

EMANUELE LUIGI DE ANGELIS<sup>1</sup>, FABRIZIO GIULIETTI<sup>1</sup> & FABIO PERCO<sup>2</sup>

## CONSIDERAZIONI SUL VOLO LIBRATO DINAMICO

**Riassunto** – Il presente lavoro presenta una trattazione analitica del volo librato dinamico, tecnica usata da diverse specie di uccelli oceanici per estrarre energia dal gradiente del vento e massimizzare così il tempo di permanenza in volo. Verranno presentate la trattazione matematica ed i risultati di simulazioni numeriche effettuate a partire da un modello matematico in cui il volatile viene schematizzato come un punto materiale che percorre una traiettoria bidimensionale.

**Parole chiave** – volo librato dinamico, gradiente di vento, autonomia chilometrica.

**Abstract** – *Considerations on dynamic soaring.*

This paper presents an analytical treatment of dynamic soaring, a behaviour that certain sea birds use to extract energy from wind gradient. Theoretical modeling and results of numerical simulations, based on a two-degrees-of-freedom point mass model, are presented.

**Key words** – dynamic soaring, wind gradient, range.

### Introduzione

Gli albatrici ed altri uccelli pelagici dell'ordine Procellariiformes e, parzialmente, anche altre specie di uccelli pelagici, eseguono in volo una complicata manovra che permette loro di trarre energia da masse d'aria in moto orizzontale sulla superficie del mare per volare continuamente, senza dover sbattere le ali per lunghi tratti. Questa tecnica di volo è possibile, infatti, quando e se esiste una variazione della velocità del vento (gradiente) in funzione della quota. Questo tipo di variazione, chiamata 'shear flow' è presente in una zona (estesa qualche decina di metri) al di sopra delle acque oceaniche.

Il presente lavoro si propone di illustrare, attraverso gli strumenti teorici della meccanica del volo, la tecnica del volo librato dinamico. In par-

---

<sup>1</sup> II Facoltà di Ingegneria, Università di Bologna - Via Fontanelle, 40 - I-47121 Forlì

<sup>2</sup> Stazione Biologica Isola Cona - Riserva Naturale Foce Isonzo - I-34079 Staranzano (Gorizia)

ticolare, la possibilità di procurarsi una spinta semplicemente estraendo energia dai gradienti del vento è stata affrontata attraverso un'analisi del tutto analoga a quelle condotte per velivoli dotati di un impianto propulsivo. Le equazioni del moto che descrivono le traiettorie nel gradiente di vento, sono state poi implementate nell'ambiente di calcolo *Matlab/Simulink*<sup>®</sup> per valutare, attraverso un modello bidimensionale, il comportamento del volatile in esame al variare di alcuni parametri descrittivi.

### Dati e Metodi

Il volo librato dinamico è basato sulla presenza di un gradiente di vento, ossia di una variazione della velocità del vento orizzontale con la quota. Per la descrizione del suddetto gradiente è possibile utilizzare diversi modelli matematici; tra questi si è scelto un modello logaritmico, che più fedelmente si presta ad una descrizione della realtà:

$$v_w = v_r \frac{\ln(h/h_0)}{\ln(h_r/h_0)}$$

dove  $h$  e  $v_w$  rappresentano, rispettivamente, la quota e la velocità del vento attuali,  $v_r$  è la velocità del vento alla quota  $h_r$ , ed infine  $h_0$  rappresenta la quota al di sotto della quale la velocità del vento è supposta nulla.

Per lo studio del volo librato, si parte dall'ipotesi che il volo si svolga, sulle opportune traiettorie, in condizioni tali da garantire l'equilibrio dei momenti intorno agli assi; questo permette di analizzare le caratteristiche del volo utilizzando le sole equazioni di equilibrio delle forze, assimilando il volatile ad un punto materiale di massa  $m$  sul quale agiscono azioni di natura aerodinamica (portanza e resistenza) e gravitazionale (forza peso). Le equazioni del moto sono scritte utilizzando due sistemi di riferimento costituiti da terne di assi cartesiani: il primo,  $F_E$ , solidale con la superficie terrestre, presenta l'asse  $z_E$  rivolto verso il centro della Terra, l'asse  $x_W$  secondo il Nord geografico ed  $y_W$  a completare la terna verso Est (sistema di riferimento assi terrestri); il secondo,  $F_W$ , ha l'origine coincidente col baricentro del volatile mentre i suoi assi sono così disposti: l'asse  $x_W$  è diretto secondo la direzione della velocità di volo  $V$ , l'asse  $z_W$  punta verso il basso e l'asse  $y_W$  è tale, anche in questo caso, da rendere la terna levogira (sistema assi vento).

Nel modello di seguito illustrato, scritto per un volo sul piano verticale locale, si assume inoltre che il segno dato al vento sia positivo (contrario) in fase di salita e negativo (a favore) in discesa. Tralasciando i passaggi matematici per non appesantire la lettura, le equazioni di Newton (scritte in assi vento) per un volatile schematizzato come punto materiale secondo una traiettoria bidimensionale all'interno di un gradiente di vento porta-

no ad un modello matematico costituito dalle seguenti equazioni differenziali:

$$\dot{V} = -\frac{D}{m} - g \sin \gamma + v_h V \sin \gamma \cos \gamma$$

$$\dot{\gamma} = \frac{L}{mV} - \frac{g \cos \gamma}{V} - v_h \sin^2 \gamma$$

dove  $V$  e  $g$  rappresentano, rispettivamente, la velocità e la pendenza della traiettoria,  $L$  e  $D$  le forze aerodinamiche (portanza e resistenza),  $m$  la massa del volatile e  $g$  l'accelerazione di gravità. Il termine  $v_h$  rappresenta il gradiente del vento, ossia:

$$v_h = \frac{dv_w}{dh} = \frac{v_r/h}{\ln(h_r/h_0)}$$

Le forze aerodinamiche di portanza e resistenza sono state modellate secondo la classica struttura:

$$L = \frac{1}{2} \rho V^2 S C_L$$

$$D = \frac{1}{2} \rho V^2 S C_D$$

La densità dell'aria  $\rho$  subisce piccole variazioni nelle simulazioni di seguito descritte: nulla vieta, dunque, di considerare un modello approssimato in cui essa venga posta pari ad un valore costante, ad esempio pari a quello standard a livello del mare ( $\rho_0 = 1,225 \text{ kg/m}^3$ ). Senza eccessiva complicazione si è deciso comunque di inserire un modello di atmosfera abbastanza vicino a quello Standard Internazionale, basato su una funzione esponenziale:

$$\rho = \rho_0 \exp\left(\frac{h}{\beta}\right)$$

Il parametro  $\beta$  è definito 'altezza di scala' e vale  $9296 \text{ m}$ , valore che permette alla formulazione di mantenere un errore massimo del 3% rispetto al modello standard.

Definita  $S$  come la superficie in pianta del volatile, è possibile introdurre, rispettivamente, i coefficienti adimensionali di portanza e resistenza  $C_L$  e  $C_D$ . Durante ogni simulazione verrà mantenuto un valore costante di  $C_L$  e, di conseguenza, di  $C_D$ , modellato secondo polare di Prandtl:

$$C_D = C_{D0} + k C_L^2$$

Dove i termini  $C_{D0}$  e  $k$  vengono illustrati nella Tabella I.

Il modello è infine completato dalle equazioni della cinematica, che forniscono la posizione e la quota nel sistema di riferimento ‘inerziale’  $F_E$ :

$$\begin{aligned}\dot{x} &= V \cos\gamma - v_h h \\ \dot{h} &= V \sin\gamma\end{aligned}$$

Appare subito chiaro dalle precedenti equazioni che il termine  $v_h V \sin\gamma \cos\gamma$  può rappresentare un termine di resistenza (e quindi produrre una decelerazione) oppure di spinta (e quindi accelerare il moto). È opportuno ricordare che in un volo planato stazionario in assenza di vento il valore di  $\dot{\gamma}$  è sempre negativo e questo comporta una diminuzione costante di energia che si traduce in una perdita di quota. La presenza di un gradiente di vento può arrestare e anche invertire questo processo; infatti, volando controvento in traiettorie di salita e a favore di vento in traiettorie di discesa il termine  $v_h V \sin\gamma \cos\gamma$  ha sempre segno positivo e quindi rappresenta un termine di accelerazione (propulsivo) che tende ad arrestare la perdita di energia. Nella Fig. 1 è illustrato il meccanismo di inversione del vento a seconda della fase di volo: si sottolinea comunque che tale situazione è soltanto un artificio teorico utilizzato in simulazione; nella realtà l'albatro segue una traiettoria tridimensionale, dove il volatile vira contro e a favore di vento durante, rispettivamente, la salita e la discesa. Il valore del gradiente di vento per il quale si ottiene  $\dot{\gamma} = 0$  è facilmente ricavabile dalla prima equazione del moto:

$$v_h = \frac{D/mg + g \sin\gamma}{V \sin\gamma \cos\gamma}$$

## Risultati e Conclusioni

Simulazioni numeriche del modello matematico descritto nel precedente paragrafo sono state effettuate nell'ambiente di calcolo *MATLAB/Simulink*<sup>®</sup>, utilizzando i parametri descrittivi riportati nella Tabella I:

Tab. I - Parametri utilizzati per la simulazione.

Parametro	Valore
Superficie alare ( $S$ )	0,65 m <sup>2</sup>
Apertura alare ( $b$ )	3,44 m
Coefficiente di resistenza indotta ( $k$ )	0,019
Coefficiente di resistenza parassita ( $C_{D0}$ )	0,033
Efficienza aerodinamica massima ( $EM$ )	20
Massa	8,5 kg
Quota iniziale	10 m
Velocità iniziale	40 km/h

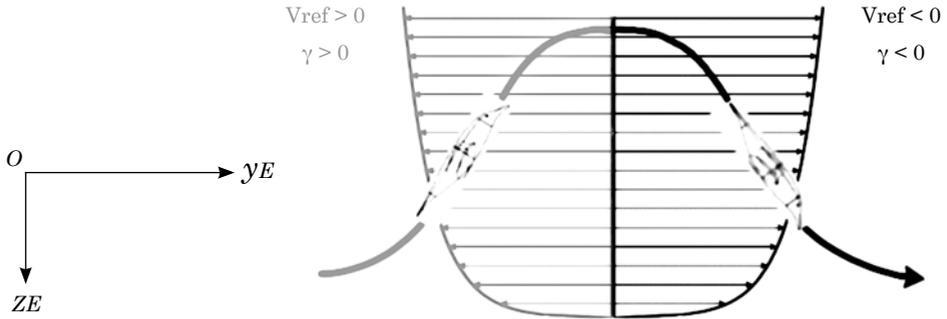


Fig. 1 - Inversione del vento nel modello bidimensionale.

Le seguenti figure riportano i risultati ottenuti integrando le equazioni del moto. In Fig. 2 sono riportati gli andamenti temporali delle variabili che descrivono la traiettoria: quota, velocità e pendenza della traiettoria. Appare chiaro come il volo si assesti su una traiettoria auto-sostenuta e tutte le variabili presentino una oscillazione attorno ad un valore di riferimento (sopra segnato). La Fig. 3 riporta invece il legame tra lo spazio percorso e le condizioni del vento. In caso di atmosfera calma o di vento costante nel tempo, l'autonomia chilometrica risulta limitata; è ovvio però come essa risulti comunque massimizzata nel caso con vento a favore, poiché la massa d'aria in movimento accompagna favorevolmente il volatile nel suo avanzare. Se tuttavia viene adottata l'inversione automatica del gradiente e si mantiene l'intensità al di sopra di un valore critico  $v_{refmin}$ , allora lo spazio percorso tende all'infinito (traiettoria auto-sostenuta).

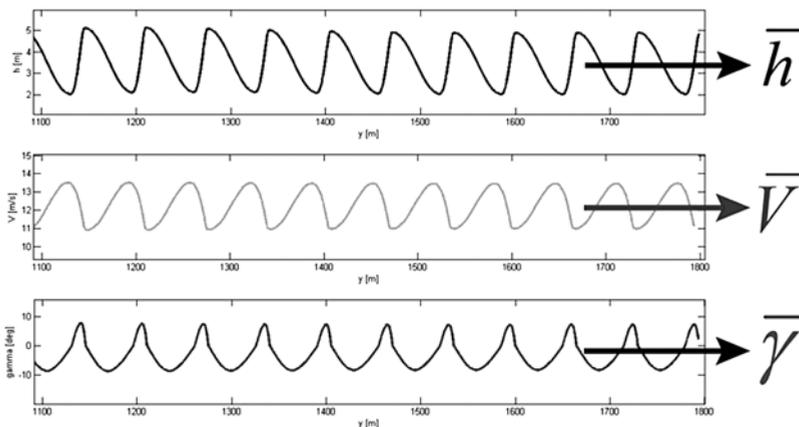


Fig. 2 - Andamento autosostenuto di alcune grandezze attorno ai relativi valori medi (oscillazioni a regime).

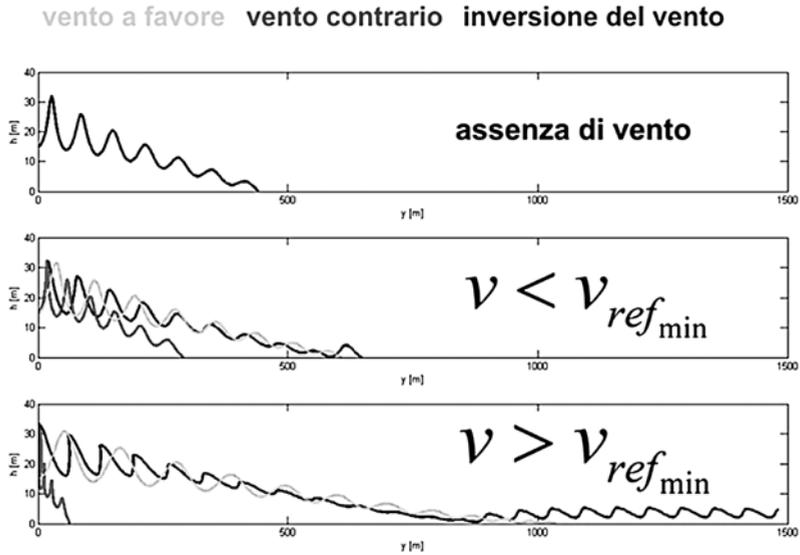


Fig. 3 - Andamento dell'autonomia chilometrica per varie condizioni di vento.

Nella Fig. 4 il valore minimo di velocità che permette il Volo Librato Dinamico (VLD) è stato analizzato numericamente al variare del coefficiente di portanza. Evidentemente, il VLD può essere effettuato solo mantenendosi al di sopra di una tale curva; se la velocità del vento dovesse

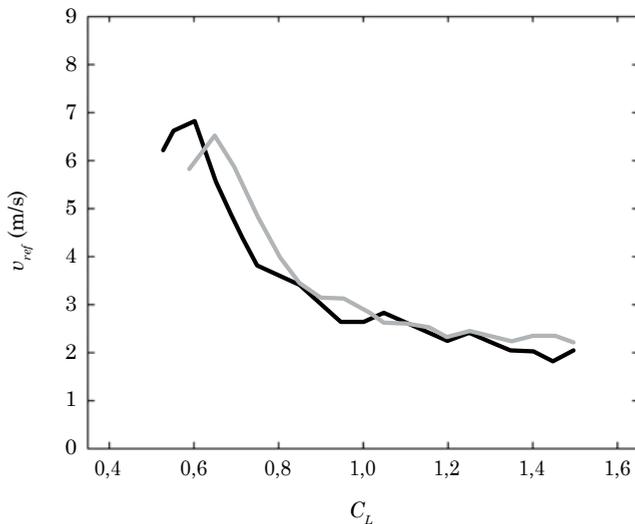


Fig. 4 - Andamento della minima velocità  $v_{ref}$  al variare del  $C_L$  di volo.

scendere al di sotto del valore minimo associato a quell'incidenza di volo, l'albatro o la procellaria non dovrebbero fare altro che portarsi ad un  $C_L$  più elevato (nei limiti imposti dalla condizione di stallo, in tale modello data da  $C_{Lmax}=1,5$ ). In particolare si può osservare come, al di sotto di  $C_L=0,53$  il volo librato dinamico non sia possibile per nessuna intensità di vento. Si ricorda però che tali risultati sono validi per gli *assegnati parametri* di modellazione del volatile.

È interessante infatti notare cosa succede, ad esempio, al variare del peso dell'esemplare; incrementandone la massa di  $1\text{ kg}$ , è possibile ridisegnare (in grigio chiaro) la curva della minima velocità  $v_{ref}$  e confrontarla con la precedente (in nero); come è possibile osservare dalla figura, la nuova curva risulta spostata verso il basso e verso destra (il  $C_L$  minimo che consente il VLD è passato dal valore di  $0,53$  a  $0,59$ ) rispetto a quella blu, valida per una massa di  $m=8,5\text{ kg}$ . A parità di assetto, dunque, un peso maggiore richiede una più grande intensità di vento; al contrario, facendo delle considerazioni di tipo operativo, per assegnata velocità del vento, un incremento del peso implica la sistemazione ad un'incidenza più elevata. È esattamente quello che ci si poteva aspettare: risulta infatti ragionevole concludere che per spingere un velivolo più grosso servano dei motori più potenti; in questo caso la spinta è fornita da un motore virtuale, il gradiente del vento. Come è noto la distribuzione dei Diomedidae coincide con le aree oceaniche dove, solitamente, spirano venti di intensità sufficiente al *soaring dinamico*; l'anatomia di tali volatili impedisce loro di condurre un volo battuto prolungato, che richiederebbe uno sforzo al di là delle loro possibilità; la facoltà, invece, di coprire centinaia di chilometri in volo librato permette loro di procacciarsi del cibo e di muoversi verso i siti riproduttivi tra loro molto distanziati in maniera agevole, col minimo dispendio energetico. Ciò giustifica la diffusione degli albatrici, di dimensioni maggiori rispetto a molte altre specie pelagiche (come ad esempio le berte) soprattutto in alcune zone del pianeta.

#### BIBLIOGRAFIA

- BARNES J.P., 2005 - How flies the albatross - The flight mechanics of dynamic soaring - *T.W.I.T.T. Newsletter*, 226.
- BOSLOUGH M.B.E., 2002 - Autonomous Dynamic Soaring Platform for Distributed Mobile Sensor Arrays - Sand Report 2002, *Sandia National Laboratories*.
- CASAROSA C., 2004 - Meccanica del volo - *Edizioni PLUS*, Pisa.
- PENNYCUICK C.J., 1982 - The flight of petrels and albatrosses (*Procellariiformes*), observed in South Georgia and its vicinity - *Philosophical Transactions of the Royal Society of London B*, 300: 75-106.
- RAYLEIGH J.W.S., 1883 - The soaring of birds - *Nature*, 27: 534-535.
- SACHS G., 2005 - Minimum shear wind strength required for dynamic soaring of albatrosses - *Ibis*, 147: 1-10.