

ALMA MATER STUDIORUM  
UNIVERSITA' DI BOLOGNA

SCUOLA DI INGEGNERIA  
Sede di Forlì

Corso di Laurea in  
INGEGNERIA AEROSPAZIALE  
Classe L – 9

ELABORATO FINALE DI LAUREA  
In IMPIANTI AEROSPAZIALI

Studio del fenomeno del "wind shear" e  
analisi dei principali sistemi di  
rilevamento

CANDIDATO  
Veronica Iannotti

RELATORE  
Chiar.mo Prof. Paolo Tortora

CORRELATORE  
Prof. Alfredo Locarini

Anno Accademico 2018/2019



# Indice

<b>Introduzione</b>	<b>8</b>
<b>1 Introduzione al fenomeno del windshear</b>	<b>10</b>
1.1 Definizione . . . . .	10
1.2 Possibili origini del windshear . . . . .	11
1.2.1 Stabilità e instabilità atmosferica . . . . .	12
1.2.2 Temporalità . . . . .	13
1.2.3 Fronte . . . . .	15
1.2.4 Brezza di mare e di terra . . . . .	17
1.2.5 Gust Front . . . . .	18
1.2.6 Inversione termica . . . . .	18
1.2.7 Orografia . . . . .	19
1.3 Riepilogo . . . . .	21
<b>2 Effetti sugli aeromobili</b>	<b>24</b>
2.1 Sistemi di riferimento e forze esterne . . . . .	24
2.2 Stabilità dei velivoli . . . . .	27
2.2.1 Stabilità statica longitudinale . . . . .	27
2.2.2 Stabilità statica latero-direzionale . . . . .	28
2.3 Effetti sull'aeromobile del windshear orizzontale . . . . .	30
2.4 Effetti sull'aeromobile del windshear verticale . . . . .	32
2.5 Tecniche per i piloti . . . . .	34
<b>3 Troposfera e principi per il rilevamento dei fenomeni di wind-shear</b>	<b>39</b>
3.1 Troposfera . . . . .	39
3.2 Onde . . . . .	43
3.2.1 Onde sonore . . . . .	44
3.2.2 Onde elettromagnetiche . . . . .	46

<b>4 Sistemi di rilevamento</b>	<b>53</b>
4.1 RADio Detection And Ranging (RADAR) . . . . .	53
4.1.1 Equazioni caratteristiche dei RADAR . . . . .	56
4.1.2 Disturbi . . . . .	58
4.1.3 RADAR Doppler . . . . .	59
4.1.4 RADAR meteorologico . . . . .	61
4.2 LIght Detection And Ranging (LIDAR) . . . . .	62
4.3 SOnic Detection And Ranging (SODAR) . . . . .	64
4.4 Low Level Windshear Allert System (LLWAS) . . . . .	66
4.5 Terminal Doppler Weather Radar (TDWR) . . . . .	67
4.6 Riepilogo . . . . .	68
<b>Conclusioni</b>	<b>69</b>
<b>A Incidenti e dati relativi al fenomeno del windshear</b>	<b>74</b>
A.1 Casi di windshear in Italia . . . . .	76
A.1.1 Aeroporto di Palermo Punta Raisi . . . . .	79
<b>Bibliografia</b>	<b>82</b>
<b>Sitografia</b>	<b>84</b>

# Elenco delle figure

1.1	Microburst simmetrico . . . . .	14
1.2	Schema di una cella temporalesca . . . . .	15
1.3	Fronte caldo . . . . .	16
1.4	Fronte freddo . . . . .	17
1.5	Fronte di raffica . . . . .	19
1.6	Orografia in presenza di edifici e di rilievi montuosi . . . . .	20
2.1	Sistemi di riferimento: assi verticali locali, assi vento, assi corpo . . . . .	25
2.2	Angolo di Sideslip $\beta$ e momento di imbardata N . . . . .	28
2.3	Angolo di Sideslip $\beta$ e momento di rollio L . . . . .	29
2.4	Atterraggio con diminuzione e aumento del vento di testa . . . . .	31
2.5	Incontro durante il decollo dopo il lift-off . . . . .	31
2.6	Incontro durante il decollo in pista . . . . .	32
2.7	Rateo di salita . . . . .	36
3.1	Suddivisione della troposfera . . . . .	41
3.2	Suddivisione dello strato limite planetario . . . . .	42
3.3	Velocità con diminuzione della temperatura . . . . .	45
3.4	Velocità con aumento della temperatura . . . . .	45
3.5	Direzione di propagazione con vento . . . . .	46
3.6	Spettro elettromagnetico . . . . .	47
3.7	Scattering di Rayleigh e di Mie . . . . .	50
4.1	Antenna di un sistema RADAR . . . . .	53
4.2	Pulse repetition time . . . . .	54
4.3	Funzionamento di un sistema RADAR . . . . .	56
4.4	Funzionamento di un sistema RADAR Doppler . . . . .	61
4.5	Schematizzazione di un radar meteorologico . . . . .	62
4.6	Radar meteorologico di Teolo(PD) . . . . .	62
4.7	Esempio di un sistema SODAR . . . . .	65

4.8	Schematizzazione di un LLWAS . . . . .	66
4.9	Confronto tra sistemi di rilevamento . . . . .	68
4.10	Dati tecnici di un RADAR meteorologico . . . . .	69
4.11	Dati tecnici di un LIDAR . . . . .	70
4.12	Dati tecnici di un SODAR . . . . .	70
A.1	Eventi di windshear nel periodo 2007-2017 . . . . .	77
A.2	Eventi di windshear per aeroporto . . . . .	78
A.3	Aeroporto di Palermo Punta Raisi . . . . .	80



# Introduzione

Il fenomeno del windshear rappresenta un problema non indifferente nel campo dell'aviazione, soprattutto in termini di sicurezza del trasporto aereo.

Il windshear è stato, ed è tuttora, oggetto di numerosi studi, come testimoniano documenti, articoli e conferenze tenutesi fin dagli anni '70 dello scorso secolo.

L'obiettivo di questa tesi di laurea è quello di fornire un'analisi principalmente descrittiva di tale fenomeno, mettendo in evidenza quelle che risultano essere le condizioni meteorologiche sufficienti per la sua comparsa. L'elaborato, in questo modo, offre dei concetti base per il monitoraggio del windshear, attraverso lo studio di strumenti di *detection* e *warning*, che siano essi già esistenti o in fase di sviluppo.

La tesi è articolata in quattro capitoli: nel primo capitolo viene fornita una introduzione al fenomeno in oggetto, attraverso la ricerca delle sue possibili origini. Nel secondo capitolo ci si occupa di descrivere e comprendere gli effetti sulla stabilità dell'aeromobile a seguito di una variazione del vento e vengono inoltre fornite delle procedure per i piloti da attuare in caso di incontro con il windshear. Il terzo capitolo si concentra maggiormente sullo studio dei principi che sono alla base dei sistemi di rilevamento attualmente più utilizzati; mentre nell'ultimo capitolo sono descritti tali sistemi di rilevamento, sia da un punto di vista funzionale che matematico.

Grazie a questo lavoro è stato possibile analizzare alcuni importanti fattori che influenzano il controllo del fenomeno del windshear e l'assistenza alla navigazione aerea; risultati che verranno esposti nelle conclusioni finali.





# Capitolo 1

## Introduzione al fenomeno del windshear

### 1.1 Definizione

Il windshear, o gradiente di vento, è definito dalla circolare ICAO 186 del 1987 come:

una variazione della velocità e/o della direzione del vento nello spazio, includendo correnti ascendenti o discendenti.

Da questa definizione segue che, ogni fenomeno atmosferico o ostacolo fisico che potrebbe provocare una variazione del vento nella sua velocità o direzione è causa di windshear. L'importanza di tale fenomeno è dovuta principalmente alle conseguenze sulle prestazioni degli aeromobili e sulla sicurezza del volo.

Nonostante possa presentarsi in qualsiasi strato dell'atmosfera, il windshear più pericoloso è il *Low Level Wind Shear* (LLWS). Quest'ultimo si presenta nei primi 600 m dell'atmosfera ed è, dunque, critico lungo il sentiero di avvicinamento, nella fase di atterraggio e nella fase iniziale del decollo.

Il gradiente di vento, essendo una variazione del vettore vento (o di ognuna delle sue componenti) in una data direzione, è dato dalla differenza tra due vettori vento osservati, diviso la distanza che separa i due punti di misura. Dimensionalmente rappresenta una velocità diviso una distanza e si misura in  $(\frac{m}{s}/30m)$  o in  $(kt/100ft)$ , entrambe dimensionate in  $[s]^{-1}$ . In ambito aeronautico si misura lo *shear rate*, espresso in  $(kt/s)$ , e rappresenta l'accelerazione percepita dal velivolo durante le varie fasi di volo.

La risposta degli aeromobili ad una variazione del vento è estremamente complessa e dipende da diversi fattori come:

- il tipo di velivolo;
- il peso dell'aereo;
- la fase di volo;
- la scala del windshear;
- l'intensità del windshear;
- la durata del windshear;

La circolare ICAO classifica il windshear in base alla sua intensità in:

Scale	Intensity
Light	0 - 4 kt/s
Moderate	5 - 8 kt/s
Strong	9 - 12 kt/s
Severe	> 12 kt/s

Nel segnalare l'intensità del windshear incontrato, i piloti possono basarsi sulla propria esperienza personale.

In base alla durata del fenomeno, si parla di:

- **Windshear non transitorio:** il quale agisce su scale temporali elevate ed è in genere associato a fronti, fronti di brezza e onde orografiche;
- **Windshear transitorio:** il più pericoloso in quanto presenta una maggiore intensità e scale temporali più brevi, è difficile da prevedere e segnalare ed è associato a nubi temporalesche o convettive.

## 1.2 Possibili origini del windshear

Il windshear inizialmente era associato alle correnti discendenti presenti al di sotto di nubi temporalesche; a seguito di vari studi è invece emerso che può presentarsi anche in corrispondenza di altri fenomeni meteorologici, quali:

- Temporali;
- Fronti;
- Brezze di mare;

- Gust front;
- Inversioni termiche;
- Onde orografiche;

### 1.2.1 Stabilità e instabilità atmosferica

Come verrà in seguito descritto, una condizione necessaria affinché si verifichi il fenomeno del windshear è l'instabilità atmosferica.

Per parlare di stabilità e instabilità, bisogna innanzitutto introdurre due concetti base:

- Gradiente termico verticale;
- Gradiente adiabatico secco;

Il *gradiente termico verticale* rappresenta la variazione di temperatura dell'atmosfera al variare della quota e generalmente assume un valore medio di  $6,5^{\circ}\text{C}$  ogni 1000 m. La temperatura ad una quota  $h$  risulta essere legata alla temperatura al livello del mare  $T_0$  dalla relazione:

$$T = T_0 - 0,0065h \quad (1.1)$$

Il *gradiente adiabatico secco* fa riferimento ad una particella di aria che si muove verso l'alto (o verso il basso) adiabaticamente, ovvero senza scambi di calore con le masse di aria circostanti. Il suo valore è pari a  $9,8^{\circ}\text{C}$  ogni 1000 m ed è costante a tutte le quote.

Quando il gradiente termico verticale è maggiore del gradiente adiabatico secco, l'aria si dice *instabile*. In tal caso, infatti, la massa di aria che sale si raffredda più velocemente dell'atmosfera circostante e la sua attitudine è quella di salire sempre più velocemente.

Quando il gradiente termico verticale è minore di quello adiabatico secco, l'aria è, invece, *stabile*. La massa di aria, salendo, si raffredda più velocemente dell'aria adiacente e continuerà la sua salita fino a quando non raggiungerà la stessa temperatura dell'atmosfera esterna.

In definitiva, l'aria stabile tende a rimanere ferma una volta raggiunta tale condizione, mentre quella instabile è soggetta ad un moto verticale, ad

un continuo rimescolamento che porta alla generazione di moti convettivi e di conseguenza alla formazione delle nubi.

### 1.2.2 Temporali

I temporali si verificano, in genere, in condizioni di elevata instabilità atmosferica; la loro origine è legata alla formazione di cumulonembi, detti cellule temporalesche o cellule convettive, che si sviluppano per surriscaldamento dell'aria umida e per i moti convettivi prodotti dall'energia termica dovuta alla condensazione di umidità atmosferica. Durante il ciclo di vita di un temporale è possibile individuare tre fasi:

- **FASE DI SVILUPPO**, caratterizzata da forti correnti ascendenti in tutta la cella con velocità medie di 9 m/s e picchi fino a 30 m/s nella parte centrale. Le alte temperature al suolo provocano la formazione di bolle di aria calda che vengono spinte verso l'alto; se in quota vi sono condizioni favorevoli (ovvero aria fredda, secca e instabile) si forma un cumulo e l'aria calda in salita prevale su quella fredda in discesa. Tale prima fase è preceduta al suolo da un breve periodo di calma e una diminuzione della pressione, ha una durata di circa 10-15 minuti ed è caratterizzata da assenza di precipitazioni; si ha, inoltre, una separazione tra cariche elettriche positive, che si accumulano alla base della nube, e cariche elettriche negative che si distribuiscono nella zona più elevata;
- **FASE DI MATURITÀ**: una volta che il cumulo raggiunge l'aria stabile, non si espande più verticalmente ma inizia ad espandersi orizzontalmente, diventando un cumulonembo. In questa fase coesistono in quota cristalli di ghiaccio e gocce di acqua; all'interno del cumulonembo sono presenti correnti ascensionali, mentre esternamente correnti discendenti. Queste ultime portano al suolo una diminuzione delle temperature, un aumento della pressione, una variazione della direzione dei venti e una diminuzione della luminosità dell'atmosfera. Si verificano violenti rovesci di pioggia e scariche elettriche sia tra la nube e il suolo che all'interno della nube stessa;
- **FASE DI DISSIPAZIONE**, quando scoppia il temporale, nella zona interna del cumulonembo si ha una corrente discendente, mentre in quella esterna una ascendente che diminuisce sempre più fino a estinguersi. Il temporale perde vigore, cessano le precipitazioni, l'aria torna stabile e al suo posto rimangono cumuli e cirri.

In base alla causa che determina il primo moto ascendente, i temporali sono classificati in:

- *Temporali frontali*, associato ai fronti freddi o ai fronti caldi (paragrafo 1.2.2);
- *Temporali di massa d'aria*, prodotti per instabilità all'interno di una massa d'aria e si suddividono a loro volta in: *temporali di calore*, si verificano principalmente nei mesi caldi a causa del rapido riscaldamento dell'aria in prossimità del suolo, e *temporali orografici*, causati dal sollevamento di aria dovuto alla presenza di rilievi montuosi;

Più la struttura cellulare è organizzata, più grave e intenso risulterà il temporale. Il grado di organizzazione delle celle di un temporale dipende da diversi fattori, tra cui la stabilità dell'atmosfera, la convergenza del flusso d'aria, il profilo del vento con l'altezza. Tra questi, l'instabilità e il windshear verticale risultano essere i più critici nel determinare l'intensità di un temporale. In particolare, l'intensità sembrerebbe aumentare con l'aumentare del vento con l'altezza.

La colonna d'aria discendente di un temporale, chiamata *downdraft*, presenta un diametro che può variare, in base anche all'intensità del temporale, tra 1 o 5 miglia. Una volta raggiunto il suolo, le correnti si diffondono radialmente, creando un vortice circolare alla base del burst. Se l'area interessata da tali vortici è minore di 4 km si parla di *microburst*, altrimenti se superiore il fenomeno prende il nome di *macroburst* (Figura 1.1<sup>1</sup>).

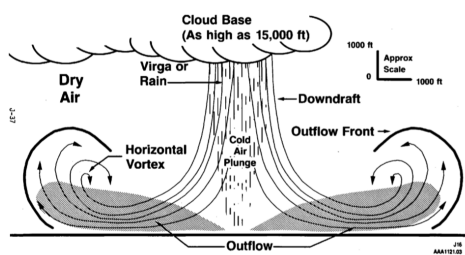


Figura 1.1: Microburst simmetrico

All'interno di una cella temporalesca è possibile distinguere due correnti di aria. In riferimento alla figura 1.2<sup>2</sup>, si hanno venti di inflow (in entrata) e

<sup>1</sup>Immagine tratta da: Federal Aviation Administration, *Advisory Circular 00-54: Pilot windshear guide*, 1988;

<sup>2</sup>Immagine tratta da: <http://www.fenomenitemporaleschi.it/convezione.htm>

venti di outflow (in uscita). Il flusso di inflow, generalmente meno intenso e più umido e tiepido, è la corrente d'aria che alimenta la cella temporalesca portando umidità verso il centro della cella. È un flusso d'aria che precede il temporale e che soffia in direzione opposta allo spostamento della cella stessa. Il flusso di outflow invece, più freddo e spesso più intenso, è la corrente d'aria in uscita dal temporale e non è altro che l'aria più fredda e pesante che scende verso il suolo. Il vento in uscita può propagandosi anche come un fronte di raffica (paragrafo 1.2.4).

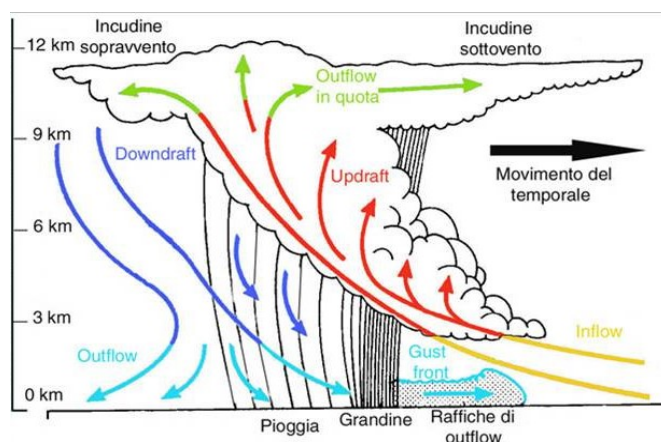


Figura 1.2: Schema di una cella temporalesca

### 1.2.3 Fronte

Un fronte atmosferico è definito come una superficie di contatto tra due masse d'aria aventi valori di temperatura, pressione, densità e umidità differenti. Quando queste due masse entrano a contatto tra loro, viene raggiunto un equilibrio in modo che la massa di aria fredda e densa si posizioni al di sotto della massa d'aria calda e meno densa, con il confine tra loro inclinato di un certo angolo rispetto l'orizzontale. Maggiore è il contrasto nella distribuzione della temperatura e del vento lungo il confine, più ripida è la pendenza.

Una superficie frontale è, per definizione, una zona di windshear in quanto essa stessa impone una discontinuità della pressione e di conseguenza della velocità del vento.

I fronti vengono classificati in base al loro movimento e alle variazioni di temperatura registrate in un punto attraverso il quale passa il fronte.

Un fronte caldo è caratterizzato da una massa d'aria più calda, la quale è meno densa, che scorre sopra una massa d'aria fredda (Figura 1.3). L'aria calda si raffredda e causa la formazione di nuvole molto estese. I fronti caldi sono accompagnati da precipitazioni poco intense ma con una durata maggiore rispetto a quelle associate ai fronti freddi. Prima del passaggio del fronte è possibile rilevare una temperatura relativamente bassa e una diminuzione della pressione atmosferica; durante il suo spostamento si ha un riscaldamento improvviso e un livellamento della pressione; mentre dopo il passaggio si osserva un leggero aumento della temperatura, della pressione e dell'umidità. Un fronte caldo presenta in genere delle pendenze tipiche che vanno da  $1/100$  a  $1/300$  e l'aria fredda sottostante, a causa dell'attrito con il terreno, si sposta più lentamente.

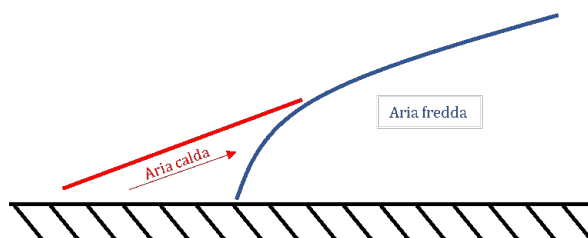


Figura 1.3: Fronte caldo

Un fronte freddo si verifica quando una massa di aria fredda incontra una massa di aria calda; la massa fredda si incunea al di sotto di quella calda, provocando la salita di quest'ultima (Figura 1.4). Lungo il fronte possono verificarsi dei fenomeni atmosferici molto violenti, come temporali di breve durata e forte vento. A seguito del passaggio di un fronte freddo è possibile notare una diminuzione delle temperature, un aumento della pressione dopo aver raggiunto un minimo durante il suo transito, acquazzoni e una diminuzione dell'umidità. La pendenza media di un fronte freddo varia da  $1/50$  a  $1/100$ , pendenze comunque più ripide rispetto a quelle di un fronte caldo.

I fronti caratterizzati da zone di transizione, ovvero di discontinuità della velocità del vento, più marcate sono quelli che hanno maggiore probabilità di causare windshear. L'effetto del windshear dovuto ad un fronte su un aereo dipende dalla larghezza della superficie frontale (ovvero della zona di transizione) e dal tempo di transito dell'aeromobile attraverso tale zona.



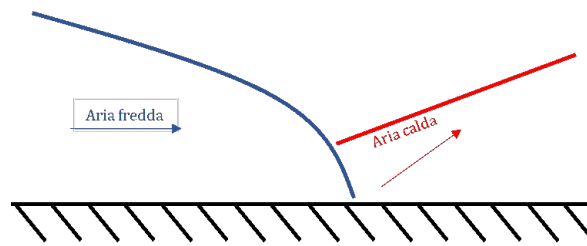


Figura 1.4: Fronte freddo

### 1.2.4 Brezza di mare e di terra

La brezza è un vento:

- debole e locale, in quanto ha una estensione molto limitata, solitamente compreso fra i gradi 2 e 3 della Scala di Beaufort <sup>3</sup>, quindi con velocità comprese tra i 7 e i 20 km/h (4 – 10 knt);
- periodico, in quanto è caratterizzato da regolari e alternate variazioni di direzione nel corso della giornata;

Al di sopra di aree terrestri adiacenti a zone marine si verifica una variazione considerevole del vento di superficie. Tale effetto è causato dal gradiente termico che si sviluppa durante il giorno e che si forma sopra la terraferma a causa del diverso calore specifico. L'acqua, avendo un calore specifico maggiore rispetto al terreno, si riscalda e si raffredda più lentamente rispetto al suolo.

Durante il giorno il terreno si scalda, l'aria sovrastante aumenta la sua temperatura e tende ad innalzarsi, causando una diminuzione di pressione al di sopra del suolo. L'aria che si trova sulla superficie del mare, essendo più fresca e in una zona con pressione maggiore, si sposta verso terra dove la pressione è più bassa. Si parla in questo caso di brezza di mare, una brezza diurna che nasce sulla superficie del mare e si sposta verso terra anche per decine di chilometri. La brezza marina può essere considerata come un fronte freddo, poco profondo, ma con pendenza e gradiente di temperatura tipici di un fronte caldo.

Durante la notte, il terreno si raffredda più velocemente dell'acqua e in questo caso la zona a bassa pressione è quella al di sopra del mare; si genera dunque un vento da terra verso il mare che prende il nome di brezza di terra.

<sup>3</sup>La scala di Beaufort è una misura empirica della forza del vento suddivisa inizialmente in 12 gradi e successivamente aumentanti a 17. Un grado Beaufort corrisponde alla velocità media di un vento di dieci minuti di durata.

Oltre al brusco cambiamento del vento di superficie, l'inizio della brezza di mare è spesso caratterizzato da una diminuzione della temperatura e un relativo aumento dell'umidità.

### 1.2.5 Gust Front

Il *gust front* (fronte di raffica) rappresenta una discontinuità tra l'aria fredda e densa proveniente da un downdraft che raggiunge il suolo e che si estende in tutte le direzioni, e l'aria circostante, più calda e meno densa (Figura 1.5<sup>4</sup>). Il fronte di raffica somiglia ad un fronte freddo poco profondo, ma con velocità del vento e turbolenze molto consistenti. Se la cella temporalesca si sta muovendo, il fronte di raffica si sposta insieme ad esso, anche se viaggia ad una velocità maggiore e nella stessa direzione della tempesta. Per questo motivo potrebbe presentarsi una variazione marcata della velocità del vento di superficie a seguito del passaggio del fronte. I fronti di raffica possono persistere anche oltre le 24 ore dalla dissipazione del temporale che li ha generati e nel loro spostamento possono generare nuovi temporali. Lungo la superficie di discontinuità si ha in particolare:

- Una variazione della direzione del vento, che passa da ascendente a discendente;
- Un aumento della temperatura;
- Una diminuzione della pressione atmosferica;

### 1.2.6 Inversione termica

Il gradiente termico verticale indica la variazione della temperatura dell'aria al variare della quota e in atmosfera standard ha un valore negativo, pari a  $-6,5^{\circ}\text{C}$  ogni 1000 m. L'aria a contatto con il suolo che ha una temperatura maggiore, si riscalda per convezione e, avendo una densità minore dell'aria circostante, sale di quota. Durante questa fase ascensionale la stessa massa d'aria si espande, in quanto all'aumentare della quota diminuisce la pressione, ed espandendosi la temperatura tende a diminuire.

Si possono verificare inversioni termiche sia al suolo che in quota.

In presenza di una inversione termica al suolo, il gradiente termico verticale

---

<sup>4</sup>Immagine tratta da: International Civil Aviation Organization, *Manual on low-level wind shear*, First Edition, 2005;

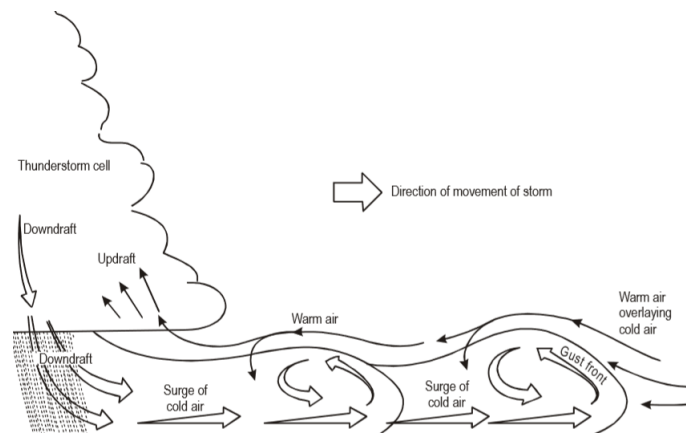


Figura 1.5: Fronte di raffica

assume un valore positivo, la temperatura dunque aumenta con l'aumento della quota. Si verifica quando i raggi del Sole non riescono a scaldare il suolo e di conseguenza l'aria a contatto con il terreno si raffredda molto rapidamente, raggiungendo delle temperature inferiori a quelle degli strati sovrastanti.

Nelle inversioni termiche in quota si verifica invece lo scorrimento di aria calda al di sopra di uno strato freddo. L'aria fredda ha la possibilità di salire sino a quanto incontra lo strato di aria calda: non avendo più possibilità di espandersi verticalmente si assiste ad una espansione orizzontale e questo fenomeno è riconoscibile con la formazione di nubi a forma di incudine (cumulonemi) che danno origine ai temporali.

Lo strato di aria fredda, che risulta in questo modo limitato dallo strato caldo sovrastante, determina un accumulo di umidità e di nebbia negli strati a contatto con il terreno.

A seguito di questa analisi si può concludere che le inversioni termiche non risultano essere direttamente connesse con il fenomeno del windshear, ma rappresentano una condizione di instabilità atmosferica e soprattutto un presupposto per la formazione di nubi temporalesche.

### 1.2.7 Orografia

La presenza di edifici o di rilievi montuosi può provocare un sollevamento orografico, una massa d'aria è forzata a deviare la sua direzione a causa della conformazione del terreno. L'effetto che gli ostacoli hanno sul vento dipende da diversi fattori, quali la velocità del vento e il suo orientamento rispetto al-

l'ostacolo o, in ambito aeroportuale, la scala dell'ostacolo stesso rispetto alle dimensioni della pista.

Con edifici che si sviluppano principalmente in larghezza, le masse di aria sono costrette a deviare intorno agli edifici e il vento in superficie può presentare direzioni variabili lungo la pista (Figura 1.6<sup>5</sup>). Viene a crearsi un windshear orizzontale che è, in genere, localizzato, profondo e turbolento e può essere problematico per gli aeromobili più leggeri.

In corrispondenza di un rilievo, invece, all'aumentare della quota l'aria calda e umida tende a raffreddarsi fino a raggiungere il punto di rugiada. L'umidità condensa e si generano delle precipitazioni sul versante sopravvento della catena montuosa, in corrispondenza del punto più alto. Passando nell'altro versante della montagna, l'aria torna a perdere quota, aumenta la pressione, la massa si comprime e si riscalda di nuovo. Quest'aria più calda e secca genera l'ombra pluviometrica, un'area a sottovento delle montagne caratterizzata da scarse precipitazioni. Il vento che scende dal versante della montagna è detto vento catabatico (vento di Fohn) e può dunque incanalarsi lungo la pista, se presente.

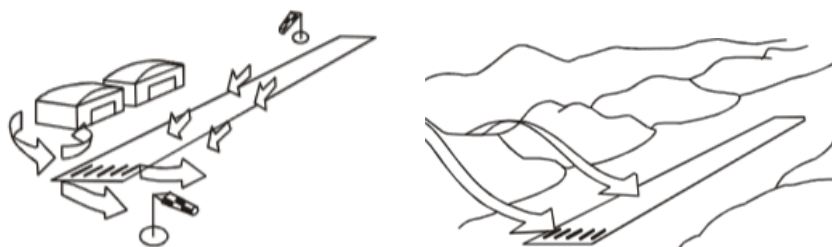


Figura 1.6: Orografia in presenza di edifici e di rilievi montuosi

---

<sup>5</sup>Immagine tratta da: International Civil Aviation Organization, *Manual on low-level wind shear*, First Edition, 2005;

### 1.3 Riepilogo

In base a quanto detto e alla durata del fenomeno, il windshear si classifica principalmente in:

- *Non transitorio* : il quale agisce su scale temporali elevate ed è in genere associato a fronti, fronti di brezza e onde orografiche;
- *Transitorio* : più pericoloso del precedente in quanto presenta una maggiore intensità e scale temporali brevi, è difficile da prevedere e segnalare ed è associato a nubi temporalesche o moti convettivi generali.

Riassumendo come variano le principali grandezze fisiche associate ad alcuni dei fenomeni atmosferici appena analizzati:

<b>Temporale</b>	<b>Fase di sviluppo</b>	Diminuzione pressione
	<b>Fase di maturità</b>	Aumento pressione
	<b>Fase di dispersione</b>	Diminuzione pressione ai valori di partenza

<b>Fronte di raffica</b>	<b>Pressione</b>	Diminuzione
	<b>Temperatura</b>	Aumento

<b>Fronte caldo</b>		<b>PRIMA</b>	<b>DURANTE</b>	<b>DOPO</b>
	<b>Pressione</b>	Diminuzione	Livellamento	Leggera risalita
	<b>Temperatura</b>	Freddo	Riscaldamento	Livellamento
	<b>Umidità</b>	Aumento	Stazionaria	Aumento

<b>Fronte freddo</b>		<b>PRIMA</b>	<b>DURANTE</b>	<b>DOPO</b>
	<b>Pressione</b>	Diminuzione	Minima	Aumento
	<b>Temperatura</b>	Caldo	Raffreddamento	Freddo
	<b>Umidità</b>	Alta	Rapido aumento	In caduta

Si può concludere che, prima dell'insorgere di ciascuno di essi si verifica una diminuzione della pressione atmosferica. In accordo anche con il fatto che il vento (essendo il windshear una variazione della sua direzione e/o della sua intensità), per definizione, è considerato come uno spostamento di una massa d'aria da una zona ad alta pressione a una zona a bassa pressione.

La pressione atmosferica varia in funzione della temperatura e dell'umidità atmosferica: in particolare, la pressione diminuisce all'aumentare di tali grandezze. Diminuisce con l'aumento della temperatura in quanto riscaldandosi,

l'atmosfera terrestre si dilata, diventa meno densa e più leggera, diminuisce dunque il peso della colonna d'aria. Aumentando l'umidità atmosferica, aumenta il contenuto di vapore acqueo, meno denso dell'ossigeno e dell'azoto che compongono l'atmosfera; ciò determina una densità minore dell'aria umida rispetto all'aria secca e di conseguenza una riduzione della pressione atmosferica.

In definitiva, il windshear può essere principalmente preceduto da:

- Instabilità atmosferica;
- Diminuzione della pressione;
- Aumento della presenza delle molecole di vapore acqueo.



## Capitolo 2

# Effetti sugli aeromobili

Per studiare gli effetti che il windshear, o in generale una variazione della direzione del vettore velocità, causa sugli aeromobili si fa riferimento alla Meccanica del Volo. Un modello matematico semplificato può essere ricavato ipotizzando l'aeromobile come un corpo rigido e la Terra come un corpo piatto e non rotante. In un sistema di riferimento inerziale, le equazioni della meccanica assumono la seguente forma:

$$F^{(e)} = \frac{d(mv)}{dt} \quad (2.1)$$

$$M^{(e)} = \frac{d(I\Omega)}{dt} \quad (2.2)$$

$F^{(e)}$  rappresenta la somma delle forze esterne agenti sul sistema, quali forze gravitazionali  $F^{(g)}$ , forze aerodinamiche  $F^{(a)}$  e forze propulsive  $F^{(p)}$ :

$$F^{(e)} = F^{(g)} + F^{(a)} + F^{(p)} \quad (2.3)$$

Al variare dell'assetto del velivolo, la matrice di inerzia  $I$  varia e con essa anche le equazioni dei momenti  $M^{(e)}$ . Per poter trascurare tali variazioni, è necessario riportare le equazioni (2.1) e (2.2) in un sistema di riferimento in cui:

$$\frac{dI}{dt} = 0$$

ovvero nel sistema di riferimento "assi corpo". Essendo tale sistema una terna non inerziale, bisognerebbe considerare anche dei termini di trascinamento.

### 2.1 Sistemi di riferimento e forze esterne

I sistemi di riferimento più utilizzati sono:



- Sistema di riferimento ASSI TERRESTRI: viene assunto l'origine della terna coincidente con il centro della Terra, l'asse  $Z_E$  passante per il poli e orientata verso Nord, gli assi  $X_E$  e  $Y_E$  giacenti nel piano dell'equatore e orientati in modo tale da rendere la terna levogira;
- Sistema di riferimento ASSI VERTICALI LOCALI: terna centrata nel baricentro del velivolo con l'asse  $Z_V$  orientata verso il basso secondo la direzione del vettore gravità, l'asse  $X_V$  perpendicolare al precedente e diretto come l'orizzontale locale. L'asse  $Y_V$  è presa in modo tale da rendere la terna levogira;
- Sistema di riferimento ASSI VENTO: centrata anch'essa nel baricentro del velivolo, l'asse  $X_W$  è orientata nella direzione del vettore velocità relativa rispetto all'atmosfera. L'asse  $Z_W$  giace nel piano di simmetria del velivolo ed è perpendicolare al precedente;
- Sistema di riferimento ASSI CORPO: è un sistema di riferimento solidale con il velivolo stesso in cui l'origine coincide con il baricentro. L'asse  $X_B$  è orientato nella direzione dell'asse longitudinale dell'aeromobile, l'asse  $Z_B$  è perpendicolare all'asse  $X_B$  e orientato verso il basso. L'asse  $Y_B$  è preso in modo tale da rendere la terna levogira;

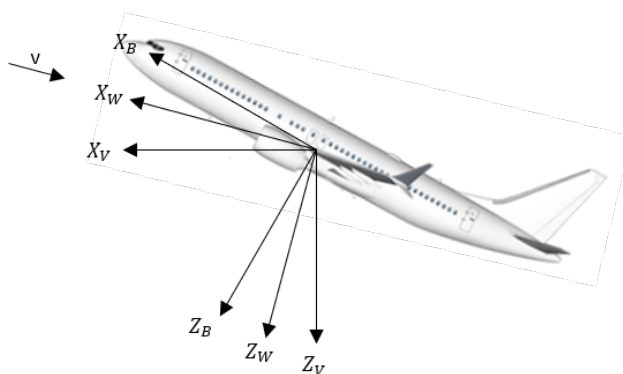


Figura 2.1: Sistemi di riferimento: assi verticali locali, assi vento, assi corpo

Dall'equazione (2.3) le forze che agiscono su un velivolo sono:

- Forze gravitazionali: ovvero il Peso  $mg$  del velivolo agente nella direzione dell'asse verticale locale  $Z_V$ ;
- Forze aerodinamiche:

- Resistenza  $D$ : orientata nella direzione negativa dell'asse vento  $X_W$ ;
- Portanza  $L$ : orientata nella direzione negativa dell'asse vento  $Z_W$ ;
- Forze propulsive: vettore Spinta  $T$  orientato nella direzione dell'asse corpo  $X_B$ ;

Si supponga, per semplificazione, la spinta  $T$  agente nella stessa direzione delle forze aerodinamiche.

Riscrivendo, per i motivi già affrontati, le equazioni nel sistema di riferimento ASSI CORPO, risulta che in condizioni di volo equilibrato la somma delle forze esterne e la somma dei momenti esterni devono essere nulle.

L'equazione che descrive il moto del baricentro per un volo livellato assume la forma:

$$\begin{cases} T = D \\ L = mg \end{cases} \quad (2.4)$$

Per l'equazione del moto attorno al baricentro, invece:

$$M^{(g)} + M^{(a)} + M^{(p)} = 0 \quad (2.5)$$

Essendo nullo il momento dato dalle forze gravitazionali in quanto il vettore peso, rispetto al baricentro, ha braccio nullo e trascurando i momenti dati dalle forze propulsive sotto l'ipotesi di braccio di applicazione delle forze circa nullo, risulta:

$$M^{(a)} = 0 \quad (2.6)$$

Il momento aerodinamico  $M^{(a)}$  è costituito da tre contributi:

- Momento attorno all'asse di rollio L;
- Momento attorno all'asse di beccheggio M;
- Momento attorno all'asse di imbardata N;

Per un volo simmetrico il momento L e il momento N sono nulli.

Risulta allora:

$$M = \frac{1}{2} \rho S v^2 c_m b = 0 \quad (2.7)$$

Per avere una condizione di equilibrio devono dunque essere soddisfatte le seguenti relazioni:

$$\begin{cases} T = D \\ L = Mg \\ c_m = 0 \end{cases} \quad (2.8)$$

## 2.2 Stabilità dei velivoli

Dalla definizione di portanza  $L$  e di resistenza  $D$ :

$$L = \frac{1}{2}\rho S v^2 c_L \quad (2.9)$$

$$D = \frac{1}{2}\rho S v^2 c_D \quad (2.10)$$

è evidente come esse dipendano dall'angolo di attacco  $\alpha$  (tramite il  $c_L$ ) e dal quadrato della velocità; una variazione della velocità del vento può, dunque, influenzare questi due parametri che agiscono sulle componenti della forza risultante, modificando a loro volta l'equilibrio dell'aeromobile.

La stabilità di un velivolo è definita come

la possibilità di ritornare ad una prefissata condizione di equilibrio, se da essa perturbato da cause esterne<sup>1</sup>.

### 2.2.1 Stabilità statica longitudinale

Per stabilità statica longitudinale si intende la stabilità attorno all'asse di beccheggio. Si parla in particolar modo di rigidità in beccheggio, ovvero

la tendenza del velivolo di generare un momento di beccheggio opposto alla variazione di incidenza subita<sup>2</sup>.

A seguito di una variazione di angolo di incidenza rispetto al velivolo, si può osservare una variazione dell'angolo di incidenza  $\Delta\alpha_{wb}$  rispetto al sistema alafusoliera e una variazione di incidenza  $\Delta\alpha_t$  rispetto al sistema coda, in genere diverse a causa dei fenomeni di interferenza con le ali. Tali variazioni di incidenza determinano variazioni di portanza in ala  $\Delta L_{wb}$  e in coda  $\Delta L_t$  e dei rispettivi momenti.

Se la nuova configurazione di forze e momenti provocasse un ulteriore aumento o diminuzione dell'angolo di attacco, il velivolo tenderebbe ad allontanarsi dalla condizione di equilibrio e risulterebbe *staticamente instabile*. Se a seguito della perturbazione il velivolo ha la tendenza di generare una nuova condizione di equilibrio si parla di *stabilità statica neutra*; se invece tende a tornare nella condizione di equilibrio iniziale, il velivolo risulterà *staticamente stabile*.

---

<sup>1</sup>Casarosa C., *Meccanica del volo*, Pisa University Press, 2013;

<sup>2</sup>Casarosa C., *Meccanica del volo*, Pisa University Press, 2013;

La condizione di stabilità statica longitudinale comporta che ad un aumento di incidenza si accompagni un momento picchiante, in modo da contrastare il momento generato dall'angolo  $\alpha$ . Il controllo in beccheggio può essere garantito attraverso la deflessione della superficie mobile presente nella superficie di coda. La deflessione  $\delta_e$  dell'equilibratore genera una variazione del carico di coda che determina di conseguenza una variazione del momento in modo da ripristinare l'equilibrio.

### 2.2.2 Stabilità statica latero-direzionale

Un velivolo si dice *direzionalmente stabile* se ha l'attitudine di inseguire il vettore velocità, ovvero se tende a mantenere nullo l'angolo di sideslip  $\beta$ , l'angolo formato tra l'asse longitudinale del velivolo e il vettore velocità. Al variare di tale angolo bisogna che si generi sul velivolo un momento di imbardata  $N$  tendente ad annullarlo (Figura 2.2<sup>3</sup>). Il controllo in imbardata è garantito dalla deflessione del timone di coda.

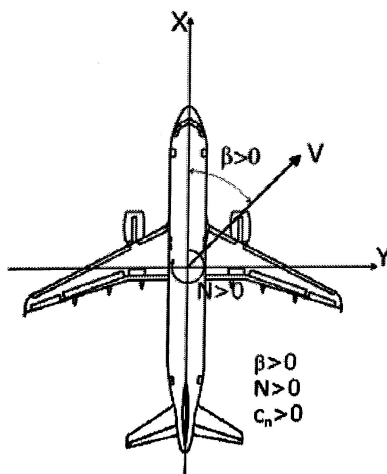


Figura 2.2: Angolo di Sideslip  $\beta$  e momento di imbardata  $N$

Si consideri una raffica laterale da destra che, combinandosi con la velocità asintotica, genera un vettore velocità inclinato di un angolo  $\beta$  nel piano di simmetria longitudinale. A seguito di tale componente di vento, per la presenza delle ali si avrà una deflessione del flusso in corrispondenza del timone di coda di un angolo detto *angolo di sidewash*  $\alpha_F$ . Per effetto dell'angolo di incidenza  $\alpha_F$  nasceranno forze di portanza e di resistenza. Trascurando la componente

<sup>3</sup>Immagine tratta da: Casarosa C., *Meccanica del volo*, Pisa University Press, 2013;

dovuta alla resistenza, si genera una forza laterale pari al valore della forza di portanza. Tale forza laterale, moltiplicata per la distanza tra il centro aerodinamico della deriva e il baricentro del velivolo, genera un momento di imbardata che va ad annullare l'angolo  $\beta$ .

L'angolo di sideslip  $\beta$ , oltre ad un momento di imbardata, genera anche un momento di rollio. Il controllo in rollio è garantito andando a generale una asimmetria nelle forze di portanza su ciascuna semiala attraverso una rotazione asimmetrica degli alettoni. A seguito di una rotazione positiva degli alettoni, ovvero una deflessione dell'alettone di destra verso il basso e una deflessione verso l'alto dell'alettone di sinistra, si genera un incremento di portanza sulla semiala destra e una riduzione di portanza sulla semiala sinistra. Si genera dunque un momento di rollio  $L$  proporzionale alla deflessione  $\delta_a$  (Figura 2.3<sup>4</sup>). Tale momento di rollio va a contrastare il momento generato dall'angolo di sideslip, riportando il sistema in una condizione di equilibrio.

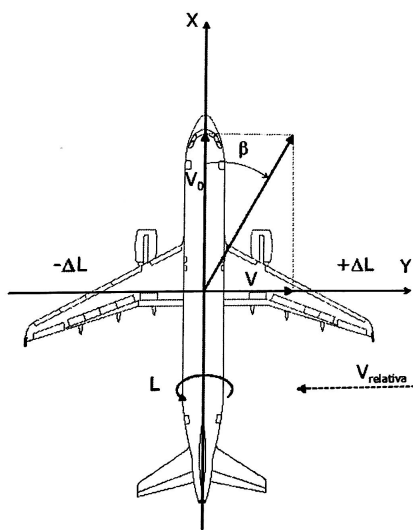


Figura 2.3: Angolo di Sideslip  $\beta$  e momento di rollio  $L$

<sup>4</sup>Immagine tratta da: Casarosa C., *Meccanica del volo*, Pisa University Press, 2013;

## 2.3 Effetti sull'aeromobile del windshear orizzontale

In condizioni di windshear, la componente orizzontale del vento potrebbe cambiare rapidamente in una scala spaziale relativamente breve. A seguito di una variazione del vento di testa o di coda, il velivolo accelera nella direzione in cui la forza disturbante agisce, fino a quando non si raggiunge nuovamente l'equilibrio. L'effetto del taglio di vento è quello di modificare la traiettoria del velivolo e per tornare nella rotta prevista il pilota deve intervenire adeguatamente.

Un vento di testa decrescente, così come un vento di coda crescente, provoca un effetto transitorio sulla velocità, in particolare determinano una sua diminuzione e un abbassamento della traiettoria dell'aereo. Viceversa, una componente di vento di testa crescente, o ugualmente di vento di coda decrescente, causa un aumento del vettore velocità.

Può verificarsi un windshear orizzontale:

- Nel fronte delle raffiche associate ai temporali, l'aria che impatta il suolo si espande lateralmente formando il gust front e lungo la linea del fronte l'aereo incontra forti variazioni di vento;
- Attraversando un fronte;
- Nel flusso del vento attorno ad ostacoli;

Per un aeromobile che atterra rapidamente su un vento contrario decrescente o su un vento di coda crescente, la velocità dell'aria decelera approssimativamente con lo stesso ritmo della decelerazione del vento contrario o dell'accelerazione del vento di coda. Questa variazione fa volare l'aereo al di sotto della *glide slope*, ovvero il sentiero di discesa stabilito. Il nuovo angolo di discesa, generato dallo squilibrio delle forze che agiscono sull'aereo, verrà mantenuto fino a quando il windshear continuerà ad insistere e fino a quando il pilota non deciderà di intervenire. Atterrare in un vento contrario crescente o in un vento di coda decrescente provoca una accelerazione della velocità dell'aria; ciò porta l'aereo a volare al di sopra della pendenza di planata (Figura 2.4<sup>5</sup>) Si consideri, per esempio, un aumento del vento di coda causato da un microburst, incontrato dopo il lift-off. Inizialmente il decollo appare normale ma dopo pochi secondi con la diminuzione della velocità, diminuisce la portanza e il velivolo reagisce

---

<sup>5</sup>Immagine tratta da: International Civil Aviation Organization, *Manual on low-level wind shear*, First Edition, 2005;

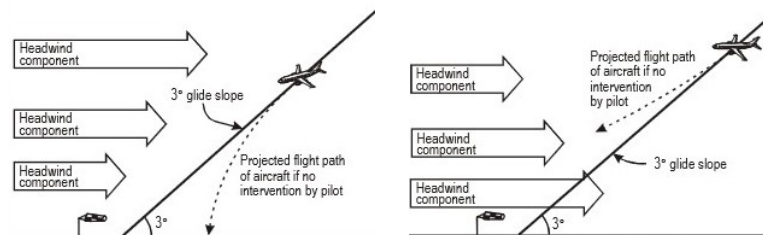


Figura 2.4: Atterraggio con diminuzione e aumento del vento di testa

con un *pitch down*, diminuisce dunque l'angolo tra l'asse longitudinale del velivolo e un asse orizzontale. In questo modo il velivolo inizia a perdere quota e a deviare dalla traiettoria originaria (Figura 2.5<sup>6</sup>). In caso di perdita di velocità è necessario mantenere o incrementare il *pitch attitude* e accettare una diminuzione della velocità. Inoltre uno sforzo di barra inusuale potrebbe essere necessario per contrastare la naturale stabilità del velivolo.

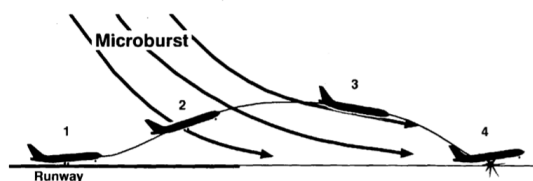


Figura 2.5: Incontro durante il decollo dopo il lift-off

Nel caso in cui l'incontro si verifichi sulla pista, prima del lift-off, il velivolo sarà soggetto ad una accelerazione minore rispetto al caso nominale e potrebbe raggiungere la velocità di rullaggio  $V_R$  solo verso la fine della pista. La velocità minore determina una minore portanza e dunque l'incapacità del velivolo di sollevarsi a sufficienza. Se la pista non è abbastanza lunga per accelerare e completare la manovra di decollo o per arrestare il velivolo, è consigliato aumentare l'angolo di pitch in modo da generare una portanza sufficiente anche a basse velocità (Figura 2.6<sup>7</sup>).

<sup>6</sup>Immagine tratta da: Federal Aviation Administration, *Windshear training aid: Windshear Overview for Management*, 1987;

<sup>7</sup>Immagine tratta da: Federal Aviation Administration, *Windshear training aid: Windshear Overview for Management*, 1987;

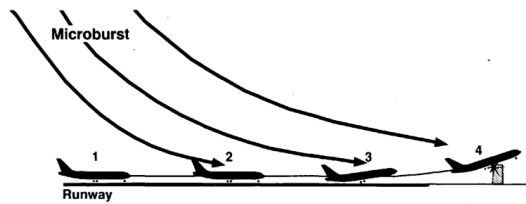


Figura 2.6: Incontro durante il decollo in pista

## 2.4 Effetti sull'aeromobile del windshear verticale

La variazione della componente verticale del vento dovuta a correnti ascendenti o discendenti rappresenta la situazione più critica per gli aeromobili. Come già affrontato, le cause principali sono i downburst e i microburst associati alle nuvole convettive.

Gli effetti dovuti ad un incontro di un aeromobile con un downburst dipendono, anche in questo caso, dalla configurazione dell'aereo, dall'intensità delle correnti, dal punto in cui si trova il velivolo.

Un downdraft o un updraft, dunque una variazione della componente verticale del vento, causano una variazione dell'angolo di attacco  $\alpha$ . Come nel caso del cambiamento della velocità, a seguito della variazione di  $\alpha$  si verifica un transitorio in attesa del ripristino dell'angolo di attacco originale.

Un downdraft provoca una riduzione transitoria dell'angolo di attacco, che causa una riduzione del coefficiente di portanza e genera di conseguenza una forza risultante che agisce al di sotto del percorso di volo previsto. Una corrente ascensionale agisce invece nel senso opposto.

Possiamo avere tre casi tipici:

- 1) Downburst sulla traiettoria di volo;
- 2) Downburst a sinistra della traiettoria di volo;
- 3) Downburst a destra della traiettoria di volo;

Nel caso 1) il velivolo potrebbe incontrare dapprima un vento contrario crescente, il quale causa un aumento della velocità, l'aereo si solleva e vola sopra la traiettoria di discesa o di salita. Il pilota potrebbe neutralizzare tale aumento



di velocità e ristabilire la traiettoria desiderata andando a diminuire la spinta; se l'aumento del vento contrario è però dovuto a un downburst è consigliato avviare una riattaccata (*go-around*).

Mentre l'aereo avanza attraverso il downburst, la componente verticale diventa sempre più predominante fino al quando, al centro, il downburst è terminato. Quando l'aereo raggiunge il centro, il vento contrario scompare e viene sostituito dalla corrente discensionale. A questo punto, l'angolo di attacco diminuisce e ciò provoca un abbassamento della traiettoria di discesa o di salita. Superata la zona centrale, il velivolo è soggetto ad un aumento del vento di coda che causa una diminuzione della velocità e un deterioramento della traiettoria.

Nei casi 2) e 3), gli effetti che il downburst potrebbe causare su un velivolo non sono così gravi come quelli che potrebbero verificarsi quando l'aereo passa al di sotto del downburst stesso. In questi casi, oltre ad avere una componente verticale, che sarà comunque di minore intensità, bisogna considerare anche la componente laterale del downburst.

I downburst possono essere incontrati anche quando l'aereo si trova ancora sulla pista prima del decollo. In queste circostanze, non importa esattamente dove colpiscono i burst d'acqua sulla pista poiché tutti i casi possono causare seri problemi al pilota. Se il downburst colpisce la pista davanti al velivolo, dopo il decollo l'aereo dovrà comunque transitare all'interno del downdraft e essere soggetto al vento di coda. Ciò può presentare la peggiore combinazione possibile di circostanze poiché al decollo l'aereo sta operando vicino ai massimi livelli di spinta e con una massa relativamente alta. Se la fase di decollo non è ancora stata completata, in base alla velocità di volo, il pilota deve valutare se ci sia o meno una lunghezza della pista sufficiente per arrestare il velivolo o altrimenti per procedere con il decollo.

Una situazione simile può sorgere se il downburst si verifica dietro l'aereo prima del decollo. In questo caso, il vento contrario improvviso può rendere impossibile un'accelerazione per il decollo se la lunghezza della pista disponibile non è sufficiente.

## 2.5 Tecniche per i piloti

Da uno studio effettuato dalla *Federal Aviation Administration* su una serie di incidenti causati dal windshear è stato possibile redigere un documento<sup>8</sup> che fornisse concetti base per il riconoscimento di tale fenomeno e tecniche raccomandate per i piloti. Prima che il pilota possa applicare però le tecniche di recupero, egli deve essere in grado di riconoscere se l'aeromobile sta per incontrare un fenomeno di windshear. C'è un intervallo di tempo inevitabile tra il pilota che vede per la prima volta i segni, li riconosce, applica le tecniche di recupero appropriate e l'aereo che risponde di conseguenza. Ridurre al minimo tale intervallo di tempo significa riconoscere precocemente la condizione di windshear e applicare tempestivamente le tecniche di recupero consigliate. Le indicazioni di un incontro con windshear possono essere ricavate dagli strumenti di bordo presenti nella cabina pilotaggio, da attrezzature apposite per avvertimento a bordo, da attrezzature a terra, da rapporti di piloti o bollettini meteo.

Dalle indicazioni riportate nei bollettini meteorologici è possibile riconoscere la presenza di windshear e forniscono al pilota la possibilità di evitare l'incontro o ritardare l'avvicinamento o il decollo fino a quando le condizioni meteo non siano migliorate. Bollettini meteo, come i METAR (*ME*Teorological *Aerodrome Report*), possono riportare informazioni su:

- venti di superficie o raffiche;
- presenza di nubi;
- virga, ovvero precipitazione percepita alla base di una nuvola che evapora prima di raggiungere il suolo;
- presenza di un fronte di raffica;
- aree di polvere sollevate dal vento, in particolare a seguito dell'anello che si forma a seguito di un downburst;
- presenza di temporali;

E' importante sottolineare come tali avvertenze servano ad allertare il pilota sulla possibilità di incontrare un windshear e permettano di intraprendere azioni appropriate. Negli aeroporti che non sono dotati di sistemi di rilevamento

---

<sup>8</sup>Federal Aviation Administration, *Windshear training aid: Windshear Overview for Management*, 1987;

per il windshear, è probabile che tali avvertimenti si basino su indicazioni fatte da altri piloti. I piloti sono dunque tenuti a segnalare l'incontro di windshear durante le manovre di atterraggio o di decollo.

Il riconoscimento di una situazione di windshear attraverso il comportamento degli strumenti di bordo è invece più facile, soprattutto se il pilota vola sempre in condizioni di un approccio stabilizzato. Le indicazioni che il pilota dovrebbe osservare sono cambiamenti significativi della velocità, la posizione relativa al percorso di discesa, la velocità verticale e l'impostazione della spinta. Anche i radar meteorologici di bordo sono d'aiuto per rilevare la presenza di celle convettive.

Vi possono essere però diversi fattori che potrebbero impedire l'identificazione del fenomeno stesso, come per esempio:

- Condizioni meteorologiche marginali;
- Elevate condizioni di carico di lavoro per l'equipaggio;
- Illusione della normalità;

Contribuiscono anche al rischio di incidenti la mancata comunicazione tra l'equipaggio e il centro di controllo e il non perfetto coordinamento tra i membri stessi dell'equipaggio.

Dagli studi effettuati risulta che, a seguito di un incontro con una componente di coda crescente durante il decollo, per i primi 5 secondi dopo il lift-off la traiettoria seguita dal velivolo risultava circa uguale a quella prevista in condizioni nominali. Entro 20 secondi dal lift-off, però, il velivolo iniziava a perdere quota a causa della diminuzione della velocità, fino ad impattare la pista (Figura 2.7<sup>9</sup>).

Se, dopo una attenta valutazione di tutte le informazioni disponibili, il pilota decidesse di continuare l'avvicinamento o di procedere con il decollo, dovrebbe essere predisposto ad un possibile incontro con il windshear, attuando le misure precauzionali specificate nei manuali operativi delle varie compagnie aeree. L'uso di tali precauzioni può, tuttavia, non garantire la certezza di non incontrare un windshear e, inoltre, non dovrebbe sostituire in ogni caso il giudizio perso-

---

<sup>9</sup>Immagine tratta da: Federal Aviation Administration, *Windshear training aid: Windshear Overview for Management*, 1987;

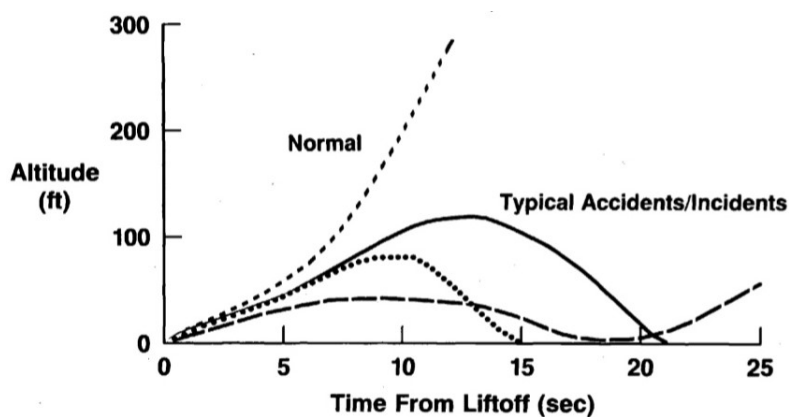


Figura 2.7: Rateo di salita

nale del pilota.

#### *Precauzioni per il decollo*

- Impostare la spinta massima al decollo, in questo modo si accorcia la fase di rullaggio massimizzando la capacità di accelerazione, si ha un miglior rateo di salita e si riduce il carico di lavoro dell'equipaggio;
- Scegliere la pista più lunga in modo da poter accelerare alla velocità di rotazione, se si decide invece di non completare la fase di decollo, si ha una maggiore distanza disponibile per arrestare il velivolo;
- Considerare l'uso della regolazione dei flap consigliata, che dipende dai tipo di aeromobile;
- Prendere in considerazione l'impostazione di una maggiore velocità di rotazione;
- Non utilizzare direttori di volo con riferimenti alla velocità a meno che non siano dotati di guida al recupero del vento;

#### *Precauzioni per l'atterraggio*

- Utilizzare un approccio stabilizzato non oltre i 300 m di AGL (*Above Ground Level*) in modo da migliorare la capacità di riconoscimento del windshear;
- Ridurre al minimo le riduzioni di spinta;

- Utilizzare la pista più adatta;
- Considerare le impostazioni dei flap consigliate;
- Considerare l'uso di una maggiore velocità di avvicinamento, se la lunghezza della pista è sufficiente per la successiva frenata;
- Utilizzare i sistemi di AutoFlight in grado di alleviare il carico di lavoro del pilota, consentendo anche all'equipaggio più tempo per monitorare gli strumenti e le condizioni meteorologiche. Tali sistemi devono continuamente essere monitorati;

La conclusione che emerge è che l'incontro con windshear dovrebbe essere evitato il più possibile. Si spende molto tempo ad analizzare in dettaglio il fenomeno e il suo effetto sugli aerei per fornire ai piloti una base nel riconoscere ed evitare potenziali situazioni di taglio del vento. Conoscere i tipi e l'intensità di tale fenomeno è importante per dare al pilota una visione completa della situazione. La conoscenza della risposta aeronautica al windshear aiuta il pilota stesso a capire cosa sta succedendo e spiega le ragioni delle tecniche raccomandate per affrontare un involontario incontro di windshear, alcune delle quali potrebbero apparire diverse rispetto alle "normali" pratiche di volo.



## Capitolo 3

# Troposfera e principi per il rilevamento dei fenomeni di windshear

Prevedere possibili situazioni che potrebbero causare il fenomeno del windshear è senz'altro un primo passo per aiutare i piloti a gestire e adottare, in tempi ridotti, adeguate misure in caso di emergenza.

Informazioni utili potrebbero essere ottenute dalla continua osservazione e da uno studio approfondito in quelle zone che risultano essere più critiche. Gli strumenti attualmente in uso per il rilevamento e l'avvertimento del windshear prevedono costi molto elevati, sia per il loro acquisto che per la loro manutenzione, e potrebbero essere presenti solo in aeroporti maggiormente trafficati o soggetti a tale fenomeno più frequentemente.

Prima di esaminare le tecniche di rilevamento più utilizzate, verranno analizzati l'ambiente nel quale tali dispositivi devono operare, le principali caratteristiche delle onde impiegate e la propagazione e l'attenuazione di queste ultime.

### 3.1 Troposfera

La troposfera è lo strato dell'atmosfera terrestre più vicino alla superficie della Terra, presenta uno spessore che varia a seconda della latitudine e raggiunge un valore tra i 16 e i 20 km in corrispondenza dell'equatore, mentre ai poli presenta uno spessore di circa 8 km.

Nella troposfera è contenuta la maggior parte di tutto il vapore acqueo dell'atmosfera e in essa hanno prevalentemente origine tutti i fenomeni atmosferici dovuti al movimento di masse d'aria che portano alla formazione di venti, nu-

vole e precipitazioni.

La superficie terrestre si riscalda assorbendo la radiazione solare ed il calore emesso dal suolo viene trasportato verso l'alto grazie al rimescolamento turbolento che caratterizza la troposfera stessa; poiché il suolo scalda maggiormente gli strati d'aria ad esso adiacenti, ne deriva che la temperatura diminuisce con l'altitudine e varia fino a raggiungere un minimo di  $-50^{\circ}\text{C}$  a 12 km di altezza. La troposfera è composta principalmente da:

- Azoto: 78% circa;
- Ossigeno: 21% circa;
- Anidride carbonica: 0.03% circa;
- Vapore acqueo;

Il vapore acqueo e l'anidride carbonica permettono il passaggio della radiazione solare nell'atmosfera ma trattengono una percentuale elevata dei raggi infrarossi riemessi dalla Terra, determinando un accumulo dell'energia termica e, quindi, un aumento della temperatura terrestre, generando il cosiddetto "effetto serra". La capacità dell'atmosfera di trattenere più o meno calore dipende dalla concentrazione dei gas serra: un'atmosfera umida, quindi con un maggior contenuto di vapore acqueo, risulta trattenere più calore rispetto a un'atmosfera meno umida; ugualmente una maggior concentrazione di anidride carbonica determina un aumento della temperatura più intenso rispetto ad un'atmosfera con una minore concentrazione.

Come già affrontato, essendo il fenomeno del windshear specialmente evidente e preoccupante al di sotto dei 600 m, è conveniente considerare quella porzione di troposfera a diretto contatto con il suolo, che prende il nome di **strato limite planetario** (*PBL: planet boundary layer*).

La parte restante della troposfera viene invece chiamata *free atmosphere*. Quest'ultima è caratterizzata da una scarsa presenza di turbolenza e un flusso piuttosto laminare. Tra lo strato limite planetario e l'atmosfera libera vi è uno *strato di inversione* (Figura 3.1<sup>1</sup>).

Lo strato limite planetario è, in sostanza, la parte bassa della troposfera direttamente influenzata dalla presenza della superficie terrestre e che risente di

---

<sup>1</sup>Immagine tratta da: Stull Roland B., *An introduction to boundary layer meteorology*, Kluwer Academic Publishers, 1999;



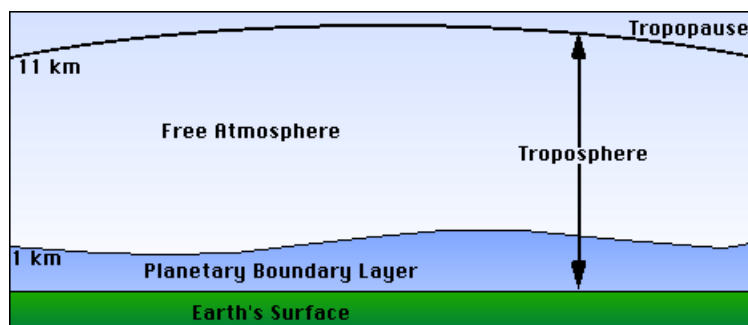


Figura 3.1: Suddivisione della troposfera

forcing superficiali quali l'attrito, l'evaporazione, il trasferimento di calore, l'emissione di gas inquinanti, la modifica del flusso a causa del terreno. Lo spessore dello strato limite varia nel tempo e nello spazio ma, in genere, risulta essere più sottile nelle zone ad alta pressione e più spesso, a causa dell'innalzamento delle nubi, nelle zone a bassa pressione. Al di sopra delle superfici terrestri, in zone ad alta pressione, lo strato limite ha una struttura ben definita in quanto segue un ciclo giornaliero (Figura 3.2<sup>2</sup>). Si compone principalmente di:

- uno **strato superficiale**;
- uno **strato di mescolamento**;
- uno **strato residuo**;
- uno **strato limite stabile**;

Lo strato superficiale (*surface layer* – *SL*) è una regione instabile e rappresenta la parte inferiore dello strato limite in cui i flussi turbolenti variano meno del 10% delle loro intensità. Si sviluppa con il soleggiamento diurno, a seguito dei processi convettivi provocati dal forcing superficiale, ed ha uno spessore massimo di 100 m.

È caratterizzato da:

- Una diminuzione della temperatura con la quota;
- Una diminuzione dell'umidità con la quota;
- Un incremento del vento (*windshear*) con la quota;

<sup>2</sup>Immagine tratta da: <https://slideplayer.it/slide/589276/>

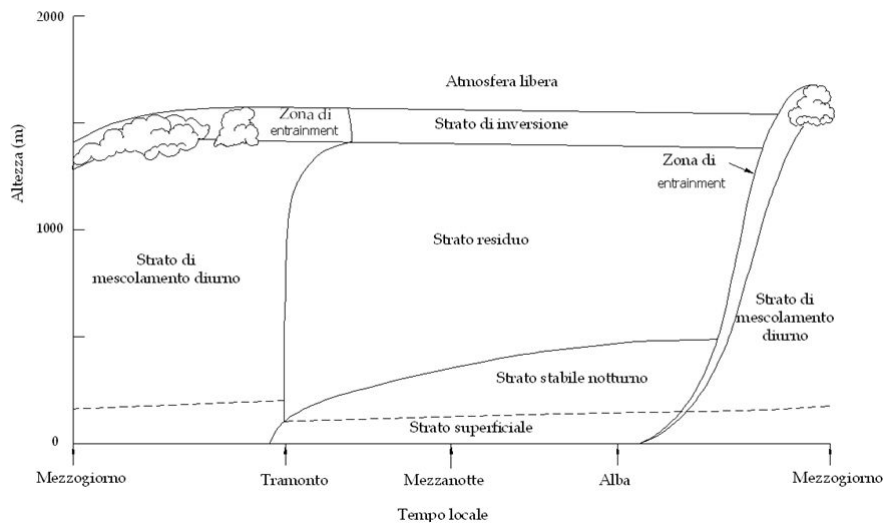


Figura 3.2: Suddivisione dello strato limite planetario

Lo strato mescolato (*mixed layer* – *ML*) è caratterizzato da moti convettivi ed effetti turbolenti che determinano un rimescolamento delle grandezze termodinamiche quali la temperatura e l’umidità che tendono ad assumere un profilo verticale circa costante. Anche l’intensità e la direzione del vento assumono un andamento più omogeneo con la quota. La crescita di questo strato è determinata dal riscaldamento solare del terreno, raggiungendo la massima profondità nel tardo pomeriggio.

Lo strato residuo (*residual layer* – *RL*) si forma, in genere, poco dopo il tramonto del sole, al termine delle turbolenze e delle termiche. In questo strato i valori delle varie grandezze atmosferiche tendono a rimanere costanti e pari ai valori medi assunti nel mixed layer.

Durante la notte, gli strati più bassi a contatto con il terreno si trasformano in strati limite stabili (*stable boundary layer* – *SBL*) in cui l’aria è più stabile e le turbolenze più deboli.

Se l’atmosfera, nello strato limite planetario, è stabile, è possibile descrivere la variazione teorica della velocità del vento con l’altezza con la legge logaritmica di *Von Kàrmàn e Prandtl*:

$$V(z) = \frac{V_*}{k} \ln \frac{z}{z_0} \quad (3.1)$$

dove:

- $k$ : costante di Kàrmàn pari a 0.38;
- $V_*$ : velocità di attrito che dipende dallo stress superficiale  $\tau$ ;
- $z_0$ : rugosità superficiale;

Nel caso in cui lo strato limite risulta instabile, la variazione della velocità del vento con l'altezza sarà inferiore a quella prevista dalla legge logaritmica.

Nell'atmosfera libera, l'effetto dell'attrito superficiale diminuisce con l'altezza e prevalgono sempre più il gradiente di pressione e le forze di Coriolis che si fanno equilibrio (vento geostrofico). Il vento segue in genere un andamento intermedio tra la legge logaritmica a basse quote e l'andamento geostrofico negli strati più alti. Ne deriva una "spirale di Eckman": secondo questo modello, il vento salendo di quota non cambia solo la sua intensità ma anche la sua direzione, assumendo dunque una forma a spirale.

## 3.2 Onde

Le onde sono definite come delle perturbazioni che nascono in una definita regione dello spazio da una sorgente e che si propagano nel tempo e nello spazio, trasportando energia o quantità di moto. Un'onda non comporta uno spostamento di materia in quanto le particelle, che costituiscono il mezzo nel quale le onde stesse si propagano, non traslano ma si muovono solo attorno alla loro posizione di equilibrio.

Una prima classificazione divide le onde in *onde meccaniche* e *onde elettromagnetiche*. Le prime sono riconducibili ad oscillazioni del mezzo nel quale si propagano; fanno parte delle onde meccaniche le onde sonore. Le onde elettromagnetiche sono invece associate a oscillazione del campo elettromagnetico.

Un'altra importante classificazione riguarda la distinzione tra *onde trasversali*, in cui la perturbazione si verifica perpendicolarmente alla direzione di propagazione dell'onda, e *onde longitudinali*, in cui la direzione di propagazione e gli spostamenti del mezzo sono paralleli tra di loro. Nei liquidi e nei gas si possono avere solo onde longitudinali; nei solidi, invece, si possono propagare sia onde trasversali che longitudinali, a seconda di come viene perturbato il mezzo.

### 3.2.1 Onde sonore

Come già accennato, le onde sonore sono onde meccaniche longitudinali che possono propagarsi sia nei solidi, che nei liquidi e nei gas. Il mezzo nel quale non possono propagarsi è invece il vuoto.

Le onde sonore sono generate dalla vibrazione di un oggetto, detto sorgente del suono, il quale trasmette il proprio movimento alle particelle adiacenti. A loro volta, tali particelle iniziano ad oscillare e trasmettono il loro movimento a particelle vicine e così via, provocando una variazione locale della pressione. Mentre le particelle oscillano intorno alla loro posizione di equilibrio, l'onda sonora si muove nel mezzo considerato con una certa velocità. Se si considera come mezzo di propagazione un gas, grazie alla sua alta comprimibilità la variazione di pressione si traduce in una variazione della densità; si generano così onde di compressione e rarefazione.

La velocità di propagazione delle onde sonore dipende dal mezzo materiale nel quale si propagano: nell'aria la velocità di propagazione è circa 330 m/s, mentre nei liquidi e nei solidi essa è molto maggiore. Velocità del suono e temperatura in un gas ideale sono legati dalla relazione:

$$a = \sqrt{\gamma \bar{R} T} \quad (3.2)$$

Dove  $\gamma$  rappresenta il coefficiente di dilatazione adiabatica,  $\bar{R}$  la costante propria del gas e  $T$  la temperatura assoluta.

Poiché una rapida compressione del gas provoca un aumento della temperatura, da tale relazione segue un aumento della velocità del suono.

L'onda sonora, per la natura stessa delle onde, è soggetta al fenomeno della rifrazione: ovvero cambia direzione di propagazione quando attraversa regioni dello spazio (o mezzi fisici diversi) con differenti velocità di propagazione.

Poiché nella troposfera all'aumentare della quota la temperatura diminuisce, un'onda sonora che parte da terra con un fronte sferico, avrà in quota una velocità minore mentre a terra continuerà a propagarsi con la stessa velocità. A seguito di ciò il raggio sonoro viene incurvato verso l'alto a causa della rifrazione. Esiste un raggio limite a contatto con la superficie terrestre al di sotto del quale si crea una zona d'ombra che il segnale sonoro non riesce a raggiungere (Figura 3.3<sup>3</sup>).

---

<sup>3</sup>Immagine tratta da: <http://pcfarina.eng.unipr.it/dispense01/gazzola132514/gazzola132514.htm>

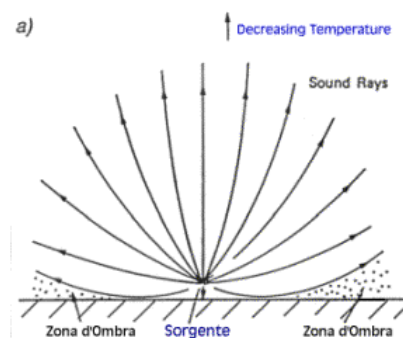


Figura 3.3: Velocità con diminuzione della temperatura

Una inversione termica determina, invece, un aumento della temperatura con la quota, causando quindi un relativo aumento della velocità del suono e una deformazione dei raggi d'onda e dei fronti d'onda verso il basso. In questo caso non si hanno zone d'ombra e l'onda sonora riesce a propagarsi ovunque (Figura 3.4<sup>4</sup>).

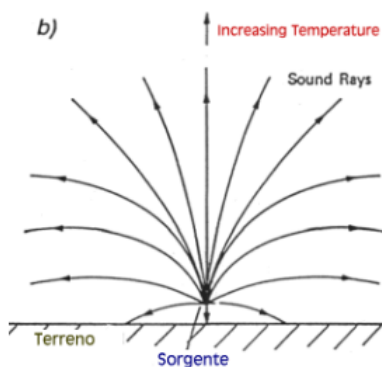


Figura 3.4: Velocità con aumento della temperatura

La direzione di propagazione di un'onda sonora può essere influenzata anche dall'intensità e dalla direzione del vento. Quando un raggio sonoro passa da una zona senza vento ad una zona con vento, la velocità del suono si somma vettorialmente alla velocità del vento. Poiché la velocità del vento risulta essere minore della velocità del suono (in particolare a contatto con la superficie a causa dell'attrito e degli ostacoli), un raggio sonoro che si propaga con il vento

<sup>4</sup>Immagine tratta da: <http://pcfarina.eng.unipr.it/dispense01/gazzola132514/gazzola132514.htm>

a favore verrà deviato verso il basso; viceversa, se si propaga controvento viene deviato verso l'alto (Figura 3.5<sup>5</sup>).

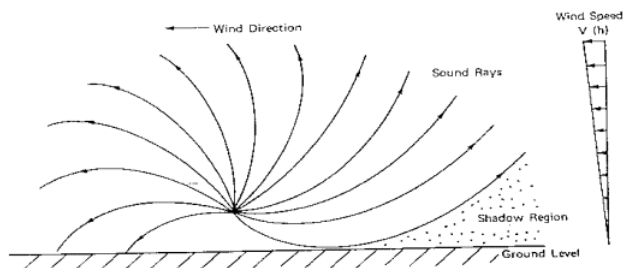


Figura 3.5: Direzione di propagazione con vento

Ai fini dello studio dei sistemi di rilevamento utilizzati per rilevare il fenomeno del windshear, che si presenta in particolar modo in situazioni di instabilità e in presenza di vapore acqueo nell'atmosfera, e a seguito dell'analisi appena effettuata, si potrebbe pensare di monitorare la variazione della velocità del suono in modo da generare un *warning* in caso di instabilità. Anche se le variazioni della velocità con la quota sono minime, si potrebbe confrontare il valore rilevato da un sensore posto ad una certa quota con il valore nominale che ci si aspetta nelle stesse condizioni di temperatura e quota. Potrebbero anche essere inseriti dei sensori allo stesso livello della sorgente in grado di registrare e rilevare i segnali sonori prodotti dalla sorgente stessa. In condizioni nominali tali sensori non dovrebbero registrare alcun segnale per la presenza della zona d'ombra. Una loro rilevazione potrebbe invece rappresentare una inversione termica nell'atmosfera.

### 3.2.2 Onde elettromagnetiche

Un'onda elettromagnetica è un'onda energetica in cui l'energia trasportata è ripartita in ugual modo tra campo elettrico e campo magnetico. I vettori campo elettrico  $E$  e campo magnetico  $B$  sono sempre normali tra di loro, il loro prodotto scalare è dunque nullo.

Partendo dalle equazioni di Maxwell si dimostra che ogni componente dei campi  $E$  e  $B$  soddisfa l'equazione di D'Alambert e ne deriva che le onde elettromagnetiche si propagano nel vuoto con la velocità della luce  $c$ . I due vettori sono inoltre perpendicolari alla direzione di propagazione in cui l'onda si propaga.

<sup>5</sup>Immagine tratta da: <http://pcfarina.eng.unipr.it/dispense01/gazzola132514/gazzola132514.htm>

Ne segue che le direzioni di  $E$ ,  $B$  e della velocità di propagazione formano una terna destra ( $E$ ,  $B$ ,  $c$ ): le onde elettromagnetiche sono dunque onde trasversali. In un punto dello spazio, i vettori campo elettrico e campo magnetico si propagano con la stessa legge sinusoidale, oscillano dunque con moto concorde e con la stessa frequenza  $f$ .

Come per tutte le onde periodiche, la frequenza e la lunghezza d'onda sono legate dalla relazione:

$$f\lambda = \nu \quad (3.3)$$

L'insieme delle frequenze delle onde elettromagnetiche costituisce lo spettro elettromagnetico (Figura 3.6<sup>6</sup>).

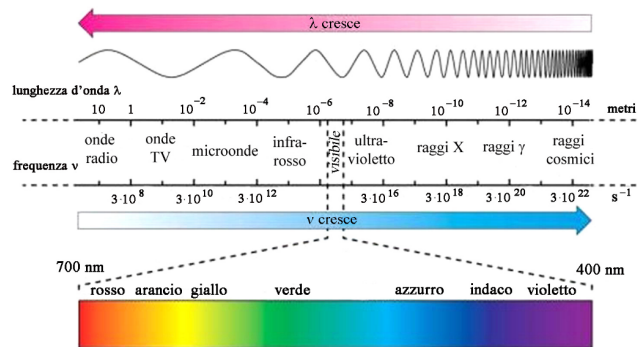


Figura 3.6: Spettro elettromagnetico

Le frequenze principalmente utilizzate nei sistemi di rilevamento sono quelle corrispondenti alle onde radio, per sistemi RADAR (paragrafo 4.3), e all'infra-rosso, al visibile e all'ultravioletto, per i sistemi LIDAR (paragrafo 4.4).

### Onde radio

Le onde radio sono caratterizzate da una frequenza che varia tra i 3 Hz ai 300 GHz, con una lunghezza d'onda maggiore di 1 mm. La gamma delle onde radio è a sua volta suddivisa in diverse bande con differenti intervalli di frequenza. La propagazione delle onde radio da un'antenna trasmittente a una antenna ricevente può avvenire in diversi modi:

- Onde di superficie;

<sup>6</sup>Immagine tratta da: <https://slideplayer.com/slide/960556/>

- Onde ionosferiche;
- Onde troposferiche;
- Diffusione troposferica (troposcatter);
- Onde spaziali;

Le *onde di superficie* sono onde in grado di seguire la curvatura della superficie terrestre e vengono fortemente attenuate dalla conducibilità del terreno. La propagazione per onde superficiali è limitata alle basse frequenze poiché l'attenuazione aumenta al crescere della frequenza: onde lunghe e medie possono percorrere distanze maggiori rispetto alle onde corte.

Le *onde ionosferiche* sono onde che vengono riflesse dalla ionosfera. Essendo sensibile alla radiazione solare che provoca la ionizzazione dei gas che la costituiscono, la ionosfera permette una riflessione delle onde radio provenienti da antenne trasmettenti posizionate a terra. La propagazione di onde ionosferiche avviene in modi diversi a seconda dell'ora del giorno, delle stagioni, delle condizioni ambientali, in definitiva in base al variare dell'attività solare. L'onda elettromagnetica attraversando gli strati più ionizzati subisce una deviazione rispetto alla sua direzione originale, ogni strato della ionosfera determina una deflessione di un certo angolo che si somma a quella provocata dallo strato precedente. In questo modo, quando l'angolo di deviazione supera i  $90^\circ$ , l'onda non può più penetrare lo strato ionizzato e tende ad essere riflessa verso il basso. L'onda riflessa, attraversando di nuovo i diversi strati della ionosfera, viene deviata fino a fuoriuscire dallo strato riflettente con un angolo pari a quello incidente. La riflessione delle onde da parte della ionosfera dipende principalmente dalla frequenza delle onde incidenti e dall'angolo di incidenza. Le onde corte sono soggette più facilmente al fenomeno della riflessione da parte della ionosfera e sono in grado di percorrere una maggiore distanza rispetto alle onde medie e lunghe.

Nella troposfera il campo elettrico e il campo magnetico subiscono delle modifiche a causa di fenomeni quali:

- Attenuazione: assorbimento di una parte energia da parte delle molecole presenti nell'atmosfera. L'attenuazione dipende dalla frequenza delle onde trasmesse;



- Riflessione: cambiamento nella direzione di propagazione quando l'onda incontra un materiale riflettente. L'angolo di riflessione è uguale all'angolo di incidenza;
- Rifrazione: deviazione subita dall'onda quando riesce a trapassare un mezzo con caratteristiche differenti;
- Diffrazione: deviazione della traiettoria di propagazione quando l'onda incontra un ostacolo dalle dimensioni uguali alla sua lunghezza d'onda;
- Diffusione: le onde subiscono una deviazione casuale a causa della collisione con altre particelle o onde (*troposcatter*);

Condizione fondamentale affinché vi sia un fenomeno di *scattering* è che l'indice di rifrazione <sup>7</sup> della particella e quello del mezzo siano diversi in modo da creare una sorta di discontinuità per l'onda elettromagnetica.

La forma della distribuzione della radiazione diffusa dipende principalmente dalle dimensioni della particella incontrata e dalla lunghezza d'onda della radiazione incidente (Figura 3.7<sup>8</sup>).

E' possibile introdurre un parametro di scattering  $x$ :

$$x = \frac{2\pi}{\lambda} a$$

dove  $a$  rappresenta la dimensione della particella.

Se  $x \ll 1$ , ovvero se le dimensioni della particella sono inferiori rispetto alla lunghezza d'onda dell'onda, si verifica lo "scattering di Rayleigh" in cui la radiazione è diffusa in modo quasi uniforme attorno alla particella. Questo tipo di scattering si osserva soprattutto nell'interazione tra la luce visibile e le molecole gassose presenti in atmosfera.

Quando  $x$  tende a crescere, quando dunque aumentano le dimensioni della particella, la radiazione diffusa presenta una maggiore diffusione nella direzione della radiazione incidente. La diffusione non è più simmetrica e in questo caso si parla di "scattering di Mie".

Infine, le *onde spaziali* riflesse da satelliti sono onde in cui il segnale viene trasmesso nello spazio con un angolo di incidenza molto piccolo e diretto in

<sup>7</sup>L'indice di rifrazione descrive la diminuzione della velocità di propagazione della radiazione elettromagnetica quando attraversa un materiale. E' dato dal rapporto tra la velocità della luce  $c$  e la velocità della radiazione nel mezzo  $v$ :

$$n = \frac{c}{v} \quad (3.4)$$

<sup>8</sup>Immagine tratta da: <http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/atmos/blusky.html>

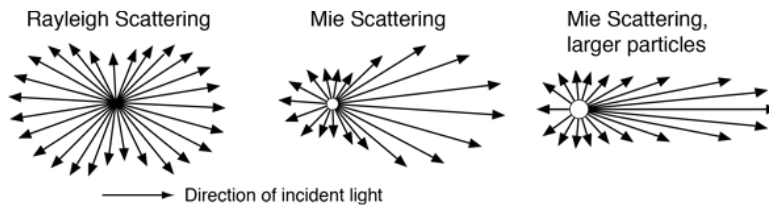


Figura 3.7: Scattering di Rayleigh e di Mie

un punto in cui vi è un satellite geostazionario. Il satellite si comporta come una antenna in grado di riflettere il segnale verso Terra che sarà poi ricevuto dall'antenna ricevente. Questo tipo di propagazione permette di avere distanze tra trasmettitore e ricevitore notevoli.

### ***Laser***

Un fascio laser non è altro che un'onda elettromagnetica in cui le lunghezze d'onda utilizzate appartengono al campo del visibile, ma a seconda delle applicazioni può essere anche più corta (ultravioletto) o più lunga (infrarosso).

A differenza delle onde radio, il fascio laser gode di alcune proprietà quali:

- **Monocromaticità:** ovvero la proprietà di emettere fasci di radiazioni in un intervallo spettrale molto stretto, concentrata cioè in una unica lunghezza d'onda;
- **Direzionalità:** il laser emette un fascio direzionale, fortemente collimato ma con una certa divergenza, anche se limitata, dovuta alla diffrazione;
- **Coerenza:** proprietà di mantenere una certa relazione con sé stesso durante la sua propagazione, i fotoni sono emessi simultaneamente e con la stessa fase. Si parla di:
  - **Coerenza temporale** quando le onde conservano la stessa fase nel tempo ed è correlata alla proprietà della monocromaticità;
  - **Coerenza spaziale** quando le onde hanno la stessa fase in tutti i punti della sezione trasversale del fascio ed è legata alla proprietà di avere fasci unidirezionali e collimati, ovvero paralleli anche ad elevate distanze;

- **Irradianza:** densità di potenza del fascio data dal rapporto tra la potenza (energia trasportata dal fascio nell'unità di tempo) e la sezione del fascio:

$$I = \frac{P}{S} \quad (3.5)$$

- **Fluenza:** densità di energia data dal rapporto tra l'energia trasportata dal fascio e la sezione del fascio considerata:

$$F = \frac{Q}{S} \quad (3.6)$$



## Capitolo 4

# Sistemi di rilevamento

### 4.1 RAdio Detection And Ranging (RADAR)

Il termine RADAR, acronimo di *RAdio Detection and Ranging* (radiatorilevamento e misura della distanza), è utilizzato per indicare qualsiasi sistema elettronico che impieghi onde elettromagnetiche per il rilevamento e la determinazione della posizione e/o della velocità di oggetti fermi o in movimento rispetto al radar stesso (Figura 4.1<sup>1</sup>).

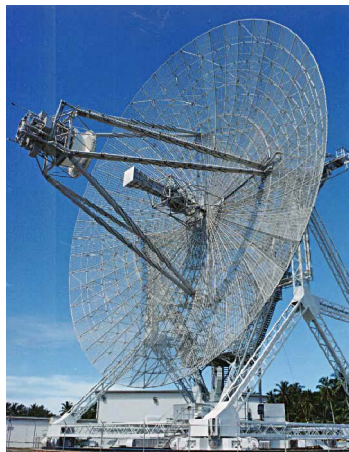


Figura 4.1: Antenna di un sistema RADAR

Il principio di funzionamento di un radar si basa sulla dispersione delle radiazioni elettromagnetiche. In particolare, una antenna, che potrebbe funzionare sia da trasmettitore che da ricevitore, trasmette delle onde radio alla velocità della luce  $c$ ; quando tale onda colpisce un oggetto (*target*) di dimensioni maggiori del-

---

<sup>1</sup>Immagine tratta da: <https://it.wikipedia.org/wiki/Radar>

la lunghezza d'onda della radiazione incidente, il segnale torna indietro. Tutti i target producono una riflessione diffusa, ovvero l'onda incidente si riflette in tutte le direzioni. Il riflesso del segnale è chiamato *scattering*, mentre la riflessione nella direzione opposta al raggio incidente prende il nome di *backscattering*. Conoscendo il tempo  $t$  impiegato dall'impulso emesso dal trasmettitore per raggiungere l'oggetto di interesse, essere riflesso da esso e ritornare al ricevitore, è possibile determinare la distanza alla quale si trova l'oggetto  $d$ :

$$d = c \times \frac{t}{2} \quad (4.1)$$

Il tempo tra l'inizio di un impulso e l'inizio dell'impulso successivo è detto *pulse repetition time* (PRT) ed è pari al reciproco del *pulse repetition frequency* (PRF): Il PRF rappresenta il numero di impulsi che il sistema trasmette nell'unità di tempo, un secondo (Figura 4.2<sup>2</sup>).

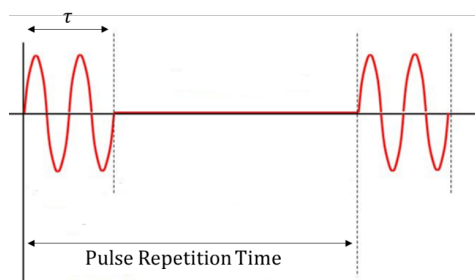


Figura 4.2: Pulse repetition time

Ogni volta che il radar trasmette un impulso è necessario aspettare un tempo sufficientemente lungo per permettere all'eco di tornare prima di trasmettere l'impulso successivo. Questo accorgimento, infatti, serve ad evitare i cosiddetti "echi di seconda traccia": un eco dovuto all'impulso  $n$ -simo che giunge solo dopo la trasmissione del successivo impulso. In questo modo verrà misurato un intervallo di tempo sbagliato e dunque una distanza errata. Il pulse repetition time definisce un intervallo non ambiguo massimo.

Se  $\tau$  è il tempo di trasmissione del singolo impulso, la massima distanza non ambigua può essere scritta come:

$$R_{unamb} = \frac{(PRT - \tau)c}{2} \quad (4.2)$$

<sup>2</sup>Immagine tratta da: <http://electriciantraining.tpub.com/14184/css/Figure-2-33-Pulse-Repetition-Time-Prt-124.htm>

Poiché il ricevitore non è in funzione quando il trasmettitore sta inviando l'impulso di trasmissione è necessario definire una portata minima, ovvero una distanza minima alla quale deve trovarsi un target per poterne misurare correttamente la posizione. Quando l'eco cade all'interno del tempo di trasmissione  $\tau$ , è impossibile determinare l'intervallo di tempo tra trasmissione e ricezione. Allora:

$$R_{min} = \frac{(\tau + t_{recovery})c}{2} \quad (4.3)$$

dove  $t_{recovery}$  è il tempo di recupero del duplicatore.

Lo schema a blocchi di un tipico RADAR a impulsi è mostrato in figura 4.3. Il sincronizzatore genera una successione di brevi impulsi di comando che accendono periodicamente il modulatore: questo a sua volta fa da interruttore del tubo di potenza a radiofrequenza (magnetron). Gli impulsi a radiofrequenza vengono poi inviati all'antenna con cadenza di ripetizione comandata dal sincronizzatore. Gli impulsi, che arrivano all'antenna attraverso il duplicatore, vengono irradiati nello spazio entro un fascio la cui direzione dipende dall'orientamento dell'antenna. Se il fascio è intercettato da un oggetto, una parte dell'energia degli impulsi viene riflessa dal target e gli impulsi riflessi vengono catturati dalla stessa antenna come "eco". Il duplicatore è un dispositivo che consente di utilizzare una medesima antenna sia per la trasmissione che per la ricezione. Gli echi captati dall'antenna sono applicati a un miscelatore che converte la radiofrequenza ad una frequenza più bassa, in genere ad un valore compreso tra 15 e 90 MHz, in modo da ottenere un segnale più adatto per la successiva fase di amplificazione; la conversione di frequenza è ottenuta per battimento<sup>3</sup> della radiofrequenza con la frequenza generata da un oscillatore locale. Dopo essere stato amplificato attraverso un amplificatore video, il segnale a frequenza intermedia viene applicato a un rilevatore che ne ricava l'involuppo (impulso video). È tale impulso che viene usato per rappresentare, sullo schermo di un tubo a raggi catodici, il tempo intercorso fra l'istante di trasmissione di un impulso radio e l'istante in cui esso viene ricevuto come eco. La presentazione visiva può essere ottenuta applicando al pannello elettronico del tubo a raggi catodici una modulazione di deflessione o una modulazione di intensità.

---

<sup>3</sup>Battimento: sovrapposizione di due onde sonore, ottiche o elettromagnetiche, di uguale ampiezza e di frequenza poco diversa. Se le due onde hanno frequenze  $f_1$  e  $f_2$  ampiezza A, l'onda risultante ha ampiezza variabile tra 0 e 2A e frequenza uguale a  $\frac{f_1+f_2}{2}$  e frequenza della perturbazione, o battimento, uguale alla differenza tra le frequenze componenti.

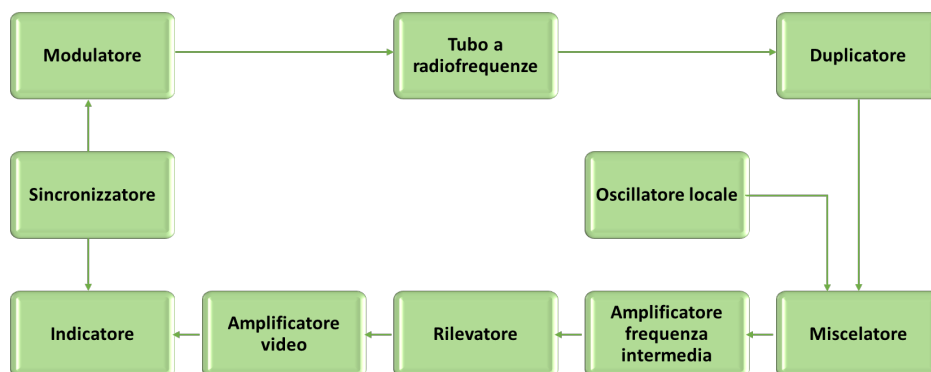


Figura 4.3: Funzionamento di un sistema RADAR

I sistemi RADAR, nonostante la loro efficienza e precisione, presentano dei limiti. Il più importante riguarda il rapporto tra la dimensione fisica dell'entità da rilevare e il volume dell'onda trasmessa dal radar. Se il fenomeno è piccolo e il volume degli impulsi è grande a causa dell'ampiezza del fascio o a causa della distanza dal radar o entrambi, probabilmente quel fenomeno non sarà rilevato dal RADAR; se il volume dell'impulso è invece molto piccolo rispetto ad un target, allora esso sarà ben campionato e rappresentato in modo relativamente fedele.

#### 4.1.1 Equazioni caratteristiche dei RADAR

Si consideri una antenna omnidirezionale, ovvero un'antenna che irradia onde radio ad una potenza uniforme in tutte le direzioni; sia  $P_t$  la potenza del trasmettitore, allora la densità di potenza (potenza per unità di aria) a una distanza  $R$  dal radar è uguale al rapporto tra la potenza trasmessa e l'area di una sfera di raggio  $R$ :

$$P_{iso} = \frac{P_t}{4\pi R^2} \quad (4.4)$$

Poiché i RADAR sono in genere costituiti da antenne direzionali, antenne che irradiano onde principalmente in una direzione preferenziale, è necessario introdurre un *guadagno*  $G_t$  che tiene conto del confronto tra l'antenna considerata e quella isotropa (cioè perfettamente omnidirezionale). In particolare, il guadagno è inteso come la capacità di una antenna di concentrare il campo elettromagnetico in una certa direzione. Analiticamente il guadagno è dato dal rapporto tra la densità di potenza irradiata dall'antenna considerata e la densità di potenza irradiata dall'antenna isotropa:

$$G_t = \frac{P}{P_{iso}} \quad (4.5)$$



Dunque, la densità di potenza dell'antenna direzionale è pari a:

$$P = G_t P_{iso} = \frac{P_t G_t}{4\pi R^2} \quad (4.6)$$

La capacità di un obiettivo di riflettere la potenza irradiata dal radar può essere rappresentata da un parametro detto *radar cross section*  $\sigma_t$ , che ha le dimensioni di un'area [ $m^2$ ]. Se tutta l'energia radar incidente sul bersaglio fosse riflessa allo stesso modo in tutte le direzioni, allora la sezione trasversale del radar sarebbe uguale all'area della sezione trasversale del bersaglio vista dal trasmettitore. In realtà una certa energia viene assorbita e l'energia riflessa non viene distribuita equamente in tutte le direzioni.

La quantità di energia che torna alla sorgente dipende da una serie di fattori quali:

- il materiale del target;
- le dimensioni del bersaglio;
- le dimensioni relative del bersaglio in relazione alla lunghezza d'onda utilizzata dal radar;
- l'angolo di incidenza e l'angolo di riflessione;

Per il segnale di ritorno, dal target al radar, vale lo stesso ragionamento fatto per il segnale di andata; se l'antenna è la stessa sia per la trasmissione che per la ricezione, il guadagno sarà lo stesso ma in ricezione l'antenna cattura solo una parte della potenza dell'eco, in proporzione alla sua area equivalente  $A_r$ . La densità di potenza per la ricezione risulterà pari a:

$$P_r = \frac{P_t G_t A_r \sigma_t}{(4\pi R^2)^2} \quad (4.7)$$

Considerando la relazione tra il guadagno e l'area effettiva:

$$G = \frac{4\pi}{\lambda^2} A_r \quad (4.8)$$

$$A_r = \frac{\lambda^2}{4\pi} G \quad (4.9)$$

si nota che le dimensioni dell'antenna dipendono dal guadagno  $G$  e dalla lunghezza d'onda: maggiore è la frequenza, minore è la lunghezza d'onda, minore saranno le dimensioni dell'antenna.

Sostituendo si ottiene la relazione finale della densità di potenza del ricevitore:

$$P_r = \frac{P_t G_t^2 \lambda^2 \sigma_t}{(4\pi)^3 R^4} \quad (4.10)$$

Bisogna anche tenere conto delle perdite che possono presentarsi durante la trasmissione. L'attenuazione di spazio libero (*free-space path loss*) è definita come:

l'attenuazione della potenza di un segnale elettromagnetico risultante da un percorso in linea di vista attraverso lo spazio libero, senza incontrare ostacoli che possano causare riflessioni o diffrazioni <sup>4</sup>.

Il parametro  $L_s$  indica la somma di tutte le perdite del sistema, tra le quali perdite atmosferiche, perdite di ricezione, perdite di trasmissione o perdite di fluttuazione.

$$P_r = \frac{P_t G_t^2 \lambda^2 \sigma_t}{(4\pi)^3 R^4 L_s} \quad (4.11)$$

Il segnale più piccolo che può essere rilevato dal radar, a partire dal quale il ricevitore può iniziare a funzionare, è detto "segnale minimo discernibile". La potenza minima associata a tale segnale si ottiene per la massima distanza raggiungibile con il radar che risulta essere pari a:

$$R_{max} = \sqrt[4]{\frac{P_t G_t^2 \lambda^2 \sigma_t}{(4\pi)^3 P_{rmin} L_s}} \quad (4.12)$$

Entro certi limiti tutti i parametri possono essere scelti dal progettista, fatta eccezione per la cross section radar  $\sigma_t$ . L'equazione radar stabilisce che per avere grandi portate, la potenza trasmessa deve essere elevata, le antenne devono avere un alto guadagno ed il ricevitore deve essere sensibile ai segnali più deboli. Tali stime sono però del tutto ottimistiche; pur considerando le molteplici perdite che possono avvenire lungo tutto il sistema, esse non tengono conto della natura statistica di parametri quali il minimo segnale rilevabile o la sezione  $\sigma_t$ . Una volta determinata la distanza, si può parlare di quale sia la probabilità che il radar riesca a rivelare un determinato bersaglio.

### 4.1.2 Disturbi

Il disturbo può essere definito come un eco indesiderato che modifica l'output del radar e rende difficile il rilevamento dei target, in quanto si sovrappone al

<sup>4</sup>[https://it.wikipedia.org/wiki/Attenuazione\\_di\\_spazio\\_libero](https://it.wikipedia.org/wiki/Attenuazione_di_spazio_libero)

segnale utile ricevuto. Esempi di echi indesiderati possono essere i riflessi del mare, della terra, la pioggia, gli uccelli, la presenza di edifici o rilievi montuosi. Tali elementi possono però essere indesiderati in un tipo di applicazione ma oggetto di studio in un altro.

Echi di mare e di terra sono chiamati *clutter di superficie*, mentre gli echi della pioggia o di altri fenomeni atmosferici sono detti *clutter di volume*. Il clutter di pioggia è originato oltre che dalla pioggia, anche da grandine, neve o nubi e nelle zone in cui sono presenti tali fenomeni atmosferici si osservano principalmente due effetti:

- Assorbimento dell'energia a radiofrequenze, con conseguente attenuazione degli echi dei target e diminuzione della portata;
- Riflessione parziale dell'onda da parte delle precipitazioni e dunque rappresentazione del disturbo sull'indicatore;

Più bassa è la frequenza, minore sarà l'assorbimento dell'energia: radar in banda C hanno un minor assorbimento rispetto ai radar in banda X. Per la riflessione è possibile utilizzare dei dispositivi antidisturbo in modo da mascherare i segnali indesiderati.

Per i clutter di volume si definisce un parametro, riflettività  $\eta$ , come il rapporto tra la radar cross section e il volume:

$$\eta = \frac{\sigma}{V} \quad (4.13)$$

che rappresenta la capacità di una precipitazione di riflettere l'impulso radar. L'attenuazione dovuta ai clutter di pioggia riduce la riflettività del nucleo e distorce la forma e l'estensione dell'eco.

### 4.1.3 RADAR Doppler

Un radar, dunque, rileva la presenza di oggetti e la loro posizione trasmettendo una serie di impulsi e osservando i loro echi. Il trasmettitore può anche essere utilizzato in modo continuo, invece che pulsato, se il segnale trasmesso può essere separato dall'eco più debole. La potenza del segnale eco ricevuto è infatti molto più piccola della potenza del trasmettitore. Per separare il segnale ricevuto da quello trasmesso si sfrutta l'effetto Doppler, ovvero il riconoscimento dello slittamento in frequenza dei due segnali. L'effetto Doppler è alla base dei Radar Doppler che sono in grado di determinare la velocità con la quale un target si

sta muovendo. Se  $R$  è la distanza tra il radar e il target, il numero totale di lunghezze d'onda  $\lambda$  contenuto nel percorso di andata e ritorno sarà pari a:

$$\frac{2R}{\lambda} \quad (4.14)$$

e poiché una lunghezza d'onda corrisponde ad una escursione angolare di  $2\pi$  radianti, l'escursione angolare totale  $\Phi$  risulterà essere:

$$\Phi = \frac{2R}{\lambda} 2\pi = \frac{4\pi R}{\lambda} \quad (4.15)$$

Se il target è in movimento, la distanza  $R$  e la fase  $\Phi$  sono in continuo cambiamento. La variazione di  $\Phi$  rispetto al tempo è uguale ad una velocità angolare, si ottiene così una *velocità angolare Doppler*  $\omega_d$ :

$$\omega_d = 2\pi f_d = \frac{d\Phi}{dt} = \frac{4\pi}{\lambda} \frac{dR}{dt} = \frac{4\pi v_r}{\lambda} \quad (4.16)$$

dove  $f_d$  è la frequenza Doppler e  $v_r$  la velocità relativa.

La frequenza Doppler, dalla relazione precedente e ricordando la relazione tra frequenza e lunghezza d'onda  $f = \frac{c}{\lambda}$ , si può scrivere come:

$$f_d = \frac{2v_r}{\lambda} = \frac{2v_r f_t}{c} \quad (4.17)$$

con  $f_t$  la frequenza trasmessa e  $c$  velocità della luce  $\cong 3 \times 10^8 m/s$ .

La frequenza ricevuta può essere scritta come:

$$f_r = f_t + f_d = f_t + \frac{2v_r f_t}{c} \quad (4.18)$$

Dalla differenza tra la frequenza ricevuta e quella trasmessa può essere ricavata la velocità dell'oggetto, in particolare:

- Se la frequenza doppler  $f_d$  è negativa si avrà uno slittamento verso le basse frequenze (*red shift*), la frequenza ricevuta sarà minore di quella trasmessa e l'oggetto che si sta osservando si sta allontanando dal radar;
- Se la frequenza doppler è positiva si avrà un *blue shift*, uno slittamento verso le alte frequenze; la frequenza ricevuta sarà maggiore di quella trasmessa e ciò indica che l'oggetto si sta avvicinando;

Lo schema a blocchi di un semplice radar a impulsi continui è mostrato in figura 4.4. Un trasmettitore genera delle onde continue con frequenza  $f_t$ , che vengono irradiate nello spazio attraverso l'antenna. Una parte dell'energia irradiata è intercettata da un target che in parte la riflette nella direzione del

radar e viene catturata dall'antenna ricevente. Se il target è in movimento con una velocità relativa  $v_r$  rispetto al radar, il segnale ricevuto presenterà uno shift in frequenza rispetto al segnale trasmesso di una quantità pari a  $\pm f_d$ . Il segnale eco ricevuto ad una frequenza pari a  $f_t \pm f_d$ , attraverso l'antenna, passa nel miscelatore che, con una parte del segnale trasmesso, genera una radiofrequenza con frequenza  $f_d$ . Lo scopo dell'amplificatore doppler è quello di eliminare gli echi di target fissi e di amplificare il segnale doppler dell'eco ad un livello in cui può operare l'indicatore.

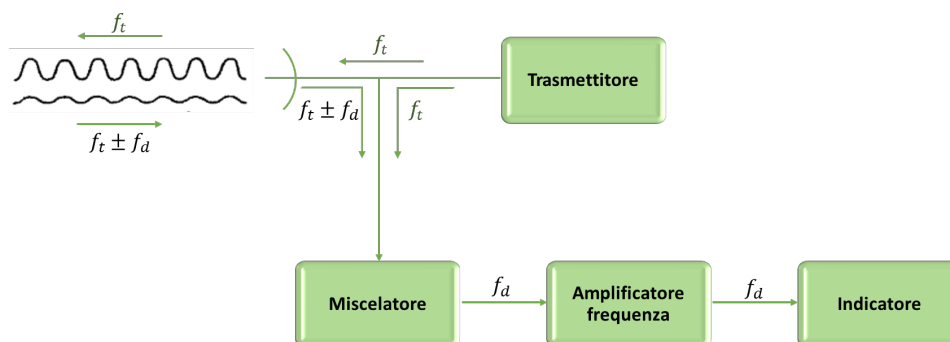


Figura 4.4: Funzionamento di un sistema RADAR Doppler

#### 4.1.4 RADAR meteorologico

Un radar meteorologico è un particolare tipo di radar utilizzato appunto in meteorologia per rilevare la presenza in atmosfera di idrometeore; in particolare è impiegato per determinare posizione, intensità e moto di fenomeni atmosferici quali pioggia, neve, grandine o vento. I radar doppler sono in grado di misurare la componente radiale della velocità del vento, rilevare il moto delle goccioline d'acqua o dei cristalli di neve e determinare l'intensità della precipitazione (Figura 4.5<sup>5</sup> e 4.6<sup>6</sup>).

I più utilizzati in tale campo sono:

- Radar in Banda C, caratterizzati da una frequenza tra 4 e 8 GHz e una lunghezza d'onda tra 7,5 – 3,75 cm, che risentono però di condizioni meteorologiche avverse;
- Radar in Banda X con una frequenza tra 8 e 12 GHz e lunghezza d'onda tra 3,75 – 2,4 cm, che offrono delle buone prestazioni grazie alle dimensioni ridotte delle antenne.

<sup>5</sup>Immagine tratta da: <https://www.montelema.ch/radar-meteo/>

<sup>6</sup>Immagine tratta da: <https://www.colleuganei.it/sentieri/sentiero-monte-grande/>

L'atmosfera è in parte trasparente a questo tipo di radiazioni, ciò permette al fascio radar di percorrere grandi distanze prima di essere attenuato. In presenza di particelle di pioggia, neve o grandine, la radiazione emessa dal radar viene diffusa, in parte anche nella direzione del radar, secondo la teoria dello scattering di Rayleigh che si applica a particelle di diametro minore della lunghezza d'onda del fascio incidente.

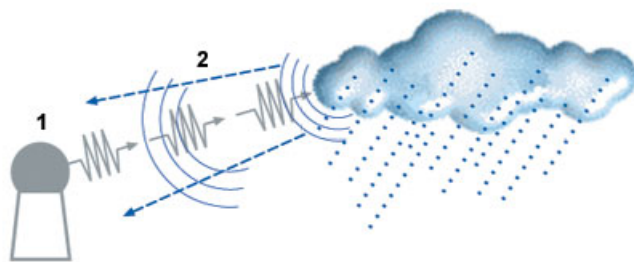


Figura 4.5: Schematizzazione di un radar meteorologico



Figura 4.6: Radar meteorologico di Teolo(PD)

## 4.2 LIght Detection And Ranging (LIDAR)

LIDAR (*LIght Detection And Ranging*) è una tecnica di telerilevamento che permette di determinare la distanza di un oggetto o di una superficie o anche informazioni su venti, turbolenze, pressioni, temperatura, densità e concentrazioni delle varie specie chimiche presenti nell'atmosfera, utilizzando un impulso laser. Il principio di funzionamento è lo stesso dei sistemi RADAR e possia-

mo distinguere in questo caso tre particolari tipi di LIDAR, ognuno con una differente funzione:

- *Range finders*: utilizzati per la determinazione della posizione di un target in base al tempo di ricezione degli impulsi laser retrodiffusi;
- *DIAL (Differential Absorption Lidar)*: utilizzato per determinare la concentrazione delle varie specie chimiche presenti in atmosfera. Il LIDAR trasmette un impulso a due frequenze diverse, ma solo una di queste viene assorbita dalla molecola che si vuole studiare. Dalla differenza di intensità dei due segnali riflessi è possibile determinare la concentrazione di quella particolare molecola;
- *LIDAR Doppler*: utilizzato per misurare la velocità del target e delle particelle, quali gli aerosol che possono essere trasportate dal vento e permettono di determinare la velocità di quest'ultimo.

Il LIDAR è normalmente composto da un trasmettitore e un ricevitore. Il trasmettitore emette degli impulsi luminosi nella direzione del target da rilevare, di durata e ampiezza adeguate, mentre il ricevitore è costituito da un telescopio ottico che raccoglie i segnali riflessi e attenuati dall'atmosfera e invia i dati ad un analizzatore ottico. Tale analizzatore è in grado di selezionare una lunghezza d'onda tramite un selettore spettrale in modo da ottenere informazioni solo su quelle determinate lunghezze. La radiazione viene elaborata da un rivelatore che trasforma il segnale ottico in un segnale elettrico. Sono previste delle unità di controllo e di elaborazione per i segnali amplificati e una unità di controllo dell'intero sistema.

La sorgente utilizzata in questi sistemi è appunto un laser, un fascio di luce a una precisa lunghezza d'onda, in genere quella degli ultravioletti, nel visibile o nel vicino infrarosso (da 10 micron a 250 nm): ciò rende possibile localizzare e ricavare informazioni su oggetti molto piccoli, delle dimensioni pari alla lunghezza d'onda utilizzata. Tali lunghezze d'onda sono infatti riflesse bene da oggetti piccoli, come le particelle di acqua. Ognuna di queste radiazioni interagisce in modo diverso con i vari componenti chimici presenti in atmosfera; dunque in base alla scelta dei diversi processi di scattering è possibile acquisire informazioni diverse sul *boundary layer* dell'atmosfera.

La potenza del segnale laser retrodiffuso ricevuto da una distanza  $R$  può essere scritta in modo semplificato come:

$$P(R) = KG(R)\beta(R)T(R) \quad (4.19)$$

dove:

$K$  è un parametro che dipende dalle prestazioni del sistema;

$G(R)$  è un fattore geometrico dipendente dalla distanza;

$\beta(R)$  è il coefficiente di retrodiffusione a distanza  $R$ , ovvero la capacità dell'atmosfera di diffondere la radiazione incidente nella direzione da cui proviene;

$T(R)$  è il fattore di trasmissione che descrive la quantità di luce persa lungo il tragitto dal LIDAR al target che si trova a distanza  $R$  e viceversa a causa della diffusione e dell'assorbimento da parte delle molecole presenti nell'atmosfera.

I sistemi LIDAR possiedono diverse capacità uniche che spesso rendono i risultati ottenuti da questi sistemi e quelli generati dai RADAR complementari per il sondaggio atmosferico. Poiché i LIDAR sono dispositivi ad aria pulita, possono essere utilizzati per sondare lo strato limite dell'atmosfera in condizioni non adatte per i sistemi Radar. Uno dei vantaggi dei LIDAR è la propria risoluzione fine, specialmente trasversalmente al raggio, che è tipicamente da pochi metri a 10-20 km di distanza. Tuttavia, presentano anch'essi alcune difficoltà: hanno una capacità limitata in caso di nebbia, presenza di nuvole o, in misura minore, in caso di precipitazioni. Rispetto ai radar meteorologici che hanno portate massime di 100-200 km, il sistema LIDAR più potente ha una portata massima di circa 30 km.

### 4.3 SONIC DETECTION AND RANGING (SODAR)

Un SODAR (*SONIC Detection And Ranging*) è uno strumento meteorologico che misura la diffusione delle onde sonore riflesse dalle turbolenze atmosferiche e in particolare la velocità del vento a varie altezze sopra il livello del suolo (*wind profiler*), determina informazioni sulle turbolenze, sulla stabilità dell'aria e sulla temperatura. Sono dispositivi simili ai RADAR con la differenza che utilizzano segnali acustici invece di segnali radio.

Esistono *Sodar Doppler* che misurano la velocità e la direzione del vento lungo la colonna d'aria che li sovrasta (Figura 4.7<sup>7</sup>).

---

<sup>7</sup>Immagine tratta da: <https://en.wikipedia.org/wiki/SODAR>





Figura 4.7: Esempio di un sistema SODAR

Così come i sistemi già analizzati, dei brevi impulsi sonori vengono emessi verso l'alto da tre antenne inclinate in tre diverse direzioni; gli impulsi vengono così riflessi dalle disomogeneità dell'aria sovrastante e sono infine ricevuti o dalla stessa antenna, che può quindi essere utilizzata sia come trasmettitore che come ricevitore (SODAR mono-statico), o da un'altra antenna posta ad una determinata distanza dalla prima (SODAR bi-statico).

Combinando le componenti del vettore velocità, ognuna ottenuta grazie alla diversa orientazione delle antenne, è possibile ottenere il vettore vento tridimensionale. Misurando l'ampiezza e la frequenza dei segnali riflessi è possibile ottenere informazioni rispettivamente sulla struttura del boundary layer atmosferico (soprattutto sui livelli di turbolenza presente) e sulla velocità del vento.

I SODAR sono in genere utilizzati per misurare i profili verticali del vento in un intervallo di altezza tra i 20 e i 200 metri, un range molto ridotto rispetto a quello dei sistemi RADAR o LIDAR. Anche il ciclo di funzionamento di tali strumenti è molto limitato: a causa del lento campionamento dovuto alla trasmissione di 1 impulso ogni 3 secondi, i SODAR effettuano una misurazione del vettore velocità circa ogni 10 secondi. Da ciò deriva una incertezza sui dati registrati.

L'equazione semplificata di un SODAR monostatico è:

$$P(R) = P_0 \frac{A}{R^2} L\sigma(R) \exp(-2\alpha R) \quad (4.20)$$

dove:

$P(R)$  è la potenza ricevuta dal target a distanza  $R$ ;

$P_0$  è la potenza effettivamente trasmessa;

$A$  è l'area effettiva del ricevitore;

$L$  è la lunghezza dell'impulso acustico raggiunta nello spazio;

$\sigma(R)$  è la riflettività acustica alla distanza  $R$ ;

$\alpha$  è l'attenuazione molecolare media del suono nell'aria oltre la distanza  $R$ .

Il termine esponenziale è un termine di trasmissione e il fattore 2 tiene conto della trasmissione a due vie.

## 4.4 Low Level Windshear Alert System (LLWAS)

Il *Low Level Windshear Alert System* è un sistema in grado di misurare la velocità e la direzione media del vento di superficie utilizzando una rete di stazioni remote situate vicino le piste, soprattutto lungo le zone di avvicinamento o di partenza di un aeroporto (Figura 4.8<sup>8</sup>).

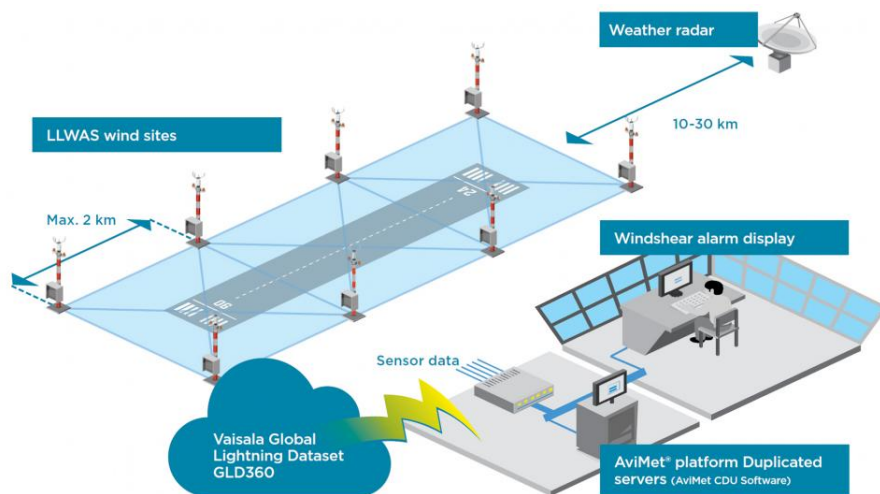


Figura 4.8: Schematizzazione di un LLWAS

Tale sistema prevedeva 5 sensori del vento di superficie situati in punti strategici attorno al perimetro dell'aeroporto, un sensore di vento di superficie nel

<sup>8</sup>Immagine tratta da: <https://www.vaisala.com/en/products/systems/avimetr-low-level-wind-shear-alert-system-llwas>

campo centrale e una unità di visualizzazione per monitorare i dati registrati e confrontare i vettori del vento del perimetro con quelli del campo centrale. Successivamente il numero di sensori venne aumentato da 6 a circa 30.

I sensori perimetrali misurano il vento istantaneo e i valori vengono campionati ogni 10 secondi; il sensore centrale produce invece un valore medio del vento ogni due minuti. Se la differenza vettoriale tra i due valori del vento è superiore a 15 kt, viene attivato un allarme audiovisivo che viene poi trasmesso ai piloti e alla torre di controllo. I sistemi di allarme hanno però un uso limitato a causa della loro capacità di rilevare solo variazioni del vettore vento orizzontale a livello del suolo; non possono dunque valutare eventuali cambiamenti nella direzione e nell'intensità del vento lungo i sentieri di decollo e di atterraggio.

Nonostante l'affidabilità e la precisione dei LLWAS siano estremamente alte, la loro accuratezza potrebbe essere migliorata, soprattutto per evitare falsi allarmi dovuti a raffiche di vento o ad una posizione degli anemometri non corretta. È possibile, per esempio, sostituire gli anemometri a palette meccanici con anemometri sonici o integrare le informazioni dei LLWAS con i dati provenienti dal *Terminal Doppler Weather Radar* (TDWR). Più correttamente si è soliti parlare di:

- LLWAS – RS (*Relocation and Sustainment*), quando il numero di anemometri è superiore a 6;
- LLWAS – NE (*Network Expansion*), quando il LLWAS è integrato con il TDWR;

## 4.5 Terminal Doppler Weather Radar (TDWR)

Un sistema TDWR rileva e segnala le condizioni meteorologiche pericolose nelle zone di avvicinamento e di partenza dei terminal aeroportuali; identifica e avverte i controllori del traffico aereo di possibili windshear a bassa quota causati da microburst e fronti di raffiche, oltre a fornire informazioni sull'intensità delle precipitazioni e sui cambiamenti della direzione del vento. Il vantaggio principale di questi sistemi rispetto ai RADAR meteo è la loro risoluzione più ampia, grazie all'utilizzo di un raggio più stretto. Il TDWR utilizza frequenze intorno ai 5600 MHz, alle quali corrisponde una lunghezza d'onda di 5 cm, con un raggio di risoluzione angolare di 0.5 gradi e una potenza massima di 250 kW.

## 4.6 Riepilogo

Come è stato appena analizzato, il monitoraggio del fenomeno del windshear, o più in generale delle condizioni meteorologiche, si basa principalmente sull'utilizzo di diverse tecnologie, quali RADAR, LIDAR e SODAR, impiegate singolarmente o integrate tra di loro.

Ognuno di essi, inoltre, presenta un apposito sistema software, in modo da creare una semplice interfaccia tra gli operatori e i dati registrati.

Al fine di sottolineare le differenze e giustificare una eventuale scelta in campo aeronautico tra le possibili tecnologie utilizzabili, viene fornita una tabella riassuntiva che mette a confronto le caratteristiche principali dei tre sistemi di rilevamento precedentemente citati.

	<b>RADAR</b>	<b>LIDAR</b>	<b>SODAR</b>
<b>TECNOLOGIA</b>	ONDE ELETTROMAGNETICHE	IMPULSI LASER	ONDE SONORE
<b>RILEVAMENTO</b>	POSIZIONE E/O VELOCITÀ DI OGGETTI; POSIZIONE, INTENSITÀ E MOTO DI FENOMENI ATMOSFERICI	POSIZIONI E/O VELOCITÀ DI OGGETTI; INFO SU VENTI, TEMPERATURA, PRESSIONE, DENSITÀ E CONCENTRAZIONI SPECIE CHIMICHE	COMPONENTI DEL VETTORE VENTO
<b>DISTURBI</b>	FUNZIONANTE IN CONDIZIONI METEOROLOGICHE AVVERSE; QUALITÀ DEI DATI INFLUENZATI DAL RUMORE	IMPULSI DISTURBATI IN CASO DI NEBBIA, NUBI O PIOGGIA	IMPULSI DISTURBATI DA RUMORE AMBIENTALI DI FONDO ELEVATO
<b>PRECISIONE</b>	MISURE NON ESTREMAMENTE ESATTE A CAUSA DI INTERFERENZE ESTERNE E DISTORSIONI	ELEVATA GRAZIE ALLA VELOCITÀ DEGLI IMPULSI E ALLA LORO CORTA LUNGHEZZA D'ONDA	NON MOLTO ELEVATA A CAUSA DEL CICLO DI FUNZIONAMENTO RIDOTTO
<b>PORTATA</b>	100-200 KM	MAX 30 KM	20-200 M
<b>DIMENSIONI OGGETTI RILEVATI</b>	NON POSSONO ESSERE RILEVATI OGGETTI PIÙ PICCOLI DELLA LUNGHEZZA D'ONDA UTILIZZATA	POSSONO ESSERE RILEVATI OGGETTI MOLTO PICCOLI	VOLUME DI CAMPIONAMENTO GRANDE

Figura 4.9: Confronto tra sistemi di rilevamento

Di seguito sono invece mostrati, come esempio per il lettore, diversi dati tecnici di alcuni sistemi attualmente in commercio, forniti dalle rispettive case produttrici:

- **Modello:** Weather Radar skySCANner  
**Casa produttrice:** Ramet a.s  
Figura 4.10<sup>9</sup>;
- **Modello:** 3D Scanning Lidar  
**Casa produttrice:** Raymetrics  
Figura 4.11<sup>10</sup>;
- **Modello:** SODAR PCS.2000-64  
**Casa produttrice:** METEK Meteorologische Messtechnik GmbH  
Figura 4.12<sup>11</sup>

<b>Frequency</b>	X-band (9345 Hz)
<b>Unambiguous ranges</b>	40/80/160 km
<b>Pulse Repetition Time</b>	1766/1158/682 Hz
<b>Antenna diameter</b>	0.56 m
<b>Antenna gain</b>	32.64 dB
<b>Polarization</b>	Linear horizontal
<b>Scanning</b>	0°to 360°azimuth, -3.5°to +90°elevation
<b>Environmental tolerance</b>	-40°to +50°C
<b>Dimensions</b>	Diameter: 726 mm; Height 950 mm
<b>Weight</b>	60 kg




Figura 4.10: Dati tecnici di un RADAR meteorologico

<sup>9</sup>Fonte: <https://www.ramet.as/weather-radar>

<sup>10</sup>Fonte: <https://www.raymetrics.com/product/3d-scanning-lidar>

<sup>11</sup>Fonte: <https://metek.de/product/pcs-2000-64/>

<b>Laser energy</b>	30mJ per pulse at 355nm
<b>Repetition rate</b>	20 Hz
<b>Receiver Size</b>	200 mm
<b>Spatial Revolution</b>	7.5 m
<b>Effective Range</b>	> 10 -15 km
<b>Scanning</b>	0°to 360°azimuth, +90°zenith
<b>Environmental tolerance</b>	-15°to +45°C
<b>Dimensions</b>	1.8 m x 1.0 m x 1.0 m
<b>Weight</b>	220 kg



Figura 4.11: Dati tecnici di un LIDAR

<b>N° of loudspeakers</b>	64
<b>Frequency</b>	1300 – 2600 Hz
<b>Horizontal wind components</b>	± 50 m/s
<b>Wind direction</b>	0° to 360°
<b>Spatial Revolution</b>	7.5 m
<b>Vertical wind speed</b>	± 10 m/s
<b>Max. measuring height</b>	1500 m
<b>Environmental tolerance</b>	-30° to + 55°C
<b>Dimensions</b>	1.1 m x 1.1 m x 0.40 m
<b>Weight</b>	130 kg



Figura 4.12: Dati tecnici di un SODAR

# Conclusioni

Lo sviluppo di questa tesi ha permesso non solo di raccogliere e mostrare i concetti che sono alla base del fenomeno del windshear, ma anche di comprendere e riconoscere gli effetti e le conseguenze provocati da esso sulla condotta di un volo aereo.

In particolare, è stato studiato come una variazione del vettore vento, in termini di direzione e intensità, possa verificarsi sia in condizioni di instabilità atmosferica, sia, per definizione stessa di "vento", a causa di una disuguaglianza dei valori di pressione atmosferica in zone adiacenti.

Monitorare i valori di temperatura e pressione al di sopra delle zone aeroportuali può dunque permettere una identificazione del windshear.

Lo studio di questo fenomeno risulta importante, in primo luogo, per fornire ai piloti una adeguata formazione nel riconoscere tempestivamente possibili situazioni non ottimali per il volo e una consapevolezza sui rischi che potrebbero presentarsi nel caso in cui si decidesse di intraprendere o continuare il volo in queste circostanze.

Comprendere il criterio con cui il windshear si origina è fondamentale anche per ingegneri e progettisti in modo da permettere loro di sviluppare tecnologie e tecniche di rilevamento sempre più affidabili e precise. Gli strumenti attualmente impiegati si basano sul monitoraggio delle masse d'aria, sulla determinazione di informazioni quali temperatura, densità o concentrazione delle specie chimiche presenti in atmosfera e sulle misurazioni delle varie componenti del vento.

Si può inoltre confermare come una interpretazione non corretta dei dati registrati da suddetti strumenti o una mancanza di comunicazione tra piloti e controllori del traffico aereo siano stati dei fattori considerevoli in diversi incidenti aerei. Migliorare tali aspetti potrebbe, anche se in piccola parte, evitare delle complicazioni in situazioni già critiche.

Tuttavia, è importante tenere presente come questa tesi si sia concentrata sullo studio di un fenomeno che, per sua natura, è quasi imprevedibile; o meglio, le variazioni del vento possono essere improvvise, verificarsi in maniera isolata o far parte di correnti durature, possono avere differenti origini e la loro bassa intensità potrebbe inizialmente non essere considerata un pericolo.

È facile comprendere da tutto ciò come riconoscere situazioni sfavorevoli, soprattutto in tempi ridotti, non sia semplice per i piloti e non solo.

Per questo motivo non è possibile elaborare una teoria unica valida per tutti i casi possibili, ma ogni situazione dovrebbe essere analizzata pienamente e considerando anche i possibili fattori aleatori.

Una raccomandazione per ulteriori ricerche future potrebbe essere quella di realizzare uno studio basato sul monitoraggio delle condizioni meteorologiche in alcuni aeroporti, come per esempio l'aeroporto di Palermo Punta Raisi che si è dimostrato essere il più soggetto a tale fenomeno in Italia, attraverso l'interpretazione dei bollettini METAR (acronimo di *METeorological Aerodrome Report*) o valutare gli stessi per diverse zone aeroportuali, al fine di determinare eventuali differenze legate alla posizione geografica o confermare le somiglianze che sono state analizzate in questa tesi.





## Appendice A

# Incidenti e dati relativi al fenomeno del windshear

L'International Civil Aviation Organization (ICAO) definisce, nell'Annesso 13 della Convenzione sull'aviazione civile internazionale, l'*incidente aereo* come:

Un evento associato all'impiego di un aeromobile che si svolge fra il momento in cui una persona si imbarca con l'intento di volare fino al momento in cui tutte le persone sbarcano, nel quale:

- una persona è deceduta o gravemente ferita [...]
- l'aeromobile riporti un danno o un'avaria strutturale [...]
- l'aeromobile sia scomparso o completamente inaccessibile.

Le cause di un incidente aereo possono essere molteplici: le condizioni meteorologiche rappresentano solo una piccola percentuale di essi. Nonostante ciò, nel corso degli anni, si sono verificati diversi incidenti dovuti all'incontro di windshear, alcuni dei quali hanno registrato un elevato numero di vittime.

Esempi di incidenti<sup>1</sup> provocati, in parte, dal windshear sono:

- **Date:** 2 Agosto 1985  
**Place:** Dallas/Fort worth International airport, Texas  
**Aircraft:** Lockheed L-1011-385-1  
**Occupants:** 163  
**Results:** 134 vittime
- **Date:** 21 Dicembre 1992  
**Place:** Aeroporto di Faro, Portogallo

---

<sup>1</sup>Fonte delle informazioni: <http://www.aviation-accidents.net>

**Aircraft:** McDonnell Douglas DC-10-30F

**Occupants:** 340

**Results:** 56 vittime, 282 feriti

- **Date:** 4 Novembre 1993  
**Place:** Hong Kong International Airport, China  
**Aircraft:** Boeing 747-409B  
**Occupants:** 286  
**Results:** 10 feriti
- **Date:** 12 Novembre 1995  
**Place:** East Granby, Connecticut  
**Aircraft:** McDonnell Douglas MD-83  
**Occupants:** 78  
**Results:** 1 ferito
- **Date:** 18 Gennaio 2001  
**Place:** Brisbane, Queensland  
**Aircraft:** Boeing 737-400  
**Occupants:** 144  
**Results:** 0 vittime o feriti
- **Date:** 25 Maggio 2001  
**Place:** Cayenne-Rochambeau Airport, French Guyana  
**Aircraft:** Airbus A340-311  
**Occupants:** 215  
**Results:** 0 vittime o feriti
- **Date:** 21 Gennaio 2002  
**Place:** Hakodate airport, Hokkaido, Japan  
**Aircraft:** Airbus A321-131  
**Occupants:** 93  
**Results:** 87 feriti
- **Date:** 24 Gennaio 2004  
**Place:** Singapore Changi Airport  
**Aircraft:** Boeing 777-200  
**Occupants:** 269  
**Results:** 0 vittime o feriti

- **Date:** 1 Novembre 2009  
**Place:** London Gatwick Airport, Gran Bretagna  
**Aircraft:** DHC-8-402  
**Occupants:** 46  
**Results:** 0 vittime o feriti
- **Date:** 20 Aprile 2012  
**Place:** Benazir Bhutto International Airport, Islamabad  
**Aircraft:** Boeing 73-236A  
**Occupants:** 127  
**Results:** 127 vittime
- **Date:** 8 Aprile 2015  
**Place:** Brasilia international Airport, Brasile  
**Aircraft:** Airbus A320-214  
**Occupants:** 160  
**Results:** 0 vittime o feriti
- **Date:** 3 Agosto 2016  
**Place:** Dubai international airport, Emirati Arabi Uniti  
**Aircraft:** Boeing 777-31H  
**Occupants:** 300  
**Results:** 1 vittima, 32 feriti

Dai rapporti di tali incidenti aerei è possibile notare come la maggior parte di essi siano stati causati non solo da un incontro con windshear, avvenuto soprattutto durante la fase di avvicinamento, ma anche da errate decisioni da parte dei piloti, una mancanza di linee guida e procedure relative al fenomeno stesso e una mancanza di informazioni riguardanti le condizioni meteorologiche in tempi reali.

## A.1 Casi di windshear in Italia

L'*Agenzia Nazionale per la Sicurezza del Volo (ANSV)* pubblica ogni anno un rapporto informativo sull'attività svolta dall'Agenzia stessa durante il periodo 1 Gennaio - 31 Dicembre.

Dal 2006 l'ANSV iniziò ad approfondire il fenomeno del windshear, in particolare a seguito di un'inchiesta relativa ad un aeromobile che durante la manovra di avvicinamento all'aeroporto di Firenze impattò la pista con la parte posteriore della fusoliera. La causa di tale incidente fu attribuita ad una probabile

variazione della direzione e dell'intensità del vento, avvenuta sotto i 100 m, che provocò una riduzione della velocità dell'aeromobile, compensata parzialmente da una manovra correttiva.

Dai rapporti informativi pubblicati nel periodo 2007 – 2017 è stato possibile estrapolare delle tabelle riassuntive relative ai fenomeni di windshear registrati nei principali aeroporti italiani <sup>2</sup> (Figure A.1 e A.2<sup>3</sup>).

Dalle tabelle si nota come l'aeroporto di Palermo Punta Raisi rappresenta lo scalo più critico in termini di frequenza e di intensità del fenomeno in questione, seguito dagli aeroporti di Catania Fontanarossa e Firenze.

	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	Totale
LIBD	21	30	18	19	18	18	15	32	39	12	34	256
LIBP	11	10	12	11	4	6	1	3	8	3	18	87
LICA	17	19		11	11	12	3	12	15	20	4	88
LICC	10	10	21	14	18	51	6	75	111	220	125	661
LICJ	209	214	258	228	138	93	112	161	114	215	235	1977
LICR	6	7	10	7	10	9	3	4		3	8	67
LIEO	24	29	21	29	25	16	29	65	88	40	77	443
LIMC	41	31	22	20	25	22	26	89	84	48	41	449
LIME	6	18	12	10	25	6	8	20	36	23	40	204
LIMF	4	6	3	3	0	11	1	4	31	16	8	87
LIMJ	10	6	18	16	20	21	12	29	41	38	31	242
LIML	32	6	33	19	5	10	11	58	63	53	42	332
LIPE	9	11	15	13	13	16	8	5	27	23	30	170
LIPY	8	11	8	11	5	8	4	2	1	1	3	62
LIPZ	8	4	8	15	13	10	11	41	39	34	24	207
LIRF	13	19	32	29	25	32	38	77	53	66	71	455
LIRN	21	54	28	14	18	51	6	67	47	46	97	449
LIRQ	17	25	32	22	49	90	21	30	57	45	72	460

Figura A.1: Eventi di windshear nel periodo 2007-2017

<sup>2</sup>LIBD: Bari Palese; LIBP: Pescara; LICA: Lamezia Terme; LICC: Catania Fontanarossa; LICJ: Palermo Punta Raisi; LICR: Reggio Calabria; LIEO: Olbia Costa Smeralda; LIMC: Milano Malpensa; LIME: Bergamo Orio al Serio; LIMF: Torino Caselle; LIMJ: Genova; LIML: Milano Linate; LIPE: Bologna Porto Panigale; LIPY: Ancona Falconara; LIPZ: Venezia Tessera; LIRF: Roma Fiumicino; LIRN: Napoli Capodichino; LIRQ: Firenze;

<sup>3</sup>Fonte dei dati: <http://www.ansv.it/>

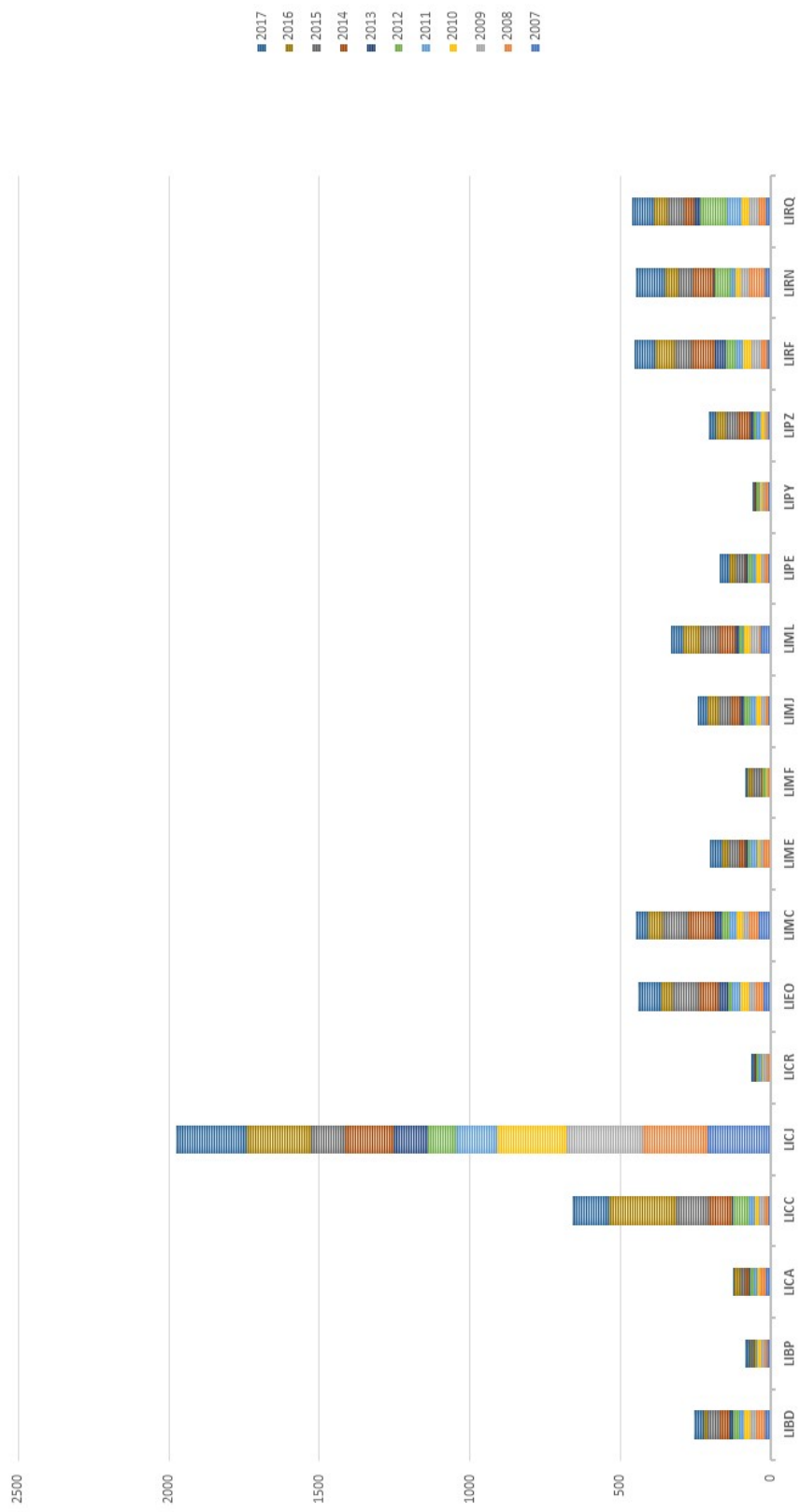


Figura A.2: Eventi di windshear per aeroporto

Nel 2006 l'*Ente Nazionale per l'Assistenza al Volo (ENAV S.p.A)* avviò un programma di studio e di interventi finalizzati a realizzare dei sistemi per il rilevamento e la previsione del fenomeno del windshear.

In particolare, da quanto riportato nei rapporti informativi, nello stesso anno erano in fase di completamento l'installazione dei sistemi LLWAS presso gli aeroporti di Genova e Reggio Calabria; mentre per l'aeroporto di Palermo era in fase di progettazione un sistema denominato *Palermo Windshear Detecting System (PWDS)*.

Alla fine del 2008 il PWDS non era ancora pienamente operativo a causa di alcune procedure autorizzative relative all'installazione di una delle sue componenti principali, il TDWR.

Nel dicembre 2011 risultava installato e in fase di collaudo il LLWAS nell'aeroporto di Reggio Calabria, mentre quello installato a Genova aveva subito dei danni a causa di una mareggiata. Per l'aeroporto di Palermo, invece, il sistema era stato sottoposto a delle opere di adeguamento che prevedevano lo spostamento di anemometri su piattaforme marine.

Nel corso del 2012, a seguito dell'impossibilità di installare il TDWR, l'ENAV decise di far collocare all'interno dell'aeroporto di Palermo Punta Raisi un sistema laser di tipo LIDAR.

Dal rapporto del 2014 si evince che il sistema LIDAR per l'aeroporto di Palermo non era ancora entrato in funzione, mentre i sistemi LLWAS di Genova e Reggio Calabria erano stati dismessi, rispettivamente per distruzione a causa di mareggiate e per inefficacia dovuta all'impossibilità di posizionare correttamente gli anemometri.

### **A.1.1 Aeroporto di Palermo Punta Raisi**

L'aeroporto di Palermo risulta essere fortemente soggetto a tali fenomeni di windshear a causa della sua posizione tra il Mar Tirreno e la Montagna Longa (Figura A.3<sup>4</sup>).

Il programma PWDS prevedeva l'installazione di una serie di sensori, in grado di fornire un allarme integrato alle varie postazioni operative, la presenza di un sistema LLWAS, ovvero una serie di anemometri posizionati all'esterno dell'aeroporto, e di un radar a banda C.

A seguito dell'impossibilità di installare le antenne per il radar, ENAV S.p.A. decise di sostituirlo con sensori LIDAR, posizionati all'interno dell'aeroporto e

---

<sup>4</sup>Immagine tratta da: <https://www.ilgazzettinodisicilia.it>



Figura A.3: Aeroporto di Palermo Punta Raisi

in grado di effettuare delle scansioni volumetriche. Essendo i sistemi LIDAR adatti per rilevare la presenza di windshear in condizioni di aria secca, si decise di combinare un radar meteorologico in banda X e un LIDAR, in modo da compensare i reciproci punti di debolezza (la ridotta portata dei LIDAR in caso di precipitazioni e la mancanza di tracciati per i radar X in caso di aria secca). Nei primi mesi del 2017 il sistema LLWAS fu collaudato ma con esito negativo a causa di un danneggiamento dovuto ad una mareggiata, mentre ebbe esito positivo il collaudo dei sensori LIDAR e del radar X. Fu inoltre messo a punto un sistema, chiamato *ENAV Automated Weather Observing System (E-AWOS)*, in grado di combinare i dati di windshear ricevuti dai singoli sistemi e restituire in uscita la situazione degli allarmi, sia in forma singola che integrata. All'inizio del 2018 risultavano funzionanti 8 postazioni su 11 del sistema LLWAS. Attualmente il sistema risulta non essere ancora completamente funzionante.





# Bibliografia

- [1] Agizza C., Gigli P., Iaccarino F., *Scienze della navigazione*, Volume Terzo, IBN Editore;
- [2] Atlas D., *Radar in meteorology*, American Meteorological Society, 1990;
- [3] Barr J. C., *Airbone weather radar: a user's guide*, Iowa State Pr, 1993;
- [4] Bassi P., Scolari L., Zoli R., *Propagazione di onde elettromagnetiche*, CLUEB, 2006;
- [5] Bellomo A., *Elementi basici di metereologia generale*, Volume I, 2014;
- [6] Braham R. R., Byers H. R., *Thunderstorm structure and circulation*, U.S. Weather Bureau, 1948;
- [7] Casarosa C., *Meccanica del volo*, Pisa University Press, 2013;
- [8] Ciccognani C., *La propagazione delle onde radio: con elementi di fisica ionosferica*, C&C edizioni radioelettroniche, 1996;
- [9] Corbosiero K. L., Molinari J., *The Effects of Vertical Wind Shear on the Distribution of Convection in Tropical Cyclones*, Department of Earth and Atmospheric Sciences, University at Albany, 2002;
- [10] Doviak R. J., Zrnic D. S., *Doppler radar and weather observations*, Academic Press, 1984;
- [11] Facardi S., Massa I., Uguzzani A., *Fisica generale: onde e ottica*, Seconda edizione, CEA Casa Editrice Ambrosiana, 2010;
- [12] Federal Aviation Administration, *Advisory Circular 00-54: Pilot windshear guide*, 1988;
- [13] Federal Aviation Administration, *Windshear training aid: Windshear Overview for Management*, 1987;

- [14] Frank W. M., Ritchie E. A., *Effects of Vertical Wind Shear on the Intensity and Structure of Numerically Simulated Hurricanes*, Department of Meteorology, The Pennsylvania State University, 2001;
- [15] International Civil Aviation Organization, *Manual on low-level wind shear*, First Edition, 2005;
- [16] Kessinger C., McCarthy J., Roberts R. D., Wilson J. W., *Microburst Wind Structure and Evaluation of Doppler Radar for Airport Wind Shear Detection*, National center for Atmospheric Research, 1984;
- [17] Klemp J. B., Weisman M. L., *The Dependence of Numerically Simulated Convective Storms on Vertical Wind Shear and Buoyancy*, National center for Atmospheric Research, 1982;
- [18] Riva I., *Metereologia Aeronautica. Il wind shear*, Parte II, ENAV S.p.A.;
- [19] Riva I., *Metereologia Aeronautica. Origine e classificazione dei fenomeni di turbolenza: convettiva, meccanica, in aria chiara e di scia*, Parte I, ENAV S.p.A.;
- [20] Romeni C., *Campo magnetico, Induzione e onde elettromagnetiche, Relativita e quanti: con physics in english*, Zanichelli, 2012;
- [21] Skolnik M. I., *Introduction to radar systems*, Second edition, Mcgraw-Hill College, 1979;
- [22] Stull Roland B., *An introduction to boundary layer meteorology*, Kluwer Academic Publishers, 1999;

# Sitografia

- [1] <https://cdn.ymaws.com/www.kyengcenter.org/resource/resmgr/imported/airbornelidar.pdf>;
- [2] <https://en.wikipedia.org/wiki/SODAR>
- [3] [http://fisicaondemusica.unimore.it/Rifrazione\\_del\\_suono.html](http://fisicaondemusica.unimore.it/Rifrazione_del_suono.html)
- [4] [https://it.wikipedia.org/wiki/Fronte\\_meteorologico](https://it.wikipedia.org/wiki/Fronte_meteorologico)
- [5] <https://it.wikipedia.org/wiki/Lidar>
- [6] [https://it.wikipedia.org/wiki/Stabilit%C3%A0\\_dell%27aria](https://it.wikipedia.org/wiki/Stabilit%C3%A0_dell%27aria)
- [7] [https://it.wikiversity.org/wiki/Strumentazione\\_per\\_l%27analisi\\_delle\\_condizioni\\_meteorologiche](https://it.wikiversity.org/wiki/Strumentazione_per_l%27analisi_delle_condizioni_meteorologiche)
- [8] <http://pcfarina.eng.unipr.it/dispense01/gazzola132514/gazzola132514.htm>
- [9] <http://personalpages.to.infn.it/~bressani>
- [10] <http://www.ansv.it/It/Main.asp?Area=doczzz>
- [11] <http://www.ariparma.it/risorse/articoli/Propagazione%20troposferica.pdf>
- [12] <http://www.aviation-accidents.net/>
- [13] <https://www.ecoage.it/brezza.htm>
- [14] <http://www.fenomenitemporaleschi.it>
- [15] [https://www.skybrary.aero/index.php/Low\\_Level\\_Wind\\_Shear\\_Alert\\_System\\_\(LLWAS\)](https://www.skybrary.aero/index.php/Low_Level_Wind_Shear_Alert_System_(LLWAS))
- [16] [https://www.skybrary.aero/index.php/Low\\_Level\\_Wind\\_Shear#Before\\_Departure](https://www.skybrary.aero/index.php/Low_Level_Wind_Shear#Before_Departure)
- [17] [https://www.skybrary.aero/index.php/Terminal\\_Doppler\\_Weather\\_Radar](https://www.skybrary.aero/index.php/Terminal_Doppler_Weather_Radar)
- [18] <http://www.ufficiometeo.it/articoli-pubblicazioni>

