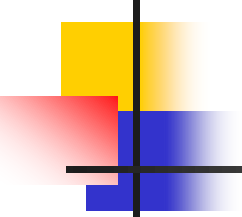


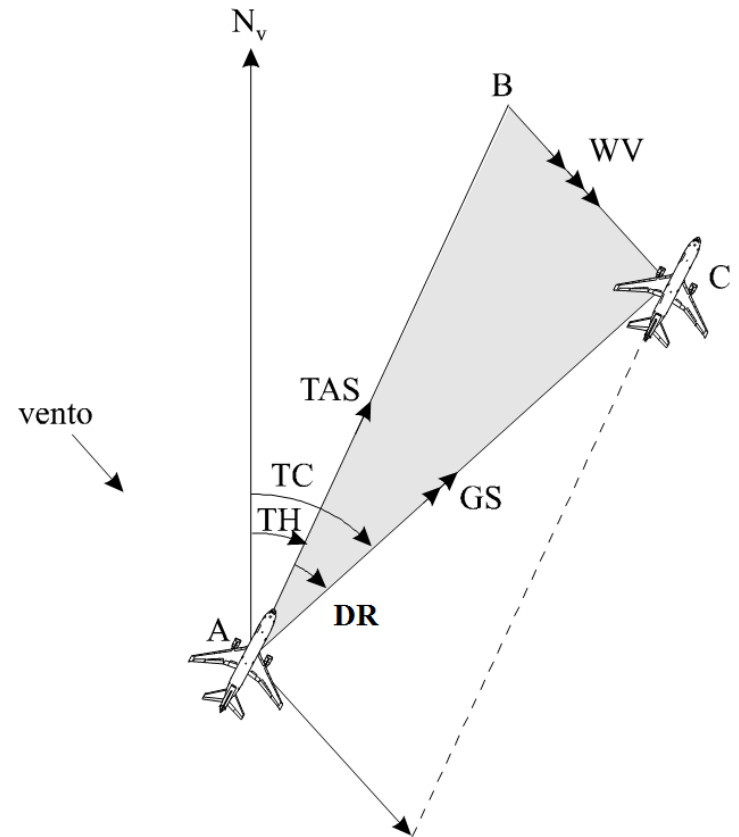
Navigazione nel vento

Il triangolo del vento

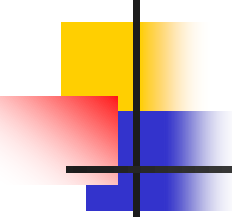
- 
- In pratica non si verifica quasi mai una navigazione in atmosfera tranquilla per la presenza del vento, definito come lo spostamento di una massa d'aria, per lo più in senso orizzontale, dovuto a differenze di temperatura e di pressione da luogo a luogo.
 - Gli elementi del vento sono la direzione e la velocità che vengono indicati con il simbolo WD/WV o anche W/V.
 - Per *direzione* ($WD=Wind\ Direction$) s'intende la direzione dell'orizzonte da cui esso proviene, per *velocità* ($WV=Wind\ Velocity$) lo spazio che la massa d'aria percorre nell'unità di tempo. La velocità del vento viene espressa nella stessa unità di misura della velocità dell'aeromobile (normalmente in nodi). Ad esempio, un vento proveniente da *SE* (vento di scirocco) con velocità 50 kt viene indicato con $135^{\circ}/50\ kt$.

Il triangolo del vento

Triangolo del vento:
rappresentazione grafica
del'influenza del vento
sull'aeromobile.



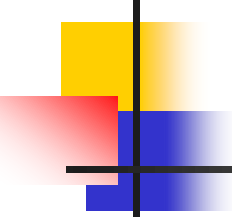
Il triangolo del vento



Le velocità sono rappresentate da segmenti orientati (*vettori*); le varie velocità che si considerano sono le seguenti:

- *velocità all'aria TAS (True Air Speed)*; si rappresenta con un segmento orientato avente per direzione quella dell'asse longitudinale dell'aeromobile (TH); per senso quello che va da poppa a prora, per grandezza il numero di nodi (tale vettore, per convenzione, è contrassegnato da una freccia);
- *velocità al suolo GS (Ground Speed)*; è data, in direzione, senso e grandezza dalla diagonale AC del parallelogramma costruito sui segmenti orientati TAS e WV (per convenzione è contrassegnato con due frecce); ha per direzione la TC;
- *velocità del vento W/V (Wind Velocity)*; si rappresenta pure con un segmento orientato avente per direzione quella di provenienza del vento, per senso quello definito dal punto dell'orizzonte verso cui il vento dirige, per grandezza il numero di nodi (è indicato con tre frecce).

Il triangolo del vento

- 
- Dalla figura si ricava:

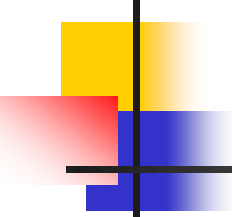
$$TC = TH + DRIFT$$

- L'angolo di deriva DRIFT ANGLE è, pertanto, dato dalla relazione algebrica:

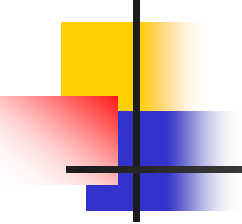
$$DRIFT = TC - TH$$

- La deriva è dunque uguale alla differenza tra la rotta vera e la prora vera; se è $TC > TH$ essa è positiva (RIGHT), è negativa (LEFT) se invece risulta $TC < TH$.

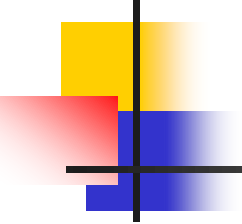
Il triangolo del vento

- 
- Il triangolo ABC , i cui lati sono TAS , WV e GS , è detto triangolo delle velocità o triangolo del vento.
 - Per rappresentarlo basta tracciare con una scala adatta, in grandezza, direzione e verso, la velocità all'aria e successivamente, dalla sua estremità, la velocità del vento.
 - La congiungente l'origine del segmento TAS con l'estremo del segmento WV , dà, in grandezza, direzione e verso, la velocità al suolo GS che completa il triangolo delle velocità.

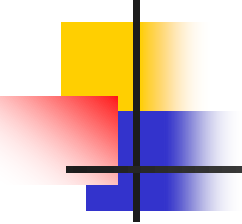
Il triangolo del vento

- 
- Alcune relazioni fondamentali che si ricavano dal triangolo del vento sono:
 - $X_c = TAS * \sin WCA$
 - $ETAS = TAS * \cos WCA$
 - $TH = TC + WCA$
 - $GS = ETAS + L_c$

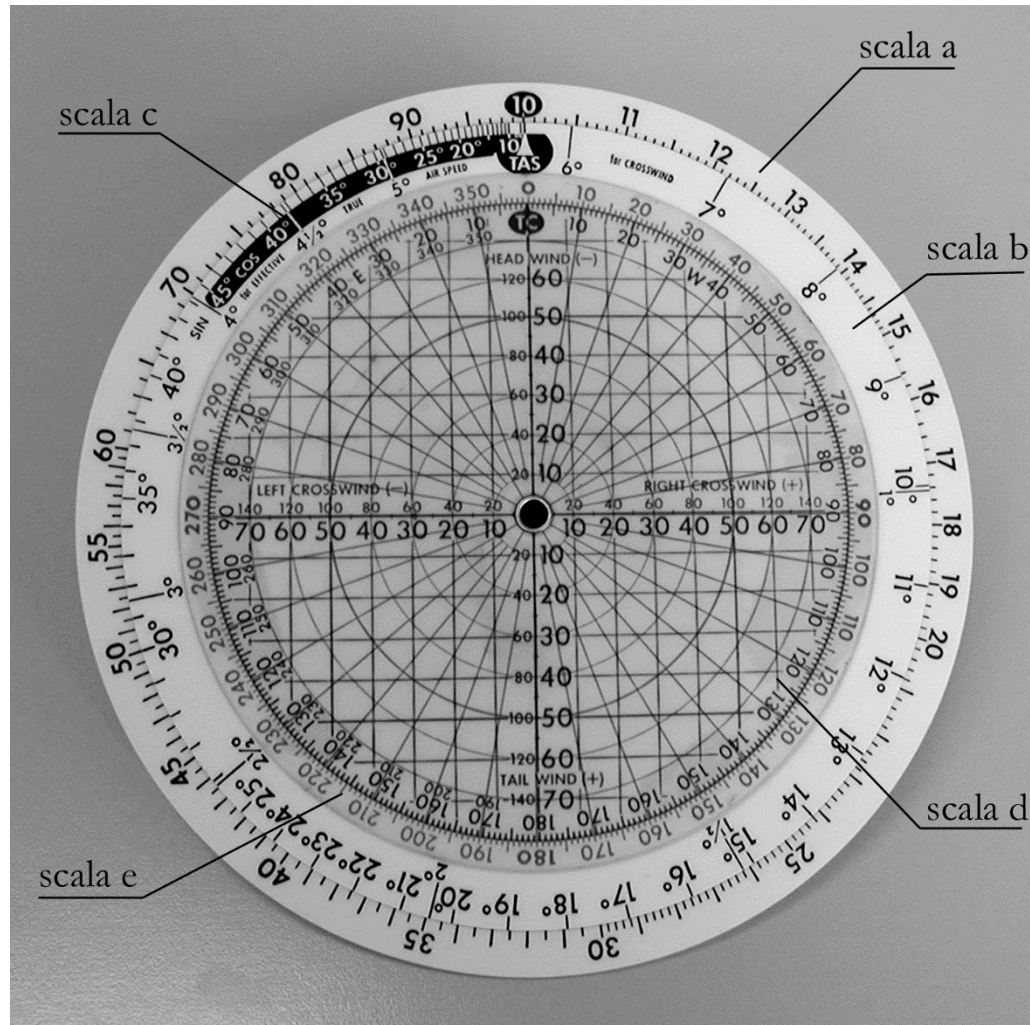
Il triangolo del vento

- 
- Dove con X_c s'intende la componente trasversale del vento;
 - Con L_c la componente longitudinale del vento;
 - Con ETAS la Equivalent True Air Speed;
 - Con WCA il Wind Correction Angle.

1° Problema del vento

- 
- Tra i molteplici problemi relativi alla presenza del vento discutiamo qui il principale.
 - Esso consiste nel determinare la prua vera TH da seguire ed il tempo che s'impiegherà per andare dal punto di partenza a quello di arrivo quando sono note: la velocità all'aria TAS e gli elementi del vento W/V .
 - In altri termini, dati la TC , la TAS e gli elementi del vento W/V , ricavare la GS , l'angolo di correzione di deriva ($WCA=Wind\ Correction\ Angle$) e la TH .
 - Esistono tre tipi di risoluzione:
 - Regolo aeronautico;
 - Analitica;
 - Grafica.

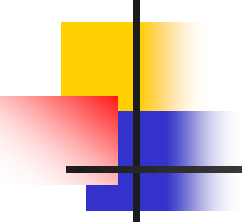
1° Problema del vento



1° Problema del vento con regolo

■ ***Risoluzione con il regolo aeronautico:***

- Il regolo aeronautico è composto da due facce; la parte geometrica è dedicata alla soluzione dei problemi del vento;
- La scala esterna porta incisa alla sua periferia una scala logaritmica graduata da 10 a 100 (*scala a*), uguale a quella del lato analitico;
- La scala intermedia porta incisa alla sua periferia una scala blu logaritmica dei seni per valori angolari fino a 45° (*scala b*) ed una scala bianca (*scala c*), graduata da 0° a 45° , dei logaritmi coseno e fornita di un indice intestato *TAS*;
- Più internamente, sottostante al disco trasparente, vi è una scala goniometrica (*scala e*) graduata uniformemente da 0° a 360° ;
- La *scala d* della figura non viene adottata.



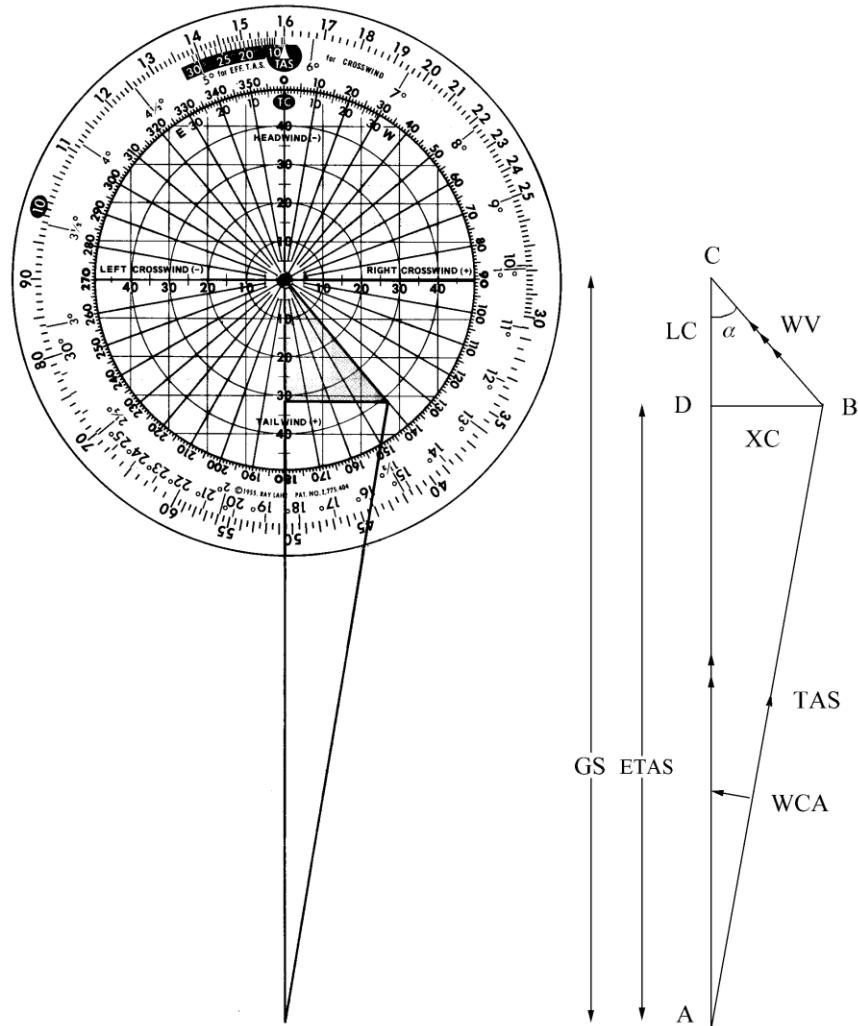
1° Problema del vento con regolo

- Al centro di questo secondo disco vi è un reticolo quadro con origine nel centro del disco;
- Il lato di ciascun quadrato è uguale a 10 o a 20 a seconda della scala adoperata.
- Dal centro di questo disco partono anche delle radiali (una ogni 10°);
- Vi è, inoltre, una serie di cerchi concentrici distanziati di una quantità uguale al lato dei quadrati incisi sul disco precedente.

1° Problema del vento con regolo

- La risoluzione del 1° problema del vento è in parte logaritmica e in parte grafica.
- La figura seguente rappresenta ancora il triangolo del vento: dall'estremità della *TAS* si abbassa la perpendicolare alla *GS* ottenendo il triangolo rettangolo *BCD* i cui lati rappresentano:
 - *BC* il vettore vento;
 - *CD* la componente longitudinale del vento;
 - *BD* la componente trasversale del vento;
- Il disco trasparente, con l'ausilio del sottostante reticolato, consente come si vedrà nel successivo esempio, di ricavare dalla *WV* le due componenti del vento indicate rispettivamente con *LC* e *XC*:
 - *LC*, componente longitudinale del vento, è detta *Tailwind Component* se positiva, *Headwind Component* se negativa.
 - *XC*, componente trasversale del vento, è detta *Right Crosswind* se positiva, *Left Crosswind* se negativa.

1° Problema del vento con regolo

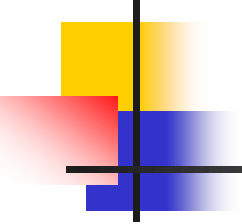


1° Problema del vento con regolo

- Dal triangolo ABD è possibile ricavare l'angolo di correzione di deriva WCA tramite la relazione:

$$\text{sen } WCA = \frac{XC}{TAS}$$

- dove WCA prende lo stesso segno di XC ;
- il lato AD che rappresenta la componente della TAS lungo la rotta.
- Detta componente è utile ai fini della progressione del volo verso il punto di destinazione e per tale motivo è anche nota come $ETAS$ (*Effective True Air Speed*);



1° Problema del vento con regolo

- dal triangolo ABD si ricava:

$$ETAS = TAS \cos WCA$$

- Dal triangolo ABC della stessa figura si ricava inoltre:

$$AC = AD + CD = AB \cos WCA + CD$$

- che diventa:

$$GS = TAS \cos WCA + LC = ETAS + LC$$

1° Problema del vento con regolo

- Se WCA è minore di 8° può porsi $\cos WCA \cong 1$ e $ETAS \cong TAS$; pertanto:

$$GS \cong TAS + LC$$

- commettendo con tale approssimazione un errore inferiore all'1%.

1° Problema del vento con regolo

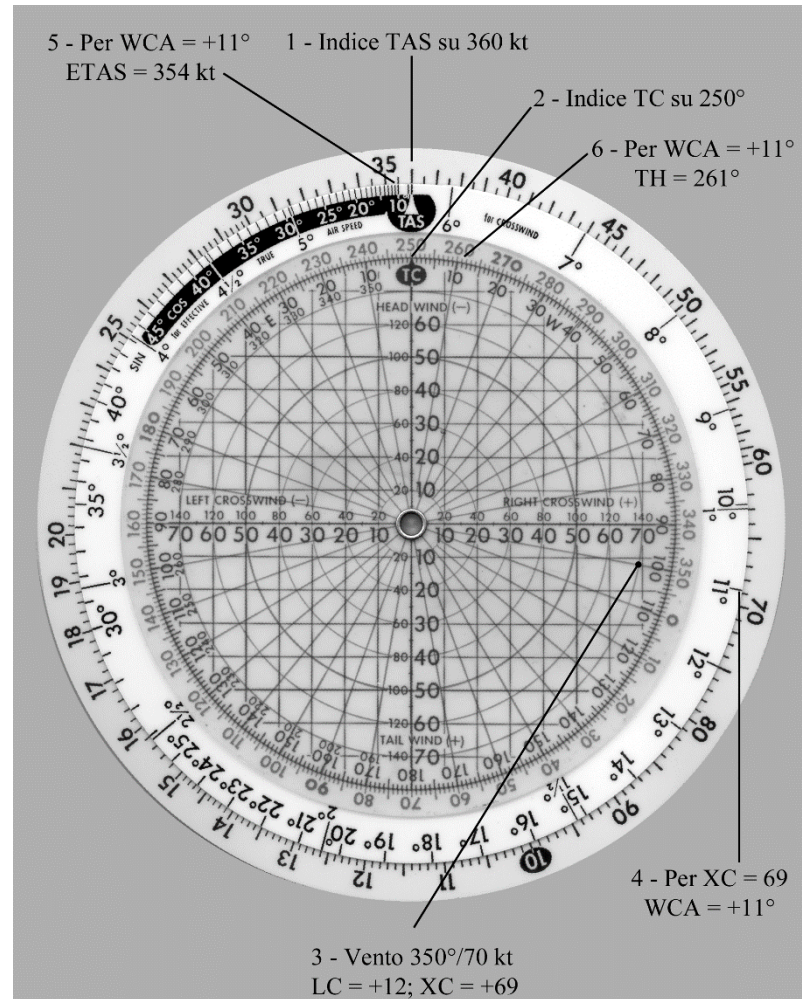
■ Esempio:

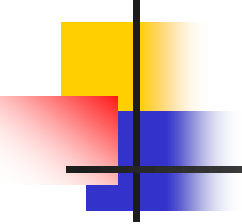
$$TC = 250^\circ$$

$$TAS = 360 \text{ kt}$$

$$WD = 350^\circ$$

$$WV = 70 \text{ kt}$$





1° Problema del vento analitico

■ ***Risoluzione analitica:***

- L'angolo di correzione di deriva WCA , da sommare algebricamente alla TC per ottenere la TH , cioè l'angolo EAD del triangolo del vento ADE , e la *Ground Speed* GS dell'aeromobile possono determinarsi anche a mezzo di formule che si ricavano dal triangolo ADE , in cui: il lato AE è noto essendo uguale alla TAS dell'aeromobile, il lato ED è anche noto perché rappresenta la velocità del vento WV .
- Inoltre, note le direzioni della rotta vera e del vento, è facile stabilire l'angolo che formano fra loro queste due direzioni:

$$\alpha = TC - (WD - 180^\circ)$$

1° Problema del vento analitico

- Dal triangolo ADE , per il teorema dei seni si ha:

$$\frac{TAS}{\text{sen } \alpha} = \frac{WV}{\text{sen } WCA}$$

- da cui:

$$\text{sen } WCA = \frac{WV}{TAS} \text{sen } \alpha$$

- formula che permette di determinare WCA ; il segno di WCA dipende dal valore di α .
- Per calcolare TH, si usa la relazione precedente della risoluzione con regolo:

$$TH = TC + WCA$$

1° Problema del vento analitico

- Per ricavare la GS , essendo l'angolo in E del triangolo uguale a α , basta applicare nuovamente la relazione dei seni.

- Si ha:

$$\frac{GS}{\sin[180^\circ - (\alpha + WCA)]} = \frac{TAS}{\sin \alpha}$$

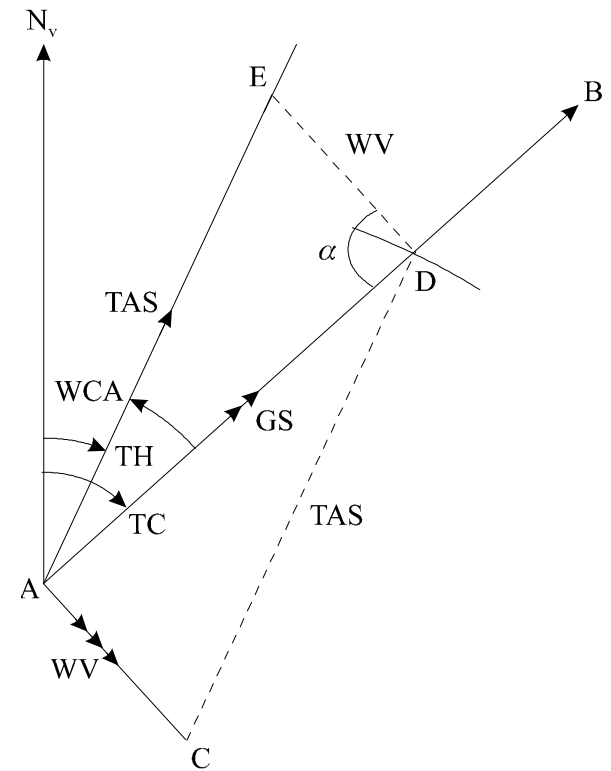
- da cui:

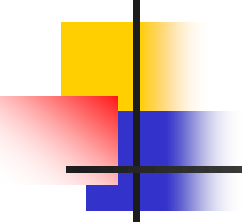
$$GS = \frac{\sin(\alpha + WCA)}{\sin \alpha} TAS$$

1° Problema del vento grafico

■ ***Risoluzione grafica:***

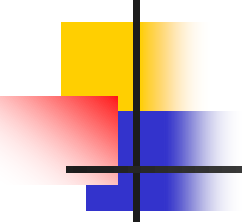
- Fissato il punto A su un foglio di carta, il cui piano, come sempre, è quello orizzontale passante per il velivolo, e tracciata per esso la semiretta, che rappresenta la linea meridiana vera passante per A , si fa uscire da A una semiretta formante con la linea meridiana un angolo uguale alla rotta per andare dal punto di partenza A al punto di arrivo B .





1° Problema del vento grafico

- Quest'angolo può essere misurato sulla carta di navigazione che contiene i due punti A e B , oppure può essere calcolato conoscendo le coordinate geografiche di A e di B .
- Dal punto A si fa, poi, uscire una semiretta nella direzione del vento e di senso opposto a quello da cui esso spira.
- In una scala conveniente, si porta su questa semiretta la velocità del vento.
- Con centro nel punto C ottenuto e con raggio uguale alla TAS dell'aeromobile, si taglia la direzione AB nel punto D .
- Si congiunge C con D e da A si conduce una semiretta parallela alla congiungente CD .
- L'angolo che questa semiretta forma con la linea meridiana di A sarà la prora vera TH da seguire per andare da A in B ; l'angolo EAD è la *correzione di deriva* WCA (*Wind Correction Angle*) da sommare algebricamente alla TC per ottenere la TH .
- *La lunghezza del segmento AD rappresenta la velocità al suolo GS .*
- *Dividendo la distanza che separa i due punti A e B per detta velocità, si ottiene il tempo che si impiega per andare dal punto di partenza al punto di arrivo.*



2° Problema del vento con regolo

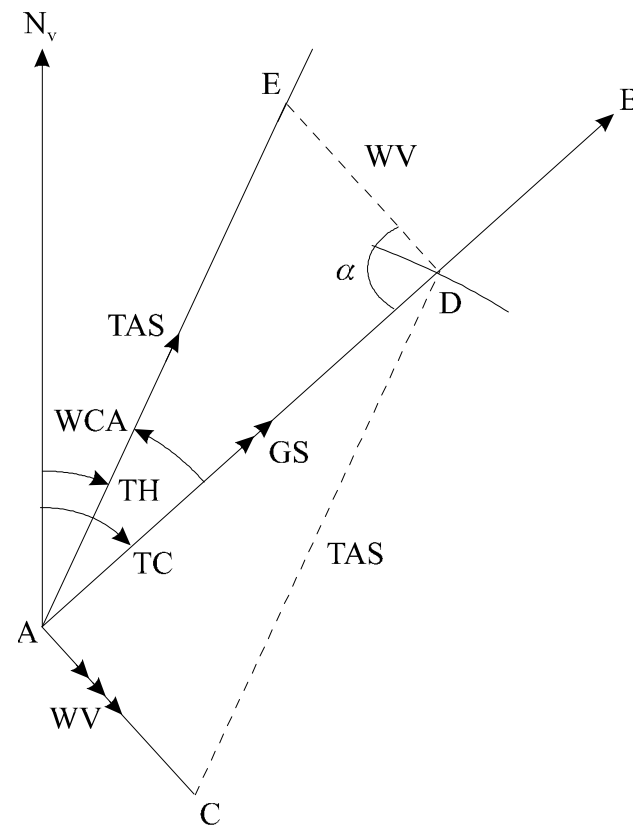
■ ***Risoluzione con il regolo aeronautico:***

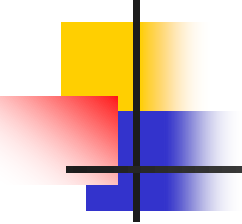
- La risoluzione di questo problema con il regolo Jeppesen non è agevole in quanto è necessario, come si vedrà, ricorrere ad un procedimento di successive approssimazioni.
- Dopo aver segnato con un puntino l'intersezione della radiale, corrispondente al valore della WD , con la circonferenza relativa alla WV in modo analogo a quanto visto per il problema fondamentale, si posiziona il disco intermedio sul valore della TAS .
- Poiché non è possibile fare altrettanto con il disco trasparente in quanto non è nota la TC , si posiziona tale disco sul valore della TH in modo da avere un valore approssimato della componente trasversale del vento XC .
- Con tale valore si ricava dalla scala b una stima di WCA da cui si trae un valore approssimato di TC ($TC = TH - WCA$).
- Si riposiziona il disco trasparente su tale valore e si ricava un nuovo valore di XC e, di conseguenza, di WCA .
- Si ricava un valore aggiornato della TC e si riposiziona il disco trasparente procedendo al calcolo della GS come per il problema fondamentale.
- In casi particolari potrebbero richiedersi ulteriori iterazioni.

2° Problema del vento grafico

■ ***Risoluzione grafica:***

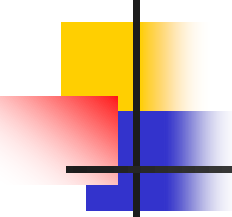
- Si traccia per un punto A del piano la semiretta, direzione della linea meridiana vera. Dal punto A si fa uscire una semiretta nella direzione della prora vera sulla quale, secondo una scala conveniente, si porta la velocità all'aria TAS. Dallo stesso punto si fa uscire un'altra semiretta nella direzione del vento e di senso opposto a quello da cui esso spira, sulla quale si porta, sempre con la stessa scala, la velocità del vento WV.





2° Problema del vento grafico

- Sulle velocità all'aria e del vento si costruisce il parallelogramma delle velocità, la cui diagonale rappresenta in direzione e senso la rotta dell'aeromobile ed in grandezza la velocità al suolo.
- L'angolo, che la direzione della diagonale forma con la direzione della linea meridiana, dà la rotta vera dell'aeromobile.



2° Problema del vento analitico

■ ***Risoluzione analitica:***

- Il problema può risolversi calcolando le due componenti della velocità al suolo GS lungo la direzione $E-W$ e lungo la direzione $N-S$.
- Dalla figura a) che segue si ha:

$$AC' = AB' + B'C'$$

- che diventa:

$$GS \sin TC = GS_1 = TAS \sin TH - WV \sin WD$$

- Il segno (-) è giustificato dal fatto che il vettore vento, come già visto, è diretto nel senso opposto a quello da cui esso spira.
- Analogamente dalla figura b) si ha:

$$GS \cos TC = GS_2 = TAS \cos TH - WV \cos WD$$

2° Problema del vento analitico

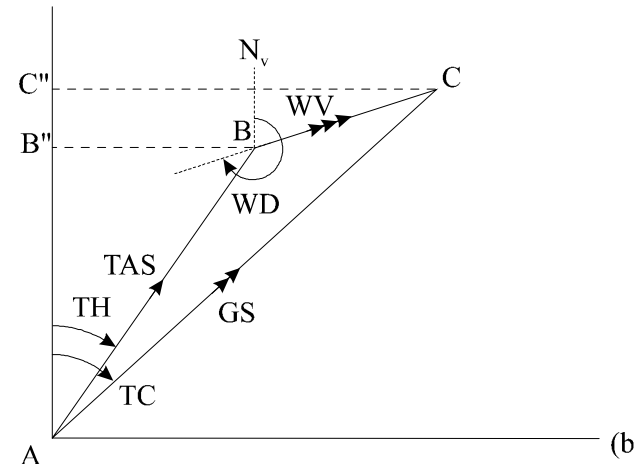
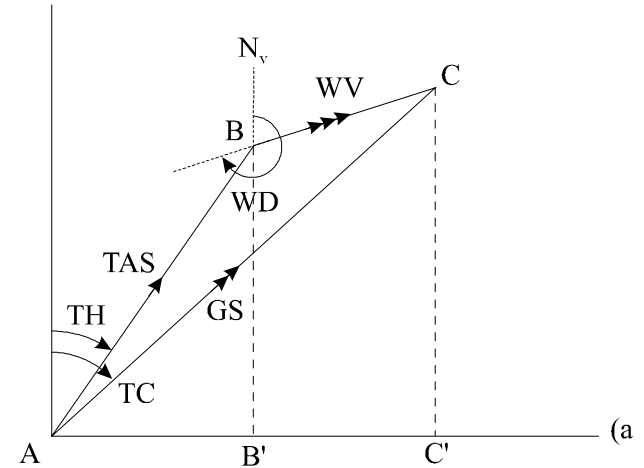
- La GS può ricavarsi dalla relazione:

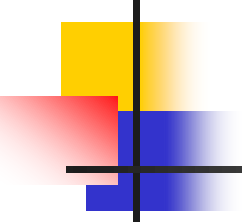
$$GS = \sqrt{GS_1^2 + GS_2^2}$$

- mentre, dividendo la GS_1 per la GS_2 si ottiene:

$$\tan TC = \frac{GS_1}{GS_2}$$

- La TC ricavata con la precedente relazione è minore di 90° (rotta quadrantale) e prende come primo segno N o S a seconda del segno + o - di GS_2 e come secondo segno E o W a seconda del segno + o - di GS_1 .





2° Problema del vento analitico

■ Esempio:

$$TH = 150^\circ$$

$$TAS = 400 \text{ kt}$$

$$WD = 300^\circ$$

$$WV = 50 \text{ kt}$$

$$GS_1 = 243.3 \text{ kt}$$

$$GS_2 = -371.4 \text{ kt}$$

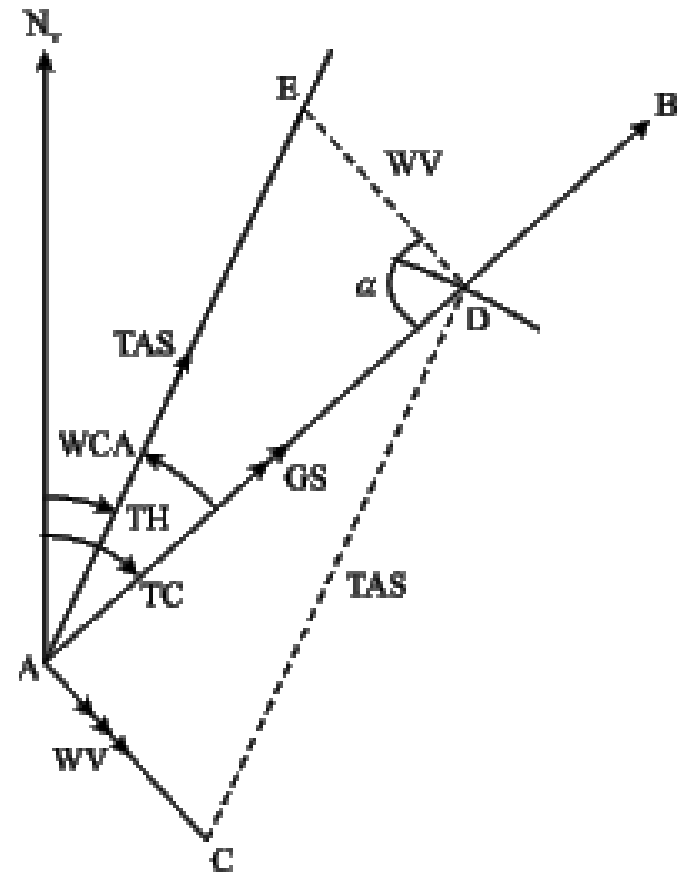
$$GS = 444 \text{ kt}$$

$$TC = S33^\circ.2E = 146^\circ.8$$

3° Problema del vento

■ ***Risoluzione grafica***

Assumendo sempre come direzione di riferimento la linea meridiana vera , basta costruire, adottando un'opportuna scala, le velocità all'aria e al suolo TAS e GS. La congiungente ED, estremo TAS-estremo GS, definisce il vettore vento del quale può stabilirsi direzione e velocità.



3° Problema del vento

- ***Risoluzione analitica -***

- In questo caso, si ha:

$$WV \cdot \sin WD = WV_1 = TAS \cdot \sin TH - GS \cdot \sin TC$$

$$WV \cdot \cos WD = WV_2 = TAS \cdot \cos TH - GS \cdot \cos TC$$

- La WV si ricava da:

$$WV = \sqrt{(WV_1^2 + WV_2^2)}$$

- mentre la WD si ricava dalla relazione:

$$\tan WD = \frac{WV_1}{WV_2} \Rightarrow WD = \tan^{-1} \left(\frac{WV_1}{WV_2} \right)$$

3° Problema del vento

- ***Risoluzione con il regolo Jeppesen –***

- Si predispone il regolo sui valori della TAS e della TC; dalla differenza tra la TH e la TC si ricava WCA ed in corrispondenza di tale angolo si legge sulla scala b il valore della crosswind component XC.
- La componente del vento lungo la rotta LC può ricavarsi sottraendo dalla GS la ETAS ricavata utilizzando, così come nel problema fondamentale del vento, la scala c del regolo.
- Con i valori di LC e XC così ottenuti si può segnare sul disco trasparente un puntino in corrispondenza del quale si leggono la WD e la WV.

3° Problema del vento

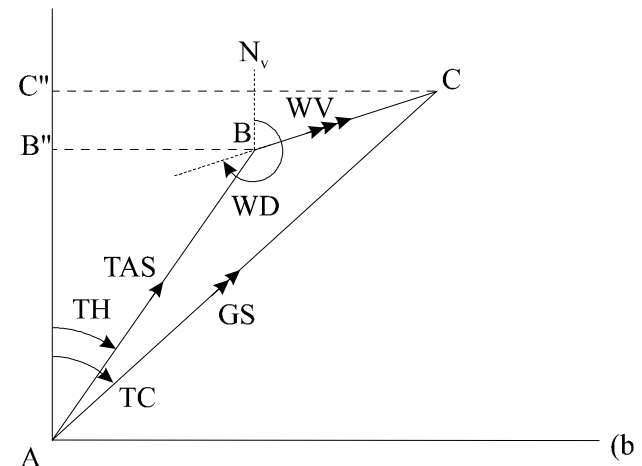
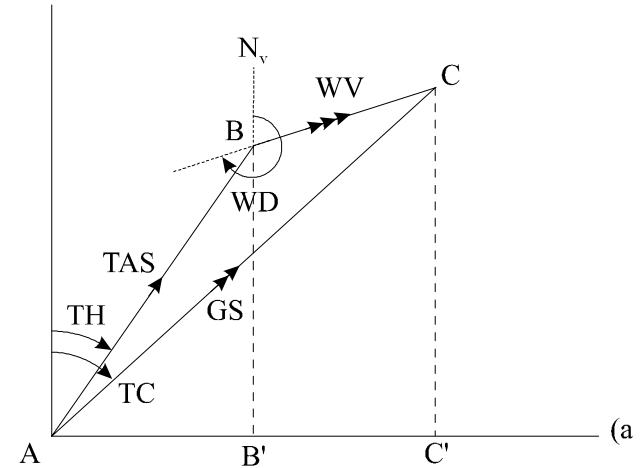
- La GS può ricavarsi dalla relazione:

$$GS = \sqrt{GS_1^2 + GS_2^2}$$

- mentre, dividendo la GS_1 per la GS_2 si ottiene:

$$\tan TC = \frac{GS_1}{GS_2}$$

- La TC ricavata con la precedente relazione è minore di 90° (rotta quadrantale) e prende come primo segno N o S a seconda del segno + o - di GS_2 e come secondo segno E o W a seconda del segno + o - di GS_1 .

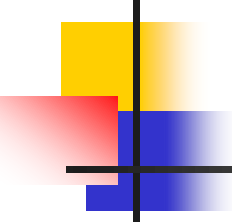


3° Problema del vento

■ ***Risoluzione con il regolo Jeppesen –***

- La risoluzione di questo problema con il regolo Jeppesen non è agevole in quanto è necessario, come si vedrà, ricorrere ad un procedimento di successive approssimazioni.
- Dopo aver segnato con un puntino l'intersezione della radiale, corrispondente al valore della WD , con la circonferenza relativa alla WV in modo analogo a quanto visto per il problema fondamentale, si posiziona il disco intermedio sul valore della TAS .
- Poiché non è possibile fare altrettanto con il disco trasparente in quanto non è nota la TC , si posiziona tale disco sul valore della TH in modo da avere un valore approssimato della componente trasversale del vento XC .
- Con tale valore si ricava dalla scala b una stima di WCA da cui si trae un valore approssimato di TC ($TC=TH-WCA$).
- Si riposiziona il disco trasparente su tale valore e si ricava un nuovo valore di XC e, di conseguenza, di WCA .
- Si ricava un valore aggiornato della TC e si riposiziona il disco trasparente procedendo al calcolo della GS come per il problema fondamentale.
- In casi particolari potrebbero richiedersi ulteriori iterazioni.

3° Problema del vento



■ Esempio:

Sono dati: $TH=71^\circ$; $TAS=300^k$; $TC=80^\circ$; $GS=328^k$. Ricavare gli elementi del vento.

Risolvendo le relazioni ricavate in precedenza si ha:

$$WV_1 = -39,4^k$$

$$WV = 56,5^k$$

$$WV_2 = +40,7^k$$

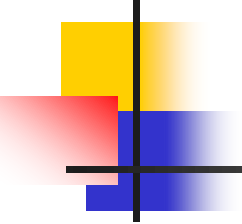
$$WD = N044^\circ W = 316^\circ$$

4° Problema del vento

■ Risoluzione grafica –

- Questo problema trova la sua applicazione quando si stabilisce il tempo che si vuole impiegare per andare da un punto ad un altro della superficie terrestre sapendo di dover navigare con un vento i cui elementi sono noti.
- Fissata la direzione della linea meridiana vera di A, si riporta (fig. 6.5) sulla rotta relativa ai punti A e B il vettore GS, il cui modulo è ottenuto dividendo la distanza in miglia che separa i due punti per il tempo che si vuole impiegare a percorrerla.
- Costruito nel punto A il vettore vento WV, con senso opposto a quello da cui spira, basta congiungere l'estremo di WV con l'estremo di GS.

4° Problema del vento



- L'angolo che la parallela a detta congiungente condotta da A forma con la direzione della linea meridiana, dà la prora vera TH che dev'essere seguita per spostarsi da A a B; mentre la lunghezza del segmento AE dà la velocità all'aria TAS. La prora vera TH dev'essere convertita, come al solito, in prora bussola CH.
- Facciamo osservare che se l'aeromobile si spostasse con prora uguale alla rotta, esso non raggiungerebbe il punto di destinazione. Inoltre l'angolo di de-riva risulterebbe diverso dall'angolo EAD, che è quello di cui dev'essere corretta la rotta per pervenire alla fine del tempo stabilito nel punto B. Ciò si verifica perché la deriva varia col cambiare della prora.

4° Problema del vento

■ Risoluzione analitica –

- Anche in questo caso, del triangolo del vento sono noti una componente e la risultante; il problema si risolve in modo analogo ai casi precedenti.

$$TAS \cdot \sin TH = TAS_1 = GS \cdot \sin TC + WV \cdot \sin WD$$

$$TAS \cdot \cos TH = TAS_2 = GS \cdot \cos TC + WV \cdot \cos WD$$

$$TAS = \sqrt{(TAS_1^2 + TAS_2^2)}$$

$$\tan TH = \frac{TAS_1}{TAS_2} \Rightarrow TH = \tan^{-1} \left(\frac{TAS_1}{TAS_2} \right)$$

4° Problema del vento

- **Risoluzione con il regolo Jeppesen -**
- Poiché non è nota la TAS, il disco intermedio non può essere posizionato mentre può posizionarsi quello trasparente (essendo noto TC) sul quale si segna con un puntino provenienza e velocità del vettore vento. Si ricavano le due componenti del vento LC e XC; con LC, nota la GS, si ricava la ETAS ($ETAS = GS - LC$).
- Con tale valore (utilizzato al posto della TAS) si posiziona il disco intermedio. Con XC può leggersi sulla scala b la WCA con la quale si ricava la TH.
- Per passare dalla ETAS alla TAS si ruota il disco intermedio fino a collimare il valore della ETAS con il WCA letto sulla scala c. La nuova posizione dell'indice TAS ci dà il valore cercato.

4° Problema del vento

■ Esempio:

Sono dati: $TC=225^\circ$; $GS=500^k$; $WD=0^\circ$; $WV=60^k$. Ricavare la TH e la TAS.
Risolvendo le relazioni ricavate in precedenza si ha:

$$TAS_1 = -353,5^k$$

$$TAS = 495,5^k$$

$$TAS_2 = -293,5^k$$

$$TH = S050,3^\circ W = 230,3^\circ$$