diesel	12	235	20

Tabella 2.40: GSE di servizio all'Airbus A319 di linea

Reg-100 - GSE					
Veicolo	Numero veicoli	Combustibile	Tempo (min)	Potenza (hp)	Carico %
Bus	1	Diesel	10	210	80
FollowMe	1	Diesel	10	110	53
Auto motoristi	1	Benzina	10	54	50
Auto security	1	Benzina	10	54	50
Aircraft tractor commuter	1	Diesel	5	86	80
Baggage tractor commuter	1	Elettrico	75	0	55
Catering truck commuter	1	Diesel	10	71	53
Fuel truck mid-size	1	Diesel	20	175	25
Service truck	1	Diesel	15	235	20

Tabella 2.41: GSE di servizio al Canadair Reg-100 charter

PA-28 - GSE					
Veicolo	Numero veicoli	Combustibile	Tempo (min)	Potenza (hp)	Carico %
FollowMe	1	Diesel	10	110	53
Auto security	1	Benzina	10	54	50
Fuel truck small	1	Diesel	10	175	25

Tabella 2.42: GSE di servizio al Piper PA-28 di aviazione generale

Per ciò che riguarda le configurazioni di GSE per gli altri velivoli presenti in questo studio si rimanda all'Appendice D mentre per i coefficienti di emissione si rimanda alle relative tabelle reperibili sul sito dell'FAA (<http://www.aee.faa.gov>). Tali coefficienti sono espressi, come nel caso delle GPU, in grammi di inquinante per unità di potenza e di tempo.

È necessario infine osservare che il database di EDMS per quanto molto ricco e completo non è tuttavia esaustivo e quindi alcuni mezzi utilizzati presso l'aeroporto Marco Polo sono stati definiti dall'utente.

In particolare si è resa necessaria la realizzazione del profilo relativo ai followme, alle auto dei motoristi e della security e agli autobus per il trasporto dei passeggeri.

Le caratteristiche di questi ultimi sono state fornite direttamente dall'Ufficio Sicurezza in Pista della SAVE S.p.A. e sono state riassunte in Tabella 2.43 mentre la definizione del profilo delle automobili si è rivelato più complesso.

Veicolo		Bus			
Combustibile		Diesel			
Potenza (hp)		210			
Carico (%)		80			
Tempo per LTO (min)		10			
Tempo operativo annuale (h)		5172			
Coefficients di emissione					
CO g/(hp*h)	HC g/(hp*h)	NO _x g/(hp*h)	SO _x g/(hp*h)	PM10 g/(hp*h)	
0.90084	0.32293	4.63252	0.81208	0.11498	

Tabella 2.43: Caratteristiche del bus adibito al trasporto passeggeri definito nel presente studio

Per la definizione delle automobili dei motoristi e della security si è osservato che esse sono in genere rappresentate da utilitarie a benzina molto diffuse sul mercato quali Fiat Panda e Fiat Punto. Non potendo usufruire tuttavia di dati precisi che indichino

con esattezza con quale frequenza vengano utilizzati i vari modelli e quale sia l'effettivo parco macchine disponibile, si è optato per la definizione di una automobile fittizia con coefficienti di emissione molto prossimi a quelle di una Fiat Panda modello della fine degli anni '90. La fonte dei dati è stata in questo caso il sito della rivista specialistica Quattroruote.

Similmente si è lavorato per le auto followme rappresentate in questo caso da mezzi diesel con potenza intorno ai 100 hp: si è potuto constatare che si tratta prevalentemente di Fiat Multipla.

I dati sono stati raccolti in Tabella 2.44 e 2.45.

Veicolo					Auto motoristi e security
Combustibile					Benzina
Potenza (hp)					54
Carico (%)					50
Tempo per LTO (min)					10
Tempo operativo annuale (h)					5172
Coefficienti di emissione					
CO	HC	NO_x	SO_x	PM10	
g/(hp*h)	g/(hp*h)	g/(hp*h)	g/(hp*h)	g/(hp*h)	
1.22222	0.111111	0.05555	0.00166	0.00000	

Tabella 2.44: Caratteristiche dell'auto motoristi definita nel presente studio

Veicolo					Auto FollowMe
Combustibile					Diesel
Potenza (hp)					110
Carico (%)					53
Tempo per LTO (min)					10
Tempo operativo annuale (h)					5172
Coefficienti di emissione					
CO	HC	NO_x	SO_x	PM10	
g/(hp*h)	g/(hp*h)	g/(hp*h)	g/(hp*h)	g/(hp*h)	
0.17455	0.00545	0.13636	0.02728	0.01364	

Tabella 2.45: Caratteristiche dell'auto followme definita nel presente studio

EDMS dispone a questo punto di tutti i dati necessari al calcolo delle emissioni sia su base annuale che su qualsiasi altra base temporale.

2.3 Il traffico su strada e nei parcheggi

Oltre alle emissioni dovute alle sorgenti di inquinanti presenti sul piazzale dell'aeroporto EDMS è in grado di tenere conto, come visto al capitolo precedente, anche delle emissioni dovute al traffico veicolare esterno. Le strade e i parcheggi a disposizione degli utenti e del personale addetto sono quindi considerate sorgenti di inquinanti.

I parcheggi in particolare sono considerati come sorgenti superficiali e quindi sono caratterizzati da una certa area e da una certa altezza di emissione. Si è perciò provveduto alla identificazione e conseguente digitalizzazione di tali aree:

Park1 parcheggio multipiano (3 piani in totale) dedicato alle automobili per soste medio-brevi;

Park2 parcheggio su un unico piano, scoperto, dedicato alle automobili per soste medio-lunghe;

Park4 parcheggio su un unico piano, coperto, dedicato alle automobili per soste lunghe;

Park5 parcheggio su un unico piano, scoperto, dedicato alle automobili per soste medio-brevi;

Park6 parcheggio su un unico piano, scoperto, dedicato ai soli autobus per soste medio-brevi;

Park7 parcheggio su un unico piano, scoperto, dedicato alle automobili per soste medio-lunghe;

Park rent-a-car parcheggio su un unico piano, scoperto, dedicato alle sole automobili a noleggio per soste medio-brevi;

Park dipendenti/visitatori parcheggio su un unico piano, scoperto, dedicato alle automobili dei dipendenti e dei visitatori.

Si è quindi pervenuti, ad esempio, alla definizione della Tabella 2.46 per il parcheggio denominato Park1. Per le tabelle relative agli altri parcheggi si rimanda all'Appendice D. La Figura 2.11 raffigura la distribuzione digitalizzata dei parcheggi nell'area di studio.

Le altezze di rilascio degli inquinanti sono state fissate a 0.20 metri, altezza media degli scarichi delle automobili, per tutti i parcheggi tranne che per il Park6 dove si è posta pari a 1.00 metro: si suppone che essa corrisponda all'altezza media in quanto i bus, a seconda del modello, possono presentare sia scarichi bassi che alti (sul tettuccio).

Il Park1 è multipiano e tutti i piani sono stati trattati come un parcheggio a se stanti, aventi tutti la medesima base ma diverse altezze di rilascio. Si è quindi ottenuto, essendo ogni piano alto 4.40 m:

Parcheggio	Punto	Coordinate	
		x (m)	y (m)
Park1	1	-1016.00	-252.50
	2	-1142.50	-392.50
	3	-1093.42	-436.85
	4	-967.50	-296.32

Tabella 2.46: Vertici della base del parcheggio identificato come Park1

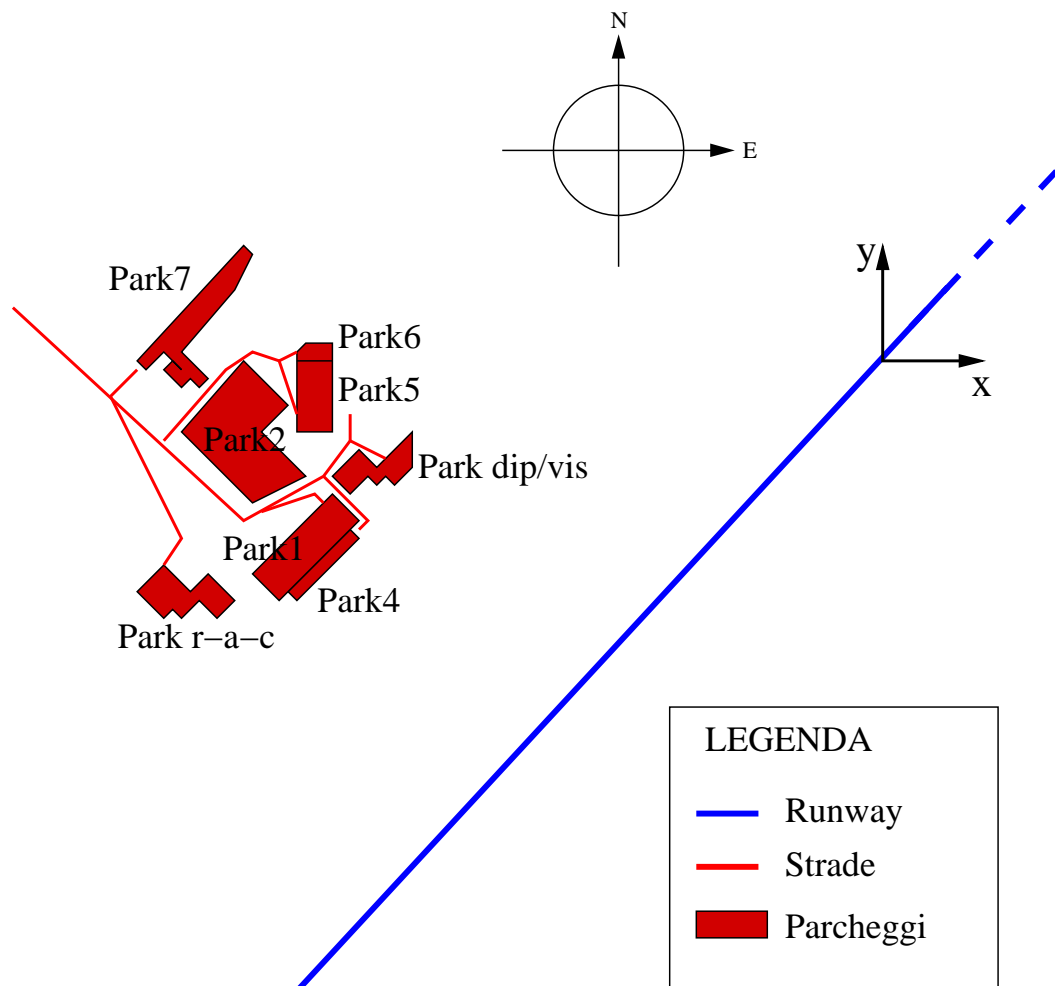


Figura 2.11: Distribuzione dei parcheggi nell'area di studio

Park1-1 primo piano con altezza di rilascio 0.20 m;

Park1-2 secondo piano con altezza di rilascio 4.60 m;

Park1-3 terzo piano con altezza di rilascio 9.00 m;

I coefficienti di emissione vengono determinati da EDMS mediante il database realizzato con i programmi MOBILE5a e PART5 di cui si è detto al capitolo precedente. Essi dipendono dalla velocità con cui i mezzi si spostano all'interno del parcheggio, dalla distanza percorsa e dal tempo di idle.

Per tutti i parcheggi si è supposto che la velocità media di percorrenza sia pari a circa 25 km/h tranne che nel Park1 dove gli spazi piuttosto angusti impongono velocità inferiori, intorno ai 15 km/h, e nel Park6, dove si è imposta la velocità di 15 km/h a causa dei notevoli ingombri dei mezzi.

La distanza percorsa all'interno del parcheggio è stata calcolata come la distanza necessaria affinché un veicolo raggiunga il posto macchina in posizione centrale. Si sono allora ottenuti i dati in Tabella 2.47.

Parcheggio	Distanza percorsa (m)
Park1-1	200
Park1-2	500
Park1-3	800
Park2	250
Park4	75
Park5	200
Park6	250
Park7	200
Park rent-a-car	100
Park dipendenti/vis.	100

Tabella 2.47: Distanze percorse all'interno di ogni parcheggio per raggiungere il posto macchina centrale

I tempi di sosta con motore acceso sono stati complessivamente posti pari a 1.5 minuti. Questo tempo è stato scelto per tenere conto di:

- tempo necessario al ritiro del biglietto dal sistema automatico all'ingresso;
- condizioni di modesto traffico all'interno del parcheggio;
- piccole soste per gli inserimenti di marcia e per breve riscaldamento del motore all'avvio;

- tempo necessario alla consegna del biglietto al sistema automatico all'uscita.

Per il piano secondo e terzo del Park1 i tempi sono stati portati rispettivamente a 2.5 e a 3 minuti. Ciò per tenere conto del fatto che spesso il Park1 è molto affollato, soprattutto ai piani primo e secondo: se un'auto cerca un posto macchina ai piani superiori significa che il primo è già completo e quindi probabilmente ci si trova in orario di punta. Gli spazi piuttosto angusti non facilitano le manovre e questo impone frequenti arresti nella marcia, facendo lievitare, con buona approssimazione, di un minuto il tempo di idle necessario al reperimento di un posto al secondo piano rispetto al primo. Se poi anche il secondo piano è al completo, si passa al terzo, dove il traffico è inferiore e difficilmente non si trova posto: si ritiene quindi ragionevole un ulteriore incremento di soli 30 secondi.

A questo punto è possibile determinare mediante il database di EDMS i coefficienti di emissione per ciascun veicolo; essi sono riportati in Tabella 2.48.

Coefficienti di emissione (g/veh)					
Parcheggi					
	Park1-1	Park1-2	Park1-3	Park2	park4
CO	15.01	30.03	42.06	14.73	10.71
HC	1.84	3.59	4.94	1.81	1.39
NO_x	0.54	1.17	1.73	0.59	0.33
SO_x	0.02	0.05	0.07	0.02	0.01
PM10	0.02	0.04	0.07	0.02	0.01
	Park5	Park6	Park7	Park dip/vis	park r-a-c
CO	13.58	16.51	13.58	11.29	11.29
HC	1.69	2.00	1.69	1.45	1.45
NO_x	0.52	0.62	0.52	0.37	0.37
SO_x	0.02	0.02	0.02	0.01	0.01
PM10	0.02	0.02	0.02	0.01	0.01

Tabella 2.48: Coefficienti di emissione per i parcheggi dell'aeroporto Marco Polo

Il sistema di pagamento nei parcheggi è di tipo elettronico e ciò ha facilitato enormemente la determinazione del numero di veicoli che ha usufruito di ciascun parcheggio durante il 2002. I dati sono stati raccolti in Tabella 2.49.

Per ciò che riguarda il Park1 però non è stato possibile determinare quale è stata la distribuzione dei mezzi sui tre piani. Si è allora deciso di attribuire al primo e al secondo lo stesso numero complessivo di veicoli e al terzo l'80% degli altri due. Ciò è stato suggerito dalle visite effettuate durante i primi mesi del 2004. Si è quindi ottenuto quanto riportato dalla Tabella 2.50.

A questo punto EDMS dispone di tutti i dati per la determinazione delle emissioni su base annuale; per poter effettuare la simulazione di dispersione tuttavia, si rende neces-

Parcheggio	Numero di mezzi nel 2002
Park1	786089
Park2	552702
Park4	48534
Park5	184057
Park6	23776
Park7	203285
Park dip/vis	104400
Park r-a-c	85885

Tabella 2.49: Numero di veicoli che hanno usufruito di ciascun parcheggio durante il 2002

Parcheggio	Numero di mezzi nel 2002
Park1-1	280746
Park1-2	280746
Park1-3	224597
Totale	786089

Tabella 2.50: Numero di veicoli che hanno usufruito di ciascun piano del Park1 durante il 2002

saria, come già visto per il traffico aereo, la determinazione dei profili orari, settimanali e mensili.

Purtroppo i dati relativi alla distribuzione dell'afflusso dei veicoli nel tempo non sono stati memorizzati e quindi si è dovuto procedere ad una determinazione approssimata.

Per ciò che riguarda i parcheggi Park1, Park2, Park4, Park5, Park7 e Park rent-a-car si è considerato che il passeggero in partenza giunge in aerostazione con mediamente due ore di anticipo sull'orario del volo mentre quello in arrivo abbandona al più presto l'aeroporto. Si è provveduto pertanto alla determinazione del numero di aerei in partenza e in arrivo per ogni fascia oraria, giornaliera e mensile, si sono moltiplicati tali valori per il numero massimo di passeggeri che ciascun velivolo può ospitare e si sono sommati i risultati per ogni fascia temporale. Nel caso del profilo orario si è assunto che la metà di tali passeggeri sia in partenza e quindi per essi i valori sono stati anticipati di due ore; il profilo ottenuto è stato sommato a quello della seconda metà dei passeggeri, inalterato perchè passeggeri in arrivo. Si è infine diviso il valore di ogni fascia per il picco massimo, ottenendo così i profili temporali. I risultati ottenuti sono riportati nelle tabelle 2.51, 2.52 e 2.53.

Parcheggio generico	
Fascia oraria	Profilo
Dalle 00 alle 01	0.0053
Dalle 01 alle 02	0.0033
Dalle 02 alle 03	0.0000
Dalle 03 alle 04	0.0000
Dalle 04 alle 05	0.1596
Dalle 05 alle 06	0.3660
Dalle 06 alle 07	0.3404
Dalle 07 alle 08	0.6790
Dalle 08 alle 09	0.7225
Dalle 09 alle 10	0.8088
Dalle 10 alle 11	1.0000
Dalle 11 alle 12	0.7155
Dalle 12 alle 13	0.8091
Dalle 13 alle 14	0.5241
Dalle 14 alle 15	0.6363
Dalle 15 alle 16	0.7227
Dalle 16 alle 17	0.7585
Dalle 17 alle 18	0.7985
Dalle 18 alle 19	0.7132
Dalle 19 alle 20	0.6370
Dalle 20 alle 21	0.5035
Dalle 21 alle 22	0.2848
Dalle 22 alle 23	0.2687
Dalle 23 alle 00	0.0315

Tabella 2.51: Profilo orario per i parcheggi Park1, Park2, Park4, Park5, Park7 e Park rent-a-car

Parcheggio generico	
Giorno settimanale	Profilo
lunedì	0.9833
martedì	0.9842
mercoledì	0.9765
giovedì	1.0000
venerdì	0.9931
sabato	0.9032
domenica	0.9388

Tabella 2.52: Profilo settimanale per i parcheggi Park1, Park2, Park4, Park5, Park7 e Park rent-a-car

Parcheggio generico	
Mese	Profilo
gennaio	0.8512
febbraio	0.7743
marzo	0.8564
aprile	0.7535
maggio	0.8012
giugno	0.8117
luglio	0.8852
agosto	0.8821
settembre	0.8533
ottobre	0.8759
novembre	0.8988
dicembre	1.0000

Tabella 2.53: Profilo mensile per i parcheggi Park1, Park2, Park4, Park5, Park7 e Park rent-a-car

Per determinare i profili temporali relativi al Park6 si sono interpellate le aziende SITA e LA MARCA che espletano il servizio autobus di linea da e per l'aeroporto e che sfruttano quindi il parcheggio a loro riservato; in base agli orari relativi al 2002 da esse forniti, si è giunti alla determinazione dei profili riportati nelle tabelle 2.54, 2.55 e 2.56. Per mancanza di dati non si è potuto tenere conto del contributo dei mezzi privati impiegati dalle agenzie di viaggi italiane ed estere per il trasporto turistico.

Per la determinazione dei profili temporali relativi al parcheggio dipendenti e visitatori sarebbe stato necessario poter disporre degli orari di lavoro dei dipendenti SAVE ed ENAV presso l'aeroporto. Sebbene i dati richiesti siano relativi al 2002 le aziende interpellate si sono comunque rifiutate di fornirli a causa del continuo inasprimento delle norme di sicurezza relative agli scali aeroportuali, soprattutto all'indomani dello scoppio della guerra nel Golfo.

La determinazione dei profili è stata così del tutto approssimata e basata sulle seguenti considerazioni:

- l'attività aeroportuale è continua durante tutto l'arco dell'anno, tuttavia si è supposto che nel mese di agosto l'afflusso del personale al parcheggio dipendenti e visitatori si riduca della metà: si suppone che in questo mese non giungano visitatori e che il personale subisca una certa riduzione;
- similmente si è ragionato per i giorni settimanali di sabato e domenica;
- si è supposto, anche sulla base delle osservazioni eseguite nei primi mesi del 2004, che durante le ore centrali della giornata il traffico da e per il parcheggio dipenden-

Parcheggio Park6	
Fascia oraria	Profilo
Dalle 00 alle 01	0.5000
Dalle 01 alle 02	0.0000
Dalle 02 alle 03	0.0000
Dalle 03 alle 04	0.0000
Dalle 04 alle 05	0.0000
Dalle 05 alle 06	0.5000
Dalle 06 alle 07	1.0000
Dalle 07 alle 08	1.0000
Dalle 08 alle 09	1.0000
Dalle 09 alle 10	1.0000
Dalle 10 alle 11	1.0000
Dalle 11 alle 12	1.0000
Dalle 12 alle 13	1.0000
Dalle 13 alle 14	1.0000
Dalle 14 alle 15	1.0000
Dalle 15 alle 16	1.0000
Dalle 16 alle 17	1.0000
Dalle 17 alle 18	1.0000
Dalle 18 alle 19	1.0000
Dalle 19 alle 20	1.0000
Dalle 20 alle 21	1.0000
Dalle 21 alle 22	1.0000
Dalle 22 alle 23	0.5000
Dalle 23 alle 00	0.0000

Tabella 2.54: Profilo orario per il parcheggio Park6

Parcheggio Park6	
Giorno settimanale	Profilo
lunedì	1.0000
martedì	1.0000
mercoledì	1.0000
giovedì	1.0000
venerdì	1.0000
sabato	1.0000
domenica	0.5000

Tabella 2.55: Profilo settimanale per il parcheggio Park6

Parcheggio Park6	
Mese	Profilo
gennaio	0.9414
febbraio	0.8919
marzo	0.9707
aprile	0.9640
maggio	0.9707
giugno	0.9346
luglio	1.0000
agosto	0.9707
settembre	0.9346
ottobre	1.0000
novembre	0.9346
dicembre	1.0000

Tabella 2.56: Profilo mensile per il parcheggio Park6

ti si riduca drasticamente rispetto alle ore di punta e diventi con buona approssimazione trascurabile durante le ore notturne.

Si sono quindi ottenute le tabelle 2.57, 2.58 e 2.59.

Il calcolo delle emissioni è ora possibile per ogni fascia temporale desiderata con le limitazioni di cui si è detto al Paragrafo 2.1.

Parcheggio dipendenti e visitatori	
Fascia oraria	Profilo
Dalle 00 alle 01	0.0000
Dalle 01 alle 02	0.0000
Dalle 02 alle 03	0.0000
Dalle 03 alle 04	0.0000
Dalle 04 alle 05	0.0000
Dalle 05 alle 06	0.0000
Dalle 06 alle 07	0.0000
Dalle 07 alle 08	1.0000
Dalle 08 alle 09	1.0000
Dalle 09 alle 10	0.5000
Dalle 10 alle 11	0.1000
Dalle 11 alle 12	0.1000
Dalle 12 alle 13	0.1000
Dalle 13 alle 14	0.1000
Dalle 14 alle 15	0.1000
Dalle 15 alle 16	0.1000
Dalle 16 alle 17	0.5000
Dalle 17 alle 18	1.0000
Dalle 18 alle 19	1.0000
Dalle 19 alle 20	0.0000
Dalle 20 alle 21	0.0000
Dalle 21 alle 22	0.0000
Dalle 22 alle 23	0.0000
Dalle 23 alle 00	0.0000

Tabella 2.57: Profilo orario per il parcheggio dipendenti e visitatori

Parcheggio dipendenti e visitatori	
Giorno settimanale	Profilo
lunedì	1.0000
martedì	1.0000
mercoledì	1.0000
giovedì	1.0000
venerdì	1.0000
sabato	0.5000
domenica	0.5000

Tabella 2.58: Profilo settimanale per il parcheggio dipendenti e visitatori

Parcheggio dipendenti e visitatori	
Mese	Profilo
gennaio	1.0000
febbraio	1.0000
marzo	1.0000
aprile	1.0000
maggio	1.0000
giugno	1.0000
luglio	1.0000
agosto	0.5000
settembre	1.0000
ottobre	1.0000
novembre	1.0000
dicembre	1.0000

Tabella 2.59: Profilo mensile per il parcheggio dipendenti e visitatori

Anche le strade sono considerate sorgenti di inquinanti. Il modello infatti, come già descritto nel capitolo precedente, suddivide le vie di accesso all'aeroporto in tronconi della lunghezza di 20 *m* e ne calcola le emissioni in base ai dati temporali di traffico trattandoli come sorgenti superficiali.

Le strade sono state quindi idealmente suddivise in segmenti e completamente digitalizzate, come è possibile osservare in Figura 2.12, mentre in Tabella 2.60 vengono riportate le coordinate dei punti estremi di ogni segmento.

In Tabella 2.61 vengono riportati i nomi dei vari segmenti stradali e i loro punti estremi.

Una volta ottenuti i segmenti stradali devono esservi attribuiti i dati di traffico. Per le strade di diretto accesso ai parcheggi si è assegnato per l'anno 2002 lo stesso numero di mezzi attribuito al relativo parcheggio. Per le strade comuni e di accesso all'aerostazione si è dovuto invece tenere conto di tutto il traffico diretto ai vari parcheggi più il traffico diretto alla sola aerostazione.

Tutte le auto private che giungono in aeroporto possono parcheggiare esclusivamente all'interno degli appositi parcheggi. Gli autobus di collegamento con Mestre e i paesi limitrofi, i taxi e le auto delle forze dell'ordine possono invece parcheggiare nelle apposite aree presso l'aerostazione.

Per ciò che riguarda il traffico dovuto alle forze di polizia nessun dato è stato reso disponibile e quindi tale contributo è stato completamente trascurato.

A seguito dei contatti telefonici avvenuti con la Cooperativa Radiotaxi di Mestre e la Cooperativa Radiotaxi di Padova si è giunti alla conclusione che mediamente stazionano presso l'aeroporto 20 taxi e che il numero medio di corse di andata e ritorno per ognuno

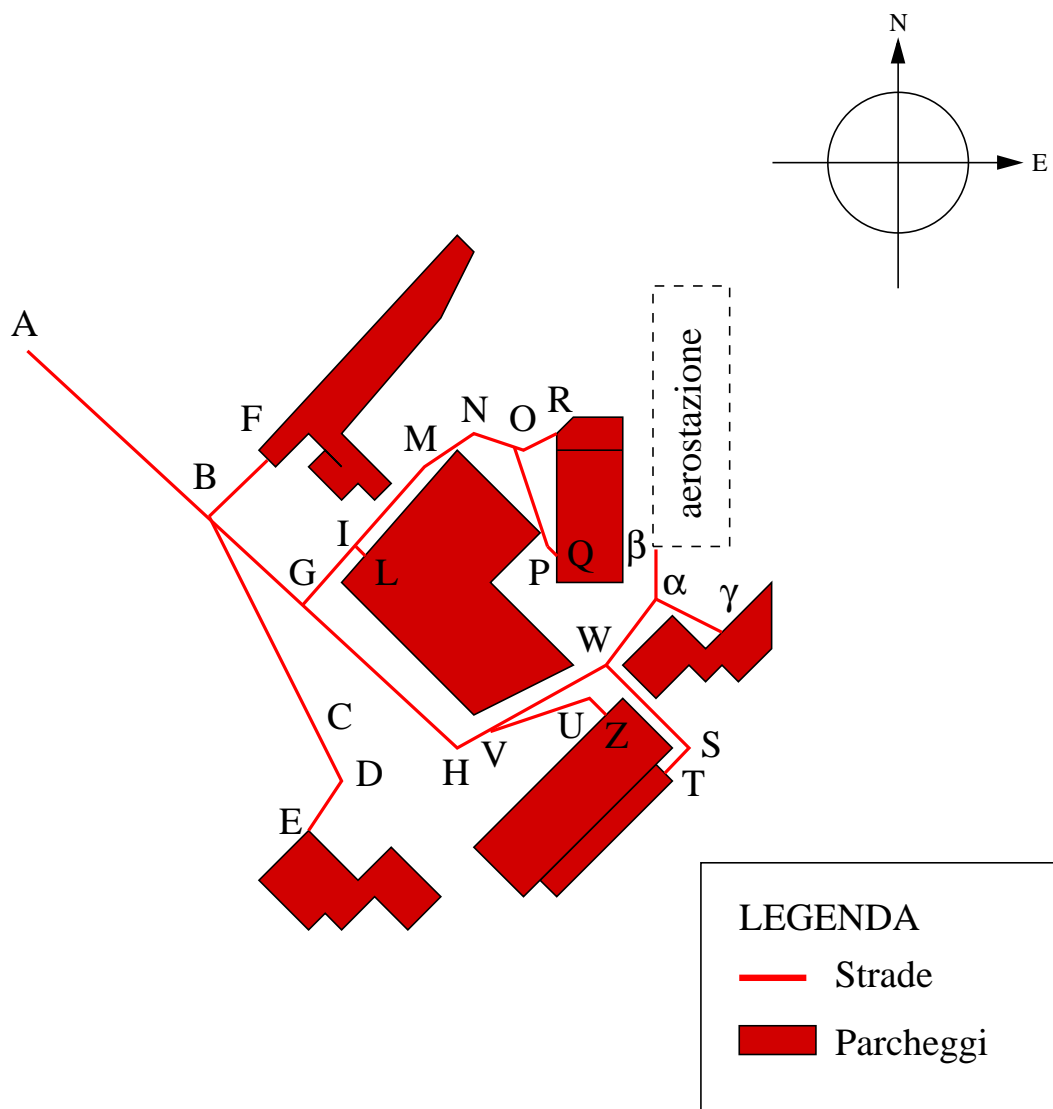


Figura 2.12: Immagine digitalizzata delle strade di accesso all'aeroporto

Coordinate punti estremi dei segmenti stradali		
Punto	x (m)	y (m)
A	-1580.9976	90.0013
B	-1400.0013	-70.0004
C	-1314.9986	-295.0007
D	-1280.5014	-331.5005
E	-1322.4693	-387.5014
F	-1345.0001	-9.9974
G	-1305.0012	-154.9999
H	-1155	-285.0002
I	-1247.5007	-90.0013
L	-1235.0008	-99.9988
M	-1190.5	-27.4991
N	-1130.0003	0.0000
O	1084.9996	-14.9992
P	-1074.9991	-105.0006
Q	-1059.9999	-105.0006
R	-1059.6951	20.0010
V	-1116.0008	-260.0005
W	-1032.5009	-227.4997
S	-957.4987	-299.9994
T	-972.501	317.5010
U	-1039.9989	-242.4989
Z	-1022.5004	-260.0005
α	-970.0000	-150
β	-965.0000	-108.2
γ	-905.0000	-177.5

Tabella 2.60: Coordinate dei punti estremi dei segmenti in cui sono state divise le strade di accesso all'aeroporto

Segmenti stradali	
Segmento	Estremi
Acc park rent 1	BC
Acc park rent 2	CD
Acc park rent 3	DE
Acc park 7	BF
Acc park 6	OR
Acc park 5-6 a	IM
Acc park 5-6 b	MN
Acc park 5-6 c	NO
Acc park 5 a	OP
Acc park 5 b	PQ
Acc park 4 a	VW
Acc park 4 b	WS
Acc park 4 c	ST
Acc park 1 a	VU
Acc park 1 b	UZ
Acc park 1-4	HV
Acc park 2 b	IL
Acc park 2 - 5 - 6	GI
Acc gate main a	$W\alpha$
Acc gate main b	$\alpha\beta$
Principale	AB
Principale2	BG
Principale3	GH
Dipendenti	$\alpha\gamma$

Tabella 2.61: Segmenti stradali in cui sono state suddivise le vie di accesso all'aeroporto

di essi è pari a 10: ciò comporta un aumento di 200 automobili fittizie in più ogni giorno, ovvero 73000 in più ogni anno.

Le aziende ACTV, ATVO e ATVO/FAP hanno fornito invece le tabelle orarie del 2002 e la valutazione del traffico dovuto ai bus è stata più precisa. Si è ottenuto che durante il 2002 hanno circolato in aerostazione nei giorni feriali 142 autobus al giorno durante i mesi invernali, 23 in più che nei giorni festivi, 154 autobus ogni giorno feriale nei mesi estivi, 21 in più che nei giorni festivi. In totale si sono avuti 52835 mezzi in più all'anno.

Si può concludere che complessivamente i mezzi pubblici comportano un aumento annuale del traffico pari a 125835 mezzi.

Si è allora giunti ai dati di traffico riassunti in Tabella 2.62.

Traffico stradale	
Segmento	Numero di mezzi
Acc park rent 1	85885
Acc park rent 2	85885
Acc park rent 3	85885
Acc park 7	203285
Acc park 6	23776
Acc park 5-6 a	207833
Acc park 5-6 b	207833
Acc park 5-6 c	207833
Acc park 5 a	184057
Acc park 5 b	184057
Acc park 4 a	278769
Acc park 4 b	48534
Acc park 4 c	48534
Acc park 1 a	786089
Acc park 1 b	786089
Acc park 1-4	1064858
Acc park 2 b	552702
Acc park 2 - 5 - 6	760535
Acc gate main a	230235
Acc gate main b	125835
Principale	2114563
Principale2	1825393
Principale3	1064858
Dipendenti	104400

Tabella 2.62: Dati di traffico relativi ad ogni segmento stradale

In tale tabella si può osservare che se un medesimo tratto stradale conduce a due o più parcheggi il traffico attribuitogli è pari alla somma del numero di veicoli che hanno

usufruito dei suddetti parcheggi durante il 2002. È il caso, ad esempio, del segmento Acc park 2-5-6 a cui è stata attribuita la somma del numero di veicoli dei Park2, Park5 e Park6.

L'altezza di emissione è stata fissata a 0.2 m ovvero l'altezza media degli scarichi delle automobili. Si è infatti considerato che il traffico imputabile ai soli bus è pari a 76612 unità annuali ovvero circa il 3.62% del traffico complessivo. È quindi stato considerato ininfluenza il contributo della maggior altezza degli scarichi dei bus, tanto più che non vi sono dati disponibili relativi al numero dei mezzi con scarichi sul tettuccio.

I coefficienti di emissione vengono calcolati anche in questo caso mediante i programmi MOBILE5a e PART5 e sono espressi in grammi di inquinante per unità di veicolo. Essi dipendono dalla velocità di percorrenza e dalla lunghezza del tratto percorso. Quest'ultima viene calcolata direttamente da EDMS una volta nota la posizione dei vertici del segmento mentre la velocità è stata posta pari a circa 50 km/h ovunque tranne sulle strade di diretto accesso ai parcheggi dove è stata abbassata a circa 20 km/h . Per i valori dei coefficienti di emissione si rimanda all'Appendice D.

A questo punto EDMS può procedere al calcolo delle emissioni su base annuale ma necessita ancora dei profili temporali per eseguire la simulazione di dispersione.

Si può notare che, a causa della mancanza di dati, il traffico taxi è stato considerato costante durante il giorno, mentre, grazie ai tabulati dell'ACTV, ATVO e ATVO/FAP si sono ottenuti i valori riportati nelle tabelle 2.63, 2.64 e 2.65.

Per tutti i segmenti stradali si sono utilizzati i profili temporali relativi ai parcheggi riportati nelle tabelle 2.51, 2.52 e 2.53 con le seguenti eccezioni:

- Acc gate main a: si è effettuata una media pesata dei profili del traffico verso l'aerostazione e del traffico diretto al parcheggio dipendenti e visitatori, dove il peso è rappresentato dal numero di veicoli.
- Acc gate main b: si sono utilizzati i profili del traffico diretto all'aerostazione.
- Acc park 1-4: si è effettuata una media pesata dei profili del traffico verso l'aerostazione, il parcheggio dipendenti e visitatori, il Park1 e il Park4, dove il peso è rappresentato dal numero di veicoli.
- Acc park 4 a: si è effettuata una media pesata dei profili del traffico verso l'aerostazione, il parcheggio dipendenti e visitatori e il Park4, dove il peso è rappresentato dal numero di veicoli.
- Acc park 6: si sono utilizzati i profili del traffico diretto al Park6.
- Dipendenti: si sono utilizzati i profili del traffico diretto al Park dipendenti e visitatori.

Traffico all'aerostazione	
Fascia oraria	Profilo
Dalle 00 alle 01	0.1000
Dalle 01 alle 02	0.1000
Dalle 02 alle 03	0.0000
Dalle 03 alle 04	0.0000
Dalle 04 alle 05	0.1000
Dalle 05 alle 06	0.3000
Dalle 06 alle 07	0.5000
Dalle 07 alle 08	0.9000
Dalle 08 alle 09	0.7000
Dalle 09 alle 10	0.7000
Dalle 10 alle 11	1.0000
Dalle 11 alle 12	0.8000
Dalle 12 alle 13	0.9000
Dalle 13 alle 14	0.9000
Dalle 14 alle 15	0.8000
Dalle 15 alle 16	0.9000
Dalle 16 alle 17	1.0000
Dalle 17 alle 18	0.8000
Dalle 18 alle 19	0.8000
Dalle 19 alle 20	0.8000
Dalle 20 alle 21	0.9000
Dalle 21 alle 22	0.8000
Dalle 22 alle 23	0.7000
Dalle 23 alle 00	0.3000

Tabella 2.63: Profilo orario per il traffico diretto all'aerostazione

Traffico all'aerostazione	
Giorno settimanale	Profilo
lunedì	0.9819
martedì	1.0000
mercoledì	0.9819
giovedì	0.9819
venerdì	0.9819
sabato	0.9819
domenica	0.8106

Tabella 2.64: Profilo settimanale per il traffico diretto all'aerostazione

Traffico all'aerostazione	
Mese	Profilo
gennaio	0.9190
febbraio	0.8281
marzo	0.9171
aprile	0.9672
maggio	1.0000
giugno	0.9627
luglio	1.0000
agosto	0.9955
settembre	0.9627
ottobre	0.9203
novembre	0.8887
dicembre	0.9043

Tabella 2.65: Profilo mensile per il traffico diretto all'aerostazione

- **Principale:** si è effettuata una media pesata di tutti i contributi al traffico complessivo.
- **Principale2:** si è effettuata una media pesata di tutti i contributi al traffico complessivo tranne il contributo al Park7.
- **Principale3:** si è effettuata una media pesata dei profili del traffico verso l'aerostazione, il parcheggio dipendenti e visitatori, il Park1 e il Park4, dove il peso è rappresentato dal numero di veicoli.

Per i valori ottenuti si rimanda all'Appendice D.

2.5 I dati meteorologici

Si è già avuto modo di osservare al Paragrafo 1.3.2 quali sono i dati meteorologici in input richiesti da EDMS. In particolare si è posto in luce che sono necessari due file, uno per i dati relativi agli strati d'aria superiori (radiosondaggi) ed uno per gli strati d'aria superficiali.

La stazione meteorologica che esegue radiosondaggi più vicina all'aeroporto di Venezia è quella di Campofornido in provincia di Udine per la quale si sono ottenuti i dati richiesti in formato FSL. Tale formato è perfettamente compatibile con EDMS e quindi non sono state necessarie ulteriori rielaborazioni.

Differente è invece il caso dei dati meteo superficiali. L'ENAV ha infatti fornito i dati richiesti sottoforma di bollettini METAR. Questo formato è stato concepito per essere immediatamente fruibile da un'utenza umana ma è del tutto inadatto per essere rielaborato dai calcolatori. Si è resa quindi necessaria la comprensione del linguaggio METAR ed una completa rielaborazione dei dati forniti.

Le informazioni riguardo a tale linguaggio sono state fornite dal Servizio Meteorologico dell'Aeronautica Militare della base di Rivolto in provincia di Udine.

In questa sede si vuole solo illustrare nelle sue linee essenziali la struttura dei bollettini senza entrare nello specifico delle regole che presiedono alla loro compilazione.

Il METAR è un bollettino che viene compilato ogni ora oppure ogni mezzora ed è costituito da una serie di righe ognuna delle quali corrisponde ad un rilevamento. Nelle righe si possono individuare diverse posizioni:

- in prima posizione si trova sempre il codice ICAO della stazione in cui viene eseguito il rilevamento;
- in seconda posizione si trovano la data e l'ora di emissione seguite dalla lettera Z;
- in terza posizione si trovano la direzione e la velocità del vento nel formato dddff: la direzione del vento è sempre arrotondata alla decina di gradi e la velocità del vento deve essere sempre seguita dalla sigla KMH, KT o MPS a seconda delle unità di misura. Se questi rilevamenti sono eseguiti in modo automatico senza controllo da parte di un operatore il gruppo dddff è preceduto dalla sigla AUTO. Nel caso di vento a raffiche o variazioni di direzione improvvise la struttura di questo gruppo si complica ulteriormente. Si rimanda alla letteratura specializzata per una approfondita analisi in questo senso;
- in quarta posizione si trova il gruppo VxVxVxVxDv relativo alla visibilità in pista; esso non viene utilizzato nel presente studio ma può complicare notevolmente la let-

tura del METAR. In alcune condizioni infatti può essere seguito da altri gruppi che indicano la visibilità sulle varie piste dell'aeroporto e le sue variazioni temporali;

- in quinta posizione vi sono indicazioni sul tempo meteorologico presente sulla stazione. Si possono incontrare in questo caso indicatori quali ad esempio SH che indica le precipitazioni a carattere di rovescio, TS che indica la presenza di un temporale, GR per la grandine e così via. Esistono regole precise che stabiliscono come questi identificatori possono essere combinati tra loro; ad esempio, FZ indica la presenza di gocce d'acqua sopraffuse in atmosfera, ma se la temperatura è inferiore a 0°C si deve usare il codice FZFG che indica la presenza di ghiaccio anche se in realtà può non esserci un reale deposito di ghiaccio sulla superficie terrestre. Esistono poi altre combinazioni che legano tra loro la visibilità e le precipitazioni;
- in sesta posizione sono raccolte le informazioni riguardo alla copertura nuvolosa e all'altezza (in centinaia di *ft*) del primo strato di nubi (ceiling height). La copertura nuvolosa viene rilevata secondo le seguenti regole:
 - cielo sereno con copertura inferiore a 1/8: SKC (sky clear);
 - copertura fino a 2/8: FEW (few clouds);
 - copertura da 3/8 a 4/8: SCT (scattered);
 - copertura da 5/8 a 7/8: BRK (broken);
 - copertura totale 8/8: OVC (overcast).

Complessivamente questo gruppo è indicato come NNNhhh.

- in settima posizione sono indicate la temperatura a bulbo secco e a bulbo bagnato in $^{\circ}\text{C}$ nel formato TT/TdTd. Esse sono precedute dalla lettera M se inferiori a 0°C ;
- in ottava posizione vi è la pressione barometrica in hectopascal preceduta dalla lettera Q. Complessivamente il gruppo si presenta come QPPPP;
- in nona posizione vi possono essere indicazioni aggiuntive per l'attività in volo (ad esempio traiettorie di avvicinamento dei fenomeni temporaleschi).

La struttura del METAR viene poi complicata dal fatto che se un determinato fenomeno non viene rilevato esso viene omissso e questo complica la struttura colonnare del bollettino. E non solo: nel caso di visibilità superiore a 10 *km*, in assenza di nubi (ovvero copertura nuvolosa inferiore a 1/8) e in assenza di fenomeni meteorologici di rilievo, i vari campi di cui si è detto vengono sostituiti dalla sola parola CAVOK.

Un bollettino METAR si presenta così come una successione di strighe alfanumeriche del tipo:

LIPZ 020550Z 26004KT 8000 SKC M05/M07 Q1033 NO SIGN

Il bollettino relativo a tutto l'anno 2002 è stato quindi importato su foglio elettronico e, dopo aver definito gli appositi filtri, si è provveduto alla stesura di un file di dati SCRAM, compatibile con EDMS.

I file di dati meteorologici SCRAM sono costituiti da righe esclusivamente numeriche ognuna delle quali corrisponde ad un rilevamento. Complessivamente in ogni riga sono individuabili le seguenti posizioni:

1. in prima posizione c'è l'identificativo numerico a cinque cifre della stazione di rilevamento;
2. in seconda posizione c'è la data nel formato anno, mese, giorno, YYMMDD;
3. in terza posizione c'è l'ora, hh;
4. in quarta posizione si colloca la ceiling height espressa in centinaia di *ft*, HHH;
5. in quinta posizione vi è la direzione del vento in decine di gradi, DD;
6. in sesta posizione c'è la velocità del vento in nodi, VVV;
7. in settima posizione c'è la temperatura a bulbo bagnato espressa in °F, TTT;
8. in ottava posizione c'è la copertura nuvolosa totale in %, CT;
9. in nona posizione c'è la copertura nuvolosa opaca in %, CO;

La stringa METAR vista sopra diviene allora:

16105020102 5 — — — 260040190000

ovvero:

- 16105: identificativo stazione;
- 020102: data;
- [*spazio*]5: ora;
- — — —: ceiling height;
- 26: direzione del vento;
- 004: velocità del vento;

- 019: temperatura;
- 00: copertura nuvolosa totale;
- 00: copertura nuvolosa opaca.

Si può infine notare come i METAR forniscano la copertura nuvolosa in ottavi mentre i file in input ad EDMS la richiedano in percentuale. Nel caso di cielo sereno, SKC viene considerato 0% mentre OVC, cielo coperto, viene considerato 100%. Nei casi di copertura intermedia la percentuale è stata determinata come valore medio dell'intervallo fornito dal METAR: ad esempio FEW indica come visto sopra una copertura tra 1/8 e 2/8 e nello SCRAM viene posto quindi pari a:

$$\frac{1}{2} * \left(\frac{1}{8} + \frac{2}{8} \right) * 100 = 19\%$$

Similmente SCT corrisponde al 44% e BRK al 75%.

Bibliografia

- [1] Riccardo Niccoli. *Aerei*. De Agostini, 2004.
- [2] Thad Godish. *Air quality*. Lewis Publishers, fourth edition, 2004.
- [3] FAA. *Air quality procedures for civilian airports and air force bases*. FAA, 1997.
- [4] Stephen R. Turns. *An introduction to combustion*. McGraw-Hill, first edition, 1996.
- [5] A.A.V.V. Annuario 2002. Technical report, ENAC - Ministero delle Infrastrutture e dei Trasporti, 2002.
- [6] General Accounting Office. Aviation and the environment. airport operations and future growth present environmental challenges. Technical report, GAO, 2000.
- [7] General Accounting Office. Aviation and the environment. strategic framework needed to address challenges posed by aircraft emissions. Technical report, GAO, 2003.
- [8] IPCC. Aviation and the global atmosphere. Technical report, IPCC, 1999.
- [9] FAA-CSSI. *EDMS reference manual*. Technical report, 2004.
- [10] A.A.V.V. *Handbook of applied meteorology*. David D. Houghton, first edition, 1985.
- [11] A.A.V.V. Linee guida per la selezione e l'applicazione dei modelli di dispersione atmosferica per la valutazione della qualità dell'aria. Technical report, ANPA, 2000.
- [12] A.A.V.V. Rapporto ambientale 2002. Technical report, Alitalia, 2002.
- [13] URS Company. *Select resource materials and annotated bibliography on the topics of hazardous pollutants associated with aircrafts, airports and aviation*. FAA, 1 giugno 2003.
- [14] Clifford T. Hall. The approximation of vertically stacked area sources with a single area source in AERMOD. Technical report, FAA, 2002.

- [15] Pacific Environmental Services Inc. *User's guide for the AERMOD meteorological preprocessor AERMET*. U.S. EPA, first edition, 1998.
- [16] Pacific Environmental Services Inc. *User's guide for the AMS/EPA regulatory model AERMOD*. U.S. EPA, first edition, 1998.

Indirizzi internet di interesse

- <http://www.aee.faa.gov>
Sito ufficiale della FAA.
- <http://www.airliners.net>
Sito in cui si possono reperire numerose informazioni tecniche riguardo ai velivoli in commercio e non.
- <http://www.assaeroporti.it>
Sito ufficiale della Assaeroporti in cui si possono trovare molte informazioni riguardo al traffico sugli scali italiani.
- <http://www.epa.gov>
Sito ufficiale dell'EPA.
- <http://www.ge.com>
Sito ufficiale dell'azienda di produzione di motori jet General Electric.
- <http://www.icao.int>
Sito ufficiale dell'ICAO.
- <http://www.noaa.gov>
Sito ufficiale del NOAA in cui è possibile reperire numerose informazioni di carattere meteorologico e scaricare dati relativi agli strati d'aria superiori.
- <http://www.pratt-whitney.com>
Sito ufficiale dell'azienda di produzione di motori jet Pratt&Whitney.
- <http://www.veniceairport.it>
Sito ufficiale dell'Aeroporto Marco Polo di Venezia.
- <http://www.weblakes.com>
Sito della società di sviluppo software Lakes Environmental in cui è possibile reperire numerose informazioni riguardo ad AERMOD e ad altri programmi di simulazione.

Indice

Introduzione	2
1 Il modello matematico	7
1.1 Una visione d'insieme del modello	7
1.2 La simulazione di emissione	10
1.2.1 Il traffico aereo	10
1.2.2 APU e GPU	17
1.2.3 Ground Support Equipment	19
1.2.4 Il traffico veicolare su strada e nei parcheggi	23
1.2.5 Le sorgenti stazionarie	30
1.3 La simulazione di dispersione	36
1.3.1 Concetti di base	36
1.3.2 Lo scambio di dati tra AERMOD e i preprocessori	41
1.3.3 AERMET e il calcolo dei parametri del CBL	47
1.3.4 AERMET e il calcolo dei parametri dell' SBL	59
1.3.5 INTERFACE e il calcolo dei parametri per CBL ed SBL	63
1.3.6 Le relazioni intercorrenti tra AERMOD e AERMAP	81
1.3.7 Il calcolo delle concentrazioni nel CBL	85
1.3.8 Il calcolo delle concentrazioni nell'SBL	93
1.3.9 Le deviazioni standard per sorgenti stazionarie puntiformi	96
1.3.10 Il calcolo della plume rise	103
1.3.11 Il calcolo delle concentrazioni per sorgenti non puntiformi	106
1.3.12 La dispersione di inquinanti emessi dai velivoli	109
2 La raccolta dei dati	117
2.1 Il traffico aereo	121
2.2 Le emissioni ai gates	150
2.3 Il traffico su strada e nei parcheggi	162
2.4 Le sorgenti puntiformi	181

2.4.1	I camini delle centrali di riscaldamento	181
2.4.2	I serbatoi di stoccaggio dei combustibili	184
2.5	I dati meteorologici	186
3	I risultati ottenuti	191
3.1	La simulazione di emissione	191
3.2	La simulazione di dispersione	203
3.2.1	Il posizionamento dei recettori	203
3.2.2	I risultati ottenuti	206
	Conclusioni	231
	Glossario	235
	Bibliografia	239
	Appendice A	243
	Appendice B	251
	Appendice C	261
	Appendice D	263