

Appunti di teoria del volo

Carmine-Emanuele Cella

3 agosto 2018

Indice

1	Principi del volo	9
1.1	Principi del sostentamento	9
1.1.1	Portanza e resistenza	9
1.1.2	Portanza e incidenza	9
1.2	La resistenza e gli angoli caratteristici	10
1.2.1	Resistenza parassita (o di profilo)	11
1.2.2	Resistenza indotta	11
1.2.3	Vortici e turbolenza di scia	12
1.2.4	Angoli caratteristici di volo	12
1.3	I comandi e le manovre	13
1.3.1	Gli assi dell'aereo	13
1.3.2	Il piano orizzontale di coda	13
1.3.3	Il piano verticale di coda	13
1.3.4	Alettoni	13
1.4	Profili, ipersostentatori, volo librato	14
1.4.1	Profili alari	14
1.4.2	Ipersostentatori	14
1.4.3	Volo librato	15
1.5	Il fattore di carico	16
1.5.1	Cambiamento del fattore di carico	16
1.5.2	Stallo e vite	17
1.6	Diagrammi di manovra e di raffica	17
1.6.1	Velocità caratteristiche di manovra	18
1.7	Stabilità e manovrabilità	18
1.8	Potenza, salita, autonomia	19
1.8.1	Potenza necessaria e disponibile	19
1.8.2	Primo e secondo regime	20
1.9	Punti importanti	21
2	Nozioni generali sugli aeromobili	22
2.1	Struttura dell'aeroplano	22
2.1.1	Parti dell'aereo	22
2.2	Componenti del motore	23
2.2.1	Descrizione generale	23
2.2.2	Parti e funzionamento	24
2.2.3	Distribuzione	24
2.2.4	Alimentazione	24

2.2.5	Accensione	25
2.2.6	Lubrificazione e raffreddamento	25
2.2.7	Differenze con motori automobilistici	25
2.3	Funzionamento del motore	26
2.3.1	Potenza e consumo	26
2.3.2	Miscela	26
2.3.3	Smagrimento	26
2.3.4	Aria calda	27
2.3.5	Detonazione e preaccensione	27
2.3.6	Strumenti motore	27
2.3.7	Potenza erogata e precauzioni	27
2.3.8	Anomalie	28
2.4	Elica	28
2.4.1	Velocità dell'aereo e rendimento	28
2.4.2	Passo fisso e variabile	29
2.4.3	Effetti sul velivolo	29
2.5	Strumentazione di volo, EFIS, bussola	30
2.5.1	Strumenti di volo tradizionali	30
2.5.2	EFIS	30
2.5.3	La bussola	30
2.5.4	Errori della bussola	31
2.5.5	Avvisatore di stallo	31
2.6	Strumenti barometrici	31
2.6.1	Aria ISA e prese di rilevamento	31
2.6.2	Variometro	32
2.6.3	Altimetro	32
2.6.4	Anemometro	33
2.6.5	Ostruzione della presa statica	33
2.6.6	Ostruzione della presa dinamica	34
2.7	Strumenti giroscopici	34
2.7.1	Indicatore di virata	34
2.7.2	Direzionale	35
2.7.3	Indicatore d'assetto	35
2.8	Punti importanti	35
3	Prestazioni dell'aereo	37
3.1	Peso e bilanciamento	37
3.1.1	Effetto del peso	37
3.1.2	Bilanciamento	37
3.1.3	Calcolo di peso e centraggio	38
3.1.4	Pesi normati dell'aereo	38
3.1.5	Velocità di salita ripida e rapida	39
3.1.6	Massima autonomia	39
3.1.7	Prestazioni in aria ISA	40
3.2	Tabelle e grafici di prestazione	40
3.2.1	Esempi	40
3.3	Punti importanti	41

4	Regolamentazione aeronautica	43
4.1	Autorità aereonautiche	43
4.1.1	ICAO	43
4.1.2	Libertà dell'aria	43
4.1.3	Normativa ed enti italiani	44
4.1.4	Enti europei	44
4.2	Documenti degli aeromobili	44
4.3	Servizi di assistenza al volo	45
4.3.1	Servizi di informazioni	45
4.3.2	Servizi del traffico aereo	45
4.3.3	Servizi di comunicazione	45
4.4	Aeroporti	46
4.4.1	Caratteristiche	46
4.4.2	Piste	46
4.4.3	Segnaletica orizzontale	47
4.4.4	Segnaletica verticale	48
4.4.5	Luci della pista	48
4.5	Spazi aerei	48
4.5.1	Classificazione degli spazi aerei	49
4.5.2	Regioni di informazioni di volo	50
4.5.3	Zone di controllo	50
4.5.4	Spazi aerei limitati	51
4.6	Regole dell'aria	51
4.6.1	Regole generali	51
4.6.2	Regole VFR	53
4.7	Procedure VFR	53
4.7.1	Mancaza di minime VMC ed avaria radio	54
4.7.2	Livelli di volo	54
4.7.3	Transponder, spazi aerei	54
4.7.4	CTR e aerovie	55
4.8	Punti importanti	56
5	Meteorologia	58
5.1	Atmosfera	58
5.1.1	Atmosfera ISA	58
5.1.2	Atmosfera reale	58
5.1.3	Calore e temperatura	59
5.1.4	Umidità	60
5.2	Moti verticali	61
5.2.1	Raffreddamento e riscaldamento	61
5.2.2	Stabilità dell'aria	61
5.3	Moti orizzontali	62
5.3.1	Isobare e vento	62
5.3.2	Effetti dei rilievi	62
5.4	Nubi, temporali, riduzione della visibilità	63
5.4.1	Classificazione delle nubi	63
5.4.2	Copertura nuvolosa	64
5.4.3	Temporali	64
5.4.4	Visibilità	65

5.4.5	Nebbia	65
5.5	Masse d'arie e fronti	65
5.5.1	Fronti	65
5.5.2	Turbolenza	67
5.5.3	Wind shear	67
5.5.4	Ghiaccio	67
5.6	Servizio meteorologico	68
5.6.1	Bolletini METAR e SPECI	68
5.6.2	Previsioni TAF	69
5.6.3	Avvisi	69
5.6.4	Radiodiffusioni meteorologiche	69
5.7	Punti importanti	69
6	Navigazione	71
6.1	Il globo terrestre	71
6.1.1	Latitudine e longitudine	71
6.2	Carte aeronautiche	71
6.2.1	Ortodromia e lossodromia	72
6.3	Navigazione stimata	72
6.3.1	Rotta e prua	72
6.4	Radionavigazione	73
6.4.1	Propagazione delle onde radio	73
6.4.2	Stazioni goniometriche	73
6.5	Navigazione con il VOR	74
6.5.1	Lettura del VOR	74
6.5.2	Operazioni con il VOR	75
6.5.3	DME	75
6.6	Radionavigazione con ADF	75
6.7	Radar e GPS	76
6.7.1	Radar	76
6.7.2	GPS	76
6.8	Punti importanti	76
7	Procedure operative	78
7.1	Normativa	78
7.1.1	Responsabilità del pilota	78
7.1.2	Preparazione del volo	78
7.1.3	Aeroplano ed equipaggiamenti	78
7.1.4	Incidenti ed inconvenienti aerei	79
7.1.5	Procedure antirumore	79
7.2	Procedure normali ed anomale	79
7.2.1	Controlli pre-volo	79
7.2.2	Decollo, salita iniziale, crociera	80
7.2.3	Situazioni anomale	80
7.3	Punti importanti	81

8	Prestazioni e limitazioni umane	82
8.1	Effetti di una cattiva ossigenazione	82
8.1.1	Circolazione sanguigna e respirazione	82
8.1.2	Pressione e diminuzione d'ossigeno	82
8.1.3	Iperventilazione	83
8.1.4	Espansione dei gas nell'organismo	83
8.1.5	Intossicazione da ossido carbonio	83
8.2	Sensi ed illusioni	83
8.2.1	Orecchio: udito ed equilibrio	83
8.2.2	Occhio e vista	83
8.2.3	Sensazioni illusorie	84
8.2.4	False impressioni	84
8.2.5	Mal d'aria	84
8.2.6	Accelerazioni	85
8.2.7	Farmaci ed alcol	85
8.2.8	Effetto della tensione	86
8.3	Psicologia del volo	86
8.3.1	Processo decisionale	86
8.3.2	Comportamenti automatici e non automatici	87
8.3.3	I falsari della mente	87
8.4	Punti importanti	87

Elenco delle figure

0.0.1 Dipendenze tra gli argomenti trattati.	8
1.1.1 Andamento del coefficiente di portanza rispetto all'angolo di incidenza.	10
1.1.2 Grafico dell'efficienza ($\frac{L}{D}$ in verde), confrontato con la portanza (c_l in blu) e con la resistenza (c_r in rosso).	10
1.2.1 Grafico della resistenza totale (somma di resistenza indotta e di profilo).	11
1.4.1 Tipologie di flap.	15
1.5.1 Fattore di carico in funzione del bank.	16
1.6.1 Esempio di diagramma di manovra.	18
1.8.1 Potenza necessaria e disponibile.	19
3.1.1 Grafico dell'involuppo del baricentro per un Cessna C172.	38
3.1.2 Rapporto tra potenza e velocità; esubero di potenza.	39
3.2.1 Corse e distanze di atterraggio per il Cessna C172.	41
3.2.2 Performance di atterraggio per il Piper PA28.	42
4.4.1 Le varie lunghezze di una pista.	47
4.4.2 Esempio di punti di attesa.	47
4.4.3 Esempi di segnali orizzontali.	48
4.4.4 Aiuti luminosi per l'avvicinamento.	49
4.5.1 Zone di controllo degli spazi aerei.	50
4.6.1 Schema riassuntivo sui segnali ottici luminosi.	53
4.6.2 Minime VMC in Italia.	54
4.7.1 Regolazione dell'altimetro nello stato di transizione.	55
4.7.2 Livelli semicircolari in Italia.	56
5.1.1 Conformazioni bariche.	59
5.1.2 Curva di stato dell'atmosfera ISA.	60
5.2.1 Stabilità ed instabilità dell'aria: (1) instabile, (2) condizionalmente instabile, (3) stabile.	61
5.4.1 Tipologie di nubi.	64
5.5.1 Esempi di fronti.	66
6.5.1 Un VOR tradizionale di bordo.	74
8.2.1 Accelerazioni durante un loop.	85

Introduzione

Questi appunti sulla teoria del volo nascono come strumento di supporto per i corsi di licenza EASA di pilota privato (PPL). In essi si ricapitolano, in estrema sintesi, le principali nozioni relative ai principi del volo, agli aeromobili e alle loro prestazioni, alla meteorologia, alla navigazione, alle procedure operative ed agli effetti uomo. Non sono invece trattate le comunicazioni. Gli argomenti sono raggruppati secondo le materie d'esame e, sebbene ogni capitolo sia sostanzialmente indipendente dagli altri, si consiglia di leggerli secondo lo schema rappresentato in figura.

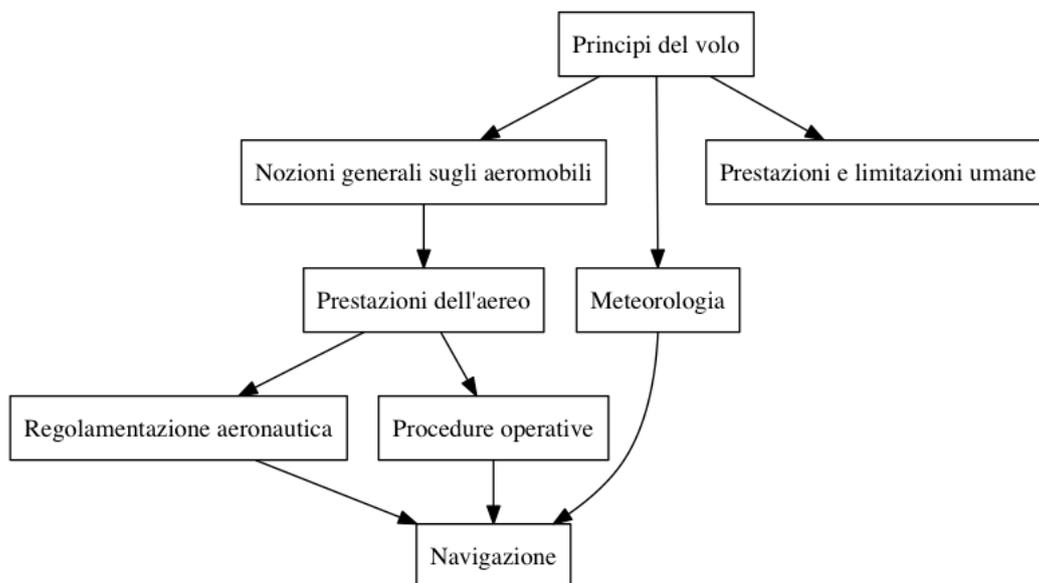


Figura 0.0.1: Dipendenze tra gli argomenti trattati.

Ciascun capitolo termina con una lista di *punti importanti* che riassumono le informazioni viste nel capitolo. Risulta comunque fondamentale, in questa disciplina, associare alla teoria una pratica basata sulla reale esperienza di volo e sull'utilizzo di appositi quiz (di cui esistono eccellenti raccolte anche online). Le fonti da cui si è attinto per la preparazione di questo materiale comprendono testi completi ([Stretti, 2015] e [Trebbs, 2003]), testi dal carattere più pratico e riassuntivo ([Langewiesc, 1944]), testi afferenti alle normative FAA ([Jeppesen, 1997] e [FAA, 2008]) e Internet (da cui è presa la maggior parte delle immagini). In nessun caso, evidentemente, questi appunti possono sostituire tali testi; potranno essere, tuttavia, un utile materiale di complemento.

Capitolo 1

Principi del volo

1.1 Principi del sostentamento

1.1.1 Portanza e resistenza

Un'ala investita da un flusso d'aria (vento) è sollecitata da una *forza aerodinamica* che nasce per il moto relativo tra i due. Se l'asse di simmetria dell'ala non ha la stessa direzione del moto, la forza aerodinamica si scompone in *resistenza* e *portanza*: la seconda permette ad un aereo di volare. L'angolo tra la direzione del moto e l'asse di simmetria dell'ala si chiama *angolo di incidenza*. Portanza e resistenza aumentano con la superficie dell'ala e col quadrato della velocità del vento. Esse sono inoltre condizionate dalla densità dell'aria secondo le formule $R = \frac{1}{2}c_r\rho SV^2$ e $P = \frac{1}{2}c_p\rho SV^2$, in cui ρ è la densità dell'aria, c_r e c_p sono coefficienti che dipendono dal profilo dell'ala e dall'angolo di incidenza, S è la superficie colpita dall'aria e V è la velocità del vento.

Origine della portanza

La velocità dell'aria è maggiore sopra all'ala e di conseguenza la superficie dorsale dell'ala è in depressione rispetto allo stato di quiete. Il flusso aerodinamico, inoltre, è deflesso verso il basso nel bordo posteriore del profilo dell'ala; per il principio di azione-reazione ciò produce una spinta verso l'alto. La portanza, quindi, è **generata dall'azione congiunta della depressione superiore e della deflessione posteriore**. Il coefficiente di portanza c_p cresce con l'aumentare dell'incidenza fino ad un valore massimo; esso si riduce però molto bruscamente superato il valore di *incidenza critica* (tra 15° e 18°) generando il fenomeno dello *stallo*, come rappresentato dalla figura 1.1.1.

Efficienza

Si definisce *efficienza* il rapporto tra portanza e resistenza: $E = \frac{P}{R} = \frac{c_p}{c_r}$. Volando in situazione di efficienza, si ottiene la massima portanza con la minima resistenza. La figura 1.1.2 mostra che il massimo dell'efficienza si ottiene circa con un angolo di incidenza di circa 4°.

1.1.2 Portanza e incidenza

A basso angolo di incidenza ($\leq 6^\circ$) le particelle d'aria riescono a seguire il profilo dell'ala grazie alla viscosità. Man mano che l'angolo aumenta, l'aria si stacca dall'ala e comincia a produrre

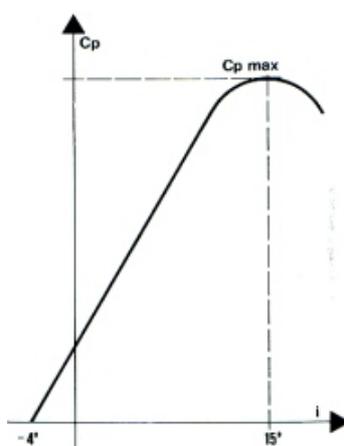


Figura 1.1.1: Andamento del coefficiente di portanza rispetto all'angolo di incidenza.

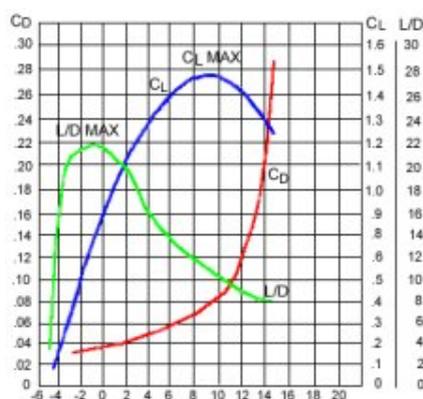


Figura 1.1.2: Grafico dell'efficienza ($\frac{L}{D}$ in verde), confrontato con la portanza (c_l in blu) e con la resistenza (c_r in rosso).

dei vortici che fanno vibrare l'ala (*buffeting*), la depressione è ridotta al solo bordo d'attacco e la resistenza aumenta; tale fenomeno preavvisa la situazione di stallo, che si verifica superato l'angolo critico di incidenza. A quel punto l'aereo abbassa il muso e scende repentinamente. Sebbene esista l'espressione *velocità di stallo* V_{s1} (ovvero la velocità determinata da un angolo di incidenza che porta allo stallo), si noti che **lo stallo dipende unicamente dall'incidenza e non dalla velocità.**

1.2 La resistenza e gli angoli caratteristici

La resistenza è la componente della forza aerodinamica che si oppone alla direzione del moto; nel volo, oltre alla resistenza dovuta alla velocità dell'aria (detta *parassita*) ne esiste un'altra che deriva dalla portanza (detta *indotta*) e si sviluppa principalmente a basse velocità. La **resistenza totale è data dalla somma delle due.**

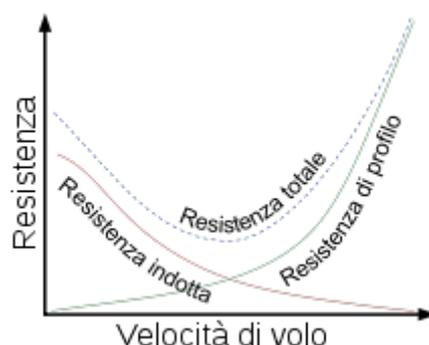


Figura 1.2.1: Grafico della resistenza totale (somma di resistenza indotta e di profilo).

1.2.1 Resistenza parassita (o di profilo)

La resistenza parassita è una conseguenza della perturbazione che un corpo in movimento crea nell'aria; essa aumenta col quadrato della velocità. Si divide in *resistenza di forma* e *resistenza d'attrito*. La prima è legata alla geometria del corpo in movimento (ad esempio l'ala) mentre la seconda alla sua superficie. Un profilo aerodinamico tende a ridurre la resistenza di forma mediante una geometria che favorisce il flusso dell'aria e può migliorare sensibilmente le prestazioni di un'ala. La resistenza d'attrito invece dipende dalla levigatezza della superficie del corpo: corpi sporgenti come rivetti o chiodi o anche solo sporchie sull'ala fanno aumentare l'attrito considerevolmente.

1.2.2 Resistenza indotta

La resistenza indotta è un prodotto della portanza e dipende dall'angolo di incidenza. Essa è causata dai vortici che si sviluppano nella parte posteriore e alle estremità laterali dell'ala: a causa della differenza di pressione tra il sopra ed il sotto dell'ala, l'aria comincia a muoversi vorticosamente. A maggiore inclinazione la portanza è maggiore e così anche la differenza di pressione, per cui i vortici sono più accentuati e ciò aumenta la resistenza indotta. Allungare l'ala o utilizzare delle alette laterali (*wingtip*) contribuisce a ridurre questo effetto.

In prossimità del suolo la formazione dei vortici è ridotta dalla presenza del terreno (*effetto suolo*). Tale fenomeno si verifica solo a distanze dal suolo più piccole della lunghezza dell'ala. In fase di atterraggio la ridotta resistenza tende a ritardare il punto di contatto; in decollo, al contrario, l'aumento della resistenza causato dalla cessazione dell'effetto suolo può modificare criticamente la velocità dell'aereo portandolo in situazione di stallo.

Velocità di massima efficienza

La figura 1.2.2 mostra la resistenza parassita, quella indotta e quella totale (somma delle altre due). Si può notare come la prima aumenti col quadrato della velocità mentre la seconda invece diminuisca corrispondentemente. La resistenza totale, dunque, avrà un minimo nel momento in cui le due resistenze sono uguali: la velocità a cui si ha questo minimo è detta **velocità di massima efficienza** V_{me} e rappresenta la miglior velocità di volo per l'aereo.

1.2.3 Vortici e turbolenza di scia

Un aereo crea dietro di sé una scia di turbolenza che si allarga e permane in aria diverso tempo dopo il suo passaggio. Componente importante di tale turbolenza sono i vortici delle ali, la cui intensità è connessa con la portanza (come visto nel paragrafo 1.2.2), per cui aumenta con l'assetto e col peso dell'aereo. Un aereo in decollo produce vortici dal punto di rotazione, mentre un aereo in atterraggio smette di produrli nel momento in cui le ruote toccano la pista (in cui cioè la portanza termina). Tali vortici possono permanere fino a 5 nm di distanza, possono avere un diametro pari all'apertura alare ed i due centri possono distare fino a due volte l'apertura alare; scendono di 1000 ft sotto la traiettoria e se l'aereo è sotto tale altezza, arrivano al suolo ad una altezza pari a metà dell'apertura alare e si allontanano lateralmente a circa 5 kt.

Evitare la turbolenza

E' necessario un tempo di separazione di circa 2 minuti tra gli aerei per evitare le turbolenze, ma questo tempo può variare in base alle condizioni. In generale, se si decolla dopo un aereo pesante, bisogna fare la rotazione prima del punto dove l'altro aereo l'ha fatta e bisogna salire con rateo maggiore. In caso di decollo dopo un atterraggio invece, la rotazione va fatta dopo il punto di toccata dell'altro. Analogamente, atterrando dopo un atterraggio, bisogna toccare dopo il punto di toccata dell'altro. Dovendo attraversare la rotta di un aereo più pesante è consigliabile mantenere una distanza di almeno 10 nm.

1.2.4 Angoli caratteristici di volo

Esistono tre *angoli caratteristici di volo*:

- **incidenza** i : angolo tra traiettoria e la corda del profilo alare;
- **rampa** β : angolo tra traiettoria e orizzonte;
- **assetto** A : angolo tra corda del profilo alare e orizzonte.

In realtà la corda del profilo alare e l'asse longitudinale dell'aereo non sono la stessa cosa: la differenza è detta angolo di **calettamento** c e serve a produrre la portanza necessaria durante l'assetto orizzontale (ovvero: le ali sono inclinate all'insù rispetto alla fusoliera).

I quattro angoli sono in relazione mediante la seguente formula: $A = i - c + \beta$; un pilota di aerei leggeri non ha uno strumento che indica l'incidenza, ma può controllarla agendo sull'assetto.

Volo per assetti

Nel volo rettilineo orizzontale a velocità costante, la portanza deve uguagliare il peso $P = Q$ e la trazione deve uguagliare la resistenza $T = R$. Assetto e velocità sono collegati: nella formula della portanza, infatti, l'unico controllo che ha il pilota è sul coefficiente c_p mediante l'assetto e sulla velocità V . In volo lento, l'assetto deve essere cabrato, a velocità di crociera dovrà essere neutrale mentre ad alta velocità dovrà essere a picchiare. In quota, la minor densità dell'aria deve essere compensata da maggiore velocità o maggiore assetto.

I parametri di potenza, assetto e velocità sono dunque collegati: fissati due di essi il terzo è determinato. Questo principio sta alla base del volo per assetti: **stabilendo potenza e assetto, l'aereo deve assumere l'unica velocità possibile che li equilibra.**

1.3 I comandi e le manovre

1.3.1 Gli assi dell'aereo

I movimenti dell'aereo si possono analizzare rispetto ad un sistema di riferimento cartesiano tridimensionale x, y, z . Il movimento attorno all'asse longitudinale x si chiama *rollio*, quello attorno all'asse trasversale y si chiama *beccheggio*, quello intorno all'asse verticale z si chiama *imbardata*. L'aereo viene controllato intorno ai tre assi mediante comandi aerodinamici, gruppo motore ed ipersostentatori (si noti che gli ultimi due non sono considerati comandi). Ad esempio, dando potenza l'aereo l'assetto dell'aereo aumenta; l'elica, inoltre produce un effetto di imbardata a sinistra.

1.3.2 Il piano orizzontale di coda

Perché l'aereo rimanga stabile attorno all'asse trasversale (beccheggio) sono necessarie due importanti condizioni:

- che il punto di applicazione della portanza P sia anteriore rispetto al peso Q ;
- che una terza forza, detta *deportanza* D , equilibri la coppia peso-portanza secondo la formula $P = Q + D$.

La deportanza viene generata dal piano orizzontale di coda: esso, oltre che equilibrare le forze in gioco, permette di controllare i movimenti intorno all'asse trasversale. Per assolvere a queste due funzioni, esso è composto di una parte fissa detta *stabilizzatore* ed una parte mobile detta *timone orizzontale* (*o di profondità*): a volte le due funzioni sono unite in un unico piano mobile detto *stabilatore* (stabilizzatore + elevatore). Il timone orizzontale viene controllato dal pilota mediante il movimento pull/push del volantino o della barra; lo sforzo richiesto per manovrare l'aereo intorno all'asse trasversale viene generalmente compensato da un'ulteriore parte mobile detta *trim*, che serve appunto a rendere nulla la forza da applicare sui comandi. Si noti che una volta che l'aereo è trimmato, tende a mantenere costante la velocità (ad esempio, se si da motore l'aereo sale a velocità costante e viceversa).

1.3.3 Il piano verticale di coda

La stabilità e la manovrabilità intorno all'asse verticale (imbardata) vengono garantite da un piano verticale di coda composto da una parte fissa detta *deriva* e da una parte mobile detta *timone verticale* (*o di direzione*). Analogamente al piano orizzontale, la deriva serve a garantire la stabilità mentre il timone verticale a manovrare. Il controllo del timone viene effettuato dal pilota mediante i pedali. Quando l'aereo imbarda da un lato, l'ala interna perde portanza e l'aereo tende a scendere entrando in una spirale che diviene via via più accentuata; per tale ragione l'utilizzo principale del timone verticale è quello di mantenere l'asse longitudinale dell'aereo allineato col flusso aerodinamico durante la virata. Esso risulta strumento essenziale, inoltre, per uscire dalla vite.

1.3.4 Alettoni

Gli alettoni sono superfici mobili situate sul bordo d'uscita alle estremità delle ali. Servono a controllare il movimento intorno all'asse longitudinale e si azionano col movimento destro/sinistro del volantino o della barra. Il movimento dei due alettoni è *inverso*: quando quello di destra sale, quello di sinistra scende. Ciò produce una differenza di portanza tra le ali che inclina l'aereo e

permette la virata: l'ala interna avrà meno portanza. Anche in questo caso, come per il timone verticale, la differenza di portanza fa scendere l'aereo in spirale. Inoltre, visto che l'ala esterna acquista oltre che maggior portanza anche maggior resistenza, si crea un fenomeno di *imbardata inversa*, per cui l'aereo imbarda nel senso opposto alla virata.

Virata

La virata è lo spostamento dell'asse longitudinale dall'aereo rispetto ad un punto esterno. Gli effetti di **imbarata e rollio sono sempre collegati** e non è possibile avere l'una senza l'altro. La differenza tra i due è trascurabile fintanto che l'aereo ha le ali poco inclinate: in pratica imbarcare equivale a virare. A maggiore inclinazione, ad esempio a 90° , l'imbardata non produce alcuna virata poichè consiste con la rotazione del muso dell'aereo verso l'alto o il basso.

La virata inizia con un rollio prodotto dagli alettoni: la portanza si inclina e trascina l'aereo dalla parte dell'ala più bassa. Ciò produce una forza aerodinamica sulla deriva che ruota la coda fintanto che l'aereo si riallinea di nuovo col flusso aerodinamico principale. Fino a che le ali sono inclinate il processo continua in una traiettoria circolare. Durante una virata, la componente verticale della portanza non è più sufficiente a mantenere l'aereo in aria e dunque il pilota è obbligato ad intervenire aumentando l'assetto per inclinazioni minori 30° o aumentando l'assetto e la potenza per inclinazioni maggiori.

La virata si dice *coordinata* quando le forze trasversali (forza peso e forza centrifuga) sono perpendicolari al piano alare. Lo strumento che indica il coordinamento della virata è lo *sbandometro*, una pallina in un tubo curvo pieno di liquido viscoso. Quando la pallina si trova all'interno delle linee di fede, significa che le forze trasversali sono perpendicolari alle ali; quando la pallina si trova all'esterno, significa che la forza centrifuga è più grande rispetto all'inclinazione (*derapata*); infine, quando la pallina si trova all'interno, significa che la forza peso è maggiore della forza centrifuga (*scivolata*). Per ottenere una virata coordinata, si deve agire congiuntamente con pedali e volantino (ovvero timone orizzontale e alettoni) secondo la regola mnemonica *il piede schiaccia la pallina*. Una virata derapata è potenzialmente pericolosa per una entrata in vite; al contrario una scivolata è generalmente sicura. Per questo bisogna sempre **virare mantenendo la pallina al centro o all'interno**.

1.4 Profili, ipersostentatori, volo librato

1.4.1 Profili alari

I profili di un'ala si distinguono in: piano-convesso, concavo-convesso, biconvesso. Il primo oppone significativa resistenza ed è usato in aerei lenti; il secondo offre la maggior portanza ed è spesso usato nelle vele dei paracadute. Il terzo, infine, offre le migliori prestazioni ed è usato in aerei ad alta performance; vista la sua simmetria inoltre, è adatto al volo rovesciato degli aerei da acrobazia. A volte l'ala tende ad avere un arretramento della zona di massimo spessore (*profilo laminare*): ciò serve a ritardare la transizione da laminare a turbolenta del flusso d'aria.

1.4.2 Ipersostentatori

Gli ipersostentatori (o *flap*) sono delle superfici che servono ad aumentare la portanza e la resistenza di un'ala. Generalmente sono applicati alla parte posteriore di uscita, ma esistono anche varianti applicate al bordo d'attacco (*slat*). In generale aumentano la superficie dell'ala, la sua curvatura e l'energia cinetica dello strato limite dell'aria per ritardarne il distacco.

Esistono vari tipi di flap:

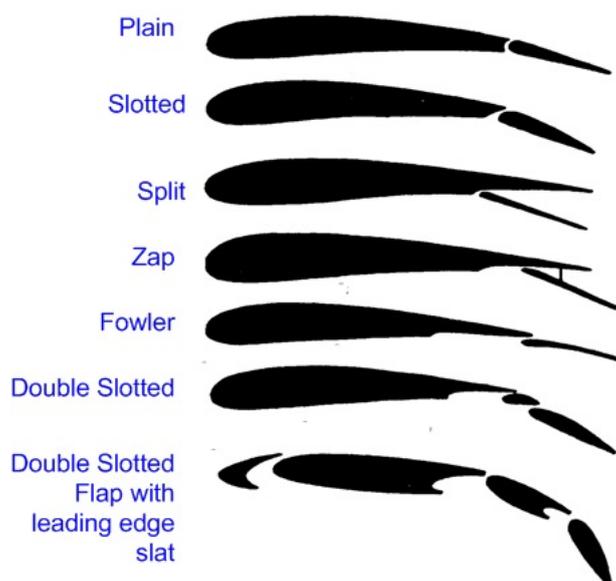


Figura 1.4.1: Tipologie di flap.

- *plain flap*: aumentano la curvatura dell'ala attraverso superfici incernierate che deflettono; riescono ad aumentare la portanza fino al 50%;
- *slotted flap*: aumentano la curvatura e l'energia cinetica attraverso delle fessure (slot) che accelerano l'aria sulla superficie dei flap; aumentano la portanza fino al 70%;
- *split flap*: sono realizzati da una parte dell'ala che ruota verso il basso; sono semplici ma aumentano molto la resistenza;
- *Fowler flap*: sono costituiti da varie superfici che si estendono e sono separate da fessure; aumentano la portanza anche del 100% ma sono complessi meccanicamente.

La figura 1.4.2 mostra, tra le altre, le tipologie descritte sopra.

1.4.3 Volò librato

Il volo librato è quello condotto senza motore. La distanza massima percorribile D dipende dall'altezza H e dalla pendenza β , la quale a sua volta dipende dall'efficienza E secondo la relazione $D = H \cdot E$. Per massimizzare tale distanza occorre volare alla velocità di massima efficienza V_{me} (vedi 1.2.2). Siccome l'efficienza non dipende dal peso (che influisce invece sul tempo), **la massima distanza percorribile planando in aria calma non dipende dal peso**¹.

Velocità di minima discesa

La velocità di minima discesa V_{md} , massimizza il tempo di discesa e fa rimanere l'aereo in aria più a lungo. La velocità di minima discesa si trova a circa un terzo della distanza tra velocità di stallo e di massima efficienza: $V_{md} = V_{s1} + \frac{1}{3}(V_{me} - V_s)$.

¹In presenza di vento contrario, un aereo più leggero percorrerà meno distanza di un aereo più pesante; al contrario con vento a favore, esso percorrerà più distanza.

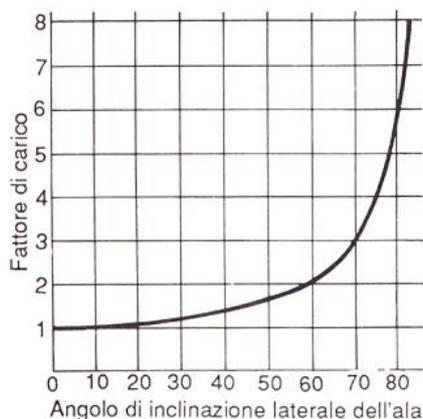


Figure 1.5.1: Fattore di carico in funzione del bank.

1.5 Il fattore di carico

Il *peso apparente* Q_a di un oggetto, è il peso dell'oggetto soggetto a delle forze inerziali. In volo rettilineo orizzontale il peso reale e quello apparante si equivalgono, ma quando l'aereo compie delle evoluzioni (o in caso di turbolenza) questo rapporto può cambiare di molto. Il rapporto tra i due pesi è detto *fattore di carico* n e si esprime con la formula $n = \frac{Q_a}{Q}$.

Ogni aereo è progettato per sopportare un certo fattore di carico, determinato dal suo particolare uso. In altri termini, il fattore di carico è quindi un numero che rappresenta di quanto deve aumentare la portanza per bilanciare la forza risultante generata dalle manovre.

1.5.1 Cambiamento del fattore di carico

In salita ed in discesa, la portanza è minore della forza peso in funzione coseno dell'angolo β : $P = Q \cos(\beta)$; per questo in entrambi i casi il fattore di carico è minore di 1. In virata, n cresce lentamente per angoli di inclinazione delle ali (bank) $< 30^\circ$ per poi crescere rapidamente per angoli superiori, come mostrato in figura 1.5.1. Con un bank di 60° si arriva a $n = 2$; si noti che il fattore di carico non dipende dalla velocità ma solo dall'inclinazione.

Durante la richiamata (manovra in cui un aereo percorre un cerchio nel piano verticale) le forze che agiscono nel punto più basso dell'arco (che ha maggior carico) sono il peso e la forza centrifuga. Quest'ultima varia col quadrato della velocità e dunque risulta maggiore con archi minori del cerchio. Il fattore di carico $n = \frac{P}{Q}$ può raggiungere valori molto elevati.

Anche l'aria turbolenta può provocare dei cambiamenti (positivi o negativi) del fattore di carico. Essi saranno più significativi per aerei più leggeri risulteranno più importanti quanto più alta sarà la velocità dell'aereo. Per tale ragione è opportuno, in aria turbolenta, mantenere una velocità abbastanza alta da garantire di non entrare in stallo ma abbastanza bassa per ridurre le sollecitazioni dell'aereo.

Si noti che **ad un aumento del fattore di carico corrisponde sempre un aumento della velocità di stallo**: a fattori di carico maggiore di 1, sebbene lo stallo si abbia sempre allo stesso angolo di incidenza, la velocità di stallo sarà più alta.

1.5.2 Stallo e vite

Le ali di un aereo vanno in stallo quando c'è troppa incidenza. Tuttavia, lo stallo non accade contemporaneamente in tutta l'ala a causa della *svergolatura* (cambio progressivo dell'angolo dell'ala). Lo stallo in effetti si verifica a partire dalla fusoliera e si propaga verso la punta delle ali. Avvicinandosi allo stallo, i comandi perdono efficienza: prima gli alettoni, poi il timone di profondità ed infine il timone di direzione.

Se le due ali non entrano in stallo allo stesso momento (o non perdono la stessa quantità di portanza) può accadere che l'aereo entri in *vite*: una perdita di quota caratterizzata da un movimento su tre assi (l'aereo rolla, imbarda e picchia). Si noti che un aereo entra in vite se stalla ed è sbandato: **se la pallina dello sbandometro è al centro, non ci sono le condizioni per uno stallo in vite.**

Per uscire dalla vite bisogna seguire le istruzioni date nel manuale dell'aereo; in generale, tuttavia, vanno seguite le fasi schematizzate dall'acronimo inglese *P.A.R.E.*:

1. (*P*)ower: ridurre il motore;
2. (*A*)ilerons: mettere gli alettoni in posizione neutrale;
3. (*R*)udder: dare piede contrario al senso di rotazione della vite;
4. (*E*)levator: timone di profondità a zero.

Una volta usciti dalla rotazione, è poi necessario aggiungere due altre azioni:

1. (*R*)udder: mettere il timone di direzione in posizione neutra;
2. (*E*)levator: usare il timone di profondità per riprendere un assetto di crociera.

1.6 Diagrammi di manovra e di raffica

Un diagramma di manovra è un grafico che mostra le capacità di sopportazione del fattore di carico di un aereo. E' possibile pensare allo stallo come ad una sorta di autodifesa dell'aereo al fattore di carico: ad una data velocità l'aereo può sopportare un certo fattore di carico; se il fattore di carico richiesto aumenta, l'aereo entra in stallo. Per evitare lo stallo va aumentata la velocità: in altri termini, per poter raggiungere un dato fattore di carico occorre possedere una determinata quantità di energia da convertire. Maggiore è la velocità, maggiore sarà l'energia e di conseguenza maggiore il fattore di carico. La figura 1.6 rappresenta un tipico diagramma di manovra.

Nel diagramma si può notare che il fattore di carico positivo arriva fino a circa a 4, mentre quello negativo circa a -2: tali valori sono quelli mediamente standard per aerei piccoli non acrobatici.

Diagramma di raffica

Il diagramma di raffica è una variante del diagramma di manovra, in cui si aggiungono i carichi provocati da raffiche di vento verticali (le altre non aumentano il carico sull'aereo) con intensità determinate statisticamente. Per maggiori informazioni si veda [Stretti, 2015], pag. 44.

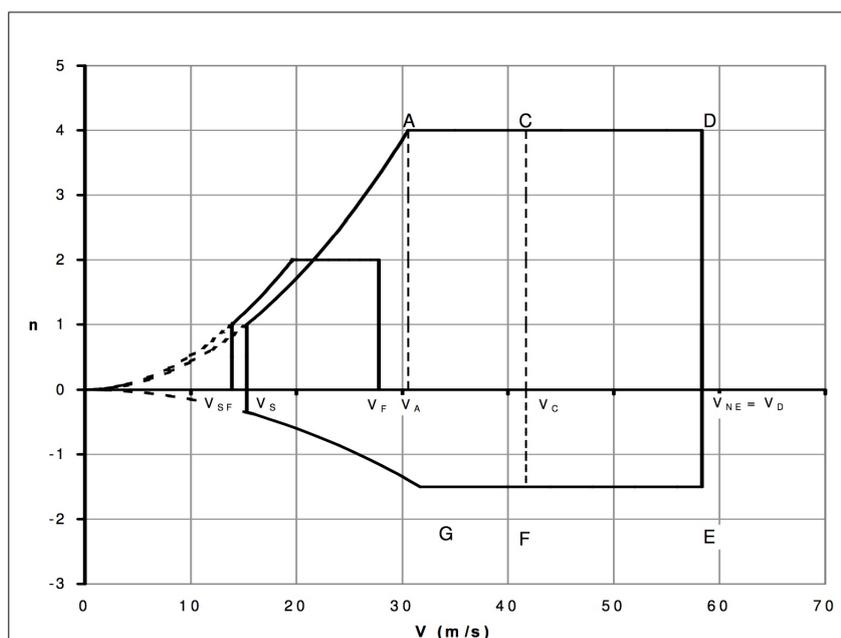


Figura 1.6.1: Esempio di diagramma di manovra.

1.6.1 Velocità caratteristiche di manovra

Mediante l'uso congiunto di diagrammi di manovra e raffica, è possibile identificare alcune velocità dette *caratteristiche*, che sono di particolare interesse per il pilota:

- V_{so} : velocità di stallo in volo livellato, senza motore;
- V_a : è la velocità di manovra e rappresenta la velocità a cui corrisponde il massimo carico di progetto (a velocità minori l'aereo non può raggiungere fattori più grandi di A perchè stalla prima, a velocità superiori l'aereo non ha la difesa dello stallo e può subire danni);
- V_{fe} : velocità di manovra con flaps estesi;
- V_{s1} : è la velocità di stallo a fattore di carico $n = 1$ (a volte chiamata semplicemente V_s);
- V_{no} : velocità massima di normali operazioni;
- V_{ne} : è la velocità da non superare mai.

Tali velocità sono così importanti per il pilota, che vengono riportate con colori diversi sull'anemometro: l'arco bianco inizia dalla V_{so} e termina con la V_{fe} , l'arco verde va dalla V_{s1} alla V_{no} e infine l'arco giallo che va dalla V_{no} fino alla V_{ne} .

1.7 Stabilità e manovrabilità

La stabilità aerodinamica indica la capacità dell'aereo di sviluppare forze aerodinamiche che ripristino e mantengano le condizioni originarie di volo senza che vi sia un intervento correttivo

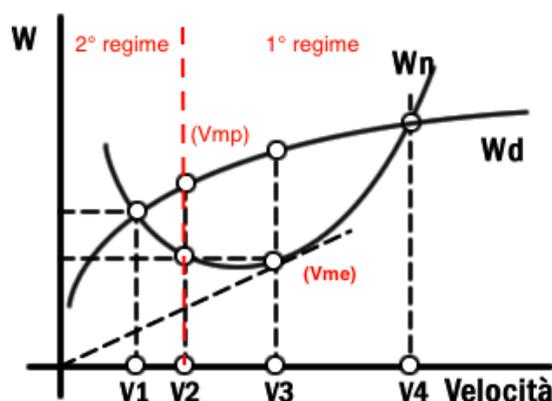


Figura 1.8.1: Potenza necessaria e disponibile.

del pilota. La manovrabilità indica invece l'agevolezza con cui l'aereo compie le evoluzioni; essa è favorita da una certa instabilità. Stabilità ed instabilità aerodinamiche non sono intrinsecamente buone o cattive ma dipendono dallo scopo a cui è destinato un velivolo (ad esempio per aerei acrobatici la manovrabilità è più importante della stabilità). In condizione di stallo, tuttavia, un aereo dovrebbe garantire una buona stabilità per ritrovare autonomamente l'assetto di uscita (baricentro anteriore al centro di pressione).

Esistono tre tipi di stabilità aeronautica (uno lungo ogni asse):

- *stabilità longitudinale* (movimenti di beccheggio): è garantita dallo stabilizzatore di coda ed è influenzata dal carico dell'aereo;
- *stabilità trasversale* (movimenti di rollio): è garantita dal *diedro* (angolo formato, sul piano orizzontale, tra le due semiali) e tende a riportare l'aereo ad ali livellate;
- *stabilità direzionale* (movimenti di imbardata): è garantita dalla deriva e tende a riallineare l'aereo al flusso aerodinamico principale; la fusoliera ha effetto neutro o destabilizzante.

1.8 Potenza, salita, autonomia

1.8.1 Potenza necessaria e disponibile

In senso generale, la potenza è il rapporto tra il lavoro compiuto e il tempo impiegato: essa è maggiore quanto prima il lavoro è compiuto.

La *potenza necessaria* per volare W_n è data dal prodotto tra resistenza e velocità: $W_n = R \cdot V$. La *potenza disponibile* W_d , invece, è la potenza di trazione massima che il complesso motore-elica può erogare; essa varia con la velocità.

Perché un aereo possa rimanere in condizione di volo rettilineo orizzontale è **necessario che potenza necessaria e potenza disponibile si equivalgano**. La figura 1.8.1 mostra le curve di W_n e W_d . Si possono notare le seguenti cose:

- le due curve si intersecano solo in due punti, che corrispondono rispettivamente al volo lento ed al volo stabile (al di fuori dei due punti di incrocio non è possibile volare);
- V_1 è la velocità di stallo;

- V_2 è la cosiddetta *velocità di minima potenza* (V_{mp}), in cui il consumo orario è minimo e si ha la maggior autonomia;
- V_3 corrisponde alla *velocità di massima efficienza* (V_{me}) (vedi 1.2.2);
- V_4 è la velocità massima possibile dell'aereo.

Alla V_{me} si ha il minimo valore del rapporto tra potenza e velocità $\frac{W_p}{V}$, poichè è minima la resistenza totale. Essa si può determinare tracciando la tangente alla curva W_d che parte dall'origine.

1.8.2 Primo e secondo regime

La V_{mp} determina la separazione tra il *primo regime* ed il *secondo regime*. Il primo regime (detto *veloce*) si estende dalla V_{mp} alla velocità massima possibile, mentre il secondo parte dalla velocità di stallo fino alla V_{mp} .

Nel primo regime, la potenza è erogata per contrastare la resistenza passiva, mentre nel secondo per contrastare la resistenza indotta. Si noti, inoltre, che all'aumentare della velocità si ha un comportamento inverso tra i due regimi: nel primo regime la potenza diminuisce, mentre nel secondo cresce.

Dal punto di vista propulsivo, il primo regime è stabile mentre il secondo è instabile. Come conseguenza, in **secondo regime l'effetto del timone di profondità è invertito**. In secondo regime, alzare il muso non estende la planata ma al contrario aumenta la velocità e la accorcia. Per estendere la planata occorre infatti abbassare il muso e guadagnare velocità anemometrica.

Potenza in volo stabilizzato, salita e discesa

Un aereo trimmato in volo orizzontale tende a mantenere la velocità, per cui se si dà potenza cercherà di salire. Una salita continuativa è possibile solo se c'è esubero di potenza: in primo regime si può aumentare l'assetto per mantenere la quota, a condizione di perdere velocità.

In altri termini, **se la potenza erogata dal motore è insufficiente a mantenere quota e velocità, la potenza mancante verrà presa da quota e velocità.**

La *velocità verticale di salita* V_z indica il guadagno di quota nell'unità di tempo e si misura in ft/min. Essa è determinata dalla formula $V_z = \frac{(W_d - W_n)}{Q}$ e ha valore massimo quando la potenza erogata è massima. La velocità anemometrica corrispondente a V_z è detta *velocità di salita rapida* V_y . La massima rampa di salita, invece, si ottiene quando il rapporto tra velocità verticale V_z e orizzontale è massimo; La velocità anemometrica corrispondente detta *velocità di salita ripida* V_x . V_y è generalmente prossima alla V_{me} , mentre V_x è di poco superiore alla velocità di stallo.

Potenza e quota

La quota ha effetto sulla potenza: la minor densità dell'aria ρ nella formula della portanza deve essere compensata con l'assetto o con la velocità (controllata con la potenza); ciò significa che la potenza necessaria aumenta. Il motore, tuttavia, diventa meno efficiente in quota e la potenza disponibile diminuisce. Le curve W_n e W_d tendono, in quota, ad incontrarsi in un solo punto, che definisce la sola possibile velocità per mantenere il volo rettilineo orizzontale. Ciò accade alla cosiddetta quota di *tangenza teorica*.

Consumi

In quota la diminuzione della densità riduce anche la resistenza. Per conseguenza, la potenza necessaria e la velocità aumentano con lo stesso rapporto; ne consegue che il consumo chilometrico rimane costante. Al contrario, il consumo orario aumenta: la migliore autonomia oraria si avrà infatti a livello del mare.

1.9 Punti importanti

- Il volo è regolato da quattro forze: trazione, resistenza, peso e portanza. In volo rettilineo orizzontale queste forze sono in equilibrio.
- La portanza è generata dall'azione congiunta della depressione superiore e della spinta inferiore. La forma dell'ala è disegnata per favorire questi effetti.
- Lo stallo è causato dalla separazione del flusso d'aria dall'ala. Dipende solo dall'angolo di incidenza e non da velocità, quota o peso.
- I flaps aumentano la portanza e la resistenza cambiando superficie e angolo d'attacco dell'ala.
- La resistenza si divide in parassita (generata dal flusso aerodinamico) e indotta (generata dalla portanza). La prima si divide in resistenza di forma e di superficie; aumenta in modo quadrato con la velocità. La seconda aumenta a basse velocità.
- La stabilità si divide in longitudinale (garantita dallo stabilizzatore), trasversale (garantita dal diedro) e direzionale (garantita dalla deriva).
- La vite si può sviluppare solo in caso di stallo con aereo sbandato.
- La minima resistenza, il miglior angolo di planata e la maggior distanza di planata si ottengono in condizione di efficienza ovvero con un angolo di incidenza che corrisponde al massimo del rapporto $\frac{c_p}{c_r}$.
- L'effetto di imbarata inversa si può contrastare dando col timone orizzontale in modo da mantenere un volo coordinato.
- Il rapporto tra il peso che le ali devono sopportare ed il peso reale dell'aereo si chiama fattore di carico.
- Il diagramma di manovra mostra l'involuppo dell'aereo e definisce le velocità caratteristiche.

Capitolo 2

Nozioni generali sugli aeromobili

2.1 Struttura dell'aeroplano

2.1.1 Parti dell'aereo

Nell'aereo si distingue tra *gruppo motopropulsore* e *cellula*. Il primo è costituito da un motore a combustione che controlla un'elica. La seconda è invece composta da fusoliera, ali, impennaggi di coda e carrello; essa contiene inoltre i vari impianti. Tra gruppo motore e cellula vi è interposta una paratia parafiamma che protegge la cabina da incendi del vano motore.

La fusoliera è la parte principale dell'aereo e comprende cabina, vani carico e eventuali serbatoi. Collega ali e piani di coda e riceve/trasmette le forze aerodinamiche. Essa è generalmente formata da una struttura resistente (traversine e longheroni oppure tubi) ed un rivestimento. Anche le ali hanno uno scheletro di longheroni e travertine ed un rivestimento di solito di metallo; molto spesso contengono anche dei serbatoi carburante. Tutte le parti metalliche dell'aereo sono in conduzione elettrica per garantire un potenziale elettrico costante ovunque.

Ali e piani di coda

Le ali sono classificate in base alla geometria vista dall'alto, all'angolo rispetto alla fusoliera e al loro collegamento con essa: esistono ali rettangolari, rettangolari rastremate, ellittiche (molto efficienti), a freccia, ecc.

L'*allungamento alare* è il rapporto tra l'apertura alare λ e la corda media c : $\frac{\lambda}{c}$. Si dice invece *carico alare* il rapporto tra peso Q e superficie alare S : $\frac{Q}{S}$; esso è misurato in kg/m^2 o N/m^2 . Le ali sono generalmente collegate alla fusoliera in alto o in basso (ala alta o bassa rispettivamente); spesso tra le due semiali esiste un angolo formato, sul piano orizzontale, chiamato *diedro* che serve a garantire stabilità trasversale (rollio); l'angolo di cui le ali sono piegate all'indietro è detto invece *angolo di freccia* e serve a aiutare la stabilità direzionale (imbardata).

Carrello

Il carrello è la base d'appoggio dell'aereo sul terreno. Storicamente il primo carrello era di tipo *biciclo*, con due ruote poste davanti ed un ruotino posteriore. Tale carrello è instabile perchè il centro di gravità dell'aereo è posteriore alla posizione delle ruote. Esso, tuttavia, risulta comodo per particolari scopi come acrobazia e *bush piloting*: è più leggero di altri tipi di carrello e ha migliori prestazioni in salita e discesa, è molto robusto e dunque adatto a piste poco trattate e richiede uno spazio di decollo ed atterraggio più corto.

La maggior parte degli aerei di aviazione generale, tuttavia, utilizza il *carrello triciclo* costituito da due ruote posteriori ed un ruotino mobile anteriore. Data la sua conformazione, esso risulta molto più stabile del biciclo¹ e può sopportare carichi verticali molto elevati (sebbene sia meno robusto per carichi laterali). Le vibrazioni e l'assorbimento di carichi sono aiutati nel carrello dalla presenza di ammortizzatori idraulici o meccanici (barre di metallo).

Impianto elettrico

L'impianto elettrico fornisce alimentazione per le utenze di bordo mediante un generatore (una dinamo o un alternatore) che prende moto dal motore tramite pulegge e cinghia e da una batteria che immagazzina l'energia in forma elettro-chimica.

Le varie utenze sono protette da fusibili (*circuit breakers*) e la batteria è inserita da un interruttore detto *master*; spesso l'intera avionica è controllata da uno specifico interruttore detto *avionic master*. In aeronautica, la posizione di *on* è standardizzata in alto.

Il circuito elettrico è a corrente continua a 12 o 24 volt; il generatore produce corrente alternata che poi viene raddrizzata. Per verificare il funzionamento dell'impianto è presente a bordo un amperometro che misura l'intensità della corrente. Generalmente ha una scala che usa sia numeri negativi che positivi: quando l'alternatore carica la batteria e alimenta le utenze esso segnerà valori positivi; al contrario, quando è la batteria a fornire energia (e dunque si scarica) esso indicherà valori negativi. In caso di avaria dell'alternatore, una batteria in buona salute potrà garantire energia all'aereo per circa 30 minuti; l'utenza che consuma più corrente è di solito il transponder.

Impianto carburante

L'impianto per il carburante varia da aereo ad aereo. In generale, negli aerei ad ala alta il carburante giunge al motore per gravità mentre in quelli ad ala bassa è necessaria una pompa elettrica o meccanica (spesso sono presenti entrambe per sicurezza). Nella maggior parte degli aerei di aviazione generale, tuttavia, è sempre presente almeno una pompa per garantire flusso di carburante in assetti inusuali come decollo e atterraggio. I serbatoi hanno degli sfiati che servono a garantire la pressione interna durante il consumo del liquido ed eventualmente a far uscire piccole quantità di carburante in caso di eccesso di liquido (in caso di otturazione dello sfiato, molti aerei hanno comunque tappi del serbatoio a valvola). La pompa non prende carburante fino al fondo del serbatoio, perchè esso contiene le impurità e l'eventuale acqua di condensa (più pesante del carburante): è importante spurgare il serbatoio attraverso un'apposita valvola prima di utilizzare l'aereo. L'uso dei vari serbatoi presenti in un aereo è responsabilità del pilota, che deve alternarli ad intervalli regolari di 30 minuti.

2.2 Componenti del motore

2.2.1 Descrizione generale

Il motore a combustione è una macchina che trasforma l'energia chimica del carburante in lavoro. Non tutta l'energia disponibile è convertita in lavoro e parte di essa diventa calore, che viene poi dissipato coi gas di scarico e col circuito del raffreddamento. Un motore aeronautico deve rispondere ai requisiti di **affidabilità, basso consumo e leggerezza**.

¹Il carrello triciclo è stato introdotto da Cessna nel 1956 e veniva commercializzato come carrello per l'*atterraggio automatico* vista la sua maggior stabilità.

I motori impiegati negli aerei monomotore e bimotore leggeri sono a pistoni e operano secondo il ciclo a *quattro tempi*: aspirazione, compressione, combustione e espulsione. Essi si distinguono in aspirati se utilizzano l'aria ambiente e compressi se utilizzano un'aria compressa da una turbina (alimentata dai gas di scarico).

Per ottenere una maggiore regolarità di funzionamento, i motori aeronautici utilizzano più *cilindri*, disposti in linea o contrapposti (boxer).

2.2.2 Parti e funzionamento

La parte esterna di un motore è composta da *basamento, cilindri e testata*. All'interno del basamento ruota l'*albero motore*; esso riceve il moto dai pistoni tramite bielle, che trasformano il moto rettilineo in circolare. I pistoni oscillano tra il *punto morto superiore* e quello *inferiore*: la distanza tra i due si chiama *corsa* mentre il diametro di un cilindro si chiama *alesaggio*.

Le quattro fasi del motore si compiono in **due** giri dell'albero motore e sono:

- **aspirazione**: la miscela aria/benzina entra nel cilindro attraverso la valvola di aspirazione, risucchiata dal movimento del pistone;
- **compressione**: la miscela è compressa dal moto ascendente del pistone e la temperatura aumenta;
- **combustione**: la candela emette una scintilla che fa esplodere la miscela compressa; l'aumento di volume dei gas combusti spinge in basso il pistone (fase *attiva*);
- **scarico**: i gas sono espulsi dalla valvola di scarico e il pistone comincia la risalita.

Un motore con un solo cilindro genera un moto irregolare perchè l'albero motore riceve energia solo nella fase di combustione, che occupa mezzo giro su due; gli altri tre giri e mezzo sono di fatto passivi. Aumentando il numero di cilindri a n e sfasandoli di $2\pi/n$, si ottengono maggior fluidità di funzionamento e meno vibrazioni.

2.2.3 Distribuzione

La distribuzione è il meccanismo che apre e chiude le valvole di aspirazione e scarico nel cilindro. La tempistica dell'apertura è gestita da un albero a camme che riceve il movimento dall'albero motore; le valvole stesse si richiudono grazie a molle.

Visto che il flusso dei gas non è istantaneo, le valvole restano aperte un po' più del necessario per ottimizzare il riempimento e lo svuotamento del cilindro: ad esempio, l'aspirazione si apre un po' prima del punto morto superiore e lo scarico si chiude un po' dopo il punto morto inferiore. Le due valvole dunque sono aperte contemporaneamente per una breve fase: l'angolo descritto dall'albero motore mentre le due valvole sono entrambe aperte si chiama *angolo di lavaggio*.

2.2.4 Alimentazione

Il carburante utilizzato nel motore a combustione è una miscela di idrogeno e carbonio (idrocarburo); dopo la combustione esso produce anidride carbonica e acqua (vapore).

Nei motori aeronautici, si usa spesso un carburante chiamato **AVGAS100LL**: *aviation gasoline* (benzina avio) a numero di ottano 100 con proprietà antidetonanti (low lead). Esso è caratterizzato, inoltre, da una bassa volatilità: se evaporasse facilmente, potrebbe provocare il blocco motore. Vista la bassa volatilità, tuttavia, con la benzina avio è più difficile l'avviamento del motore.

Carburatore

Il carburatore è lo strumento che miscela carburante ed aria e ne dosa la quantità nei cilindri. Il livello del carburante è mantenuto costante da un galleggiante². L'aria entra attraverso un tubo di Venturi che ne accelera il flusso creando una depressione; la depressione, a sua volta, aspira la benzina vaporizzandola e mescolandola all'aria. Il flusso del vapore prodotto è controllato da una valvola a farfalla regolata dalla manetta. Si noti che, sebbene semplice e robusto, un carburatore non garantisce afflusso uniforme di carburante a tutti i cilindri in modo uguale.

2.2.5 Accensione

L'impianto di accensione fa produrre la scintilla alle candele collegate alla testa del cilindro ed innesca la combustione. Tale impianto non dipende dall'impianto elettrico dell'aereo ma produce l'energia necessaria autonomamente attraverso l'uso di due magneti, che fungono un generatori di corrente elettrica corredati di trasformatore per innalzare la tensione. Un magnete è composto da una calamita avvolta di due serie di spire (primarie e secondarie). Le spire primarie producono per induzione corrente a basso voltaggio e sono collegate a massa in posizione della chiavetta d'accensione su OFF; quando la chiavetta entra in posizione L, R o BOTH il collegamento si apre e nelle spire secondarie si produce una corrente indotta ad alta tensione che viene trasmessa alle candele per provocare la scintilla.

2.2.6 Lubrificazione e raffreddamento

La funzione primaria dell'impianto di lubrificazione è di interporre una pellicola viscosa³ d'olio tra le parti in moto relativo (ad esempio cilindro e pistone) onde ridurre l'attrito e preservarne l'integrità. Altre due importanti funzioni dell'olio, inoltre, sono quella di pulire il motore da eventuali residui e quella di raffreddare il motore asportando calore (che viene poi dissipato dal flusso d'aria del radiatore e dalla permanenza nella coppa).

L'olio è mantenuto in circolazione da una pompa elettrica e la sua temperatura è controllata mediante un trasduttore elettrico: è importante che l'olio rimanga entro certi limiti di temperatura, per garantire la corretta viscosità.

Il raffreddamento principale del motore, tuttavia, è realizzato dal flusso d'aria che investe l'aeroplano; tale flusso è dirottato opportunamente verso tutti i cilindri, specialmente quelli interni che sono meno esposti degli altri. Il pilota è sempre responsabile di controllare la temperatura del motore, specialmente durante assetti inusuali come salite e discese ed in giorni particolarmente caldi.

2.2.7 Differenze con motori automobilistici

Le principali caratteristiche di un motore aeronautico non presenti in uno automobilistico sono:

- maggiore affidabilità (doppio sistema di accensione, indipendente dall'impianto elettrico);
- cilindrata ampia per basso numero di giri (per aumentare l'affidabilità);
- doppie candele per cilindro (sia per sicurezza che per aumentare la potenza);
- correttore di miscela (per migliorare il funzionamento in quota; basato su capsula barometrica);

²Si noti che perchè sia possibile, il carburatore è mantenuto in comunicazione con la pressione statica esterna.

³In aeronautica, l'olio utilizzato deve rispettare particolari requisiti di viscosità, resistenza alla temperatura e potere detergente.

- riscaldamento dell'aria motore (per evitare il congelamento, ad esempio in discesa);
- carburante non detonante e poco volatile;
- volano piccolo per ridurre le variazioni dell'albero motore poichè l'elica assolve la funzione.

2.3 Funzionamento del motore

2.3.1 Potenza e consumo

La potenza erogata dal motore è il lavoro fatto nell'unità di tempo; tale potenza viene utilizzata per far girare l'elica e tutti gli altri apparati dell'aereo (ad esempio alternatore, pompe, ecc.). Si noti che la potenza di un motore *dipende dalla densità dell'aria* e dunque da temperatura e pressione: **in una giornata di alta pressione e fredda, essa è maggiore che in una giornata di bassa pressione calda ed umida**⁴.

Oltre che per la potenza, un motore viene qualificato anche per il consumo, che si divide in *orario* e *specifico*. Il primo dipende dalla potenza erogata, è espresso in l/h e consente di determinare l'autonomia oraria. Il secondo è invece il rapporto tra consumo orario e potenza erogata ed è indice dell'efficienza del motore.

2.3.2 Miscela

Il carburante di un aereo, una miscela di idrogeno e carbonio (idrocarburo), produce, dopo la combustione, anidride carbonica e acqua (vapore). Si dice *titolo della miscela* il rapporto in peso tra aria e carburante: è detto *stechiometrico* quel titolo per cui, dopo la combustione, non restano residui né di aria né di carburante. Il titolo stechiometrico prevede 15 parti di aria per 1 di carburante: se c'è meno aria la miscela è detta *ricca* altrimenti è detta *povera*. Sia nel caso di miscela ricca che di miscela povera, la temperatura di combustione è inferiore a quella che si ottiene col titolo stechiometrico.

Nel caso di una miscela *leggermente* ricca, tuttavia, l'eccesso di carburante accelera la combustione e raffredda i gas di scarico producendo maggior potenza; tale tipo di miscela viene definita con titolo di *best power* (con *best economy*, invece, si identifica il una miscela leggermente più povera del titolo stechiometrico).

Siccome il titolo della miscela è basato sul peso, esso dipende dalla quota: in alta quota la densità dell'aria diminuisce e di conseguenza bisogna diminuire l'apporto di carburante. Per poter ottenere il titolo più adatto alla fase di volo (decollo, volo in quota, ecc.) gli aerei sono forniti di un *correttore di miscela* che permette appunto di variare il titolo. Quando il motore eroga oltre il 75% della potenza (ad esempio in decollo) o sotto i 6/7000 ft è bene avere una miscela ricca; al contrario sotto il 75% è consigliabile *smagrire*, ovvero utilizzare un titolo povero. In discesa la miscela va arricchita man mano che si torna a bassa quota.

2.3.3 Smagrimento

Si dice *smagrimento* il processo che porta da miscela ricca a miscela povera. Decidere come e quando smagrire la miscela si può capire attraverso l'uso di vari strumenti, ad esempio:

- contagiri: tirare indietro la manetta del correttore fino a sentire un aumento uniforme dei giri (un ulteriore aumento provocherebbe una diminuzione) e poi mandare di nuovo in avanti fino alla diminuzione desiderata;

⁴In inglese, si dice che la potenza del motore dipende dalle 3H: *high, hot, humid*.

- EGT (exhaust gas temperature): l'EGT è uno strumento che misura la temperatura dei gas di scarico; smagrendo si nota che la temperatura dei gas aumenta; una volta trovato il massimo (che corrisponde al titolo stechiometrico), smagrendo si ottiene il titolo di best economy, arricchendo quello di best power.

2.3.4 Aria calda

Il flusso di carburante è gestito dalla valvola a farfalla. Di fatto, per ridurre il flusso, la valvola produce una strozzatura al condotto di aspirazione; come conseguenza, la velocità del carburante aumenta e pressione e temperatura diminuiscono drasticamente.

Questo può provocare un congelamento del carburante e di conseguenza un blocco motore. Ciò può accadere in presenza di umidità visibile (pioggia, nuvole, foschia, ecc.) e **in ogni caso quando la differenza tra la temperatura ambiente e di rugiada è inferiore a 6°**.

Onde evitare questo problema, l'aria inspirata dai cilindri può venire riscaldata (su comando del pilota) passando sopra i tubi di scarico; ciò produce normalmente un abbassamento dei giri motore, ma se era presente una formazione di ghiaccio accade la cosa opposta e il motore riprende giri.

2.3.5 Detonazione e preaccensione

La combustione comincia normalmente dalla scintilla della candela e si propaga nel cilindro. In alcune condizioni, però, può succedere che ci siano altri inizi di combustione nel cilindro (ad esempio quando si sottopone il motore a carico elevato ma con basso numero di giri): si parla allora di *detonazione*. La performance del motore è ridotta e la sua integrità può essere pregiudicata.

Un fenomeno affine, detto *preaccensione*, è causato dalla presenza di residui carboniosi nel cilindro che innescano la combustione prima della candela. La differenza tra i due fenomeni è data solo dalla tempistica: la detonazione accade dopo la scintilla, la preaccensione prima.

2.3.6 Strumenti motore

I seguenti strumenti sono generalmente presenti in tutti gli aerei: *contagiri*, *manometro pressione dell'olio*, *termometro temperatura dell'olio*, *indicatori del livello carburante*, *amperometro*. Tutti questi strumenti hanno un arco verde entro cui è bene restare durante il volo, per garantire una resa ottimale e non pericolosa del motore. Altri strumenti possibili, meno usuali, sono: *MAP (manifold absolute pressure)* che indica la pressione dell'aria che entra nel motore, *manometro pressione carburante*, *flussometro* (che indica l'afflusso di carburante), *EGT (exhaust gas temperature)* e *temperatura testata dei cilindri*.

2.3.7 Potenza erogata e precauzioni

La potenza erogata dal motore dipende anche dalla densità dell'aria e di conseguenza da pressione e temperatura. Per un motore aspirato ordinario, **la perdita relativa alla quota è di circa il 2.5% per ogni 1000 ft**.

Dopo l'avviamento, è bene che il motore resti ai giri indicati dal produttore (generalmente tra 1000 e 1300 RPM) fino a che l'olio raggiunga la temperatura che garantisce la miglior viscosità per la lubrificazione.

Dopo il decollo, sebbene il motore possa lavorare a massima potenza per lungo tempo (5/10 minuti) è bene, una volta raggiunta la quota di sicurezza, ridurre la potenza a quella di salita.

In crociera, la potenza dovrebbe restare tra il 70% ed il 75% della potenza massima erogabile.

E' bene interrompere lunghe discese, infine, con tratti di volo livellato per permettere al motore di ritrovare la temperatura ottimale.

2.3.8 Anomalie

Sebbene rare, le anomalie possono sempre verificarsi. Esse hanno non sempre natura di emergenza, ma è bene essere coscienti dei problemi che comportano:

- aumento della temperatura dell'olio: la potenza deve essere ridotta e la miscela deve essere ricca; se la temperatura non cala è bene prepararsi ad un atterraggio;
- bassa pressione dell'olio motore: se la temperatura non aumenta, non dovrebbe esserci rischio immediato; se la temperatura si alza, invece, significa che la lubrificazione non avviene correttamente e bisogna prepararsi ad un atterraggio;
- ruvidità motore: se accade prima del decollo è probabilmente dovuta ad impurità presenti nel motore; bisogna allora far lavorare il motore a 2000 RPM per qualche minuto a miscela povera; se accade in quota, invece, potrebbe essere dovuta ad un errato titolo della miscela.

A.B.C.

Esiste una sigla mnemonica per ricordarsi le operazioni da fare in caso di emergenza motore:

- **A(ria)**: calda se fredda, fredda se calda; miscela ricca;
- **B(enzina)**: selettore su più pieno; pompa della benzina;
- **C(ontatti)**: sempre su BOTH.

2.4 Elica

L'elica è lo strumento meccanico che utilizza l'energia del motore per spingere all'indietro masse d'aria; per il principio di azione-reazione ciò provoca una spinta in avanti. Essa è costituita da una o più *pale* attaccate radialmente ad un mozzo solidale con l'albero motore o con un riduttore di giri.

E' detto *disco dell'elica* il cerchio descritto dall'estremità delle pale. Ogni pala ha un profilo di tipo alare ed un angolo di calettamento rispetto al piano di rotazione che diminuisce andando dal centro alla punta.

Si chiama *passo geometrico* dell'elica, la distanza di cui l'elica avanzerebbe in un giro se fosse immaginata come una vite che si avviti in un corpo; passo, disco e senso di rotazione sono i tre parametri caratteristici che contraddistinguono un'elica.

2.4.1 Velocità dell'aereo e rendimento

La potenza erogata dall'elica è il prodotto di trazione T e velocità dell'aereo TAS : $W_d = T \cdot TAS$. Per produrre trazione il vento relativo deve investire la sezione dell'elica con incidenza positiva; all'aumentare dell'incidenza aumentano sia trazione che resistenza.

Ad aereo fermo (*punto fisso*) la trazione è massima ma la potenza è nulla perchè la velocità è zero. Man mano che l'aereo prende velocità, la trazione diminuisce e la potenza aumenta fino ad un massimo che dipenda dall'elica (*elica traente*); aumentando ancora la velocità, la trazione diminuisce e quando l'incidenza è pressochè nulla cessa del tutto (*elica neutra*).

Se il processo continua ancora, l'incidenza diventa negativa e l'elica viene mossa dal flusso d'aria cedendo energia al motore (*elica a mulinello*). In quest'ultima situazione il motore viene trascinato dall'elica e l'equilibrio si ristabilisce quando quest'ultimo adegua i suoi giri a quelli dell'elica; se il processo continua ancora però, il motore può danneggiarsi per l'eccessiva forza d'inerzia.

Le eliche a passo corto sono favorevoli in fasi di decollo perchè forniscono potenza prima e le eliche a passo lungo privilegiano invece il volo di crociera.

Per aumentare la potenza erogata è possibile aumentare il numero di giri, facendo però attenzione che la velocità delle punte non diventi transonica. In tal caso, l'aumento delle vibrazioni e della resistenza diminuiscono di molto l'efficienza dell'elica.

2.4.2 Passo fisso e variabile

Mantenendo un passo fisso, il rendimento ottimale è confinato in un arco ristretto di velocità. Per tale ragione, alcuni aerei permettono di variare (a gradini o con continuità) il passo dell'elica. In tal modo è possibile avere passo corto durante il decollo e passo lungo in quota durante la crociera. Il *regolatore dei giri* cambia il passo automaticamente in funzione della velocità dell'aereo e permette di mantenere un rendimento costante a tutte le velocità.

L'intervallo di variabilità del passo è circa compreso tra il 20% ed il 25%, ma in alcuni aerei può arrivare fino al 90% invertendo così la trazione; ciò è utile per ridurre lo spazio di atterraggio e anche durante le manovre, per fare retromarcia.

2.4.3 Effetti sul velivolo

L'elica produce sull'aereo due tipi di effetti: aerodinamici e meccanici. I primi sono dovuti a:

- flusso elicoidale sul orizzontale piano di coda;
- flusso elicoidale sul piano verticale;
- effetto *propeller (P)*.

I secondo, invece sono:

- effetto coppia-controcoppia;
- effetto giroscopico.

L'elica produce un flusso d'aria elicoidale che si avvolge intorno alla fusoliera e impatta i piani di coda. A bassa velocità, l'angolo d'incidenza del flusso è maggiore e gli effetti sono più forti. Per un elica destrorsa, il flusso invece il piano verticale da sinistra e provoca un'imbardata verso sinistra. Investe inoltre il piano orizzontale e provoca un rollio verso destra. L'effetto propeller è invece causato dal fatto che, in assetti inusuali come salite e discese, la pala superiore e quella inferiore non producono uguale trazione. A causa di questa asimmetria l'asse di trazione è spostato verso destra, con conseguente effetto imbarcante a sinistra.

L'effetto coppia-controcoppia è causato dal fatto che, siccome il complesso motore-elica ruota in un senso, per azione-reazione l'effetto tende a ruotare nell'altro.

L'effetto giroscopico, infine, è prodotto dal fatto che l'aereo si comporta come un giroscopio per cui quando viene spostato l'asse di rotazione (longitudinale) si verifica un moto di precessione. Ad esempio, se una turbolenza fa picchiare l'aereo, la precessione causa una imbardata a sinistra; analogamente, se l'aereo vira a sinistra esso tende a cabrare. Tale effetto è maggiore quanto maggiore è la velocità. Per ricordarsi come la precessione si comporta è possibile usare la regola della mano sinistra.

2.5 Strumentazione di volo, EFIS, bussola

Gli strumenti dell'aereo si possono classificare secondo le seguenti categorie:

- controllo motore;
- di volo;
- di radiocomunicazione;
- per la radionavigazione;

2.5.1 Strumenti di volo tradizionali

Gli strumenti fondamentali di un aereo leggero sono sei e sono disposti in una matrice 2x3 da sinistra a destra e dall'alto al basso come segue:

- *anemometro*;
- *orizzonte artificiale*;
- *altimetro*;
- coordinatore di virata (sbandometro);
- *giroscopio direzionale*;
- variometro.

I tre strumenti più importanti (evidenziati in corsivo nell'elenco sopra) sono disposti secondo una configurazione a T, con l'altimetro al centro.

Altimetro, variometro e anemometro sono detti *strumenti barometrici* perchè utilizzano la pressione dell'aria (statica/dinamica) per il funzionamento. Il direzionale e l'orizzonte artificiale, invece, sono detti *strumenti giroscopici* poichè si basano sull'uso di giroscopi. Il funzionamento dettagliato di questi strumenti verrà dato nelle sezioni seguenti.

2.5.2 EFIS

L'*EFIS* (*electronic flight instrument system*) è il moderno sistema digitale che integra tutti gli strumenti di volo: i sensori degli strumenti nell'EFIS sono messi in zone dell'aereo logisticamente appropriate ed i dati vengono elaborati elettronicamente.

Esso si compone solitamente di due schermi: il *PFID* (*primary flight display*) che riprende sostanzialmente gli strumenti tradizionali discussi nel paragrafo precedente ed l'*MFD* (*multi-function display*) che è solitamente utilizzato per presentare carte di navigazione e strumenti motore.

2.5.3 La bussola

La bussola è uno dei primi strumenti di navigazione mai creati e si basa sul campo magnetico terrestre. La terra è composto di un nucleo ferroso che, grazie alla rotazione, produce un campo elettromagnetico. Le linee di flusso magnetico intorno alla terra sono dette *meridiani magnetici* e sono paralleli alla superficie terrestre solo all'Equatore, mentre ai poli diventano sostanzialmente perpendicolari.

La componente verticale dei meridiani magnetici, detta *inclinazione magnetica*, influisce sul funzionamento della bussola rendendola inaffidabile vicino ai poli.

A causa di giacimenti ferrosi sotto la superficie terrestre, i meridiani magnetici hanno un andamento irregolare e il campo magnetico risulta dunque irregolare. Inoltre, essi sono disallineati rispetto ai meridiani geografici in quanto il polo nord geografico e quello magnetico sono distinti; tale disallineamento si chiama *declinazione magnetica*. Sono dette *linee isogone* le linee che connettono i punti che hanno uguale declinazione.

La bussola aeronautica

Nell'aereo, la bussola è collocata sulla parte alta e al centro del parabrezza ed è pertanto separata dagli altri strumenti. La parte sensibile è contenuta in un involucro riempito di cherosene ed è libera di ruotare ed inclinarsi per circa 20°; la direzione seguita è indicata da una scala graduata chiamata *corona*. Durante le virate, la corona sembra ruotare: in realtà essa è ferma ed è l'aereo che gira relativamente. Si noti che nella bussola aeronautica, le prue crescenti si trovano a sinistra e quelle decrescenti: questo appare inizialmente come contro intuitivo.

2.5.4 Errori della bussola

La bussola aeronautica è soggetta a diversi errori di lettura, che devono essere considerati durante il volo:

- *declinazione*: è la differenza tra nord geografico (anche detto *vero*) e nord magnetico; le carte aeronautiche riportano le linee isogone, che collegano i punti di ugual declinazione magnetica;
- *deviazione*: è l'errore provocato dalle strutture metalliche e dagli apparati dell'aereo; viene generalmente compensata dal costruttore e non è mai maggiore di 2° o 3°;
- *errore di virata*: per via del fatto che le i meridiani magnetici non sono uniformemente paralleli alla terra, le virate a partire da nord o da sud provocano un falso allineamento della bussola: partendo da nord, la bussola indicherà dapprima opposta alla virata e poi rimmarrà in ritardo; virando da sud, invece, la bussola segnerà in anticipo;
- *errore di accelerazione*: in accelerazione o decelerazione, sempre per via dell'inclinazione verticale dei meridiani magnetici, la bussola sarà in errore su prue est e ovest (indicando nord nel primo caso e sud nel secondo);

2.5.5 Avvisatore di stallo

L'avvisatore di stallo emette un segnale acustico o visivo in prossimità di una situazione di stallo. Esso è disposto sul bordo d'attacco dell'ala e funziona o per deflessione o per depressione.

2.6 Strumenti barometrici

2.6.1 Aria ISA e prese di rilevamento

Gli strumenti barometrici dell'aereo si basano sulla definizione di valori di riferimento dell'aria chiamati *aria standard (ISA)*:

- pressione a livello del mare = 1013.25 hPa (29.92 pollici mercurio);

- temperatura a livello del mare = 15°C;
- gradiente barico a bassa quota = 27ft/hPa;
- gradiente termico fino alla tropopausa = 6.5°/1000m (circa 2° ogni 1000ft);
- densità a livello del mare = $\rho_0 = 1225\text{kg/m}^3$.

L'aria reale è generalmente diversa da quella standard: questa è la causa degli errori di misurazione negli strumenti barometrici e richiede una compensazione.

Gli strumenti che usano la pressione esterna sono l'altimetro, il variometro e l'anemometro. I primi due utilizzano solo la *pressione statica*, ovvero una pressione misurata fuori dal flusso dinamico dell'aereo; l'ultimo utilizza, in aggiunta, la *pressione dinamica*, presa da una sonda detta *tubo di Pitot*, disposta in modo da risentire il flusso aerodinamico. La pressione dinamica è definita da $p_d = \frac{1}{2}\rho V^2$ mentre la pressione totale è la somma delle pressioni statiche e dinamiche.

Il tubo di Pitot è costituito da due tubi coassiali: quello interno è collegato all'esterno e prende la pressione d'impatto dell'aria; quello esterno, a forma di cono, ha invece dei forellini per rilevare la pressione statica. Spesso è riscaldato da delle resistenze per evitare l'occlusione da congelamento, quando le temperature sono prossime allo zero ed è generalmente situato sotto una semiala.

La presa statica è invece si trova in una posizione in cui non arrivi la pressione dinamica, spesso sul lato della fusoliera.

2.6.2 Variometro

Il variometro indica la velocità verticale dell'aereo e funziona misurando la differenza di pressione statica (corrente con quella passata). Proprio perchè funziona attraverso un serbatoio che conserva una pressione precedente, le informazioni fornite riguardo al rateo di discesa/salita sono sempre in ritardo.

2.6.3 Altimetro

L'altimetro indica la distanza verticale dell'aereo rispetto ad una superficie preimpostata: esso è in effetti un barometro che traduce la pressione in altezza mediante le specifiche dell'aria ISA. Il suo elemento sensibile è costituito da una capsula che si deforma per la depressione esistente in quota.

Regolazioni caratteristiche

L'altimetro può essere regolato in tre modi differenti:

- per *altitudine* (**QNH**): rispetto al livello del mare;
- per *altezza* (**QFE**): rispetto al terreno (superficie aeroporto);
- per *livello di volo* (**QNE**): rispetto all'isobara standard a 1013.25 hPa.

La regolazione usata generalmente è quella per QNH ed è comunque obbligatoria negli spazi aerei non controllati, sotto i 3000 ft di altezza. A quote elevate, tuttavia viene utilizzata la regolazione per livelli di volo QNE (ciò verrà visto in dettaglio successivamente).

Errori dell'altimetro

La differenza di pressione tra aria reale ed aria standard è la principale causa di errori nell'altimetro. Essa viene compensata con la regolazione via QNH. Se durante un volo di passa da una zona di alta pressione ad una di bassa pressione senza regolare l'altimetro, l'aereo si ritroverà più basso di quanto viene riportato; la stessa cosa accadrà passando da una zona calda ad una fredda.

2.6.4 Anemometro

L'anemometro rileva la velocità all'aria dell'aereo, ricavandola dalla pressione dinamica. Siccome la densità dell'aria varia con quota e condizioni meteo, lo strumento utilizza il parametro di densità dell'aria standard $\rho_0 = 1225 \text{ kg/m}^3$. La velocità così ottenuta si chiama *IAS* (*indicated air speed*); essa è ricavata per differenza tra la pressione dinamica fornita dal tubo di Pitot e la pressione statica fornita dalla relativa presa. La IAS, in effetti, è una misura della pressione dinamica sull'aereo e dunque è in diretta correlazione con le prestazioni dell'aereo⁵.

Velocità e compensazioni

L'anemometro produce diversi errori, causati da diverse ragioni. Come visto nel paragrafo precedente, la differenza tra pressione reale e standard rappresenta la principale fonte di errore e deve essere compensata. Allo stesso modo, l'errore di *postazione* (che si verifica quando l'aereo non è in volo rettilineo orizzontale, per scomposizione della forza aerodinamica in componente verticale ed orizzontale), deve essere compensato dal costruttore; la velocità risultante dopo la compensazione viene chiamata *CAS* (*calibrated air speed*). L'errore di *compressibilità* (che si verifica quando si viaggia a velocità $> 220 \text{ kt}$, per cui l'aria subisce una compressione consistente), deve essere corretto per dare origine alla *EAS* (*equivalent air speed*). L'errore di *densità*, infine, una volta corretto produrrà la velocità reale dell'aereo, detta *TAS* (*true air speed*). In complesso, dunque, le correzioni alla velocità prodotte dall'anemometro sono:

- IAS, letta sull'anemometro $\sqrt{\frac{2(p_{tot}-p_s)}{\rho_0}}$;
- CAS, ottenuta correggendo la IAS per l'errore di postazione;
- EAS, ottenuta correggendo la CAS per l'errore di compressibilità;
- TAS, ottenuta correggendo la EAS per l'errore di densità.

Per procedure VFR a bassa velocità, le correzioni CAS e EAS sono solitamente trascurate. Si noti che, siccome sia prestazioni dell'aereo che velocità dipendono dalla pressione dinamica, **le velocità indicate caratteristiche di stallo, massima efficienza, manovra, ecc. non dipendono ne' da quota ne' da temperatura.**

2.6.5 Ostruzione della presa statica

L'ostruzione della presa statica impatta su tutti e tre gli strumenti barometrici; quando essa è totale, accadono le seguenti cose:

- **l'altimetro non varia, continuando a mostrare lo stesso valore;**

⁵La pressione dinamica si esprime come $p_d = \frac{1}{2}\rho V^2$; di conseguenza è possibile riscrivere la portanza come $P = p_d c_p S$ e la resistenza come $R = p_d c_r S$.

- il variometro segna zero;
- l'anemometro segna meno velocità se l'aereo sale e più velocità se l'aereo scende.

2.6.6 Ostruzione della presa dinamica

L'ostruzione della presa dinamica impatta solo sull'anemometro. Se l'ostruzione accade gradualmente, cosa tipica, l'anemometro si porta a zero e lo mantiene. Al contrario, se l'ostruzione accade di colpo **l'anemometro segna di più se l'aereo sale e di meno se l'aereo scende**. Ciò è estremamente pericoloso e può portare ad uno stallo.

2.7 Strumenti giroscopici

Un corpo che ruota intorno ad un asse con velocità elevata e massa sufficientemente lontata dall'asse è detto *giroscopio*; esso esibisce due comportamenti principali:

- *rigidità*: tendenza a mantenere fisso l'asse di rotazione;
- *precessione*: tendenza a mantenere cambiare il piano di rotazione se una forza estera forzi un cambiamento dell'asse di rotazione; il piano acquisito risulta perpendicolare a quello della forza applicata.

In aeronautica, i giroscopi utilizzati devono avere almeno 20000 giri al minuto. I giroscopi esibiscono tre tipi di errori: *deriva* (precessione di lieve entità dovuta agli attriti), *precessione apparente* e *precessione da trasporto*. Nei voli di breve durata sia precessione apparente che da trasporto possono essere trascurati, mentre la deriva richiede dei riallineamenti. Gli strumenti giroscopici sono tre: *indicatore di virata*, *girodirezionale* e *indicatore di assetto*.

L'alimentazione di questi strumenti è diversificata in elettrica (indicatore di virata) e pneumatica (gli altri), per assicurare supporto anche in caso di avaria di uno dei due impianti.

2.7.1 Indicatore di virata

L'indicatore di virata è il primo giroscopico costruito ed ha permesso il cosiddetto *volo cieco*. Esso indica il senso ed il rateo di virata ed ha delle linee di fede in corrispondenza del rateo standard (2 minuti/360°). E' basato su un giroscopio a due gradi di libertà, in cui è vincolato l'asse verticale e ruota sull'**asse verticale**. Lo strumento indica, in realtà, le **velocità angolare di imbardata**, per cui tale indicazione non è strettamente collegata all'inclinazione delle ali; può essere ad esempio neutro in caso di scivolata d'ala, oppure avere una inclinazione durante le accostate di rullaggio in cui le ali sono allineate.

L'indicatore di virata è spesso associato allo sbandometro per produrre così il *virosbandometro*. Lo sbandometro è uno strumento praticamente esente da guasti fatto da una pallina in un tubo riempito di fluido viscoso. La pallina è soggetta alla risultante delle forze trasversali agenti sull'aereo, peso e forza centrifuga. Se, in virata, la pallina è spostata all'interno significa che la componente peso è maggiore; viceversa se è spostata all'esterno allora è la forza centrifuga ad essere maggiore. Se l'aereo è in volo orizzontale e la pallina è spostata, allora si è in scivolata d'ala.

2.7.2 Direzionale

E' lo strumento che indica la direzione della prua ed è basato su un giroscopio con tre gradi di libertà, con asse di rotazione **orizzontale**. Il movimento relativo tra la cassa che contiene lo strumento ed il giroscopio indica le variazioni di rotta. Si noti che **il direzionale non ha capacità di indicare il nord, ma semplicemente conserva l'allineamento che ha ricevuto**. Pertanto, esso va allineato con la bussola prima dell'utilizzo; a causa della deriva causata dagli attriti, inoltre, esso va riallineato ogni 15/20 minuti (o meno, in caso di manovre accentuate). Sulla scala graduata, è presente un indicatore chiamato *heading hog* che serve a mantenere la rotta per l'autopilota o come ausilio alla navigazione. Durante l'esame PPL la tolleranza all'errore di rotta è di $\pm 10^\circ$.

2.7.3 Indicatore d'assetto

L'indicatore d'assetto (anche detto *orizzonte artificiale*), consente di riconoscere i movimenti dell'aereo lungo l'asse longitudinale ed il suo assetto. Esso è fondamentale in volo strumentale, ma solo di supporto in volo visivo.

Esso è costituito da un giroscopio a tre gradi di libertà, che gira intorno all'**asse verticale** ed è fornito di un meccanismo automatico di regolazione. Ha una tolleranza di $\pm 70^\circ$ d'inclinazione longitudinale e $\pm 110^\circ$ d'inclinazione laterale.

2.8 Punti importanti

- La fusoliera contiene la cabina e serve da punto di connessione per i vari componenti dell'aereo.
- Le ali possono essere attaccate nella parte alta, media o bassa della fusoliera e sono progettate per fornire la massima portanza possibile.
- L'impennaggio consiste negli stabilizzatori verticali ed orizzontali.
- Il trim serve a ridurre lo sforzo del pilota sui comandi.
- In aerei di piccola taglia ad elica, l'energia necessaria al volo è fornita da un motore a quattro tempi in cui le fasi sono: *aspirazione*, *compressione*, *combustione* ed *espulsione*.
- Il carburatore mescola la benzina e l'aria nella giusta proporzione e fornisce il mix alla camera di combustione, mediante un tubo di Venturi.
- Il titolo della miscela può essere regolato dal pilota tramite una manetta apposita.
- Si può verificare del ghiaccio nel carburatore a causa della depressione nel tubo di Venturi, specialmente in giornate umide (meno di sei gradi con la temperatura di rugiada) o fredde (meno di 21°); va usata sempre aria calda in tal caso.
- La detonazione e preaccensione sono due fenomeni che accadono quando il carburante brucia senza la scintilla della candela, ma dopo o prima rispettivamente.
- Lasciare in hangar un aereo col pieno di benzina, previene la formazione di acqua da condensa nei serbatoi.
- Lo stato dell'olio nel motore si può monitorare con gli indicatori di pressione e temperatura.

- Un'elica a passo fisso utilizza un solo passo di rotazione ed è ottimizzata per una sola fase del volo (es. decollo o crociera); al contrario, un'elica a passo variabile può mantenere costanti i giri variando il passo ed essere efficiente in un arco più ampio di velocità.
- L'alternatore produce corrente alternata e poi la converte in continua per l'uso dagli impianti dell'aereo.
- L'anemometro, il variometro e l'altimetro sono strumenti barometrici che usano la pressione statica e dinamica per il funzionamento; l'anemometro è l'unico strumento che usa la pressione dinamica.
- L'aria standard ISA a livello del mare è calcolata con una pressione di 1013.25 hPa a 15° C.
- Nella parte bassa dell'atmosfera il gradiente termico è di 2° ogni 1000 ft.
- L'anemometro ha scale colorate che indicano velocità ottimali per diverse fasi del volo: operazioni normali, turbolenza, stallo, flaps, ecc.
- La velocità di manovra, è la massima velocità a cui è possibile fare manovre improvvise accentuate senza provocare danni strutturali all'aereo.
- A prescindere dalla quota, le velocità indicate dall'anemometro sono corrette.
- Altitudine è la distanza verticale dal mare, altezza è quella dalla terra e livello di volo dalla isobara standard ISA.
- Volando da alta a bassa pressione o da caldo a freddo, l'altimetro indicherà più di quello che l'aereo vola.
- L'ostruzione del tubo di Pitot influisce solo sull'anemometro, mentre l'ostruzione della presa statica influisce su tutti gli strumenti barometrici.
- Un giroscopio manifesta gli effetti di rigidità e precessione; la deriva giroscopica causa, collateralmente, un disallineamento degli strumenti.
- L'indicatore di virata è alimentato elettricamente mentre direzionale e orizzonte artificiale pneumaticamente.
- Per via della deriva, il direzionale deve essere allineato periodicamente con la bussola.
- Nell'emisfero nord, la bussola mostra una virata verso nord se si accelera ed una virata a sud se si decelera volando in direzione est o ovest; nessun errore si verifica se si vola in direzione nord o sud.

Capitolo 3

Prestazioni dell'aereo

3.1 Peso e bilanciamento

3.1.1 Effetto del peso

Il peso influisce in maniera consistente sulle prestazioni dell'aeroplano. In particolare:

- aumenta la distanza di decollo (e quella di arresto per un'emergenza);
- peggiora il rateo di salita;
- aumenta tutte le velocità caratteristiche (V_x , V_y , ecc.) - ad esempio per un aumento del 10% del peso, le velocità aumentano del 5%;
- aumenta le sollecitazioni sulla struttura dell'aereo a parità di fattore di carico;
- aumenta i consumi;
- aumenta la velocità e la distanza per l'atterraggio - ad esempio per un aumento del 10% del peso la distanza di atterraggio aumenta del 20%;
- aumenta le sollecitazioni sul carrello.

Visto che l'energia cinetica è $E_c = mV^2$, un aumento di peso sarà un fattore importante in caso di decollo e atterraggio, fasi in cui tale energia va rispettivamente guadagnata e persa. Se dunque si vola con un carico superiore a quello consentito, tutte le prestazioni dell'aeroplano verranno compromesse.

3.1.2 Bilanciamento

La posizione del baricentro dell'aereo dipende dalla distribuzione del carico. Visto che le forze agenti sull'aereo in senso verticale sono *peso*, *portanza* e *deportanza dei piani di coda*, l'equilibrio tra esse viene alterato da un baricentro avanzato (che tende ad abbassare il muso del velivolo) ed un baricentro arretrato (che invece alzerà il muso). Spostando il carico all'indietro, infatti, i piani di coda diventeranno portanti e viceversa.

In generale, un baricentro avanzato (purchè nei limiti consentiti) tende ad avere un comportamento stabile poichè abbassando il muso dell'aereo favorisce l'aumento della velocità. Se troppo avanzato, tuttavia, rende l'aereo *pesante* e impone un'eccessiva deportanza dei piani di coda ed il timone di profondità potrebbe non riuscire a bilanciare il momento picchiante. Al contrario, un baricentro arretrato rende l'aereo più *leggero* e produce gli effetti opposti.

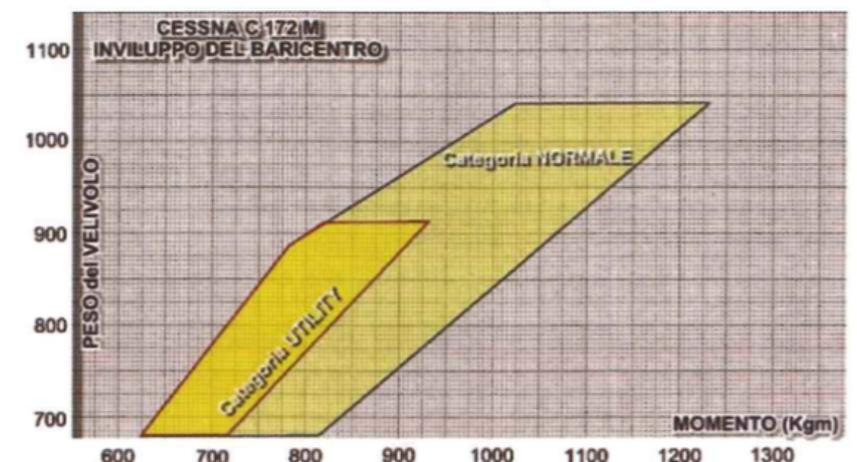


Figura 3.1.1: Grafico dell'involuppo del baricentro per un Cessna C172.

3.1.3 Calcolo di peso e centraggio

Per volare in sicurezza è necessario calcolare peso e posizione del carico al fine di conoscere il baricentro. Tecnicamente, il baricentro viene calcolato dividendo la somma dei vari momenti/peso (rispetto ad una linea di riferimento) per il peso totale dell'aereo:

$$B = \frac{\sum_{i=1}^N p_i b_i}{\sum_{i=1}^N p_i} \quad (3.1.1)$$

dove p_i sono i vari pesi dell'aereo e b_i sono i rispettivi bracci (possiamo pensare ad un momento come ad un peso moltiplicato per il rispettivo braccio).

Ogni costruttore fornisce, nel manuale di volo, una tabella da riempire per calcolare il baricentro di un aereo: in generale, **vanno moltiplicati tutti i pesi per i rispettivi bracci e il tutto va sommato; questo valore va poi diviso per il peso totale.** Il costruttore fornisce inoltre un grafico detto di *involuppo del baricentro*, i cui assi sono peso/momento oppure braccio/momento; il risultato del calcolo effettuato va quindi posizionato su tale grafico e va verificato che si trovi nell'area detta *normale* (in caso di volo semiacrobatico esso deve trovarsi nell'area detta *utility*).

La figura 3.1.3 mostra il grafico dell'involuppo per un Cessna C172, in cui gli assi sono peso/momento.

Tranne che per specifici aereomobili, in generale non è possibile occupare tutti i posti disponibili ed avere il pieno di carburante restando all'interno della curva normale.

3.1.4 Pesì normati dell'aereo

Esistono quattro pesi normati dell'aereo:

- **peso base operativo (PBO):** è il peso a vuoto dell'aereo comprensivo dell'equipaggiamento, sommato al peso dell'equipaggio con relativo bagaglio;
- **peso massimo al decollo (PMD = PBO + carburante):** è il peso a vuoto dell'aereo comprensivo dell'equipaggiamento, sommato al peso dell'equipaggio con relativo bagaglio ed al peso del carburante;

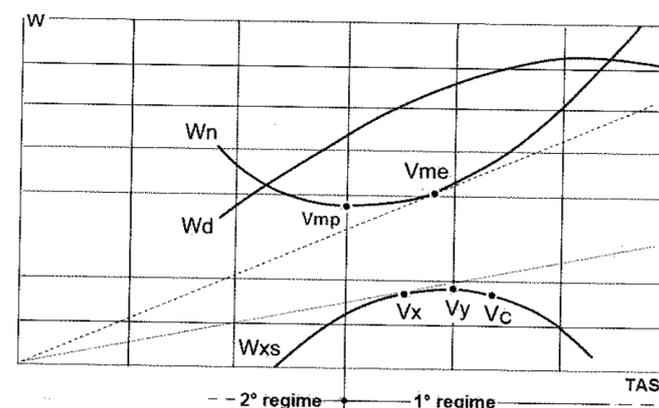


Figura 3.1.2: Rapporto tra potenza e velocità; esubero di potenza.

- **peso a zero carburante (PZC = PBO + peso passeggeri con bagaglio)**: è il peso a vuoto dell'aereo comprensivo dell'equipaggiamento, sommato al peso dell'equipaggio con relativo bagaglio ed al peso dei passeggeri con relativo bagaglio;
- **carico utile (CU = PMD - peso a vuoto con equipaggiamento)**: è la differenza tra il peso massimo al decollo ed il peso a vuoto dell'aereo comprensivo dell'equipaggiamento.

3.1.5 Velocità di salita ripida e rapida

In linea generale, il rateo di salita di un aereo dipende dalla differenza di potenza che un motore può erogare e la potenza che l'aereo richiede durante il volo livellato; tale differenza, ovviamente, decresce col peso.

Normalmente si fa riferimento a due velocità anemometriche caratteristiche (già viste brevemente nel paragrafo 1.8.1), quando si cerca di ottimizzare le prestazioni del volo. Esse sono la cosiddetta velocità di *salita ripida* o V_x e la cosiddetta velocità di *salita rapida* o V_y . A pari quantità di tempo, la prima garantisce di raggiungere il miglior angolo di rampa mentre la seconda garantisce il miglior angolo di salita. In altri termini, con una salita ripida l'aereo prende quota in meno spazio orizzontale (e dunque può superare ostacoli alti prossimi alla pista) mentre con una salita rapida esso prende quota in meno tempo.

La figura 3.1.5 mostra una variante della figura 1.8.1 mostrata in precedenza. In tale variante viene rappresentato anche l'*eccesso di potenza* $Wxs = Wd - Wn$; come si può notare, la velocità V_y si trova in corrispondenza della tangente passante per l'origine degli assi, ovvero sul massimo della curva di esubero di potenza. Essa, inoltre, è relativamente vicina alla velocità di massima efficienza V_{me} . Si noti, inoltre, come la velocità di crociera V_c ha lo stesso consumo di V_x ma è più elevata di V_y configurandosi dunque come ideale durante la fase di crociera. Durante il decollo, è opportuno mantenere la velocità di salita rapida per avere un certo distacco dalla velocità di stallo e godere di una buona manovrabilità dell'aereo, garantendo inoltre (in virtù di un assetto non troppo cabrato) un miglior raffreddamento del motore. Sia la V_x che la V_y dipendono dal passo dell'elica dell'aereo.

3.1.6 Massima autonomia

Dato che il consumo di un aereo è, in linea di massima, proporzionale alla potenza erogata, volando in velocità di massima efficienza V_{me} si raggiungerà la *massima autonomia chilometrica*

(*MAK*); allo stesso modo, volando in velocità di minima potenza V_{mp} si otterrà la *massima autonomia oraria (MAO)*. Ovviamente, entrambe le autonomie cambiano in presenza di vento: volando con vento contrario, infatti, sarà opportuno andare più veloci per ridurre i consumi; al contrario, volando con vento in coda si dovrà ridurre la manetta (senza perdere velocità per via del vento) per risparmiare carburante. Per trovare la velocità di massima efficienza in presenza di vento contrario, si dovrà utilizzare il grafico di figura 3.1.5 spostando l'origine degli assi verso destra della velocità del vento e si dovrà poi tracciare la tangente alla curva Wn : il punto di tangenza rappresenta la nuova velocità di massima efficienza. In caso di vento in coda, si procederà all'inverso, spostando cioè l'origine degli assi a sinistra. Raramente, durante la fase di crociera si manterra la V_{me} ; le considerazioni fatte riguardo ai consumi in presenza di vento, tuttavia, rimangono comunque valide a prescindere dalla velocità mantenuta.

3.1.7 Prestazioni in aria ISA

Oltre che dal peso dell'aereo, le prestazioni sono determinate dalle condizioni di densità dell'aria. Tale densità varia ovviamente di luogo in luogo e di momento in momento; per questo, si fa di solito riferimento a condizioni standard (aria ISA, cfr. paragrafo 2.6.1) per descrivere le prestazioni dell'aereo. **Se la pressione è superiore a quella ISA e la temperatura inferiore, le prestazioni saranno superiori; con bassa pressione e alta temperatura, al contrario, esse saranno inferiori.**

La densità dell'aria è chiamata, in aeronautica, *DA (density altitude)*; tuttavia, per calcolare le prestazioni con le tabelle del manuale di volo, non è necessario calcolarla in quanto normalmente si usano la *PA (pressure altitude)* e la temperatura. La prima si legge sull'altimetro regolato a 1.013,25 mPa, mentre la seconda sul termometro di bordo.

Le prestazioni più importanti per il pilota sono, ovviamente, la distanza e la velocità di decollo, il rateo di salita, la velocità di crociera, i consumi, la distanza e la velocità di atterraggio. Si tenga presente, tuttavia, mentre i valori di prestazione del velivolo su cui si vola sono stati calcolati da nuovo e da piloti collaudatori, le condizioni usuali sono peggiori. E' pertanto consigliabile applicare un coefficiente peggiorativo del 10% almeno ai valori del manuale, verificando tuttavia di restare entro parametri di sicurezza.

3.2 Tabelle e grafici di prestazione

In generale, ogni aereo viene fornito con un manuale di volo che descrive, tra le altre cose, le prestazioni.

Tipicamente ciò accade attraverso grafici o tabelle che coordinano temperature, densità dell'aria e peso. Nel prossimo paragrafo si riportano, a titolo di esempio due casi specifici: una tabella relativa al Cessna C172 ed un grafico relativo al Piper PA28.

3.2.1 Esempi

La tabella riportata in figura 3.2.1 presenta i valori relativi a corse e distanze di atterraggio per il C172, ipotizzando di avere una pista d'asfalto e di essere in assenza di vento.

I parametri indicati in tabella vanno incrementati del 10% per ogni 2 nodi di vento in coda e la distanza va ridotta del 15% se si utilizza una pista d'erba (che genera più attrito). Si noti come la corsa di rullaggio aumenta all'aumentare della temperatura e dell'altitudine.

Il grafico di figura 3.2.1, invece, mostra la performance di atterraggio per un Piper PA28. Il grafico è suddiviso in tre sezioni verticali: la prima considera l'effetto della temperatura, la seconda del peso e la terza del vento. A titolo di esempio, per un atterraggio a 2300 piedi, con un

IAS a 50 ft	Pressure Altitude	Temp 0°C		Temp 16°C		Temp 20°C		Temp 30°C		Temp 40°C	
		corsa di rullaggio mt	distanza a 50 ft	corsa di rullaggio mt	distanza a 50 ft	corsa di rullaggio mt	distanza a 50 ft	corsa di rullaggio mt	distanza a 50 ft	corsa di rullaggio mt	distanza a 50 ft
60 Kts / 69 Mph	SL	151	367	155	376	162	386	166	395	172	405
	1000	155	376	162	386	168	396	172	405	178	416
	2000	162	386	168	396	174	407	180	418	186	428
	3000	167	396	174	407	180	418	186	428	192	439
	4000	174	407	180	418	187	430	194	440	200	451
	5000	180	418	187	431	194	442	200	453	207	465

Figura 3.2.1: Corse e distanze di atterraggio per il Cessna C172.

peso di 2264 libbre, una temperatura di 21° e 5 nodi di vento frontale, la distanza di atterraggio è di 1290 piedi (linee tratteggiate nel grafico).

3.3 Punti importanti

- Il peso e la distribuzione del carico, hanno influenza sulle prestazioni dell'aereo.
- Per calcolare il baricentro dell'aereo, vanno sommati i momenti relativi a tutti i pesi dell'aereo e il risultato va poi diviso per il peso totale.
- Un aeroplano sovraccarico subirà una diminuzione delle performance; esso avrà una corsa di decollo più lunga, un rateo di salita inferiore, una velocità di stallo più alta, meno autonomia ed una maggiore corsa per l'atterraggio rispetto ad un aereo con carico appropriato.
- Spostando il baricentro in avanti si aumenta la stabilità dell'aereo, grazie alla maggiore forza peso dei piani di coda; esso avrà tuttavia una velocità di stallo più alta.
- Se il baricentro sarà spostato verso poppa, invece, l'aereo avrà meno stabilità verticale e potrebbe essere impossibile il recupero dallo stallo o dalla vite.
- I quattro pesi normati dell'aereo sono: il peso base operativo (PBO), il peso massimo al decollo (PMD), il peso a zero carburante (PZC) ed il carico utile (CU).
- Il manuale di volo presenta diverse grafici e tabelle che permettono di predire le performance dell'aereo in tutte le fasi del volo: decollo, salita, crociera e atterraggio.
- La density altitude (DA), il vento e le condizioni della pista possono incidere notevolmente sulle performance dell'aereo.
- Le performance di decollo dipendono in gran parte da fattori che possono essere misurati in anticipo.
- E' possibile scomporre le componenti del vento in vento frontale e laterale usando gli appositi grafici.

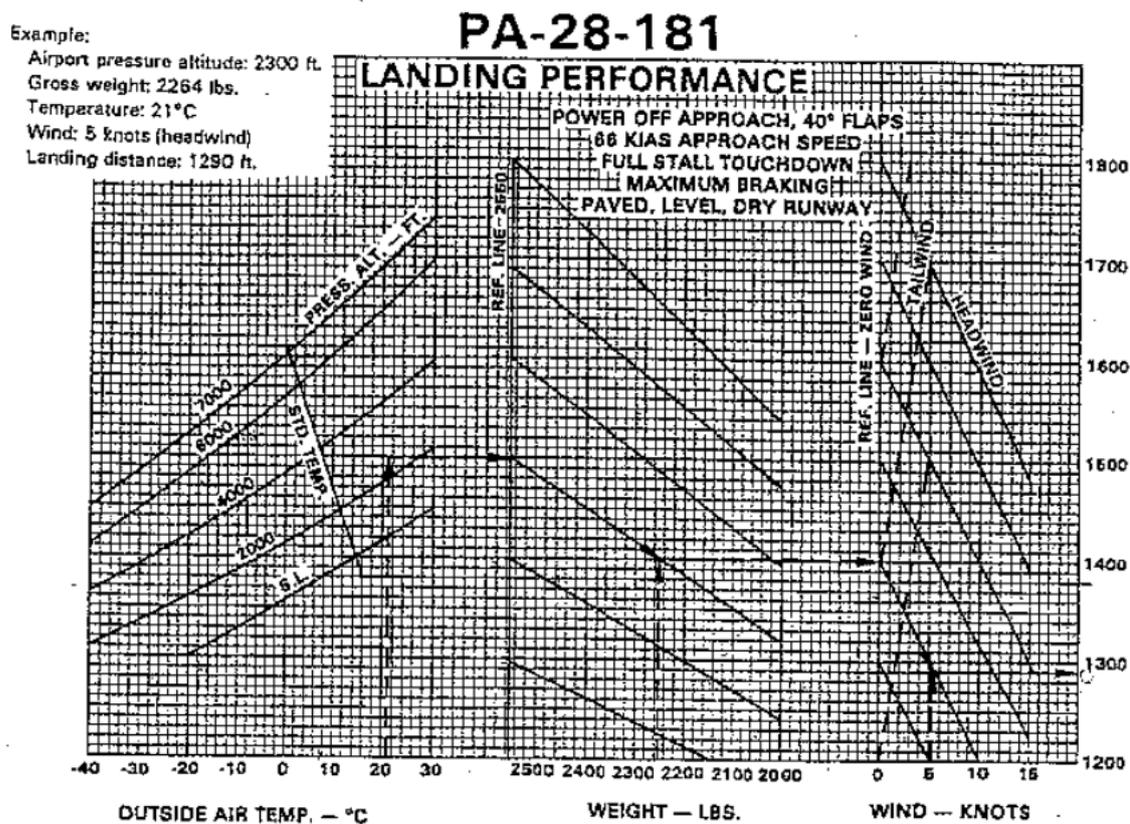


Figura 3.2.2: Performance di atterraggio per il Piper PA28.

- Il rateo di salita V_x è usato per arrivare ad una determinata altitudine in meno distanza orizzontale.
- Il rateo di salita V_y è usato per raggiungere una determinata altitudine in meno tempo.
- Nel scegliere una velocità di crociera è opportuno valutare i consumi, la distanza e gli effetti del vento.

Capitolo 4

Regolamentazione aeronautica

4.1 Autorità aereonautiche

4.1.1 ICAO

La regolamentazione aeronautica è l'insieme di norme che devono essere osservate durante il volo. La prima importante formalizzazione di tali norme è stata fatta a Chicago nel 1944. I rappresentanti di 52 si sono riuniti per discutere i problemi e lo sviluppo dell'aviazione e da tale incontro è nato l'ICAO (International Civil Aviation Organization).

Uno degli esiti della convenzione di Chicago è stato anche la creazione delle cosiddette *SARPS* (*standard and recommended practices*) e *PANS* (*procedures for air navigation services*). Le prime sono delle prassi per il volo, descritte in annessi: l'adozione degli annessi *standard* è obbligatorio per gli stati membri dell'ICAO mentre gli annessi *recommended* sono di adozione facoltativa. Le *PANS*, descritte in *DOC*, sono invece dei consigli pratici per attuare le *SARPS* ed anche la loro adozione è facoltativa. Solamente alcuni degli annessi e dei *DOC* sono interessanti per il pilota PPL.

4.1.2 Libertà dell'aria

Nella conferenza di Chicago sono state anche approvate cinque libertà dell'aria: le prime due sono dette *tecniche* e sono state accettate da tutti gli stati membri. Le ultime tre, dette *commerciali*, sono invece soggette ad accordi tra gli stati interessati. Esse garantiscono i seguenti diritti:

1. **diritto di un'aereo appartenente ad uno stato di sorvolare lo spazio aereo di un altro stato contraente;**
2. **diritto di atterrare nel territorio degli altri stati contraenti, per scopi non commerciali;**
3. diritto di sbarcare merci e passeggeri in uno stato diverso da quello di appartenenza;
4. diritto di imbarcare merci e e passeggeri in uno stato diverso da quello di appartenenza;
5. diritto di imbarcare passeggeri e merci di qualsiasi altro stato contraente.

4.1.3 Normativa ed enti italiani

Le regole e le procedure dello spazio aereo italiano sono conformi agli annessi 2 ed 11 ICAN ed al PAN DOC 4444-ATM.

L'autorità unica di regolazione tecnica e di controllo in Italia è l'ENAC (Ente Nazionale per l'Aviazione Civile), istituito il 25 luglio 1997. L'ENAV invece (Società Nazionale per l'assistenza al Volo) ha il compito di gestire e controllare il traffico aereo civile in Italia; essa (oltre a fornire informazioni) gestisce gli ARO (Air traffic services Reporting Offices), responsabili dei piani di volo.

4.1.4 Enti europei

Tra i principali enti europei vi è la JAA (Joint Aviation Authorities), col compito di emettere e far applicare standard e procedure comuni. Tali compiti sono stati poi trasferiti all'EASA (European Aviation Safety Agency); dal 2009 è rimasto in vita solo l'Ufficio Formazione Tecnica della JAA.

Uno dei prodotti di JAA sono state le JAR (Joint Aviation Requirements), norme definite in consultazione coi paesi aderenti che sono poi diventate la base delle norme EASA.

4.2 Documenti degli aeromobili

Si definisce aeromobile una macchina capace di trasportare persone o cose per aria. La legge che vige a bordo di un aeromobile è quella dello stato di immatricolazione durante il sorvolo di acque internazionali, altrimenti è quella dello stato sorvolato. Gli aeromobili sono classificati secondo vari criteri, tra cui il mezzo di propulsione e sostentamento.

Appartengono alla stessa *classe* gli aeromobili che condividono delle caratteristiche di costruzione e manovra (es. monomotore a pistone); appartengono invece allo stesso *tipo* quelli che sono stati costruiti sullo stesso progetto fondamentale.

I documenti principali di un aereo sono i seguenti:

- *certificato di immatricolazione*: definisce varie cose tra cui la nazionalità del velivolo ed ha durata perenne;
- *certificato di navigabilità*: quest'ultimo viene rilasciato dalle CAMO (Continuing Airworthiness Management Organization) e dura tre anni;
- *manuale di volo*: contiene tutte le informazioni necessarie per l'uso dell'aereo (come ad esempio pesi e bilanciamento) e viene pubblicato dal costruttore dell'aereo;
- *giornale di bordo*: registra gli accadimenti significativi del volo ed è obbligatorio solo per aerei addetti al trasporto pubblico;
- *quaderno tecnico di bordo (QTB)*: registra decolli, atterraggi ed eventuali malfunzionamenti dell'aereo.

Durante l'attività di volo il pilota deve avere con sé i seguenti documenti: licenza di pilotaggio, libretto di volo, visita medica valida, documento d'identità.

4.3 Servizi di assistenza al volo

Per agevolare le operazioni di volo, sono disponibili vari servizi:

- servizio di informazioni aereeonautiche (AIS);
- carte aereeonautiche;
- servizi del traffico aereo (ATS);
- servizi di comunicazioni;
- servizi meteorologici;
- ricerca e soccorso.

4.3.1 Servizi di informazioni

Il servizio di informazioni aereeonautiche si sviluppa attraverso un pacchetto integrato di informazioni che include AIP (Aeronautical Information Publication), Notam (NOTices To AirMan) e circolari di informazioni aereeonautiche (AIC).

L'AIP è il principale documento dell'aviazione che contiene notizie permanenti (o durature) necessarie per la navigazione aerea internazionale; esso è articolato, secondo le direttive ICAO, in tre sezioni: GEN (GENeral), ENR (EN Route) ed AD (AeroDrome).

I Notam contengono informazioni le condizioni di attivazione dei servizi e delle procedure aereeonautiche necessarie per il personale di volo, che hanno una natura temporanea e non sarebbero disponibili nei tempi richiesti attraverso l'aggiornamento dell'AIP.

4.3.2 Servizi del traffico aereo

I servizi del traffico aereo comprendono, invece, i servizi di controllo del traffico ATC (Air Traffic Control), il servizio di informazioni FIS (Flight Information Service) ed i servizi di allarme. Il servizio di controllo ha come scopo prevenire le collisioni (in aria e negli aeroporti) e si articola in controllo d'area (ACC), controllo di avvicinamento (APP) e controllo di aeroporto (TWR). Le istruzioni fornite dagli enti ATC sono *obbligatorie* e vanno eseguite scrupolosamente. Il servizio di informazioni FIS ha come compito di fornire suggerimenti utili alla condotta sicura del volo come, ad esempio, altri traffici che interessano la rotta percorsa e condizioni meteorologiche. Le istruzioni date da un ente FIS sono solo facoltative.

Servizi di allarme

Il servizio di allarme, infine, si occupa di gestire le emergenze; si divide in tre fasi: **Incerfa** (fase di incertezza, attivata 30 minuti dopo la perdita di contatto radio), **Alerfa** (fase di allarme, attivata 5 minuti dopo la fase Incerfa) ed infine **Disterfa** (fase di stress, attivata in caso ci sia la certezza che l'aereo ha necessità immediate di atterraggio o in caso le fasi precedenza non abbiano riportato l'aereo in contatto).

4.3.3 Servizi di comunicazione

Il principale canale per i servizi di comunicazione tra enti aeronautici è la rete fissa di comunicazione AFTN (Aeronautical Fixed Telecommunication Network) che connette tutti gli stati ICAO.

Un identificatore a 4 lettere è assegnato ad ogni località in cui si trova una stazione aeronautica con terminale AFTN:

- la prima lettera indica la zona ICAO (es. L identifica l'Europa meridionale);
- la seconda lettera indica lo stato ICAO (es. I per Italia);
- la terza lettera la regione (es. P per Padova Informazioni);
- la quarta lettera, infine, è relativa alla città (es. R per Rimini - LIPR).

4.4 Aeroporti

Un aeroporto è un'area su terra, o acqua, o struttura fissa, o offshore fissa o galleggiante, destinata in tutto o in parte alla partenza, all'arrivo ed al movimento di aeromobili. Esistono aeroporti statali e privati; tra i primi troviamo quelli militari e quelli civili.

L'elenco degli aeroporti italiani si trova in AIP AD 1.3 (sia certificati che non) e le relative caratteristiche si trovano in AIP AD 2. Nella maggior parte dei piccoli aeroporti italiani, non esiste un ente ATS e la gestione del traffico (quando presente) è deputata ad una radio locale (detta *biga*).

4.4.1 Caratteristiche

Gli aeroporti sono classificati in base alle loro caratteristiche con un codice composto di un numero ed una lettera. Per esempio, il numero 1 indica la capacità di accogliere aerei con distanza di decollo inferiore a 800 metri; il numero 2, invece, si riferisce ad aerei con distanza di decollo compresa tra 800 metri e 1199 metri. La numerazione segue in maniera analoga per distanze di decollo maggiori. Allo stesso modo, la lettera A indica la possibilità di accogliere aerei con apertura alare inferiore ai 15 metri, la B quelli con apertura alare inferiore ai 24 metri e così via.

Un aeroporto capace di accogliere monomotori e bimotori leggeri sarà, allora, classificato con la sigla 1A.

4.4.2 Piste

Le piste possono essere adibite a traffico strumentale oppure no. La larghezza minima di un pista è di 18 metri, mentre non esiste una lunghezza minima. Non sempre, inoltre, la lunghezza fisica e quella geometrica corrispondono: esistono parti dette *stopway* (*SWY*) e *clearway* (*CWY*) infatti, che hanno lo scopo di consentire l'arresto dell'aereo in caso di decollo abortito ed altre manovre. Di conseguenza, si definiscono le seguenti tipologie di lunghezza:

- TORA: è la lunghezza della pista disponibile per la corsa di decollo;
- TODA: è la distanza di decollo, ovvero TORA + clearway;
- LDA: è la lunghezza della pista disponibile per la corsa di atterraggio;
- ASDA: è la distanza di atterraggio, ovvero LDA + stopway.

La figura 4.4.2 mostra le varie lunghezze di una pista.

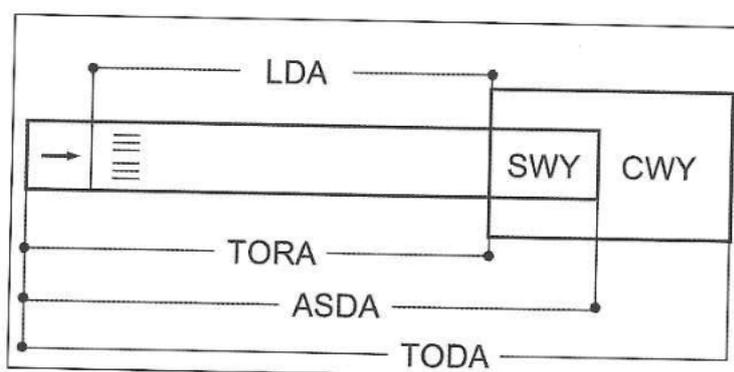


Figura 4.4.1: Le varie lunghezze di una pista.

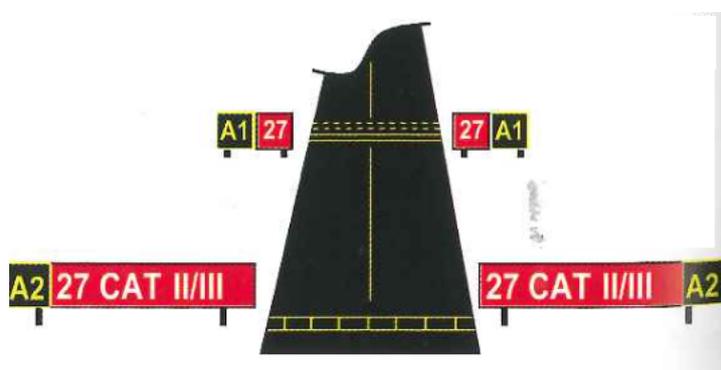


Figura 4.4.2: Esempio di punti di attesa.

4.4.3 Segnaletica orizzontale

Ogni pista è caratterizzata da una segnaletica orizzontale, dipinta sull'asfalto, necessaria per fornire informazioni ai piloti. Tra queste informazioni, il numero della pista corrisponde all'orientamento magnetico della stessa; eventuali lettere R o L vengono usate nel caso di più piste nello stesso aeroporto con lo stesso orientamento.

Piste o vie di rullaggio chiuse al traffico sono contrassegnate da lettere X poste all'estremità della zona praticabile (bianche per le piste, gialle per le vie di rullaggio). Negli aeroporti che supportano le procedure strumentali, oltre al normale punto di attesa ne è presente un altro (più distante dalla pista) per le procedure strumentali ILS CAT II/III, come mostrato in figura 4.4.3.

Tra gli altri segnali orizzontali importanti troviamo:

- divieto d'atterrare: croce gialla su sfondo rosso;
- avvicinamento e atterraggio con precauzione: diagonale gialla su sfondo rosso;
- direzione di atterraggio o decollo: T bianca su sfondo rosso in cui l'asta verticale rappresenta la fusoliera dell'aereo;
- porzione di pista chiusa al traffico: croce bianca su sfondo nero.

La figura 4.4.3 mostra i suddetti segnali.

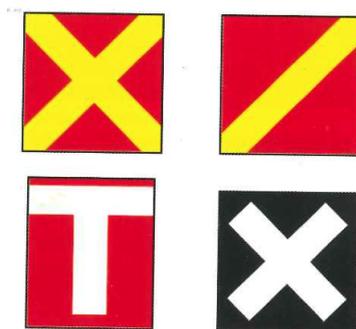


Figura 4.4.3: Esempi di segnali orizzontali.

4.4.4 Segnaletica verticale

La segnaletica verticale è l'insieme di cartelli atti a fornire informazioni o indicazioni obbligatorie ai piloti. I cartelli contenenti informazioni sono gialli su sfondo nero sono riferiti al punto in cui ci si trova con l'aereo, mentre quelli neri su sfondo giallo si riferiscono a punti in cui ci si troverà se si mantiene la direzione. I cartelli con informazioni obbligatorie, invece, sono bianchi su sfondo rosso. Tra i più importanti troviamo: STOP, NO ENTRY, RUNWAY AHEAD.

4.4.5 Luci della pista

Le luci di bordo pista sono previste per piste strumentali e per piste dedicate all'uso notturno. Sono luci fisse di colore bianco spaziate a non più di 60 metri per le prime e non più di 100 metri per le seconde; gli ultimi 600 metri hanno di solito il colore giallo. Alle posizioni di attesa possono essere presenti delle file di luci rossi unidirezionali nella direzione di entrata dette *stop bar*.

Alcuni aeroporti possono essere forniti di aiuti luminosi per l'avvicinamento. I due principali aiuti sono il *calvert* (delle luci a forma di albero di Natale, con larghezza decrescente verso la testata pista) ed il *PAPI* (2 o 4 luci laterali alla pista che aiutano a mantenere un corretto angolo di avvicinamento pari a circa 3°). La figura 4.4.5 mostra un esempio di entrambi questi strumenti di ausilio.

4.5 Spazi aerei

Il territorio nazionale si estende (oltre ai limiti topografici) ad una striscia di mare ampia 12 nm dalla linea di costa in bassa marea. Per gestire nel modo migliore il traffico aereo, ogni stato sovrano può suddividere il territorio nazionale in *spazi aerei* ovvero aree con particolari regole e procedure.

La prima suddivisione è verticale: in Italia ed in molti stati europei tale limite è fissato al FL 195. La seconda importante suddivisione è in spazi aerei *controllati* e *non controllati*; entrambe le tipologie verranno discusse nei paragrafi successivi. Nella quasi totalità degli spazi non controllati sono disponibili i servizi di informazione ed allarme; tali spazi sono pertanto chiamati anche *spazi aerei assistiti*.



Figura 4.4.4: Aiuti luminosi per l'avvicinamento.

4.5.1 Classificazione degli spazi aerei

Dal 1992 l'Italia ha adottato la classificazione ICAO per gli spazi aerei; ogni stato, tuttavia, ha completa discrezionalità sull'assegnazione di un certo tipo di spazio ad una regione geografica. Esistono sette classi di spazi aerei, identificati con lettere ad A a G. Le lettere da A a E indicano spazi controllati, mentre le lettere F e G indicano spazi non controllati. In Italia, le classi B ed F non sono implementate.

Classe A

Questo spazio è riservato ai soli voli IFR: è obbligatorio il contatto radio bilaterale e si vola sotto completo controllo ATC.

Classe C

Questo spazio ammette voli VFR e IFR. Il servizio di controllo è fornito a tutti ma la separazione avviene solo per voli IFR e tra IFR e VFR (ovvero non tra VFR e VFR). Per entrare va chiesta l'autorizzazione ed è obbligatorio mantenere il contatto radio. Anche in questo caso si vola sotto completo controllo ATC. La massima velocità consentita per voli VFR sotto FL 100 è 250 kt KIAS.

Classe D

E' uno spazio simile alla classe C: ammette sia voli VFR che IFR, richiede il contatto radio e mantiene invariata la velocità massima VFR. Tuttavia, la separazione è garantita solo tra voli IFR.

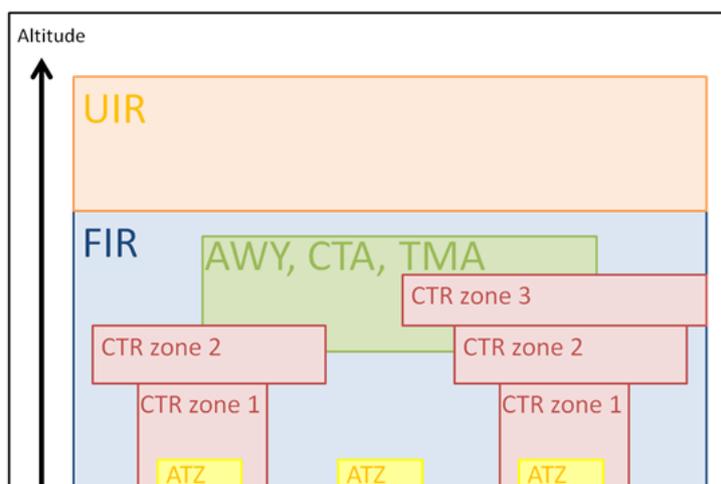


Figura 4.5.1: Zone di controllo degli spazi aerei.

Classe E

In questo spazio è previsto il controllo solo per voli IFR ed è fornito il servizio informazioni *nei limiti del possibile*: non è infatti obbligatorio il contatto radio, ma si deve rimanere in ascolto. Sul transponder va messo il codice 7000; invariati i limiti di velocità.

Classe G

E' l'unico spazio aereo non controllato in Italia. Viene fornito il servizio informazioni solo se richiesto e non va mantenuto obbligatoriamente il contatto radio bilaterale; si deve però rimanere in ascolto.

4.5.2 Regioni di informazioni di volo

Lo spazio aereo inferiore (fino a FL 195) è diviso, in Italia, in tre regioni di informazioni di volo (FIR): Milano, Roma e Brindisi. Lo spazio restante è non controllato ed è dunque di classe G. L'ente preposto alla comunicazione ed al controllo in una FIR è il FIC (Flight Information Center). Le zone superiori sono dette UIR(Upper Information Region) ma generalmente non interessano traffico VFR.

4.5.3 Zone di controllo

Gli spazi aerei controllati si suddividono in diverse zone di controllo: CTA, CTR e ATZ. I seguenti paragrafi esamineranno in breve le caratteristiche di ciascuna di esse. La figura 4.5.3x riassume le zone di controllo descritte nei paragrafi seguenti.

Area di controllo CTA

Le aree CTA prendono la forma di una rete di corridoi chiamate aerovie (AWY) e sono circondate da spazi non controllati. Le aerovie dello spazio aereo inferiore iniziano ad una quota minima tale da garantire la separazione dal terreno e ed arrivano fino a FL 195. Sono di classe E quelle fino a FL 115 e di classe di quelle da FL 120 fino a FL 195. Alla confluenza di più aerovie, viene

istituita un'ulteriore area di controllo chiama TMA (TerMinal Area). Il limite inferiore di una TMA è ad una altezza non inferiore a 700 ft dal terreno. Lo spazio italiano ha quattro TMA: Milano, Padova, Roma e Brindisi.

Zona CTR

Le zone CTR hanno lo scopo di proteggere il traffico IFR intorno ad un aeroporto strumentale e partono dal terreno. Sono di solito di classe C o D (a Malpensa è invece di classe A). L'ente preposto al controllo nei CTR è l'APP (APProach control).

Zona ATZ

Le zone ATZ identificano lo spazio intorno ad un aeroporto. Un'ATZ di dimensioni standard ha forma cilindrica con raggio di circa 5 nm e si estende dal suolo a 2000 ft; può essere controllata, non controllata o a regolamentazione speciale. Le ATZ controllate si trovano in un CTR (ereditano la stessa classe) e sono gestite dalla torre di controllo (TWR); quelle controllate sono fuori da un CTR e possono essere gestite da una AFIU (Aerodrome Flight Information Unit) che darà solo consigli, mai istruzioni mandatorie. E' possibile che su ATZ non controllate non sia istituito neppure un AFIU: in tal caso l'ente che gestisce l'ATZ è una radio locale (biga), che non è però ente ATS.

4.5.4 Spazi aerei limitati

Esistono, in Italia, molti spazi aerei con limitazioni di varia natura: operazioni militari, impianti pericolosi (es. centrali elettriche), ecc. In tali spazi può essere vietato o limitato il sorvolo. Sono generalmente identificati da un lettera P, R o D preceduta dall'indicatore dello stato (es. LI):

- P (Prohibited area): sorvolo vietato;
- R (Restricted area): sorvolo subordinato a specifiche condizioni;
- D (Dangerous area): sorvolo possibile ma con maggior cautela data la presenza di un'attività pericolosa.

4.6 Regole dell'aria

Tutte le operazioni di un aeromobile (sia in volo, sia a terra) vanno effettuate rispettando regole generali dette *regole dell'aria* ed inoltre (se in volo) le regole del volo a vista (VFR) o strumentale (IFR). Tali regole sono specificate in AIP ENR 1.1, ENR 1.2 ed ENR 1.3 rispettivamente.

4.6.1 Regole generali

Esse riguardano vari aspetti del volo, tra cui si citano:

- altezze minime di volo: in rotta non si può stare ad un'altezza inferiore a 300 metri sopra l'ostacolo più alto nel raggio di 600 metri; inoltre, il sorvolo dell'acqua non deve avvenire ad altezza inferiore a 150 metri;
- prevenzione delle collisioni: la precedenza tra aeromobili rispetta il principio di agevolare quello che ha minor facilità di manovra;

- avvicinamento frontale: quando due aerei si avvicinano lungo rotte opposte, ognuno dei due deve accostare a destra;
- avvicinamento convergente: quando due aerei si avvicinano lungo rotte convergenti, l'aereo che vede l'altro a destra deve dare precedenza;
- manovra di sorpasso: un aereo si trova in manovra di sorpasso quando si avvicina ad un altro da dietro, entro un arco di $\pm 70^\circ$ rispetto all'asse longitudinale (ovvero quando non può vederne le luci laterali);
- precedenza in avvicinamento: gli aerei in fase d'avvicinamento finale e di atterraggio hanno la precedenza sugli altri aerei in volo ed a terra;
- precedenza degli alianti: gli aerei a motore devono dare precedenza agli aerei più leggeri dell'aria;
- lancio di oggetti o nebulizzazione, traino di oggetti o di altri aeromobili, lanci con il paracadute: sono consentiti solo in conformità alle disposizioni stabilite dalle autorità competenti e eventualmente autorizzati dall'ATC competente;
- impiego delle luci: le luci anticollisione (beacon) vanno accese prima dell'avviamento motori e mantenute accese sinchè essi sono accesi - talora esse sono supplementate da luci stroboscopiche installate in punta d'ala; le luci di navigazione, invece, vanno mantenute accese dopo il tramonto e sino al sorgere del sole sia in volo che a terra (generalmente esse sono rossa a sinistra, verde a destra e bianca in coda);
- segnali di pericolo:
 - esistenza di grave ed imminente pericolo;
 - * SOS (. . . - - - . . .) trasmesso in radiotelegrafia o con qualunque altro mezzo;
 - * MAYDAY trasmesso in radiotelegrafia;
 - necessità di atterraggio immediata:
 - * lampeggio ripetuto delle luci di atterraggio o navigazione;
 - messaggio urgente riguardante altro aeromobile:
 - * XXX (- . . - - . . - - . . -) trasmesso in radiotelegrafia o con qualunque altro mezzo;
 - * PANPAN trasmesso in radiotelegrafia;
- segnali ottici luminosi: permettono di inviare messaggi in caso di avaria radio;
 - nel circuito di traffico: verde a lampi = ritornare per atterrare, verde continuo = autorizzato all'atterraggio, rosso a lampi = vietato atterrare, rosso continuo = dare precedenza e continuare a circuitare, bianco a lampi = atterrare e racarsi al parcheggio, razzo rosso = non atterrare a prescindere da qualsiasi altro segnale;
 - sull'area di manovra: verde a lampi = autorizzato al rullaggio, verde continuo = autorizzato al decollo, rosso a lampi = liberare la pista, rosso continuo = stop, bianco a lampi = ritornare al parcheggio;

I segnali ottici luminosi sono riassunti nella figura 4.6.1.

GROUND	SIGNAL	AIR
Cleared for Takeoff		Cleared to Land
Cleared to Taxi		Return for Landing
STOP		Give Way Continue Circling
Taxi Clear of Runway		Airport Unsafe DO NOT LAND
Return to Starting Point on Airport		Not Applicable

Figura 4.6.1: Schema riassuntivo sui segnali ottici luminosi.

4.6.2 Regole VFR

Il volo VFR in Italia è possibile solo fino a FL 195 ed è obbligatorio mantenere contatto visivo con l'ambiente e con gli altri traffici. Le operazioni VFR diurne in Italia sono consentite da mezz'ora prima del sorgere del sole a mezz'ora dopo il tramonto. I valori minimi di visibilità sono specificati dall'ICAO e prendono il nome di *minime VMC (Visual Minimal Conditions)*.

La distanza dalle nubi è di 1500 metri orizzontali e 1000 piedi verticali (*ceiling*); la visibilità minima è 5 km e la velocità massima 250 kt fino a FL 100, ma esse mutano in 8 km e regime supersonico sopra tale livello di volo. Negli spazi aerei F e G (vedi sezione 4.5), c'è un'altro limite posto a 3000 ft di altitudine (o 1000 ft di altezza) sotto al quale si può volare con visibilità a 1500 metri e fino alla velocità massima di 140 kt, purchè vi sia però il contatto visivo col terreno. La figura 4.6.2 riassume i valori delle minime VMC.

Se, all'interno di un CTR, la visibilità o il ceiling sono inferiori alle minime VMC è possibile richiedere il permesso di operare in VFR speciale (discusso nella sezione successiva).

Durante il volo notturno, è obbligatorio avere un piano di volo a meno che non si resti in zona ATZ.

4.7 Procedure VFR

Le procedure per il volo VFR sono un insieme di norme che vanno attuate per garantire la sicurezza del pilota e dei passeggeri.

L'autonomia dell'aereo deve essere sufficiente per la missione da compiere, garantendo anche l'arrivo ad un aeroporto alternato ed avendo inoltre una scorta di 45 minuti di volo. Il pilota deve munirsi delle cartine di volo necessarie e deve valutare la generale fattibilità del volo.

Altre procedure VFR riguardano le minime VMC, l'avaria radio, l'altimetro e così via. I paragrafi seguenti discuteranno alcune di tali procedure.

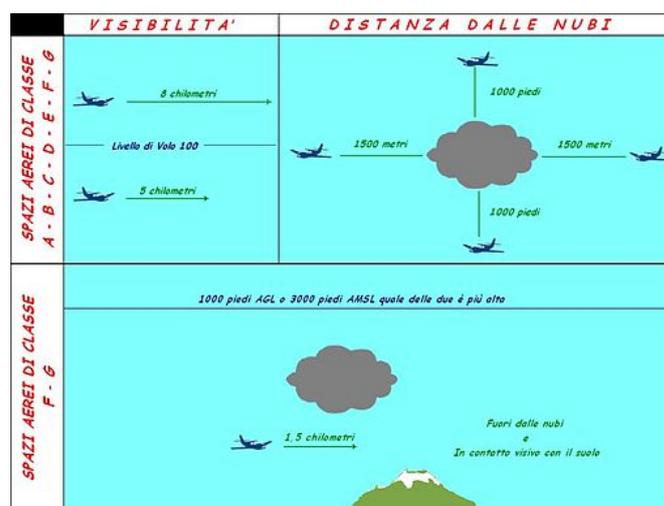


Figura 4.6.2: Minime VMC in Italia.

4.7.1 Mancanza di minime VMC ed avaria radio

Se le condizioni meteo scendono sotto le minime VMC, il pilota può dirottare e atterrare sull'aeroporto idoneo più vicino oppure (se abilitato e con opportuno aereo) passare ad un volo IFR.

In caso di avaria radio, il pilota deve mantenere le condizioni VMC ed atterrare il prima possibile. Sul transponder si dovrà immettere il codice *7600*.

4.7.2 Livelli di volo

A bassa quota, l'altimetro va settato sul QNH locale mentre ad alta quota va settato sul QNE: in tal caso si vola seguendo le superfici isobariche. Negli spazi F e G, invece si deve passare al QNE già sopra i 3000 ft. Negli spazi aerei controllati, l'altimetro resterà sul QNH sino all'*altitudine di transizione*, come mostrato dalla figura 4.7.2.

Quando l'altimetro è regolato sul QNE, esso segna un valore espresso in centinaia di piedi (es. FL 55 = 5500 ft) e si dice che il volo avviene per *livelli di volo*. I livelli di volo VFR possono essere pari + 5 o dispari + 5 e vanno scelti in base alla rotta magnetica, così che tutti gli aerei che volano con la stessa direzione condividono gli stessi livelli e sono separati verticalmente da aerei che volano in direzione opposta.

ICAO ha definito i cosiddetti *livelli semicircolari* in modo che le rotte magnetiche da 0° a 179° (west-est) utilizzino livelli dispari (es. 35, 55, 75) mentre le rotte da 180° a 359° (est-west) utilizzino livelli pari (es. 45, 65, 85). In Italia, per rispondere meglio al flusso del traffico, i livelli circolari sono stati ruotati di 90°, come mostrato in figura 4.7.2.

I livelli IFR, invece, sono interi ed hanno come ultima cifra lo zero; in tal modo sono separati verticalmente dai voli VFR di 500 ft.

4.7.3 Transponder, spazi aerei

Il transponder è obbligatorio, in Italia, per tutti i velivoli che operano in spazio aereo di qualunque classe. Il codice da impostare per voli non controllati è *7000* a meno che il FIC assegni un codice

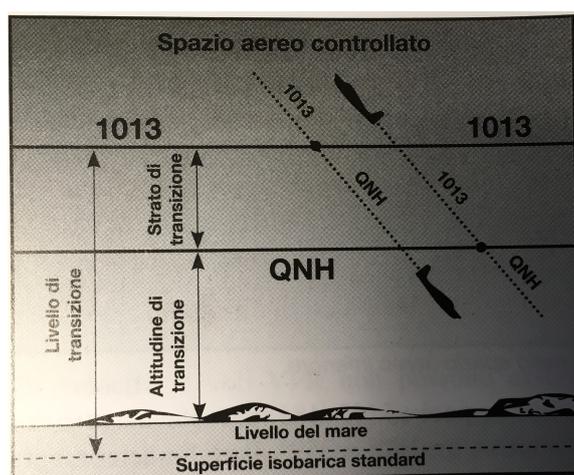


Figura 4.7.1: Regolazione dell'altimetro nello stato di transizione.

diverso. I codici di emergenza, avaria radio e atti di pirateria sono, rispettivamente, *7700*, *7600*, *7500*. Durante il rullaggio il transponder deve essere mantenuto in modo stand-by, per evitare che le onde elettromagnetiche emesse dall'apparato si riflettano su superfici magnetiche come gli hangar, creando interferenze.

Negli aeroporti senza ATS, è necessario che il pilota contatti la frequenza locale (biga) e comunichi sempre le proprie intenzioni. L'obbligo di contatto non sussiste se l'aereo sorvola l'aeroporto sopra la quota del circuito. Se si opera in un ATZ con AFIU, invece, il contatto radio è sempre obbligatorio. Quando poi esiste una torre di controllo, non solo c'è l'obbligo di contatto radio ma le istruzioni della torre vanno sempre eseguite in modo perentorio (anche solo per gli spostamenti a terra).

4.7.4 CTR e aerovie

In Italia, i CTR sono quasi sempre di classe C o D; dai confini del CTR all'aeroporto sono previste rotte standard VFR che i piloti devono seguire. All'interno di un CTR è possibile richiedere il cosiddetto VFR speciale (VFR/S) se le condizioni meteo lo necessitano. Il VFR/S è consentito solo di giorno e ha le seguenti condizioni:

- la visibilità minima non deve essere inferiore a 1500 metri;
- il ceiling non deve essere inferiore a 600 ft;
- l'aereo deve restare fuori dalle nubi e in contatto visivo col suolo;
- la velocità non deve superare i 140 kt.

Per volare in aerovie (AWY) di classe E, che arrivano fino a FL 115, i voli VFR non devono chiedere l'autorizzazione e non hanno l'obbligo di stabilire il contatto radio, ma solo di restare in ascolto. In aerovie di classe D, invece, l'autorizzazione deve essere concessa dal FIC che richiederà anche il punto di ingresso e lo stimato.

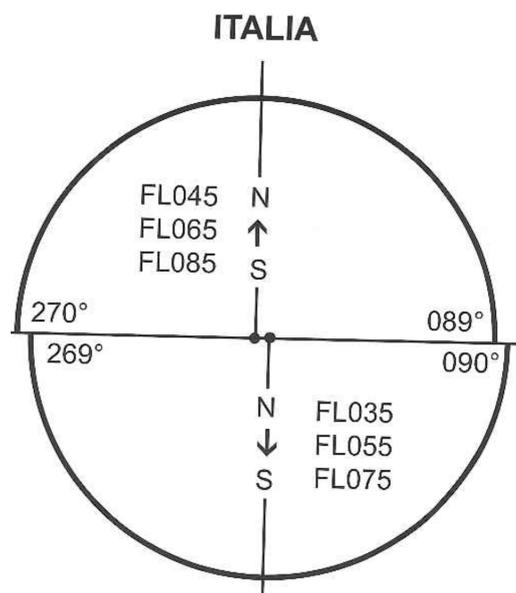


Figura 4.7.2: Livelli semicircolari in Italia.

4.8 Punti importanti

- L'ICAO, nato nel 1944 a Chicago, è l'ente transnazionale che si occupa di garantire uniformità nelle procedure per la navigazione aerea.
- Cinque libertà dell'aria, definite sempre nel 1944, permettono le relazioni con stati altri rispetto a quello di appartenenza.
- L'ente italiano per la gestione della navigazione è l'ENAC, mentre quello europeo è l'EASA (che prende molte funzioni della preesistente JAA).
- I documenti principali di un aereo sono i seguenti: certificato di immatricolazione, certificato di navigabilità, manuale di volo, giornale di bordo e QTB.
- Per agevolare le operazioni di volo, sono disponibili vari servizi tra cui il servizio informazioni, quello di controllo e quello di soccorso.
- In ogni spazio aereo, vanno mantenute le minime VFR relative (distanza e separazione dalle nuvole).
- Quando si opera in spazi controllati, si è soggetti a specifiche regole come le richieste di autorizzazione, l'uso di transponder e così via; nella maggior parte dei casi le istruzioni date da enti ATS sono obbligatorie.
- In classe E la comunicazione radio non è obbligatoria, ma si deve restare in ascolto; è possibile comunque richiedere informazioni.
- E' necessario stabilire comunicazione radio bidirezionale prima di entrare in uno spazio di classe D.
- In classe A possono operare solo voli IFR.

- Condizioni di VFR speciale (VFR/S) possono essere richieste in spazi controllati, se le condizioni meteo lo richiedono.
- Esistono spazi aerei proibiti, ad accesso ristretto o pericolosi.
- Il volo VFR è normato dalle cosiddette regole dell'aria che comprendono procedure e norme utili alla navigazione.
- L'ICAO richiede che le rotte magnetiche da 0° a 179° (west-est) utilizzino livelli dispari (es. 35, 55, 75) mentre le rotte da 180° a 359° (est-west) utilizzino livelli pari (es. 45, 65, 85). In Italia, per rispondere meglio al flusso del traffico, le rotte sono state ruotate di 90° .

Capitolo 5

Meteorologia

5.1 Atmosfera

L'atmosfera è la miscela di gas che circonda la Terra, alla quale è mantenuta aderente grazie alla forza di gravità. Essa ha densità decrescente dalla superficie terrestre verso l'alto ed è soggetta a moti verticali ed orizzontali, connessi all'attività del Sole.

Lo strato più basso è detto *troposfera* ed è l'unica parte dell'atmosfera in cui si verificano i fenomeni atmosferici. Il limite superiore della troposfera si chiama *tropopausa*, la cui altezza varia dai Poli (8 km) all'equatore (20 km). Sopra la troposfera si trova la *stratosfera* che si estende per circa 50 km e termina con la *stratopausa*. Gli ulteriori strati superiori si chiamano *mesosfera* e *termosfera*. La maggior parte dei voli avviene nella troposfera.

L'atmosfera è costituita da una miscela di gas, tra cui principali sono l'ossigeno (78%) e l'azoto (21%). Sono presenti anche anidride carbonica e vapore acqueo (per circa 1%). Le caratteristiche di temperatura e pressione cambiano con la distanza dalla superficie terrestre (*gradienti barico e termico*).

5.1.1 Atmosfera ISA

Le caratteristiche dell'atmosfera cambiano continuamente di luogo in luogo; per questo, è stato necessario definire uno standard di riferimento detto *ISA* (International Standard Atmosphere). Le sue caratteristiche principali sono:

- pressione a livello del mare di 1013.25 hPa;
- gradiente barico verticale al livello del mare 1 hPa/27 ft, decrescente con la quota;
- temperatura al livello del mare di 15°C;
- gradiente termico verticale di 6.5°/1000 mt (o 2°/ 1000 ft), decrescente con la quota;
- tropopausa ad 11 Km, con temperatura di -56.5° C.

5.1.2 Atmosfera reale

Nella realtà, sia pressione che temperatura variano in maniera piuttosto complessa. I punti dell'atmosfera che hanno uguale pressione sono chiamati *superfici isobariche*. Vengono dette *isobare*

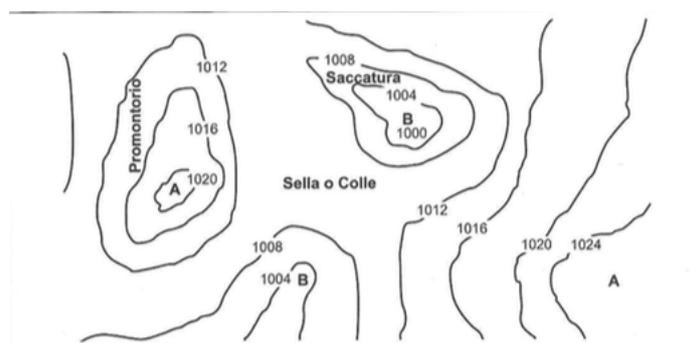


Figura 5.1.1: Conformazioni bariche.

le linee che si ricavano intersecando le superfici isobariche con il livello del mare. Per rappresentare la pressione in quota si tracciano invece le linee *isoiipse*, ottenute mediante l'intersezione delle superfici isobariche con livelli di quota crescente. In quota, l'aria si muove grossomodo lungo le isoiipse; nell'emisfero Nord essa lascia a **destra l'alta pressione e a sinistra la bassa pressione**.

Conformazioni bariche

Le due principali conformazioni atmosferiche legate alla pressione sono il *ciclone* e l'*anticiclone*. Il primo è una zona di bassa pressione che presenta delle isobare chiuse su se stesse, al cui centro si trova la pressione minima. Il secondo, invece, è una zona di alta pressione al cui centro si trova la pressione massima.

Altre configurazioni bariche sono la *saccatura*, il *promontorio* e la *sella*. La saccatura è una zona di bassa pressione che si insinua tra due pressioni; il suo reciproco è appunto il promontorio. La sella è invece la zona che si trova tra due zone di alta pressione e due zone di bassa pressione. La figura 5.1.1 illustra le conformazioni bariche discusse.

5.1.3 Calore e temperatura

Il calore è una forma di energia dovuta all'agitazione delle molecole in un corpo, il cui livello si misura mediante la temperatura. Il calore si trasferisce da un corpo a temperatura più alta verso un corpo a temperatura più bassa sino a che la differenza di temperatura non si annulla.

Il passaggio di calore¹ tra due corpi può avvenire in tre modi:

- **convezione:** il passaggio avviene attraverso lo spostamento di materia (es. acqua in ebollizione);
- **conduzione:** il passaggio avviene per contatto diretto;
- **irraggiamento:** il passaggio avviene senza contatto e nel vuoto (es. luce solare).

¹Non tutti i corpi si riscaldano o si raffreddano con la stessa velocità (capacità termica); è detto *calore specifico* la capacità termica in rapporto all'unità di massa. L'acqua ha un calore specifico tra i più alti e dunque mantiene calore per lungo tempo e si riscalda lentamente.

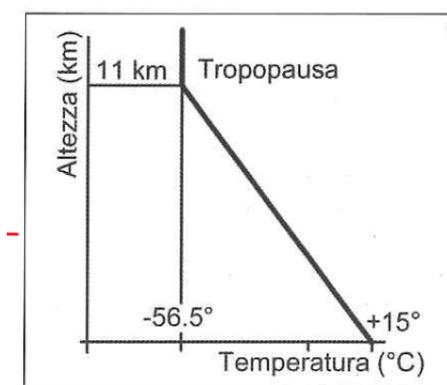


Figura 5.1.2: Curva di stato dell'atmosfera ISA.

Riscaldamento e moti convettivi

L'aria viene riscaldata per irraggiamento e convezione dalla superficie terrestre, a sua volta riscaldata dai raggi solari: per questo la temperatura dell'aria diminuisce con la quota. Visto che la superficie terrestre non è uniforme, il riscaldamento dell'atmosfera è irregolare e genera moti verticali (*convettivi*) ed orizzontali (venti).

La depressione create dall'ascendenza dell'aria riscaldata richiama aria che riempie lo spazio lasciato libero; a sua volta l'aria calda salendo si raffredda ed inizia a scendere, chiudendo il circolo.

Questi fenomeni accadono sia localmente che globalmente: zona equatoriale, tropicale e polare.

Curve di stato

L'andamento verticale della temperatura è fondamentale per prevedere i fenomeni meteorologici; tale andamento è rappresentato da un grafico chiamato *curva di stato*. La figura 5.1.3 riporta la curva di stato ideale per l'atmosfera ISA.

Se una curva di stato ha un tratto verticale si ha una *isoterma*; se invece essa presentata un tratto inclinato verso destra si è in presenza di una *inversione termica*. Uno strato isoterma (ad esempio la tropopausa) blocca i fenomeni convettivi; un'inversione in quota genera nubi stratificate, mentre al suolo genera nebbie.

5.1.4 Umidità

L'umidità è il contenuto di vapore acqueo nell'aria e può aumentare con la temperatura. L'aria è detta *satura* quando contiene la quantità massima possibile di vapore acqueo; è detta *umidità relativa* il rapporto tra il vapore acqueo contenuto nell'aria e la quantità di vapore che sarebbe necessaria per rendere tale aria satura. L'aria non satura è detta anche *secca*.

Più l'umidità relativa è vicina al 100%, maggiore è la probabilità di condensazione. In aviazione, al posto dell'umidità relativa è utilizzato un altro indicatore per lo stesso fenomeno: la *temperatura di rugiada (dewpoint)* che indica a quale temperatura una massa d'aria dovrebbe essere raffreddata per giungere a saturazione. In altri termini, se la differenza tra temperatura e temperatura di rugiada è vicina allo zero, l'aria è prossima alla saturazione.

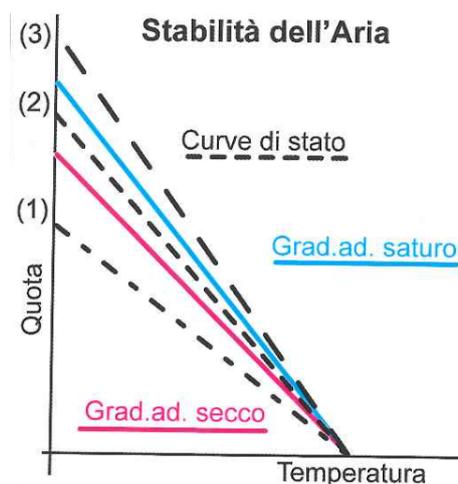


Figura 5.2.1: Stabilità ed instabilità dell'aria: (1) instabile, (2) condizionalmente instabile, (3) stabile.

5.2 Moti verticali

I moti verticali dell'aria sono dovuti a cause termiche o meccaniche. Una massa d'aria riscaldata diviene meno densa e tende a salire; si ha sollevamento meccanico quando una massa d'aria che si sposta orizzontalmente incontra un ostacolo (montagna o altra massa d'aria). I moti verticali sono alla base dei fenomeni meteorologici.

5.2.1 Raffreddamento e riscaldamento

Una colonna d'aria che sale o scende non scambia calore con l'aria circostante perchè l'aria è un pessimo conduttore di calore; tale processo viene detto *adiabatico*. L'aria che sale si raffredda e si espande; al contrario, quella che scende si comprime e si riscalda.

La diminuzione di temperatura di una massa d'aria secca che sale è di $10^{\circ}\text{C}/1000\text{m}$ ed è chiamata *gradiente adiabatico secco*. Allo stesso modo, quando tale diminuzione si riferisce ad una massa d'aria satura prende il nome di *gradiente adiabatico saturo*: tale gradiente è sempre minore di quello secco ed è pari a circa $6/8^{\circ}\text{C}/1000\text{m}$. Il gradiente dell'aria ISA ($6.5^{\circ}\text{C}/1000\text{m}$) è di tipo saturo (cfr. sezione 5.1.1).

5.2.2 Stabilità dell'aria

Se una particella d'aria in salita, nonostante la perdita di calore, rimane più calda dell'aria circostante continuerà a salire; se diviene invece più fredda inizierà a scendere cercando di tornare nella posizione iniziale. Si avrà allora, nel primo caso, un'aria *instabile* e nel secondo caso un'aria *stabile*. Se l'aria è stabile, un moto ascensionale (di qualsiasi origine) tenderà ad esaurirsi in breve tempo; se invece l'aria è instabile, tale moto si autoalimenterà. L'aria instabile ha una curva di stato che si trova sotto a quella dell'aria secca; quella stabile si trova invece sopra all'aria satura. Oltre alle due configurazioni descritte, esiste anche l'aria *condizionalmente instabile*: in essa si ha una condizione di instabilità per l'aria satura e di stabilità per l'aria secca. La figura 5.2.2 ricapitola gli stati descritti.

L'aria stabile tende a rimanere immobile ed i moti convettivi sono limitati; le nubi associate sono di tipo stratiforme, le precipitazioni continue e la visibilità ridotta. Al contrario, l'aria instabile tende a salire ed i moti convettivi sono pronunciati. Le nubi sono cumuliformi e la visibilità molto buona.

5.3 Moti orizzontali

I moti orizzontali sono detti *venti*. Storicamente, si usano per i venti dei nomi legati alla direzione di provenienza rispetto all'isola di Malta: tramontana (nord), grecale (nord-est), levante (est), scirocco (sud-est), mezzogiorno (sud), libeccio (sud-ovest), ponente (ovest) e maestrale (nord-ovest).

Si chiama *gradiente barico orizzontale* la differenza di pressione rapportata alla distanza; se questa variazione avviene a breve distanza i venti saranno più forti. Per questo motivo la distanza tra le isobare in una carta meteorologica dà un'indicazione della forza del vento.

5.3.1 Isobare e vento

Una particella d'aria tende a spostarsi, sotto la forza di un gradiente, verso una zona di bassa pressione; durante il suo moto è deviata dalla forza di Coriolis (che nell'emisfero nord devia verso destra).

Dunque, una particella percorrerà una traiettoria curva che diviene parallela alle isobare se la sua velocità è abbastanza alta. In quota, il vento è più veloce ed è quindi parallelo alle isobare. Se esse sono pressochè rettilinea, si avrà il cosiddetto vento *geostrofico*. Si definisce invece *di gradiente* il vento che soffia concentricamente a delle isobare curvilinee (o circolari); nell'emisfero nord il senso di rotazione del vento è orario intorno ad un'alta pressione. In altri termini, il vento **lascia a destra l'alta pressione**.

Da questo ragionamento si deduce che dalla deriva subita da un aereo è possibile calcolare la posizione delle zone di alta e bassa pressione. Se la deriva è verso destra, l'alta pressione si trova dietro l'aereo che dunque vola verso una zona di bassa pressione; al contrario, se la deriva è a sinistra l'alta pressione si trova davanti all'aereo.

Vicino al terreno, per via dell'attrito e della ridotta forza di Coriolis, il vento soffia ad angolo rispetto alle isobare.

Riassumendo, un ciclone genera una convergenza dei venti mentre un anticiclone genera una divergenza: la prima genera la formazione di nubi, mentre la seconda dà luogo a bel tempo.

5.3.2 Effetti dei rilievi

Se sulla sua strada il vento incontra un ostacolo, l'aria trasportata dovrà salire sino a superarlo, per poi ridiscendere: salendo si raffredderà, mentre scendendo lungo il pendio opposto si riscalderà. Per tale ragione, lungo il pendio sottovento si ha una forte discendenza e vortici violenti. Inoltre, all'aumento della velocità consegue (per il principio di Bernoulli) una diminuzione della pressione: altimetro e anemometro segneranno dunque valori più alti di quelli reali.

Dovendo dunque superare un rilievo, è prudente assumere la velocità per aria turbolenta e mantenere una quota di 1.5 volte l'altezza dell'ostacolo. Il gradiente termico di salita è quello di aria satura (dunque più lento), mentre quello di discesa è quello di aria secca.

Un altro fenomeno legato alla presenza di un rilievo è la cosiddetta *onda orografica*: oltre alla cresta della montagna il vento non scorre più orizzontalmente ma compie salite e discese regolari che restano stazionare rispetto alla montagna. Se l'aria è abbastanza umida, tale onda è evidenziata da nubi caratteristiche: nubi lenticolari in alto, rotori in basso.

5.4 Nubi, temporali, riduzione della visibilità

Le nubi sono formate da gocce d'acqua dovute alla condensazione del vapor acqueo presente nell'aria; la loro formazione è favorita dalla presenza di nuclei di condensazione, come il pulviscolo atmosferico. La formazione di una nube accade quando una massa d'aria umida, salendo, si raffredda sino a raggiungere il punto di saturazione. La nube inizia a formarsi all'altezza in cui l'aria raggiunge la temperatura di rugiada (cfr. sezione 5.1.4); la sommità delle nubi, invece, si trova all'quota in cui la temperatura dell'aria ascendente eguaglia quella dell'aria circostante (isotermia). In alta quota, le nubi possono essere formate da cristalli di ghiaccio, oltre che da gocce d'acqua.

5.4.1 Classificazione delle nubi

Le nubi si distinguono in *stratiformi* se hanno sviluppo orizzontale e *cumuliformi* se hanno sviluppo verticale. Inoltre, con riferimento alla quota, esse sono classificate in basse, medie, alte e a sviluppo verticale. I principali tipi di nubi sono i seguenti:

- basse:
 - **strati** (St): sono nubi basse e molto diffuse;
 - **stratocumuli** (Sc): sono nubi basse con struttura definita a righe o macchie;
 - **nembostrati** (Ns): sono nubi spesse, nere e gonfie di pioggia;
- medie:
 - **altocumuli** (Ac): sono nubi che si incontrano prevalentemente prima di un fronte caldo; hanno aspetto variabile (cilindri e strisce di fiocchi) e precedono l'arrivo delle nubi di pioggia;
 - **altostrati** (As): sono nubi che tendono a coprire gran parte del cielo e possono trasformarsi in nembostrati; si formano per sollevamento graduale di grandi masse d'aria;
- alte:
 - **cirri** (Ci): sono nubi bianche, fibrose e sfilacciate;
 - **cirrostrati** (Cs): sono nubi con aspetto uniforme e possono essere sottili o spesse;
 - **cirrocumuli** (Cc): sono nubi bianche che appaiono come increspature regolari;
- sviluppo verticale:
 - **cumuli** (Cu): sono nubi con base piatta, ben definita e sommità arrotondata;
 - **cumuli torreggianti** (Tcu): sono nubi che hanno altezza simile alla larghezza; possono dar luogo a pioggia leggera;
 - **cumulonembi** (Cb): sono nubi temporalesche che possono arrivare fino alla tropo-pausa; sono il fenomeno più pericoloso per il volo.

La figura 5.4.1 rappresenta le tipologie di nubi descritte sopra.

I cumulonembi sono classificati, inoltre, in base alla densità nel territorio: ISOL (ISOLated), OCNL (OCcasioNaL), FRQ (FReQeuny) ed EMBD(EMBeDded). Questi ultimi sono nascosti dentro altre nubi e sono senz'altro i più pericolosi per il volo.

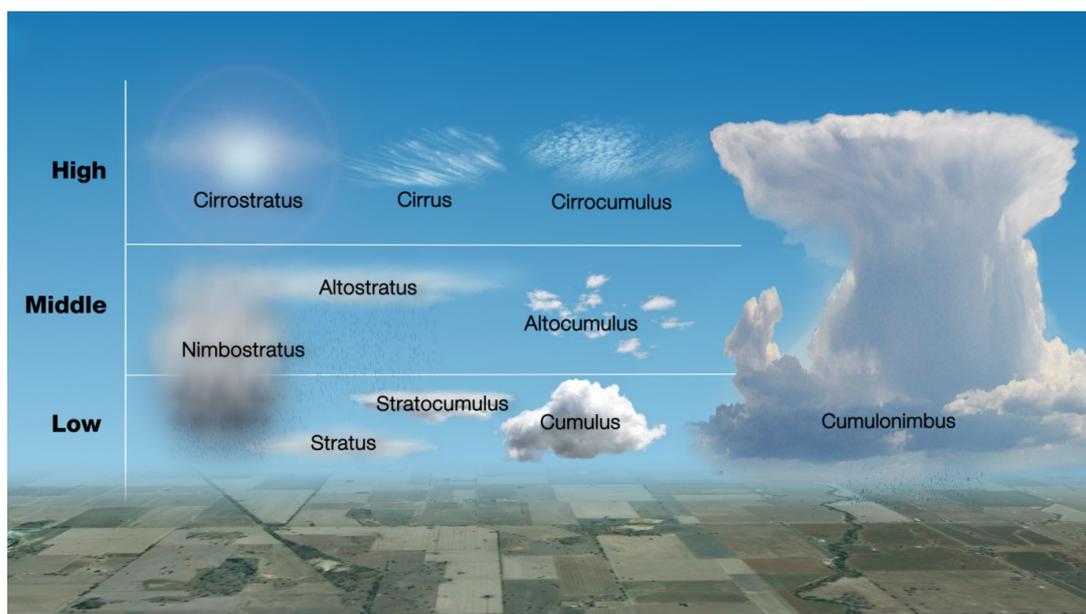


Figura 5.4.1: Tipologie di nubi.

5.4.2 Copertura nuvolosa

La copertura del cielo da parte di nubi (*nuvolosità*) è valutata a vista ed è espressa in ottavi del cielo da 0/8 (assenza di nubi) a 8/8 (cielo completamente coperto):

1. **clear** (0/8)
2. **few** (1-2/8);
3. **scattered** (3-4/8);
4. **broken** (5-7/8);
5. **overcast** (8/8).

Se le nubi coprono metà o più del cielo ed hanno base sotto i 20000 ft, si dice che formano un *ceiling*.

5.4.3 Temporali

Tutte le nubi temporalesche iniziano con un cumulo, anche se non tutte evolvono in cumulonembi. I temporali sono suddivisi in due classi, in base alla spinta che provoca il sollevamento iniziale dell'aria a formare il cumulo: si diranno dunque di origine *termica* e *frontale*. Nel primo caso, la spinta iniziale è dovuta al riscaldamento del suolo (anche quelli di origine orografica rientrano in questa categoria): i temporali derivanti non sono molto estesi ed hanno breve durata.

Nel secondo caso, invece, il sollevamento è dovuto all'incontro tra due masse d'aria (*fronte*, cfr. sezione 5.5) con temperature diverse: l'aria calda salirà sopra l'aria fredda ed i temporali derivanti saranno molto estesi e potranno durare anche giorni.

La vita di una nube comprende le fasi di formazione, maturazione e dissolvimento. La prima fase prevede correnti ascensionali rapide, la seconda prevede la coesistenza di correnti ascensionali e discendenti, mentre la terza ha solo correnti discendenti. La fase di maturazione è la più pericolosa per il volo.

Se un aereo non è equipaggiato da radar meteorologico, la **distanza minima da un temporale e/o cumulonembo è di 10 nm**; altrimenti è di 5 nm.

5.4.4 Visibilità

La visibilità è la distanza massima a cui è possibile vedere un corpo nero sullo sfondo del cielo. Si distingue in visibilità *al suolo* ed *in volo*. La prima è rilevata da un osservatore qualificato in una stazione meteorologica aeroportuale; per le operazioni strumentali vengono usati strumenti che misurano l'attenuazione di una fonte luminosa in tre punti della pista (testata, metà e fine). La visibilità generale è il valore minimo rilevato nei 360° intorno alla stazione meteorologica.

La visibilità in volo, invece, è rilevata dal pilota e si distingue in orizzontale, verticale ed obliqua.

5.4.5 Nebbia

Nebbia e foschia sono formate da goccioline d'acqua da condensazione: si tratta a tutti gli effetti di nubi con base a livello del suolo. Si ha nebbia quando la visibilità orizzontale è minore di 1500 mt. Esistono tre tipi principali di nebbia:

- nebbia da *avvezione*: si forma quando una massa d'aria umida si sposta da una zona calda ad una fredda (es. zone costiere);
- nebbia da *trasporto*: è una nube trasportata da un debole vento dalla zona d'origine (distesa d'aqua);
- nebbia da *irraggiamento*: si forma durante la notte con cielo sereno e si dissolve generalmente al mattino.

Si ha foschia, infine, quando si ha visibilità inferiore ai 5000 mt ma superiore ai 1500 mt.

5.5 Masse d'arie e fronti

Una *massa d'aria* è una porzione dell'atmosfera con caratteristiche omogenee, generate da uno stazionamento abbastanza lungo su una regione terrestre. Le masse d'aria si classificano, in base alla latitudine ed alla temperatura, in: *artica*, *polare*, *tropicale*, ed *equatoriale*.

Se una massa d'aria si sposta da una zona fredda ad una zona più calda, il riscaldamento la rende instabile; al contrario, spostandosi su una zona più fredda essa diviene stabile.

5.5.1 Fronti

Quando due masse d'aria, spostandosi, vengono in contatto formano una superficie di discontinuità detta *fronte*. La massa più fredda si insinuerà sotto a quella più calda, costringendola a salire. I fronti tra le masse d'aria principali sono detti *fronti principali* e si chiamano: fronte artico, fronte polare e Intertropical convergence zone (ITCZ).

Sono detti invece *fronti secondari* (o, comunemente, fronti) quelli generati dalle oscillazioni instabili dei fronti principali. Sono appunto i fronti secondari a determinare le condizioni meteorologiche sulla zona interessata.

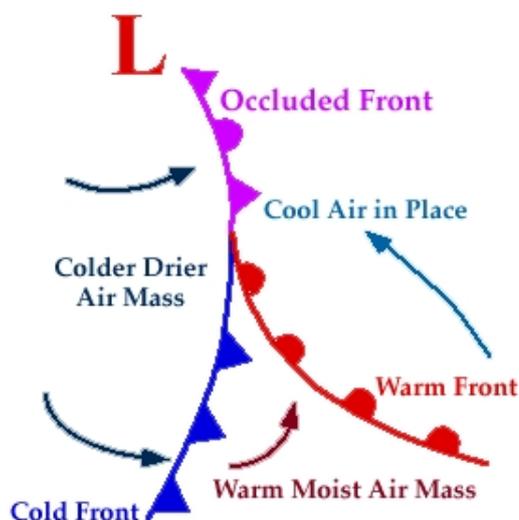


Figura 5.5.1: Esempi di fronti.

Un fronte è detto *freddo* se l'aria che avanza è fredda e s'incunea sotto a quella calda, ferma. Allo stesso modo, un fronte è detto *caldo* se l'aria che avanza è calda e sale su quella fredda. Un fronte freddo è più veloce di un fronte caldo: accade, a volte, che un fronte freddo insegua e raggiunga un fronte caldo. Si avrà allora una fusione dei due fronti che originerà un *fronte occluso*. La figura 5.5.1 mostra un esempio dei tre tipi di fronti discussi.

Fronte caldo

In un fronte caldo la superficie del fronte è inclinata nel senso del moto e la pendenza è limitata. Generalmente tale fronte è annunciato da nubi alte, come cirri, che poi si abbassano progressivamente. La pressione atmosferica diminuisce regolarmente prima dell'arrivo di un fronte caldo e poi si stabilizza. I venti sono leggeri e virano a destra al passaggio del fronte. Le nubi caratteristiche sono di tipo stratiforme. Ad un fronte caldo è generalmente associata un'aria stabile.

Fronte freddo

In un fronte freddo la superficie frontale è inclinata nel senso opposto a quello del moto ed ha una pendenza maggiore rispetto a quella del fronte caldo. La pressione atmosferica diminuisce bruscamente prima dell'arrivo del fronte ed aumenta dopo. Al passaggio del fronte il vento vira bruscamente di 90° verso destra. Le nubi caratteristiche sono a sviluppo verticale: cumuli e cumulonembi. La visibilità, dopo il passaggio del fronte, è buona. Alcuni fronti freddi sono spesso anticipati da una linea di temporali violenti detta *linea di gruppo* (*squall line*) in cui si possono anche generare moti vorticosi dell'aria (tornado).

Fronte occluso

In un fronte occluso, originato dalla fusione di un fronte freddo con uno caldo, vi sono tre masse d'aria: una massa fredda che precede il fronte caldo, una massa calda che segue il fronte caldo

ed una massa fredda che segue il fronte caldo. Si classificano le occlusioni in calda e fredda a seconda della natura della prima e della terza massa d'aria.

Non è facile prevedere le conseguenze meteorologiche di un fronte occluso: in genere la violenza dei fenomeni dipende dall'instabilità delle masse e dalla velocità di movimento dei fronti.

5.5.2 Turbolenza

Si definisce *turbolenza* una successione di repentini cambiamenti di velocità o intensità del vento. La turbolenza si classifica in *leggera*, *moderata* e *forte* e può avere un'origine convettiva o meccanica.

La turbolenza di origine convettiva si trova all'interno e nelle vicinanze di nubi cumuliforme, causata dal moto dell'aria interno alla nube.

La turbolenza meccanica, invece, è causata dall'urto di una corrente d'aria contro ostacoli e rilievi del terreno. Anche la turbolenza causata dallo scorrimento relativo di due masse d'aria è di tipo meccanico. Ad alte quote, dove il vento è più forte, la turbolenza è maggiore; poichè questo tipo di turbolenza non è associabile a formazioni nuvolose è detta CAT (Clear Air Turbulence) ed è difficile da rilevare.

5.5.3 Wind shear

Il *wind shear* è una rapida variazione della velocità del vento che può raggiungere anche 70/80 kt. Tale fenomeno è particolarmente pericoloso per il volo perchè la reazione del pilota e le prestazioni dell'aereo potrebbero non essere sufficiente per arrestare un'eventuale discesa repentina. Può essere di tipo verticale o orizzontale; la reazione migliore ad un wind shear è quella di dare tutta potenza assumendo velocità di salita ripida, privilegiando quota alla velocità.

5.5.4 Ghiaccio

L'acqua all'interno di nubi può rimanere liquida anche al di sotto dello zero: si dirà in stato di *sopraffusione*. All'ingresso di un aereo in nube, le gocce d'acqua congelano urtando con la struttura e aderiscono alle parti più esposte al flusso aerodinamico. Ciò può alterare il profilo aerodinamico delle ali e delle superfici di controllo, può appesantire l'aereo e ostruire il tubo di Pitot con conseguenti gravi conseguenze per la sicurezza del volo. Esistono tre tipi principali di ghiaccio:

- *brinoso*: è prodotto da gocce d'acqua di piccole dimensioni ed è meno pericoloso degli altri tipi;
- *vitreo*: è prodotto da grosse gocce d'acqua che, prima di solidificare, vengono portate dal vento a ricoprire l'intera struttura alare; è molto pericoloso;
- *misto*: è una combinazione delle due precedenti tipologie.

Per prevenire la formazione di ghiaccio (*anti-ice*) e per rimuoverlo quando si è già formato (*de-ice*) esistono sistemi di tipo termico, chimico e meccanico. Di quest'ultimo tipo si ricordano i manicotti di gomma posti sui bordi d'attacco che gonfiandosi e sgonfiandosi alternativamente rompono il ghiaccio già accumulatosi.

5.6 Servizio meteorologico

Le informazioni meteorologiche ufficiali sul territorio italiano vengono fornite dall'Aeronautica Militare e dall'ENAV. Il Servizio Meteorologico dell'Aeronautica Militare è costituito da 84 stazioni presidiate ed altre stazioni automatiche ed in quota (che compiono 4 osservazioni giornaliere). L'ENAV gestisce 39 stazioni meteorologiche situate presso aeroporti civili; le informazioni sul servizio meteorologico si possono trovare su AIP GEN 3.5.

Le informazioni vengono fornite attraverso servizi principali tra cui TAF, METAR e SPECI, descritti di seguito.

5.6.1 Bolletini METAR e SPECI

Le stazioni meteorologiche degli aeroporti trasmettono un rapporto delle osservazioni ai centri di raccolta, attraverso la rete AFTN, chiamato *METAR* (METeorological Aerodrome Report) secondo il seguente formato:

- indicatore di rapporto «METAR»;
- indicatore ICAO di località;
- data e orario osservazione (gg hh mm Z);
- direzione e velocità del vento;
- visibilità;
- fenomeni in corso;
- quantità e altezza delle nubi;
- temperatura dell'aria e dewpoint;
- QNH;
- altre informazioni
- segno «= \Rightarrow » di chiusura del rapporto.

La direzione e velocità del vento sono espresse con 5 cifre seguite da kt nel formato «ddd vv kt» in cui le prime tre lettere indicano la provenienza in gradi mentre le seconde due cifre indicano la velocità. La visibilità è espressa in metri con 4 cifre arrotondate. La quantità e l'altezza delle nubi è indicata in ottavi con gli indicatori few, scattered, broken e overcas seguiti dall'altezza sull'aeroporto in centinaia di piedi, espressa con 3 cifre. L'abbreviazione *CAVOK* (Ceiling And Visibility OK) significa che la visibilità è maggiore di 10 Km, c'è assenza di nubi sotto i 5000 ft e non ci sono fenomeni significativi. Il cielo sereno è riportato con SKC (SKy Clear) se non vi sono tutte le condizioni per il CAVOK. La temperatura dell'aria ed il dewpoint sono riportati in C° nel formato «tt dd», mentre il QNH è riportato come «Qhhhh» ed il suo valore è espresso in hPa. Le informazioni supplementari possono includere wind shear, commenti e previsioni di tendenza. Se le condizioni meteo lo richiedono possono essere emessi dei bollettini speciali detti *SPECI* che seguono lo stesso formato dei METAR.

5.6.2 Previsioni TAF

Il *TAF* (Terminal Aerodrome Forecast) è una stringa che riporta le previsioni delle condizioni meteo previste nell'arco delle successive 24 ore. Per cui, la differenza sostanziale tra METAR e TAF è il fatto che i primi sono dati certi e che si stanno verificando, i secondi sono invece una previsione. Le abbreviazioni seguono le stesse regole dei METAR, ma possono includere identificatori di variazione come PROB (PROBable) e BECMG (BECoMinG).

5.6.3 Avvisi

Gli avvisi riportano fenomeni meteorologici pericolosi, osservati o previsti. In Italia sono distinti per le tre FIR di Milano, Roma e Brindisi. I due principali tipi di avvisi sono i SIGMET (SIGnificant METeorological information) e gli AIRMET (AIRmen's METeorological information).

I SIGMET sono rivolti ai voli IFR e si suddividono in quelli per il volo troposferico e quelli per il volo stratosferico (SST).

Gli AIRMET sono destinati principalmente a piloti o equipaggi che volano in condizioni di VFR, per aeromobili leggeri o monomotore per segnalare quei fenomeni che possono risultare di rischio potenziale per la navigazione sotto FL 100 (nubi basse, scarsa visibilità, turbolenza, attività convettiva).

5.6.4 Radiodiffusioni meteorologiche

Le radiodiffusioni meteorologiche hanno lo scopo di fornire agli aerei in volo informazioni più recenti rispetto ai bollettini. I messaggi *VOLMET* sono rivolti agli aerei in rotta, mentre i messaggi *ATIS* a quelli in avvicinamento o in partenza da un aeroporto.

I VOLMET forniscono variazioni rispetto a METAR e TAF e sono diffusi, in Italia, da quattro stazioni su frequenze in chiaro VHF: Milano, Pisa, Roma, Brindisi. Gli ATIS, invece forniscono informazioni riguardanti pista in uso, QNH, tendenza a breve, ecc.

5.7 Punti importanti

- La troposfera è lo strato dell'atmosfera che si estende dalla superficie terrestre fino alla tropopausa e contiene i fenomeni atmosferici. Gli altri strati sono la stratosfera, la mesosfera e la termosfera.
- A causa delle differenze di riscaldamento, il calore è trasportato per convezione da una latitudine ad un'altra.
- I punti di ugual pressione sono connessi da linee dette isobare; quando le isobare sono lontane il gradiente di pressione è debole, mentre linee vicine indicano un gradiente forte.
- Le conformazioni bariche principali sono il ciclone, l'anticiclone, la saccatura, il promontorio e la sella.
- Un brezza di mare soffia dall'acqua fredda durante il giorno e torna al mare durante la notte.
- La stabilità è la resistenza dell'atmosfera ai moti verticali.
- Il gradiente termico verticale è la perdita di temperatura con la quota; ha un valore medio di $2^{\circ}\text{C}/1000\text{ ft}$.

- Se la temperatura cresce con la quota si ha una inversione termica.
- La temperatura in cui l'aria raggiunge il punto di saturazione è detta temperatura di rugiada (dewpoint).
- Le nubi sono classificate in base alla quota in basse, medie, alte e a sviluppo verticale. Le principali sono: strati, stratocumuli, nimbostrati, altostrati, altocumuli, cirri, cirrostrati e cirrocumuli, cumuli e cumulonembi.
- La nebbia è una nuvola con base a terra.
- Nell'aria stabile le nuvole sono generalmente stratiformi, la visibilità è ridotta; al contrario, in aria instabile le nubi hanno disposizione verticale, la visibilità è buona e c'è turbolenza.
- Un fronte freddo è prodotto da aria fredda che si muove verso aria calda; un fronte caldo è prodotto da aria calda che si muove verso aria fredda; un fronte occluso è prodotto dalla fusione di un fronte caldo ed un fronte freddo.
- Il ciclo vitale di una nuvola si divide in formazione (flussi d'aria ascensionali), maturazione (flussi bidirezionali) e dissipazione (flussi discendenti).
- Turbolenza convettiva si può sperimentare fino a 20 nm fuori da una nube.
- La turbolenza di montagna è spesso indicata da nubi lenticolari in alto e rotori in basso.
- I tre tipi di ghiaccio sono brinoso, vetroso e misto.
- I METAR sono osservazioni meteorologiche descritte in un formato standard.
- Il ceiling è l'altezza sul suolo dello strato più basso delle nubi.
- I TAF sono previsioni aeroportuali di zona.
- AIRMET e SIGMET sono avvisi a breve termine per fenomeni pericolosi non anticipati precedentemente.

Capitolo 6

Navigazione

6.1 Il globo terrestre

La forma della Terra è un *elissoide* di rotazione, ovvero una sfera leggermente schiacciata. L'eccentricità, tuttavia, è molto bassa ($1/298$) e dunque essa è approssimabile ad una sfera.

La Terra compie due movimenti principali: rotazione attorno al proprio asse e rivoluzione intorno al Sole. Siccome l'asse di rotazione non è perpendicolare al piano dell'eclittica ma è inclinato di circa 66° , si ha l'avvicendamento delle stagioni. L'ammontare dell'irradiazione solare, infatti, non dipende dalla distanza dal Sole ma dall'inclinazione. La massima distanza dal Sole è detta *afelio* ed è raggiunta il 21 giugno; la minima distanza è detta invece *perielio* e corrisponde al 21 dicembre.

Tra i movimenti secondari si ricorda la nutazione, una deriva che forma un cono sull'asse di rotazione in circa 26000 anni, spostando gli equinozi.

6.1.1 Latitudine e longitudine

I punti di intersezione dell'asse di rotazione con la superficie terrestre sono detti *poli*. Sono chiamate *meridiani* le semicirconferenze tracciate da piani che contengono l'asse di rotazione. Sono invece dette *paralleli* le semicirconferenze tracciate dai piani perpendicolari (che sono dunque paralleli all'Equatore). La *longitudine* è la distanza angolare dal meridiano di riferimento che passa per Greenwich e va da 180° ovest a 180° est. La *latitudine* è invece la distanza angolare dall'Equatore; essa va da 90° sud a 90° nord.

Il giorno solare vero è l'intervallo di tempo occorrente affinché un meridiano si riporti nella direzione del Sole; esso è maggiore, di poco, del tempo necessario alla rotazione poichè nel frattempo la Terra è avanzata lungo la sua orbita. Per eliminare i problemi derivanti dalla durata variabile del giorno vero, è stato definito un giorno solare medio, diviso in 24 ore.

6.2 Carte aeronautiche

Le carte geografiche usate in aeronautica rappresentano il territorio e tutti gli elementi utili alla navigazione aerea, inclusi gli spazi aerei (cfr. sezione 4.5).

Trasferendo su carta piana una superficie sferica, è necessario accettare compromessi di approssimazione. E' importante mantenere, tuttavia, due principali proprietà: *isogonia* (uguaglianza degli angoli) ed *equidistanza*.

A seconda di cosa viene privilegiato nelle approssimazioni richieste per passare da una sfera ad un piano, si hanno diverse proiezioni. Le più importanti sono quella di Lambert e quella di Mercatore. Le carte aeronautiche seguono delle proiezioni di Lambert modificate, in cui è preservata l'isogonia e si ha distanza costante tra i paralleli di base.

Le cartografia ufficiale ICAO per l'Italia si trova in AIP nella sezione ENR 6.

6.2.1 Ortodromia e lossodromia

La distanza più breve in un piano è una retta; ciò non è vero su una sfera. Quando, su una carta, si misurano distanze maggiori di 200 nm la differenza tra una distanza retta ed una sferica non è trascurabile e va tenuta in considerazione.

Esistono, tra gli altri, due modi possibili modi per tracciare una distanza su una sfera:

- distanza *lossodromia*: è il percorso ad angolo di rotta costante e non è il più breve tra due punti (es. i paralleli);
- distanza *ortodromia*: è il percorso più breve che richiede però continue correzioni dell'angolo di rotta.

Navigando con la bussola e mantenendo costante l'angolo di rotta si naviga secondo percorsi lossodromi. Le carte aeronautiche rettificano le ortodromie, la cui scala è dunque variabile con la latitudine.

6.3 Navigazione stimata

La navigazione stimata (*dead reckoning*) si basa sul riconoscimento di riferimenti geografici (naturali od artificiali) che consentono di determinare posizione e direzione. Si basa sulla legge fisica per cui la distanza è il prodotto di tempo per velocità: $D = G_s \cdot t$, dove G_s è la ground speed. In generale tale velocità è approssimata con la IAS. Gli unici strumenti necessari in tale tipo di navigazione sono l'orologio, la bussola e l'anemometro.

Vista l'imprecisione intrinseca di questo metodo, si considera sempre un *cerchio d'incertezza* nella valutazione della posizione per cui si considera di essere nel posto giusto col 90% di probabilità e in un raggio del 10% rispetto alla distanza percorsa. La G_s , ovviamente, risente dell'effetto del vento essendo in effetti la somma vettoriale della TAS con la velocità del vento: $G_s = W_v + TAS$.

E' buona norma, durante una navigazione stimata, passare *dalla carta al terreno* e non viceversa. In caso di perdita della posizione, si dovrà inizialmente valutare la criticità della situazione (autonomia residua, effemeridi, situazione meteo, ecc.) ed eventualmente ricorrere a tutti gli strumenti disponibili a bordo. E' possibile, durante la fase di ricerca, mantenere la posizione facendo dei 360° a quota costante oppure tornare al precedente punto noto. In caso di necessità, infine, è possibile chiedere un *fix radar* all'ente di controllo competente od anche un *vettoramento* (un insieme di prue per raggiungere un punto stabilito).

6.3.1 Rotte e prua

Il percorso che si intende seguire durante la navigazione è detto *rotta (course)* ed è definita dall'angolo creato da tale percorso ed il Nord. Si avranno allora rotta vera (*true course*) se ci si riferisce al Nord vero e rotta magnetica (*magnetic course*) se ci si riferisce al Nord magnetico; la relazione tra le due è $M_c = T_c - d$ dove d è la declinazione magnetica. In Italia, la declinazione magnetica è positiva e corrisponde a circa 2°.

Si chiama *prua (heading)* l'angolo tra l'asse longitudinale dell'aereo ed il Nord; anche in questo caso si possono avere prue vere e magnetiche.

6.4 Radionavigazione

Nell'arco del tempo, sono stati introdotti in aeronautica strumenti di radionavigazione che consentono di volare anche in assenza di visibilità. Durante la licenza PPL, la pratica della radionavigazione è richiesta come supporto alla navigazione a vista.

Tra i principali sistemi di radionavigazione vi è il VOR/DME (cfr. 6.5, adottato dall'ICAO negli anni '50 e tutt'ora in uso; oggi, tuttavia, il GPS (cfr. 6.7) sta prendendo sempre più piede e si sta configurando come lo strumento di radionavigazione principale.

6.4.1 Propagazione delle onde radio

Le onde radio si propagano in tre differenti modi:

- in linea *ottica*: l'onda viaggia nell'aria con contatto visivo tra emittente e ricevente;
- per via *terrestre*: l'onda si propaga lungo il terreno e si attenua rapidamente con la distanza;
- per via *celeste*: l'onda si riflette negli strati ionizzati dell'atmosfera tra 50 e 500 Km di altezza.

Le alte frequenze (VHF, UHF) si possono propagare solo in linea ottica, mentre le gravi (VLF) si propagano anche per via terrestre e celeste.

Le prime, tuttavia, non subiscono l'interferenza delle scariche elettriche dei temporali e, inoltre, l'attenuazione da parte dell'atmosfera è minima: per questa ragione VHF ed UHF sono le frequenze usate per la comunicazione radio in aeronautica.

6.4.2 Stazioni goniometriche

Per trovare la provenienza di una trasmissione radio, va individuata la linea che congiunge la stazione che trasmette con quella dell'aereo che riceve, attraverso l'angolo che tale linea forma con una direzione di riferimento. Tale angolo è chiamato *bearing* e può essere diretto (*QDR*), se è una stazione radio che rileva la posizione di un aereo, o inverso (*QDM*), se è invece l'aereo che rileva la posizione della stazione. Vale dunque la relazione $QDM = QDR \pm 180^\circ$.

In altri termini, QDM è come la stazione vede l'aereo, mentre QDR è come l'aereo vede la stazione; per questo, QDM è anche la rotta da seguire per portarsi sulla stazione, mentre il QDR è quella da seguire per allontanarsi. QTE e QUJ sono gli omologhi riferiti al Nord vero. Si noti che **QDR, QDM, QTE, QUJ non dipendono dalla prua dell'aereo**. A bordo di un aereo normalmente è installato un radiogoniometro su cui è riportata la rosa graduata con 360° : il centro del quadrante rappresenta la stazione ed ha una lancetta. Quando il pilota trasmette la lancetta si orienta verso la provenienza del segnale radio; la punta indicherà allora il QDR, la coda il QDM.

Come principio generale, quando si segue un QDR, se i valori aumentano l'aereo si è spostato verso destra; analogamente, seguendo un QDM, se i valori aumentano l'aereo si è spostato verso sinistra.



Figura 6.5.1: Un VOR tradizionale di bordo.

6.5 Navigazione con il VOR

Il sistema adottato dall'ICAO, sin dagli anni '50, per la radionavigazione a corto e medio raggio è il *VOR* (Very high-frequency Omnidirectional Range). Tale dispositivo (di cui esiste una rete di circa 3000 unità nel mondo) emette onde elettromagnetiche che tracciano dei radiosentieri detti *radiali* che possono essere usati sia in avvicinamento che in allontanamento. Al VOR è spesso associato un *DME*, un diverso tipo di radiofaro che permette di conoscere la distanza a cui si trova l'aereo. I VOR operano in VHF (circa 200 canali disponibili) e la trasmissione è di tipo ottico.

Il radiofaro emette due segnali con frequenza 30 Hz: il primo (omnidirezionale) è uguale in tutte le direzioni, mentre il secondo è sfasato dell'angolo uguale ad una specifica direzione. Grazie allo sfasamento così prodotto, un ricevitore VOR è in grado di determinare la posizione dell'aereo. Esistono VOR terminali e VOR di navigazione; per quest'ultimo tipo, la ricezione può arrivare fino a 130 nm.

6.5.1 Lettura del VOR

Sull'aereo, il VOR è rappresentato da una rosa graduata a 360° con una linea al centro detta *CDI*; è possibile ruotare la rosa attraverso un'apposita manopola detta *OBS*. Quando il CDI è centrato, indica sulla rosa la radiale QDR o QDM a seconda che sia segnalato, in una finestrella laterale dello strumento, *Fr* (from) o *To*. La figura 6.5.1 mostra un tipico strumento VOR a bordo dell'aereo.

La selezione della radiale con l'*OBS* corrisponde, generalmente, alla rotta che si vuole tenere. **Se la radiale e la prua sono concordi, le indicazioni del VOR sono istintive.** Esse sono altrimenti anti-istintive e per acquisire una radiale bisogna virare via dal CDI (più informazioni riguardo a questo concetto verranno fornite nelle sezioni successive).

Per volare dal VOR ad un punto geografico, occorre identificare sulla carta la radiale che va dal VOR al punto richiesto; in questo caso, volando con indicazione *Fr*, le indicazioni saranno istintive. Al contrario, per volare verso un VOR è opportuno selezionare una rotta che faccia apparire il *To*.

Avvicinandosi ad un VOR, il CDI reagisce più prontamente e richiede una maggiore accuratezza nel pilotaggio. Volando sopra ad un radiofaro, inoltre, ci si trova in una zona di incertezza

in cui il CDI comincia ad oscillare in corrispondenza dell'alternarsi dei segni Fr e To. In tale zona, le indicazioni del VOR non sono affidabili.

6.5.2 Operazioni con il VOR

Le principali operazioni con un VOR, in volo, sono: determinazione della posizione, intercettazione di una radiale in allontanamento (QDR), intercettazione di una radiale in avvicinamento (QDM).

Determinazione della posizione

Per determinare la posizione di un aereo si può operare con due VOR. Si ruota l'OBS in entrambi i dispositivi fino a che il CDI si centralizza con il segno Fr. A quel punto si conoscono le due radiali QDR di allontanamento; sarà allora sufficiente tracciarle sulla carta e la loro intersezione indicherà la posizione dell'aereo. Se l'aereo ed il VOR dispongono anche di un DME, allora sarà sufficiente una radiale QDR e la distanza dalla stazione per conoscere la posizione dell'aereo.

Intercettazione di un QDR

Per intercettare un QDR, occorre innanzitutto determinare il QDR attuale centrando il CDI con segnale Fr. Si ruoterà poi l'OBS sul QDR voluto: il segnale sarà allora Fr se l'aereo si trova nel semipiano $QDR \pm 90^\circ$ o To nel caso opposto. Si sceglierà allora un angolo di intercettazione AI pari a 30° , 45° o 60° e si sommerà tale angolo alla se il QDR voluto è maggiore di quello attuale; si sottrarrà altrimenti. Ai fini pratici, in realtà, è sufficiente una rotta che sia a 30° , 45° o 60° dal QDR voluto, dal lato in cui si è spostato il CDI.

Intercettazione di un QDM

Anche in avvicinamento è utile conoscere il QDM attuale ruotando il CDI. Si ruoterà poi il OBS per fino ad avere il QDM voluto: anche in questo caso se l'aereo si trova nel semipiano $QDM \pm 90^\circ$ l'indicatore sarà su FR. Per intercettare il QDM, AI dovrà essere maggiore della differenza $|QDM_{attuale} - QDM_{voluto}|$; se il QDM voluto è minore del QDM attuale, AI va aggiunto al QDM altrimenti va sottratto.

Anche in questo caso, tuttavia, a fini pratici è sufficiente assumere una rotta che sia 30° , 45° o 60° dal QDM voluto, dal lato in cui si è spostato il CDI.

6.5.3 DME

Il DME (Distance Measuring Equipment) calcola la distanza di un aereo da un radiofaro, attraverso la misura del tempo necessario ad un'onda per compiere il percorso aereo-stazione-aereo. La distanza calcolata è quella obliqua (*slant*) e quanto più l'aereo si avvicina alla stazione, tanto più il rilevamento della distanza sarà errato. Trovandosi sulla verticale a 6100 ft dal DME, la distanza indicata sarà infatti 1 nm.

6.6 Radionavigazione con ADF

L'ADF è un apparato radio AM in medie e basse frequenze dotato di un radiogoniometro; esso emette un segnale non direzionale detto NDB (Non Directional Beacon). L'indicazione riportata è l'angolo tra l'asse longitudinale dell'aereo e la direzione in cui si trova lo reNDB. Tale angolo è chiamato *RILPO* (RILEvamento POLare) o anche RB (Relative Bearing); per tale ragione,

l'indicazione riportata dallo strumento **dipende dalla prua dell'aereo**. Un possibile vantaggio rispetto al VOR è che, data le relative basse frequenze utilizzate dallo strumento, il segnale si può trasmettere anche per via terreste.

L'utilizzo principale dell'ADF è per l'avvicinamento: la lancetta dello strumento indica la direzione del radiofaro; è dunque facile capire la posizione relativa dell'aereo. Vale infatti la relazione $QDM = RB + MH$. **Se l'ADF è dotato di rosa mobile (come nella maggior parte dei casi) è sufficiente far coincidere la linea di fede sulla prua magnetica. La punta della lancetta indicherà allora il QDM, la coda il QDR.**

Come per il VOR, le operazioni più comuni dell'ADF in un volo VFR sono: dirigersi sul radiofaro con una prua qualsiasi, intercettare un QDM ed intercettare un QDR. I principi generali sono quelli descritti per il VOR e, nel caso del QDR, le operazioni sono intuitive.

6.7 Radar e GPS

6.7.1 Radar

Il RADAR (RADio Detection And Rangin) è un dispositivo per il rilevamento della posizione mediante onde radio. E' un apparato basato su un'antenna rotante che invia impulsi elettromagnetici tra 1 e 4 GHz, alternati a periodi di silenzio. Quando gli impulsi raggiungono un oggetto essi vengono riflessi: a seconda della posizione dell'antenna al momento della riflessione è possibile determinare la posizione; la distanza è calcolata attraverso il tempo necessario al segnale riflesso per tornare indietro alla sorgente.

Siccome l'antenna Radar ruota sul piano orizzontale essa non può rilevare la quota; per tale ragione (e per poter identificare in modo positivo i traffici) sopra alla prima antenna è installata un'antenna secondaria, coassiale e sincronizzata, che comunica col transponder di bordo degli aerei.

Nello schermo Radar, un traffico è rappresentato con simboli diversi a seconda che sia descritto da uno o da entrambi i Radar.

6.7.2 GPS

Il GPS (Global Positioning System) è una architettura che permette di determinare la posizione su tutto il pianeta. Esso si basa su una rete di 24 satelliti artificiali geostazionari controllati da terra¹; essi sono disposti su 6 orbite circolari inclinate sull'Equatore di 55° a circa 20000 Km di altezza.

La localizzazione avviene tramite la trasmissione di un segnale radio da parte di ciascun satellite e l'elaborazione dei segnali ricevuti da parte del ricevitore e si basa su un metodo di posizionamento sferico (*trilaterazione*), che parte dalla misura del tempo impiegato da un segnale radio a percorrere la distanza satellite-ricevitore. Il normale sistema GPS è soggetto a un certo margine di errore di circa 100 metri per il 95% delle volte e di 300 metri per il 99% delle volte.

6.8 Punti importanti

- La navigazione stimata è sempre riferita ad elementi geografici esterni.
- Mantenere una consapevolezza costante sulla propria posizione è fondamentale per ridurre il rischio di perdersi.

¹Tale configurazione è quella delle rete americana chiamata NAVSTAR; esiste una rete equivalente russa chiamata GLONASS ed è in allestimento una rete europea chiamata Galileo.

- Gli unici strumenti necessari per il dead reckoning sono l'orologio, la bussola e l'anemometro.
- La rotta vera (TC) deve essere corretta della declinazione magnetica (2° positivi in Italia) e della deriva del vento.
- In caso di smarrimento è necessario: salire, comunicare, ammettere che ci si è persi. E' possibile richiedere un fix o un vettoramento radar all'ente di controllo competente.
- Il VOR fornisce una rotta, mentre la coppia VOR/DME fornisce anche la distanza.
- Le radiali del VOR sono orientate verso il nord magnetico.
- Per trovare la propria posizione, va girato l'OBS finché il CDI va al centro, con l'indicazione Fr e leggere la radiale.
- Per trovare la rotta verso un VOR, va girato l'OBS finché il CDI va al centro, con l'indicazione To e leggere la radiale.
- Le indicazioni del VOR non dipendono dalla prua; per avere indicazioni intuitive è sempre buona norma far corrispondere il VOR alla direzione desiderata.
- E' possibile trovare la propria posizione usando due VOR ed incrociando le radiali rilevate.
- Il DME mostra la distanza diagonale dalla stazione e la sua precisione diminuisce con la vicinanza.
- Un ADR utilizza frequenze basse e medie e dunque permette la trasmissione terrestre.
- La punta dell'indicatore ADF punta alla stazione relativa alla prua dell'aereo.
- La rotta magnetica più il RILPO (RB) indica la rotta per la stazione ADF ($QDM = MH + RB$).
- Il GPS può calcolare la posizione entro 100 metri il 95% delle volte ed entro 300 metri il 99% delle volte.

Capitolo 7

Procedure operative

Il contenuto di questo capitolo è in forma estremamente ridotta, vista la natura prevalente pratica. Sebbene esistano testi dedicati, l'apprendimento delle procedure operative può avvenire solo mediante un'attività pratica di volo costante e corretta.

7.1 Normativa

7.1.1 Responsabilità del pilota

Il pilota in comando è responsabile delle operazioni e della sicurezza dell'aereo e dei passeggeri, da quando l'aereo è pronto a quando il volo finisce e si spengono i motori.

A causa di una situazione d'emergenza, il pilota può commettere azioni che violano regole e procedure, notificandolo all'ente competente.

Prima di intraprendere il volo, il pilota deve avere con sé la licenza con le abilitazioni ed il certificato di idoneità medica in corso di validità.

7.1.2 Preparazione del volo

E' importante, prima di iniziare un volo, che tutte le strutture necessarie quali aeroporti ed enti di comunicazione, siano operativi ed adeguati. E' necessario, inoltre, accertarsi che l'aereo sia *aeronavigabile* e che peso e centraggio siano entro i limiti previsti.

Sarà opportuno avere un piano alternativo in caso il peggioramento delle condizioni meteo non renda praticabile il piano originale: un volo VFR può essere effettuato solo se *le previsioni lungo la rotta e sugli aeroporti interessati indicano condizioni VMC da un'ora prima ad un'ora dopo il volo.*

L'aereo deve essere dotato del carburante sufficiente, tenendo anche in considerazione eventuali condizioni impreviste. Se il volo viene condotto a quote a rischio per l'ipossia (cfr. 8.1.2) deve essere disponibile l'ossigeno per la respirazione.

7.1.3 Aeroplano ed equipaggiamenti

Per un volo VFR, la strumentazione minima di un aereo deve comprendere una bussola, un altimetro, un anemometro ed un orologio. Devono essere presenti a bordo un estintore portatile, le carte di navigazione aggiornate ed il manuale di volo del velivolo.

Se il volo comprende una distanza dalla costa maggiore di 50 nm o 30 minuti, sono necessari giubbotti di salvataggio per le persone a bordo.

Il proprietario o l'esercente, deve assicurare che la manutenzione e le revisioni siano state eseguite come prescritto.

7.1.4 Incidenti ed inconvenienti aerei

L'Annesso 13 classifica gli incidenti e gli inconvenienti aerei in base alla gravità:

- **incidente:** un accadimento che comporta ferimento grave o morte di persone, il danneggiamento grave o la distruzione dell'aereo, la scomparsa dell'aereo;
- **inconveniente grave:** un accadimento che riguarda un incidente sfiorato;
- **inconveniente:** un evento diverso da un incidente che può impattare la sicurezza.

A seguito di un incidente aereo, posso essere attivate inchieste sommarie (dal direttore dell'aeroporto competente, tecniche dalla ANSV e giudiziarie).

Inconvenienti del traffico aereo Nel caso vengano commessi degli errori o delle infrazioni del traffico aereo da parte dei piloti o dei controllori, è possibile farne segnalazione attraverso un apposito modello ICAO chiamato ATIRF (Air Traffic Incident Report Form), reperibile presso gli ARO.

Sono classificati tre tipi di inconvenienti del traffico aereo: *airprox* (aeromobili troppo vicini), *procedure* (errore procedurale), *facility* (malfunzionamento di un impianto).

7.1.5 Procedure antirumore

Onde evitare disturbi, sono previste delle procedure anti-rumore per i voli commerciali. Negli aeroporti vicini a centri abitati, le rotte di partenza ed avvicinamento possono essere ruotate giornalmente o settimanalmente e possono essere imposti limiti orari per l'attività di volo.

Il limite di rumorosità ammesso è di **80 dB misurati ad una altezza di 1000 ft dal punto di rilevamento, con un motore al 75% della potenza.**

7.2 Procedure normali ed anomale

7.2.1 Controlli pre-volo

Il primo controllo che il pilota deve compiere è su se stesso. La FAA ha preparato una checklist chiamata **IM SAFE** che pone domande che richiedono risposta negativa:

- **I-llness:** il pilota è malato?
- **M-edication:** sta assumendo medicine?
- **S-tress:** vive una situazione di tensione o nervosismo?
- **A-lcohol:** sono trascorse meno di 12 ore da quando il pilota ha assunto bevande alcoliche?
- **F-atigue:** il pilota sembra affaticato?
- **E-motion:** è sotto l'influsso di situazioni emotive?

Successivamente, si deve procedere ai controlli sull'aereo secondo l'apposita checklist. In generale, le superfici esterne non devono presentare ammaccature, le coperture a prese statiche e tubo di Pitot devono essere tolte, le gomme devono essere gonfie.

Anche per l'avviamento del motore va seguita l'apposita checklist e gli strumenti di bordo vanno controllati durante il rullaggio (la bussola deve essere libera, l'anemometro ed il variometro devono indicare zero, l'altimetro regolato sul QNH deve indicare l'elevazione dell'aeroporto ± 75 ft, il girobandometro deve spostarsi durante le virate, l'orizzonte artificiale deve essere livellato, il girodirezionale deve essere allineato alla bussola ed indicare le accostate).

Dopo il test motore, fatto a 45° gradi dall'asse pista, va fatto il *briefing pre-decollo* per esaminare parametri ed emergenze.

7.2.2 Decollo, salita iniziale, crociera

La velocità alla quale conviene iniziare la rotazione è di $1.15 \cdot V_s$, mentre l'assetto deve esser compreso tra 6° e 9° . A decollo avvenuto, la velocità da assumere è $1.3 \cdot V_s$ e sarà la stessa durante l'avvicinamento.

Visto che *i flap peggiorano le prestazioni di salita*, sarà opportuno retrarli appena possibile, di solito a 300 ft. Durante la salita, almeno fino a 6000/7000 ft, la miscela deve essere tutta ricca.

La velocità da tenere in crociera, se non specificato nel manuale di volo, deve essere compresa tra $1.6 \cdot V_s$ e V_a . Ad intervalli regolari vanno controllati gli strumenti motore e, ogni 30 minuti circa, alternati i serbatoi del carburante.

7.2.3 Situazioni anomale

Piantata motore

In caso di piantata motore in decollo è possibile invertire la rotta e riatterrare in pista soltanto se distanza e quota sono sufficienti. Dato il tempo di reazione necessario al pilota per comprendere la situazione, la quota non dovrebbe essere inferiore a 800/1000 ft; in tale manovra, la velocità da adottare è quella di massima efficienza ed i flap devono essere retratti.

Turbolenza di scia

Dopo il decollo di un aereo pesante, la separazione per la turbolenza di scia deve essere di almeno 2 minuti; in fase di atterraggio, l'aereo più leggero dovrà tenere una rotta più alta di quella dell'aereo pesante. La separazione per l'attraversamento di una rotta di un aereo pesante è invece di 3 minuti.

Pista bagnata

Nel caso di atterraggio su pista umida o bagnata è preferibile un contatto col suono deciso, atto a rompere il velo di acqua o fango sulla pista e consentendo così un'aderenza maggiore.

Stallo e vite

Il primo sintomo di uno stallo incipiente è la relativa lassezza dei comandi; a questo seguono il *buffeting* (cfr. 1.1.2) e successivamente l'avvisatore acustico (circa 5-7 kt prima dello stallo).

La manovra di rimessa è basata sulla diminuzione dell'angolo di incidenza: il volantino va portato in avanti e la potenza va aumentata.

In caso di entrata in vite è necessario centralizzare il volantino, in posizione a picchiare, e poi fermare la rotazione col piede contrario. Nei moderni aerei scuola, il solo abbandono dei comandi blocca generalmente la rotazione e riporta l'aereo in condizione di stallo normale, dal quale è comunque necessario uscire.

Atterraggio d'emergenza e forzato

E' detto *d'emergenza* un atterraggio che, pur disponendo ancora del motore, va fatto immediatamente per evitare una situazione pericolosa. E' invece detto *forzato* un atterraggio obbligatorio causato dall'arresto del motore.

Con un aereo in efficienza normale (rapporto di planata di circa 10:1), da un'altezza di 2000 ft si ha un raggio di circa 3 Km per atterrare; per effettuarlo, si dovrà volare alla velocità di massima efficienza e con i flap retratti.

Per analizzare le cause dell'emergenza è possibile utilizzare l'acronimo **A.B.C.**:

- A-ria: controllare che la miscela sia ricca;
- B-enzina: accendere la pompa e spostare il selettore del serbatoio;
- C-ontatti: verificare che i magneti siano su *both*.

Prima del contatto col suolo benzina, contatti e master vanno chiusi per evitare il rischio d'incendio.

7.3 Punti importanti

- Il pilota in comando è responsabile delle operazioni e della sicurezza dell'aereo e dei passeggeri.
- L'aereo deve essere equipaggiato ed aeronavigabile.
- I tipi di incidenti sono classificati in base alla gravità: incidente, inconveniente grave, inconveniente.
- Il limite di rumorosità ammesso è di 80 dB misurati ad una altezza di 1000 ft dal punto di rilevamento, con un motore al 75% della potenza.
- Il primo controllo che il pilota deve compiere è su se stesso (checklist IM SAFE).
- La velocità alla quale conviene iniziare la rotazione è di $1.15 \cdot V_s$.
- I flap peggiorano le prestazioni di salita.
- La quota per un ritorno in pista dopo una piantata motore non dovrebbe essere inferiore a 800/1000 ft.
- La separazione per la turbolenza di scia deve essere di almeno 2 minuti.
- La manovra di rimessa è basata sulla diminuzione dell'angolo di incidenza: il volantino va portato in avanti e la potenza va aumentata.
- Per analizzare le cause dell'emergenza è possibile utilizzare l'acronimo **A.B.C.** (aria, benzina, contatti).

Capitolo 8

Prestazioni e limitazioni umane

8.1 Effetti di una cattiva ossigenazione

8.1.1 Circolazione sanguigna e respirazione

Il sangue è un liquido che svolge funzioni essenziali per il corpo umano quali ossigenazione, nutrimento degli organi, regolazione della temperatura. E' costituito da una base liquida detta *plasma* all'interno del quale vi sono globuli rossi, bianchi e piastrine.

Esso è spinto in circolo nel corpo dal cuore a circa 5 litri al minuto ad una determinata pressione, divisa in *sistolica* (di andata) e *diastolica* (di ritorno). I valori normali per la pressione sanguigna in una persona sana sono circa di 120/80 mmHg.

Il globuli rossi raccolgono l'ossigeno nei polmoni e lo trasportano nei tessuti periferici. Il cervello assorbe, da solo, circa il 20% del fabbisogno complessivo di ossigeno; per questo la carenza di ossigeno produce effetti importanti sul comportamento. Una persona sana compie circa 15 cicli di respirazione al minuto.

8.1.2 Pressione e diminuzione d'ossigeno

La diminuzione di pressione all'aumentare della quota riduce la quantità di ossigeno nell'aria disponibile per la respirazione.

E' chiamata *ipossia* la mancanza dell'ossigeno necessario alle funzioni vitali; è una condizione pericolosa per il volo perchè si manifesta con un senso di benessere e con l'euforia e può dunque ridurre la capacità di giudizio. Gli stadi di progressione dell'ipossia in base alla quota sono:

- *normalità*: fino a 10/12000 ft;
- *compensazione*: tra 10000 e 15000 ft; l'organismo compensa la mancanza d'ossigeno aumentando il ritmo respiratorio, i battiti cardiaci e la pressione;
- *disordine*: tra 15000 e 20000 ft; l'organismo non riesce più a compensare la mancanza e si perde la lucidità;
- *spasmi/convulsione*: oltre i 20000 ft; si hanno riflessi scoordinati e si può arrivare alla paralisi.

L'uso dell'ossigeno è obbligatorio per il pilota per permanenze superiori a 30 minuti a quote superiori a 10000 ft. Se la quota è superiore a 13000 ft, l'ossigeno deve essere usato con continuità.

La perdita di coscienza a 20000 ft accade dopo 10 minuti, a 26000 ft dopo 2 minuti ed a 40000 ft dopo solo 15 secondi. **Avvertendo i segni dell'ipossia è necessario scendere di quota, compatibilmente con l'orografia.**

8.1.3 Iperventilazione

E' detta *iperventilazione* l'aumento della frequenza della profondità respiratoria; produce acidificazione del sangue (e dunque peggiore ossigenazione). E' spesso associata a stati d'ansia e *manca completamente dello stadio di euforia* tipico dell'anossia (perciò è da quest'ultima distinguibile).

8.1.4 Espansione dei gas nell'organismo

Vari gas possono essere racchiusi nel corpo, come ad esempio nell'orecchio, nei seni nasali, nell'intestino e nelle otturazioni dentali. Con il cambio di pressione derivante dalla quota, tali gas possono espandersi fino a creare diversi tipi di problemi, quali dolori e gonfiore di stomaco. Durante le discese l'aumento di pressione agisce sulla parete esterna del timpano e tende a spingerlo verso l'interno: ciò può provocare dolore e temporanea perdita dell'udito.

8.1.5 Intossicazione da ossido carbonio

Sia l'ossido di carbonio (CO) che l'anidride carbonica (CO_2) sono dei prodotti del processo di combustione. L'ossido di carbonio si produce quando l'ossigeno non è sufficiente durante la combustione. E' un gas molto pericoloso perchè è inodore, non irrita ed i suoi effetti sono avvertiti solo ad intossicazione già avanzata.

I sintomi dell'intossicazione da ossido di carbonio sono: dolore alla testa, sensazione di pulsazione, diminuzione dell'attività respiratoria. Può portare a convulsioni, disorientamento, perdita di coscienza e morte. Qualora si riscontri qualcuno di questi sintomi è necessario **spegnere l'impianto di riscaldamento, ventilare la cabina e assumere ossigeno.**

8.2 Sensi ed illusioni

8.2.1 Orecchio: udito ed equilibrio

L'orecchio riunisce le funzioni di udito e di gestione dell'equilibrio. E' composto da una parte esterna (*padiglione*), una parte media (*timpano, martello, incudine e staffa*) ed una parte interna (*coclea ed organo vestibolare*). L'organo vestibolare è preposto alle funzioni legate all'equilibrio e si divide in organo statico, che rileva l'accelerazione lineare e canali semicircolari, che rilevano le accelerazioni angolari.

Quando le informazioni visive sono disponibili, esse prevalgono su quelle che arrivano dall'orecchio.

8.2.2 Occhio e vista

L'occhio ha forma sferica e le sue membrane sono formate da tre membrane concentriche e sovrapposte. La più esterna è una tunica fibrosa chiamata *sclera*, quella intermedia è una tunica vascolare, quella più interna è una tunica nervosa detta *retina*.

Essa è costituita da due elementi sensibili: *coni e bastoncelli*. I primi servono alla percezione dei colori e vengono usati per gli oggetti frontali; i secondi servono alla visione periferica e funzionano in condizioni di scarsa illuminazione.

Passando da uno stato di luminosità ad uno di oscurità, l'occhio subisce un adattamento che può durare anche mezz'ora. Il processo contrario, invece, richiede solo una decina di secondi. Uno dei requisiti per avere l'idoneità medica al volo è avere almeno 9/10 di visione, anche se corretta con lenti.

8.2.3 Sensazioni illusorie

Il *disorientamento spaziale* è una sensazione non reale (illusoria) che si verifica per una discordanza tra le informazioni provenienti dall'occhio e quelle provenienti dall'organo vestibolare.

Può essere provocato da vari fattori tra cui:

- movimento brusco della testa durante una virata a rateo costante: può far credere di subire accelerazioni in direzioni diverse dal reale;
- virata in discesa: può far ritenere al pilota di essere in volo livellato, provocando una cabrata;
- brusca decelerazione: può far sembrare di essere in picchiata e dunque provocare una cabrata;
- livellamento brusco dopo la salita: può dare la sensazione di essere in assetto cabrato e dunque provocare una picchiata;
- orizzonte falso (es. banco di nubi): può portare ad un livellamento scorretto.

E' detta *vertigine* la distorsione della percezione sensoriale di una persona; non è sempre associata a discrepanze sensoriali (come il disorientamento) e può essere accompagnata da nausea, sincope, mal di testa e più raramente disturbi alla vista e vomito.

8.2.4 False impressioni

Un pilota può essere portato a fare valutazioni sbagliate in conseguenza di un'errata impressione del contesto. Tali false impressioni, se non verificate e corrette con le indicazioni strumentali, possono svilupparsi nel disorientamento spaziale. E' stato dimostrato che un pilota VFR, entrando in condizioni di volo IMC, impiega meno di tre minuti per arrivare alla perdita di controllo.

Larghezza e pendenza della pista

Una pista più larga del normale può portare il pilota a fare la richiamata d'atterraggio prima del necessario, creando un atterraggio brusco. Al contrario, una pista più piccola porta una richiamata ritardata. E' possibile utilizzare la visione periferica nell'ultima fase dell'atterraggio per stimare meglio l'altezza.

Una pista in salita, invece, porta a compiere l'avvicinamento con una traiettoria piatta; con una pista in discesa accade l'inverso.

8.2.5 Mal d'aria

Il mal d'aria nasce, come il disorientamento spaziale, dalla discrepanza d'informazione tra apparato visivo e organo dell'equilibrio. L'insorgere è anche favorito dalla paura del volo e dall'ansia. Ha come sintomi mal di testa, nausea, pallore, sudorazione fredda e vomito. Per evitare il mal d'aria ai passeggeri sarà necessario effettuare un pilotaggio dolce, mantenendo l'aereo in volo coordinato.

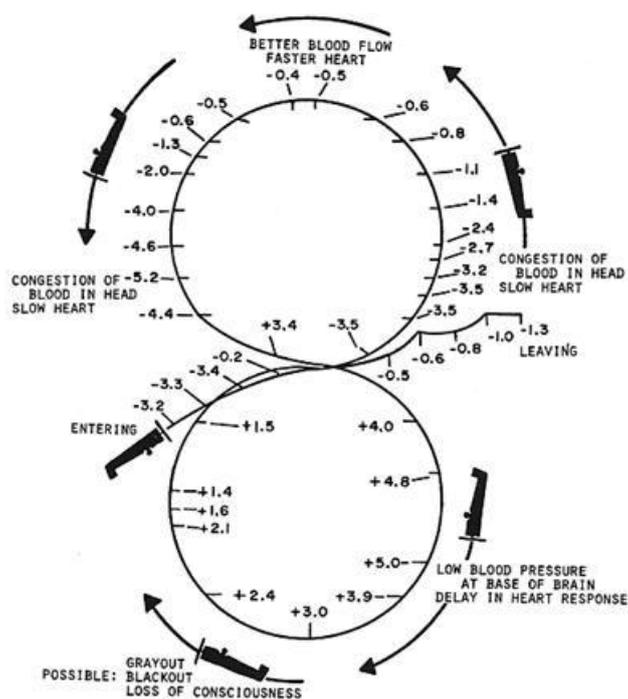


Figura 8.2.1: Accelerazioni durante un loop.

8.2.6 Accelerazioni

Quando il fattore di carico è maggiore di uno (ad esempio durante virate e richiamate) il corpo è sottoposto ad una *accelerazione positiva* (testa → piedi); quando è invece minore di uno (ad esempio come all'inizio di una picchiata, o livellando bruscamente dopo una salita) il corpo è sottoposto ad *accelerazione negativa* (piedi → testa).

Le accelerazioni positive fanno defluire il sangue verso gli arti inferiori; se superiori a 5g possono portare alla cosiddetta *visione nera* (una cortina che cala sugli occhi) che può essere seguita dalla perdita di conoscenza.

Le accelerazioni negative, invece, provocano l'afflusso di sangue al cervello; già con -1g si avverte pesantezza alla testa e si può arrivare alla *visione rossa* (emorragia della congiuntiva) che può essere seguita da emorragie cerebrali.

La figura 8.2.6 mostra le accelerazioni positive e negative (e loro effetti) durante la manovra acrobatica del *loop*. La resistenza alle accelerazioni è strettamente personale e può essere aumentata con l'allenamento; le accelerazione lineari petto → piedi e viceversa non sono, in generale, problematiche.

8.2.7 Farmaci ed alcol

Sia l'alcol che i farmaci possono produrre effetti gravi durante il pilotaggio. L'intervallo minimo tra ingestione di bevande alcoliche e pilotaggio è stabilito in 12 ore. Farmaci antistamici possono causare sonnolenza e capogiri; farmaci anti-acidità di stomaco possono invece produrre disturbi alla vista poichè contengono atropina. La semplice aspirina, se assunta in quantità alta, può portare ad emorragie gastriche.

8.2.8 Effetto della tensione

Si è verificato sperimentalmente che la reazione dell'uomo ad uno stato di tensione segue una curva simile a quella del coefficiente di portanza (cfr. figura 1.1.1): inizialmente la reazione migliora all'aumentare della tensione per poi precipitare bruscamente. E' fondamentale, per un pilota, conoscere la propria curva di tensione ed essere consapevole di dove si trovi il punto di caduta. Il miglioramento delle proprie reazioni in stato di tensione si ottiene continuando a migliorare la propria preparazione, valutando elementi critici prima del volo, anticipando le reazioni dell'aereo durante il volo.

8.3 Psicologia del volo

Uno dei fattori principali nella sicurezza del volo è lo stato psicologico del pilota. Gli incidenti in aviazione, generalmente, sono causati da una serie di concause negative; tale serie può essere facilmente fermata in principio, ma una volta avviata diventa sempre più difficile interromperla.

Per l'analisi del rischio, in un volo, è comunemente accettato il metodo **4M: Man, Machine, Medium, Mission:**

- *Man*: carattere, competenza e stato fisico ed emotivo del pilota o dell'equipaggio;
- *Machine*: adeguatezza dell'aereo alla missione, stato di efficienza, equipaggiamento;
- *Medium*: condizioni meteo, infrastrutture di supporto;
- *Mission*: difficoltà degli obiettivi prefissati, rischi connessi.

8.3.1 Processo decisionale

Esiste una sequenza di passi logici che un uomo compie nel processo di prendere una decisione:

1. *percezione* dell'ambiente esterno;
2. *riconoscimento* della situazione in base alla propria esperienza;
3. *valutazione* della situazione in funzione dell'obiettivo;
4. *raffigurazione* delle possibili azioni da fare;
5. *decisione* di un piano d'azione
6. *esecuzione* del piano deciso;
7. *ritorno* alla fase 1 per rivalutare la situazione.

E' facile in questo processo, tuttavia, commettere errori. Per evitare errori è necessario la coerenza delle informazioni attraverso controlli incrociati (ad esempio usando vari strumenti). Volare con regolarità, incontrando situazioni nuove e diverse, migliora le proprie capacità ed affina il proprio comportamento in volo.

8.3.2 Comportamenti automatici e non automatici

Esistono due tipi di comportamenti principali, in volo: *automatici (bottom-up)* e *non automatici (top-down)*. I primi sono caratterizzati da brevi tempi di elaborazione e basso costo energetico, ma avvengono con un basso grado di consapevolezza e dunque sono più soggetti ad errori di valutazione. I secondi, invece, sono più lenti e dispendiosi ma la persona che li compie è ben consapevole di farlo. Con i comportamenti automatici si affrontano generalmente situazioni noti; con quelli non automatici, invece, si affrontano situazioni nuove per le quali è necessaria una valutazione specifica.

E' importante, per un pilota, che alcuni comportamenti corretti si interiorizzino divenendo automatici, come ad esempio l'abbassamento del muso per prevenire lo stallo o la rimessa da assetti inusuali.

8.3.3 I falsari della mente

Dalle indagini sugli incidenti aerei si evince che spesso l'anello più debole è proprio l'uomo. La debolezza dell'uomo è strettamente legata al *carattere del pilota*, più che alla sua competenza. Vi sono, infatti, alcuni tratti caratteriali che possono influenzare negativamente la sicurezza del volo: essi vengono chiamati *falsari della mente*, in quanto tendono a falsare il giudizio e a far assumere scelte sbagliate. I più comuni di questi tratti sono:

- **anti-autorità:** consiste nel rifiuto acritico degli ordini e dei suggerimenti;
- **impulsività:** porta ad una azione fine a stessa, senza considerare le conseguenze;
- **sensazione di invulnerabilità:** atteggiamento che porta a pensare che certi problemi, erroneamente, non potrebbero mai capitare;
- **machismo:** comporta l'accettazione di rischi eccessivi per dimostrare agli altri di essere il migliore;
- **rassegnazione:** porta a non far nulla per cambiare lo stato delle cose e ad accettare qualsiasi ordine o consiglio.

Per non far prevalere i falsari della mente è importante essere consci della loro presenza subdola e continuativa. E' fondamentale, per valutare correttamente una situazione, fare sempre dei confronti delle informazioni che si hanno come ad esempio gli strumenti e le sensazioni fisiche.

Uno degli strumenti più efficaci per evitare gli errori, in aviazione, sono le *checklist*. Esse sono il risultato di migliaia di ore di esperienza in volo e consentono di eseguire le operazioni senza omissioni e nell'ordine corretto.

8.4 Punti importanti

- L'ipossia è la mancanza d'ossigeno nel sangue.
- L'iperventilazione comporta una respirazione rapida che elimina troppa anidride carbonica dal sangue; è connessa a stati d'ansia.
- L'organo vestibolare è responsabile della percezione dell'accelerazione lineare ed angolare. I conconi sono sensibili ai colori e vengono usati per la visione frontale.
- I bastoncelli sono i recettori primari per la visione notturna e per quella periferica.

- Il passaggio dalla luce all'oscurità può richiedere fino a mezz'ora di adattamento; l'inverso richiede invece pochi secondi.
- Le illusioni durante un atterraggio possono essere causate, tra altri fattori, da una pista più larga o più stretta e da una pista inclinata.
- Il disorientamento spaziale è un'immagine mentale incorretta generata dall'incoerenza dell'informazione tra apparato visivo e organi dell'equilibrio.
- Per valutare i rischi del volo è necessario considerare le capacità del pilota, lo stato dell'aereo, la situazione ambientale e le difficoltà della missione.
- Un incidente aeronautico è spesso generato da una catena di situazioni avverse che è difficile interrompere una volta avviata.
- Per evitare comportamenti falsati è importante conoscere se stessi ed le proprie attitudini generali.

Bibliografia

- [Stretti, 2015] G. Stretti, *Il pilota privato*, IBN editore, Roma, 2015.
- [Trebbi, 2003] R. Trebbi, *Teoria del volo*, Aviabooks, 2014.
- [Jeppesen, 1997] *Private pilot manual*, Jeppesen Sanderson, 1997.
- [FAA, 2008] *Pilot's handbook of aeronautical knowledge*, FAA-H-8083-25A, 2008.
- [Langewiesc, 1944] W. Langewiesc, *Stick and Rudder: An Explanation of the Art of Flying*, 1944.

Indice analitico

7500, 55
7600, 54, 55
7700, 55

A

accelerazione negativa, 85
accelerazione positiva, 85
AFIU, 51
AFTN, 45
AIP, 45
alesaggio, 24
allungamento alare, 22
altitudine di transizione, 54
angolo di freccia, 22
angolo di lavaggio, 24
anticiclone, 59
APP, 51
aria satura, 60
aria secca, 60
aria standard, 31
ARO, 44
assetto, 12
atterraggio d'emergenza, 81
atterraggio forzato, 81
ATZ, 51
AWY, 50

B

bearing, 73
beccheggio, 13
best economy, 26
best power, 26
buffeting, 10

C

calettamento, 12
carico alare, 22
carico utile, 39
carrello biciclo, 22
carrello triciclo, 23
CAS, 33

CDI, 74
cellula, 22
cerchio d'incertezza, 72
checklist, 87
ciclone, 59
cilindri, 24
Clear Air Turbulence, 67
consumo orario, 26
consumo specifico, 26
correttore di miscela, 26
corsa, 24
CTA, 50
CTR, 51
curva di stato, 60

D

dead reckoning, 72
declinazione magnetica, 31
density altitude, 40
deportanza, 13
detonazione, 27
dewpoint, 60
diagramma di manovra, 17
diedro, 19, 22
disco dell'elica, 28
disorientamento spaziale, 84
DME, 74

E

EAS, 33
eccesso di potenza, 39
effetto coppia-controcoppia, 29
effetto giroscopico, 29
effetto propeller, 29
effetto suolo, 11
efficienza, 9
EFIS, 30
EGT, 27
elica a mulinello, 29
elica neutra, 28
elica traente, 28

ENAC, 44
ENAV, 44

F

falsari della mente, 87
fattore di carico, 16
FIC, 50
FIR, 50
flap, 14
Fowler flap, 15
fronte, 65
fronte caldo, 66
fronte freddo, 66
fronte occluso, 66
fronti principali, 65
fronti secondari, 65

G

giroscopio, 34
gradiente adiabatico saturo, 61
gradiente adiabatico secco, 61
gradiente barico orizzontale, 62
gradiente termico, 58
gradienti barico, 58
gruppo motopropulsore, 22

H

heading hog, 35

I

IAS, 33
ICAO, 43
imbardata, 13
imbardata inversa, 14
incidente, 79
incidenza, 12
incidenza critica, 9
inclinazione magnetica, 31
inconveniente, 79
inconveniente grave, 79
iperventilazione, 83
ipossia, 82
ISA, 58
isobare, 58
isoipse, 59

L

latitudine, 71
livelli di volo, 54
livelli semicircolari, 54

longitudine, 71
lossodromia, 72

M

massa d'aria, 65
massima autonomia chilometrica, 39
massima autonomia oraria, 40
meridiani, 71
meridiani magnetici, 30
METAR, 68
metodo 4M, 86
minime VMC, 53
miscela povera, 26
miscela ricca, 26
moti convettivi, 60

N

NDB, 75
Notam, 45

O

organo vestibolare, 83
ortodromia, 72

P

PANS, 43
paralleli, 71
passo geometrico, 28
peso a zero carburante, 39
peso apparente, 16
peso base operativo, 38
peso massimo al decollo, 38
portanza, 9
pressione dinamica, 32
pressione statica, 32
pressure altitude, 40
primo regime, 20
profilo laminare, 14
prua, 73
punto fisso, 28

Q

QDM, 73
QDR, 73
QFE, 32
QNE, 32
QNH, 32
quattro tempi, 24

R

radiali, 74

rampa, 12
rapporto stechiometrico, 26
resistenza, 9
resistenza d'attrito, 11
resistenza di forma, 11
resistenza indotta, 11
resistenza parassita, 11
retina, 83
RILPO, 75
rollio, 13
rotta, 72

S

SARPS, 43
secondo regime, 20
slant distance, 75
slat, 14
slotted flap, 15
smagrimento, 26
spazi aerei assistiti, 48
spazi aerei controllati, 48
spazi aerei non controllati, 48
SPECI, 68
split flap, 15
stabilatore, 13
stabilità aerodinamica, 18
stabilizzatore, 13
stallo, 9
superfici isobariche, 58

T

TAF, 69
tangenza teorica, 20
TAS, 33
Terra, 71
timone orizzontale, 13
timone verticale, 13
titolo della miscela, 26
TMA, 51
transponder, 54
trilaterazione, 76
tropopausa, 58
troposfera, 58
tubo di Pitot, 32
TWR, 51

U

UIR, 50

V

velocità caratteristiche, 18
velocità di manovra, 18
velocità di massima efficienza, 11, 20
velocità di minima discesa, 15
velocità di minima potenza, 20
velocità di salita rapida, 20, 39
velocità di salita ripida, 20, 39
velocità verticale di salita, 20
vento di gradiente, 62
vento geostrofico, 62
vertigine, 84
VFR speciale, 55
virata coordinata, 14
virata derapata, 14
virata scivolata, 14
virosbandometro, 34
vite, 17
volo per assetti, 12
VOR, 74

W

wingtip, 11