

POLITECNICO DI TORINO



**CORSO DI LAUREA IN INGEGNERIA
AEROSPAZIALE**

PROVA FINALE DI I LIVELLO

**STUDI FISICI E APPLICAZIONI
INGEGNERISTICHE DELL'EFFETTO MAGNUS**

CANDIDATO

Samuele Di Sturco

RELATORE

Prof.ssa Stefania Scarsoglio

ANNO ACCADEMICO 2017-2018

PREFAZIONE

La seguente Prova Finale di I Livello si propone di essere un approfondimento sull'effetto Magnus, un fenomeno fisico appreso nel corso di Aerodinamica. Poiché durante il suddetto corso è lasciato poco spazio ad una discussione ampia e approfondita di questo argomento, si è deciso, in questa trattazione, di analizzarlo e studiarlo per non trascurare troppo un fenomeno che, oggi più che mai, sta via via rivoluzionando ed ampliando il settore dell'Ingegneria in generale e, in particolare, di quella Aerospaziale. Grazie ai nuovi studi su di esso condotti, si sono realizzate delle invenzioni strabilianti e sorprendenti che, fino a poco più di un secolo fa, risultavano essere solo delle idee visionarie di ingegneri sognatori.

Pertanto, partendo da poche informazioni basilari si è cercato, con un accurato lavoro di ricerca, di aprire una finestra su tutto un settore fisico ed ingegneristico, sconosciuto agli occhi dei più, e di dare il più possibile lustro e prestigio ad un argomento che, nella maggior parte dei casi, risulta abbastanza sconosciuto e alquanto anonimo. Il risultato finale di tutto questo è il suddetto elaborato.

La tesi, nel suo complessivo, si articola in cinque capitoli ed è strutturata in maniera graduale per una spiegazione il più possibile fluida ed organica. Il primo svolge un ruolo puramente introduttivo ed in esso è riportata una presentazione del fenomeno, brevi cenni biografici su Heinrich Gustav Magnus e dei richiami di Fluidodinamica per avere chiari dei concetti che verranno nominati nel corso dell'elaborato. A partire dal secondo si entra nella parte saliente della trattazione e, inizialmente, si analizza l'effetto Magnus da un punto di vista puramente di carattere fisico. Giunti al terzo capitolo si passa ad analizzare le varie applicazioni e gli innumerevoli riscontri ingegneristici che l'effetto Magnus ha avuto nel corso dei decenni. Nello specifico, nel terzo sono trattate tutta una serie di applicazioni sportive per migliorare l'efficienza e l'aerodinamica di varie tipologie di palle da gioco. Il quarto presenta invece delle applicazioni più di carattere pratico e meno ludico, trattando invenzioni per la generazione di corrente elettrica e studi per il miglioramento della guida di proiettili in volo. Chiude la tesi il quinto capitolo che, partendo da analisi di carattere storico, presenta la migliore realizzazione pratica, basata sull'effetto Magnus, che si è riusciti a realizzare e di come essa sia stata utilizzata nel campo della propulsione navale ed aeronautica.

INDICE

CAPITOLO 1 INTRODUZIONE	1
1.1 Heinrich Gustav Magnus.....	3
1.2 Richiami di Fluidodinamica	4
1.2.1 Strato limite.....	4
1.2.2 Numero di Reynolds	5
1.2.3 Equazione di Bernoulli	6
1.2.4 Equazioni di Navier-Stokes	7
1.2.5 Numero di Mach	8
1.2.6 Portanza e resistenza	9
CAPITOLO 2 STUDI FISICI DELL'EFFETTO MAGNUS.....	12
2.1 Spiegazione dell'effetto Magnus sfruttando la differenza di velocità del flusso tra i lati opposti del corpo	13
2.2 Spiegazione dell'effetto Magnus attraverso considerazioni di carattere meccanico	15
2.2.1 Relazione tra l'asimmetria dei punti di separazione e l'effetto Magnus	15
2.2.2 Meccanismi di generazione di portanza.....	16
2.3 Effetto Magnus ottico	18
CAPITOLO 3 L'EFFETTO MAGNUS NELLO SPORT	19
3.1 Effetto Magnus su un pallone da calcio rotante ad elevati numeri di Reynolds	19
3.2 Portanza generata su una palla da baseball che non ruota o si muove molto lentamente	23
3.3 Misure di portanza e resistenza su varie tipologie di palle	24
CAPITOLO 4 APPLICAZIONI INGEGNERISTICHE DELL'EFFETTO MAGNUS	27

4.1 Disco ruvido rotante che si muove all'interno di un fluido.....	27
4.2 Turbina eolica basata sull'effetto Magnus	30
4.3 Effetto Magnus su un proiettile rotante in un flusso supersonico	33
CAPITOLO 5 L'EFFETTO MAGNUS IN AMBITO NAVALE ED AERONAUTICO.....	39
CAPITOLO 6 CONCLUSIONI	52
BIBLIOGRAFIA	53
RINGRAZIAMENTI	55

CAPITOLO 1

INTRODUZIONE

La Fluidodinamica è, probabilmente, una delle branche più complesse e particolari di quella parte della Fisica definita come “Classica”. Ciò è dovuto prevalentemente ai soggetti di studio: a differenza della Meccanica, che si occupa della statica e della dinamica di corpi solidi e quindi tangibili, la Fluidodinamica si concentra sulla materia nello stato fluido. A tale stato appartengono i liquidi, gli aeriformi e il plasma.

Sebbene le origini di tale disciplina si perdano tornando a ritroso nel corso dei secoli, con materie quali l’Aerodinamica, l’Idrodinamica, la Gasdinamica e le numerose interazioni e punti di contatto che presenta con la Termodinamica, non bisogna stupirsi se, ancora oggi, numerose siano le ricerche e gli studi fluidodinamici che coinvolgono ricercatori, scienziati e ingegneri di tutto il mondo.

Essendo quindi una materia così vasta ed estesa, ci si può rendere conto facilmente di come molti siano i fenomeni, ad essa associati, che rivestano un’attenzione particolare per gli studiosi. Alcuni di essi, sebbene ormai si conoscano già da diversi secoli o decenni, ancora non smettono di sorprenderci, in quanto, grazie a nuovi esperimenti, si scoprono di volta in volta nuove particolarità e nuove peculiarità che prima erano rimaste celate agli occhi dei più.

Uno degli argomenti, che rientra in questa casistica, è l’effetto Magnus, il fenomeno aerodinamico responsabile della variazione della traiettoria di un corpo rotante in un fluido in movimento. Tale variazione della traiettoria è dovuta ad una differenza di pressione che si instaura sui vari lati del corpo a seguito di una differente velocità del fluido in prossimità dei suddetti lati. Il corpo tenderà quindi a spostarsi nella direzione del lato su cui la pressione risulterà inferiore.

Si può capire quanto l’effetto Magnus sia così importante, considerando i numerosi campi scientifici ed ingegneristici (e non solo) nei quali esso ha trovato una larga diffusione e grazie al quale sono state fatte nuove scoperte ed inventato nuove tecnologie. Tra di essi possiamo annoverare:

- 1) Fisica;
- 2) Sport;
- 3) Missilistica e balistica;
- 4) Aeronautica;
- 5) Nautica.

In **Figura 1** è possibile osservare una serie di immagini che richiamano le varie discipline, poc'anzi citate, nelle quali si ha una chiara applicazione dell'effetto Magnus.

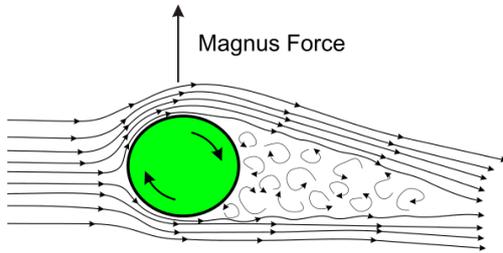


Figura 1a



Figura 1b



Figura 1c



Figura 1d

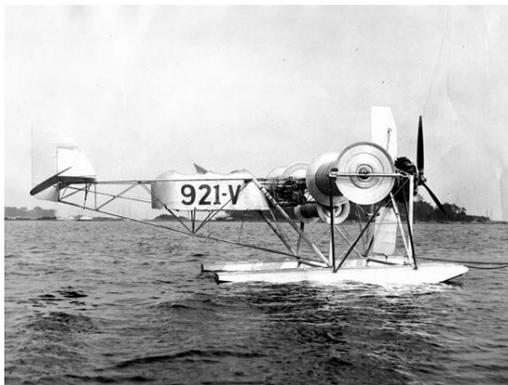


Figura 1e

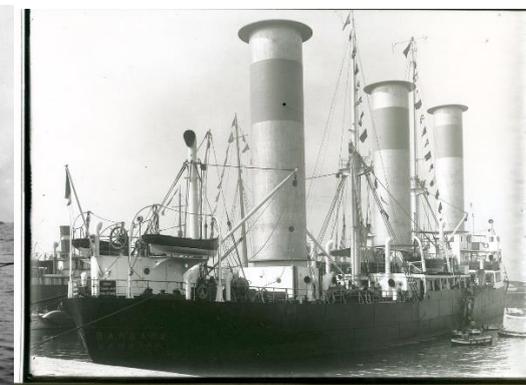


Figura 1f

Figura 1: (a) Rappresentazione fisica del fenomeno che vede coinvolta una sfera o un cilindro; (b) Un pallone poco dopo essere stato calciato del giocatore della Juventus Paulo Dybala; (c) Un disegno balistico di Leonardo Da Vinci del XV secolo; (d) Un missile radioguidato del XXI secolo; (e) L'aereo a rotore Plymouth A-A-2004; (f) La nave a rotore Barbara.

Le ultime due immagini rivestono un'importanza rilevante in quanto mostrano due tra le applicazioni ingegneristiche più importanti che, nel corso della storia, hanno

sfruttato l'effetto Magnus. Infatti, sia l'aereo che la nave, entrambi risalenti al XX secolo, utilizzano un particolare dispositivo, chiamato rotore Flattner, per generare propulsione e quindi per muoversi. Tale dispositivo consiste in un cilindro liscio con delle piastre terminali a forma di disco che vengono fatte girare lungo il suo asse principale e, quando l'aria passa perpendicolarmente ad esso, l'effetto Magnus provoca la generazione di una forza aerodinamica che a sua volta genera spinta. In particolare, mentre sulla nave i rotori vengono posizionati in direzione verticale e il sollevamento è generato perpendicolarmente alla direzione del vento per spingere la nave in avanti, sull'aereo il rotore si estende lateralmente nella parte anteriore dell'ala e viene generato un sollevamento verso l'alto.

1.1 Heinrich Gustav Magnus



Figura 2: Heinrich Gustav Magnus (Berlino, 2 maggio 1802 – Berlino, 4 aprile 1870)

Come molti altri fenomeni e leggi della Fisica, anche l'effetto Magnus porta il nome dell'illustre scienziato che a lungo lo studiò: Heinrich Gustav Magnus.

Magnus nacque a Berlino il 2 maggio del 1802 e lo si ricorda per la sua illustre carriera come fisico e come chimico. Infatti, oltre all'effetto Magnus, già citato, tra le sue ricerche sono sicuramente degne di nota quelle sulla combinazione ossigenata degli alogeni, che lo condussero alla scoperta dell'acido periodico, quelle sul cloruro platinoso ammonico (detto appunto "sale verde di Magnus"), quelle sullo studio di vari coefficienti di dilatazione del vapore acqueo e di vari gas e quelle sull'azione dell'ossigeno nel sangue.

Dopo gli studi all'Università di Berlino, si spostò all'Università di Stoccolma per lavorare sotto la guida di Berzelius, famoso chimico svedese. Più tardi fu a Parigi, dove studiò sotto Gay-Lussac (chimico e fisico) e Thénard (chimico). Nel 1831 fece ritorno a Berlino come lecturer di tecnologia e fisica all'università. Nel 1834 divenne assistente di fisica e tecnologia per poi essere nominato professore nel 1845.

Morì a Berlino il 4 aprile del 1870 e fu sepolto nel Cimitero di Dorotheenstand dove, ad oggi, sono sepolti molti famosi berlinesi.

1.2 Richiami di Fluidodinamica

Poiché nell'ambito di questa trattazione verranno più volte citati i seguenti concetti fluidodinamici, è bene, qui di seguito, fare dei brevi richiami di questi aspetti per avere, più avanti, le idee più chiare su cosa si sta parlando.

1.2.1 Strato limite

In Fluidodinamica, si definisce strato limite uno strato di fluido nelle immediate vicinanze di una superficie solida, nel quale risiede un flusso che risente maggiormente degli effetti causati proprio dalla vicinanza con tale superficie rispetto ad una zona più esterna e lontana da quest'ultima.

La teoria dello strato limite venne introdotta, per la prima volta, dall'aerodinamico tedesco Ludwig Prandtl, che ne dimostrò la reale esistenza con degli esperimenti condotti all'inizio del '900 e che videro coinvolta una lastra (o lamina piana). Prandtl indicò come strato limite quella zona, a ridosso con la superficie solida, all'interno della quale la velocità del flusso non rimane costante, ma tende a variare secondo un gradiente fino a riacquistare la velocità della corrente indisturbata allontanandosi sempre di più dalla parete stessa. In tale regione le forze viscosse diventano preponderanti rispetto a quelle d'inerzia e quindi ecco spiegata la formazione di un gradiente di velocità. Lo strato limite può essere di due tipi: laminare, dove i filetti fluidi sono appunto lamine che seguono il contorno del corpo, oppure turbolento, dove i filetti seguono linee intricate e non stazionarie. In alcuni casi, lo strato limite può transitare da laminare a turbolento attraverso una zona detta regione di transizione. Tale transizione è maggiormente favorita all'aumentare del numero di Reynolds.

In **Figura 3** è possibile osservare una regione di strato limite a ridosso di una lamina piana e il corrispondente gradiente di velocità che si genera al suo interno.

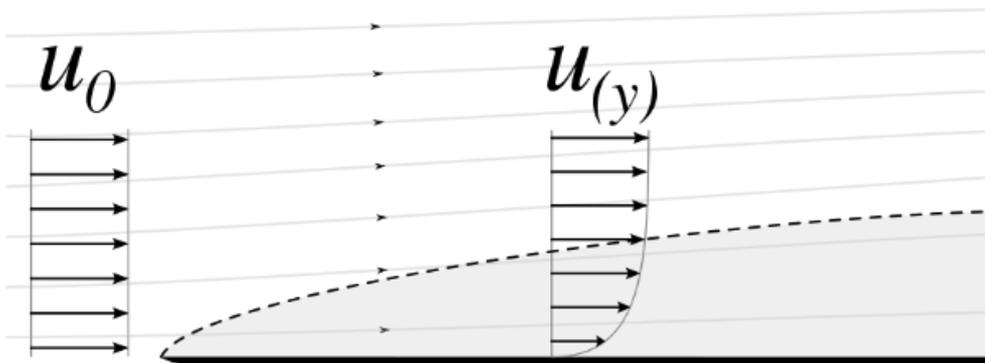


Figura 3: Zona interessata da uno strato limite laminare, dove cioè la componente orizzontale delle velocità è molto più piccola della componente orizzontale all'esterno dell'area di influenza della parete.

1.2.2 Numero di Reynolds

In Fluidodinamica il numero di Reynolds è un rapporto adimensionale tra forze d'inerzia e forze viscosive. Esso prende il nome da Osborne Reynolds che lo introdusse, per la prima volta, nel 1883 a seguito di numerosi esperimenti condotti su flussi all'interno di condotti circolari trasparenti e ad asse rettilineo.

Esso è definito nel seguente modo:

$$Re = \frac{\rho \cdot V \cdot D}{\mu}$$

dove, nella formula, ρ [kg/m^3] è la densità del fluido che scorre nel tubo, V [m/s] è la sua velocità, D [m] è il diametro del condotto e μ [$\text{Pa} \cdot \text{s}$ o $\text{N} \cdot \frac{\text{s}}{\text{m}^2}$ o $\text{kg}/(\text{m} \cdot \text{s})$] è la viscosità dinamica (un parametro che misura la resistenza del fluido allo scorrimento).

Se, al posto del tubo, avessimo invece una lamina piana, allora il numero di Reynolds sarebbe espresso in quest'altro modo:

$$Re = \frac{\rho \cdot V \cdot L}{\mu}$$

dove, questa volta L [m] è la lunghezza della lamina.

In altri casi ancora, al denominatore può comparire ν , viscosità cinematica, data dal rapporto tra la viscosità dinamica e la densità.

Grazie al numero di Reynolds è possibile valutare se il flusso, di nostro interesse, presenti un regime laminare (per il quale si hanno bassi valori del numero di Reynolds) o un regime turbolento (per il quale si hanno alti valori del numero di Reynolds).

Osservando le formule prima citate, si può concludere che il numero di Reynolds vada a dipendere dai seguenti parametri:

- 1) la geometria del corpo investito dal flusso;
- 2) la velocità del flusso;
- 3) la natura del fluido;
- 4) le variabili termodinamiche (pressione e temperatura).

In particolar modo, per quanto riguarda la geometria, si può far riferimento alla **Tabella 1**, nella quale vengono riportati i numeri di Reynolds e i corrispettivi regimi di flusso in base alla geometria dell'oggetto studiato. Di particolare interesse sarà lo studio attorno ad una sfera.

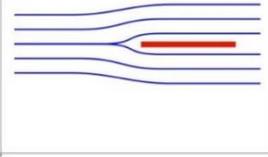
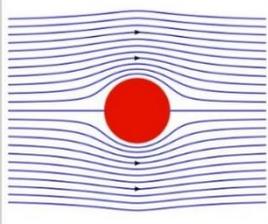
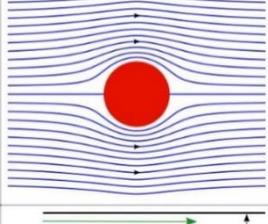
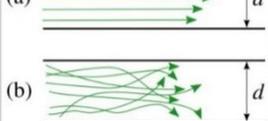
Geometria	Regime laminare	Regime di transizione	Regime turbolento	Rappresentazione della geometria
Flusso attorno a una lamina piana, in direzione parallela all'asse della lamina	$Re < 5 \times 10^5$	$5 \times 10^5 < Re < 10^7$	$Re > 10^7$	
Flusso attorno a un cilindro, in direzione perpendicolare all'asse del cilindro	$Re < 2 \times 10^5$	$Re \cong 2 \times 10^5$	$Re > 2 \times 10^5$	
Flusso attorno a una sfera	$Re < 2 \times 10^5$	$Re \cong 2 \times 10^5$	$Re > 2 \times 10^5$	
Flusso all'interno di un tubo cilindrico	$Re < 2300$	$2300 < Re < 4000$	$Re > 4000$	

Tabella 1: Alcuni valori limite del numero di Reynolds per diverse geometrie.

1.2.3 Equazione di Bernoulli

In Fluidodinamica, l'equazione di Bernoulli rappresenta un modello semplificato di flusso non viscoso di un fluido incompressibile allo stato stazionario.

L'equazione descrive matematicamente l'effetto Bernoulli, per cui in un fluido ideale su cui non viene applicato un lavoro, per ogni incremento della velocità di deriva si ha simultaneamente una diminuzione della pressione o un cambiamento dell'energia potenziale del fluido, non necessariamente gravitazionale.

Il campo più generale di validità del teorema di Bernoulli non è in realtà solo quello di fluido inviscido, ma è sufficiente che sia nulla la risultante delle azioni viscosive

legate al rotore della vorticità: quindi basta che il fluido sia incomprimibile, irrotazionale e stazionario.

Sotto queste ipotesi, l'equazione di Bernoulli assume il seguente aspetto:

$$p + \rho \frac{u^2}{2} + \rho gh = \text{costante}$$

in cui:

- ρ è la densità del fluido [kg/m^3];
- u rappresenta la velocità del flusso [m/s];
- g è l'accelerazione di gravità [m/s^2];
- h è la quota del fluido [m];
- p è la pressione del fluido [Pa].

1.2.4 Equazioni di Navier-Stokes

In Fluidodinamica le equazioni di Navier-Stokes sono un sistema di equazioni differenziali alle derivate parziali che descrivono il comportamento di un fluido dal punto di vista macroscopico. L'ipotesi di base è che il fluido possa essere modellato come un continuo deformabile: esse presuppongono perciò la continuità del fluido in esame, oltretutto il sistema perde di validità nello studio di un gas rarefatto.

Le equazioni devono il loro nome a Claude-Louis Navier e a George Gabriel Stokes che le formalizzarono e la loro soluzione analitica generale rappresenta attualmente uno dei problemi irrisolti della matematica moderna. Soluzioni analitiche particolari si hanno in casi estremamente semplificati mentre soluzioni approssimate si ottengono tipicamente ricorrendo a metodi propri dell'analisi numerica e all'uso congiunto di un calcolatore.

Tra queste soluzioni semplificate degne di nota sono le RANS, cioè equazioni di Navier-Stokes mediate, dove le grandezze risultano non più istantanee, ma mediate in un certo periodo di tempo sufficientemente piccolo rispetto ai fenomeni che si vogliono seguire ma sufficientemente grande rispetto ai disturbi della turbolenza.

Per molte applicazioni pratiche, la sola conoscenza delle grandezze mediate può essere sufficiente per la soluzione del problema. Questo approccio consente una notevole riduzione dei tempi di calcolo.

Si possono osservare le equazioni di Navier-Stokes nella loro formulazione generale e più completa in **Tabella 2** pubblicata dalla NASA. Esse sono:

- 1) Principio di conservazione della massa (equazione di continuità);
- 2) Secondo principio della dinamica (bilancio della quantità di moto);
- 3) Primo principio della termodinamica (conservazione dell'energia).



Navier–Stokes Equations

3 – dimensional – unsteady

Glenn
Research
Center

Coordinates: (x,y,z) Time : t Pressure: p Heat Flux: q
 Density: ρ Stress: τ Reynolds Number: Re
 Velocity Components: (u,v,w) Total Energy: Et Prandtl Number: Pr

Continuity:
$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho w)}{\partial z} = 0$$

X – Momentum:
$$\frac{\partial(\rho u)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u^2)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho uv)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho uw)}{\partial z} = -\frac{\partial p}{\partial x} + \frac{1}{Re_r} \left[\frac{\partial \tau_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{xz}}{\partial z} \right]$$

Y – Momentum:
$$\frac{\partial(\rho v)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho uv)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v^2)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho vw)}{\partial z} = -\frac{\partial p}{\partial y} + \frac{1}{Re_r} \left[\frac{\partial \tau_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yy}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{yz}}{\partial z} \right]$$

Z – Momentum:
$$\frac{\partial(\rho w)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho uw)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho vw)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho w^2)}{\partial z} = -\frac{\partial p}{\partial z} + \frac{1}{Re_r} \left[\frac{\partial \tau_{xz}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yz}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zz}}{\partial z} \right]$$

Energy:
$$\frac{\partial(E_T)}{\partial t} + \frac{\partial(uE_T)}{\partial x} + \frac{\partial(vE_T)}{\partial y} + \frac{\partial(wE_T)}{\partial z} = -\frac{\partial(up)}{\partial x} - \frac{\partial(vp)}{\partial y} - \frac{\partial(wp)}{\partial z} - \frac{1}{Re_r Pr_r} \left[\frac{\partial q_x}{\partial x} + \frac{\partial q_y}{\partial y} + \frac{\partial q_z}{\partial z} \right] + \frac{1}{Re_r} \left[\frac{\partial}{\partial x} (u \tau_{xx} + v \tau_{xy} + w \tau_{xz}) + \frac{\partial}{\partial y} (u \tau_{xy} + v \tau_{yy} + w \tau_{yz}) + \frac{\partial}{\partial z} (u \tau_{xz} + v \tau_{yz} + w \tau_{zz}) \right]$$

Tabella 2: Equazioni di Navier-Stokes nello spazio tridimensionale.

1.2.5 Numero di Mach

Il numero di Mach è un numero adimensionale definito come il rapporto tra la velocità di un oggetto in moto in un fluido e la velocità del suono nel fluido considerato. Il nome deriva dagli studi del fisico e filosofo tedesco Ernst Waldfried Josef Wenzel Mach. La sua definizione matematica è la seguente:

$$M = \frac{v}{c} = \frac{v}{\sqrt{\gamma RT}}$$

in cui:

- v è la velocità macroscopica dell'oggetto considerato [m/s];
- c è la velocità del suono nel fluido (o mezzo) considerato [m/s];
- γ è il coefficiente adiabatico [adimensionale];
- R è la costante specifica dei gas [J/(K · mol)];
- T è la temperatura assoluta [K].

Il moto attorno ai corpi può essere classificato in sei diverse condizioni a cui corrispondono diversi comportamenti fluidodinamici, a seconda del numero di Mach locale:

- 1) Regime subsonico incomprimibile: $M < 0,3$;

- 2) Regime subsonico: $M < 1$;
- 3) Regime transonico: $0,8 < M < 1,2$;
- 4) Regime sonico: $M = 1$;
- 5) Regime supersonico: $M > 1$;
- 6) Regime ipersonico: $M > 5$.

1.2.6 Portanza e resistenza

Uno dei risultati più importanti dell'Aerodinamica è la determinazione delle forze aerodinamiche che agiscono su un corpo. Il loro calcolo preciso è di importanza fondamentale nel progetto di un velivolo, di una barca a vela o di un'autovettura da orsa.

In particolare, su un velivolo in condizioni di volo orizzontale rettilineo uniforme agiscono tre forze:

- Il peso del velivolo "W", dovuto alla forza di gravità;
- La spinta dei motori "T";
- La forza aerodinamica risultante "R".

Per convenzione, per semplificare i calcoli la forza aerodinamica risultante viene scomposta in una componente perpendicolare alla velocità del velivolo e in una componente parallela alla velocità del velivolo, rispettivamente:

- Portanza "L";
- Resistenza "D".

Per avere un volo rettilineo ed uniforme queste forze devono essere in equilibrio, ovvero deve sussistere:

- $L = W$;
- $D = T$.

In **Figura 4** è possibile osservare uno schema di tutte queste forze applicate ad un comune aereo di linea.

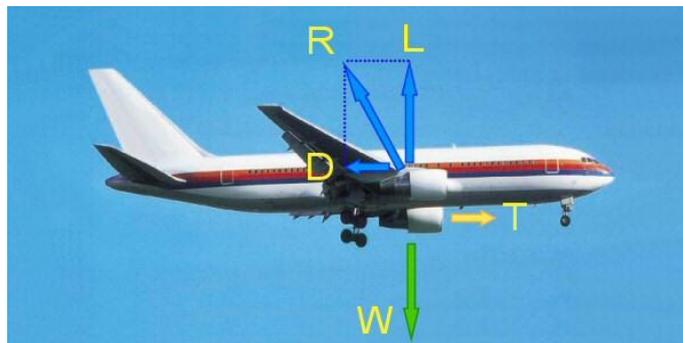


Figura 4: Forze agenti su un velivolo.

Portanza. La portanza è definita come la forza aerodinamica agente in direzione perpendicolare alla direzione del vento che investe il profilo e permette al velivolo di alzarsi in volo. Essa è positiva se orientata verso l'alto.

La portanza è generata dalla differenza di pressione tra la parte inferiore e quella superiore di un velivolo, ma il contributo maggiore è dovuto all'ala. La particolare forma del profilo alare permette di avere una differenza di velocità del fluido tra il dorso (parte superiore dell'ala) e il ventre (parte inferiore dell'ala). Conoscendo il coefficiente di portanza di un profilo (o di un corpo) è possibile risalire alla portanza: $L = \frac{1}{2} \rho V^2 S C_L$, dove ρ [kg/m^3] è la densità dell'aria, V [m/s] è la velocità di volo, S [m^2] è la superficie di riferimento (nel caso di velivoli si tratta della superficie alare) e C_L è un parametro adimensionale detto coefficiente di portanza. Quest'ultimo varia in funzione della forma geometrica dell'ala, dell'angolo di attacco, del numero di Reynolds e del numero di Mach.

Resistenza. La resistenza è definita come la forza aerodinamica agente in direzione parallela (e con verso opposto) alla direzione del moto. Essa è composta fondamentalmente da quattro termini:

- Resistenza di attrito: è dovuta alla viscosità del fluido;
- Resistenza di forma: è dovuta alla particolare forma del corpo e al distacco dello strato limite;
- Resistenza indotta: è dovuta alla presenza della portanza;
- Resistenza d'onda: è presente solo quando si vola a velocità prossime o maggiori di quella del suono.

Conoscendo il coefficiente di resistenza si può ricavare la resistenza come: $D = \frac{1}{2} \rho V^2 S C_D$, dove ρ [kg/m^3] è la densità dell'aria, V [m/s] è la velocità di volo, S [m^2] è la superficie di riferimento (nel caso di velivoli si tratta di superficie alare, nel caso di autovetture si usa la superficie frontale del mezzo) e C_D è un parametro adimensionale detto coefficiente di resistenza. Quest'ultimo varia in funzione della forma geometrica dell'ala, dell'angolo di attacco, del numero di Reynolds e del numero di Mach.

Detto α l'incidenza del profilo (angolo formato dalla corda del profilo con la direzione del vento indisturbato che lo investe) è possibile riportare l'andamento dei coefficienti di portanza e resistenza in funzione di tale parametro angolare. In **Figura 5** è possibile osservare quanto appena proposto.

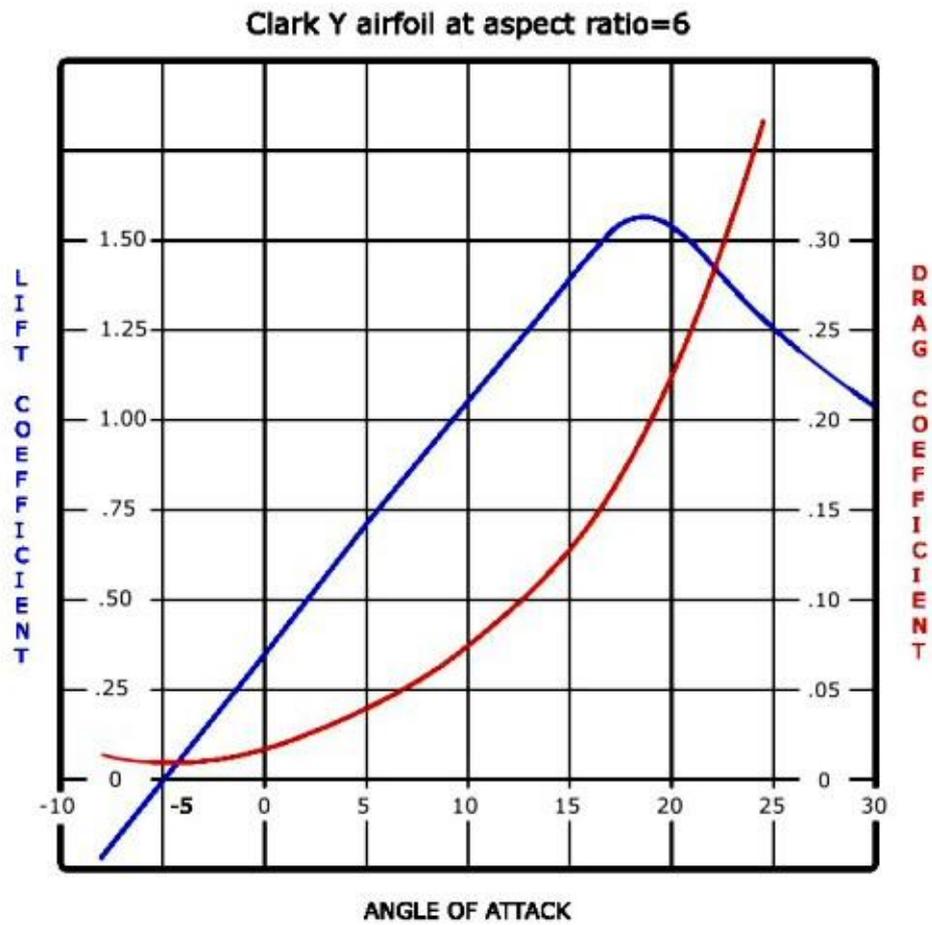


Figura 5: Andamento tipico dei coefficienti C_L e C_D di un'ala finita.

CAPITOLO 2

STUDI FISICI DELL'EFFETTO MAGNUS

Supponiamo di avere un corpo (ad esempio un cilindro o una sfera) che si muove all'interno di un fluido anch'esso in movimento. Se il moto di questo corpo è solo di traslazione, le linee di corrente, nelle sue prossimità, tenderanno ad assumere una distribuzione simmetrica tra la parte superiore del corpo e quella inferiore e tra la parte anteriore e quella posteriore. Il corpo viene quindi investito da una corrente uniforme che si muove in una direzione ad esso contraria.

Se il corpo, invece, oltre ad essere dotato di un moto di traslazione possiede anche un moto di rotazione attorno ad un asse perpendicolare alla direzione del fluido, allora, la distribuzione del flusso attorno ad esso non sarà più simmetrica poiché questo tenderà ad aumentare la propria velocità superiormente o inferiormente al corpo a seconda del verso di rotazione del corpo stesso. Si genera quindi una forza (che in base al verso può essere una portanza o una deportanza) perpendicolare sia alla direzione del flusso che all'asse attorno al quale il corpo sta ruotando. Questa forza è causata dalla differenza di velocità sulla superficie del corpo. Il flusso sarà accelerato se la sua velocità risulterà concorde alla rotazione del corpo, mentre sarà decelerato se la sua velocità risulterà discorde alla rotazione del corpo.

In **Figura 6a** e in **Figura 6b** si possono osservare i due fenomeni appena descritti.

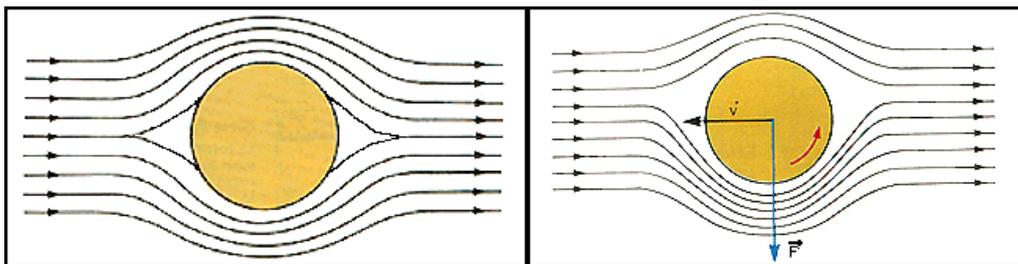


Figura 6a: Corpo in moto rettilineo senza rotazione.

Figura 6b: Corpo in moto con rotazione antioraria.

La forza, così prodotta, è responsabile di una variazione della traiettoria del corpo. Questo fenomeno è noto come effetto Magnus. Esso è osservabile in numerose applicazioni, quali il volo curvilineo di una pallina da baseball o da tennis, oppure in un razzo che ruota attorno al suo asse nell'aria in movimento.

Sebbene molti siano stati gli esperimenti su questo effetto, i ricercatori non sono ancora arrivati ad un'interpretazione unificata di tale fenomeno, ad una comprensione accurata dei meccanismi fisici che ne derivano e ad una loro spiegazione plausibile. Tanti sono quindi i metodi e gli approcci grazie ai quali è possibile dare una spiegazione ed una giustificazione dell'effetto Magnus. In questa trattazione ne vengono descritti, presentati e messi a confronto due: il primo usa il teorema di Bernoulli e la differenza di velocità del fluido tra i due lati del corpo, mentre il secondo propone una descrizione più dal punto di vista meccanico, sfruttando il teorema della quantità di moto che mette in relazione la forza di sollevamento con l'accelerazione del flusso. Entrambi, però, vedranno come protagonisti di studio o un cilindro o una sfera [1].

Come molti fenomeni fisici, anche l'effetto Magnus presenta quindi più spiegazioni, seppur diverse, ugualmente corrette e veritiere.

Chiude il capitolo un paragrafo nel quale viene presentato un accenno su uno degli ultimi studi, condotto nel 2010, su un particolare tipo di effetto Magnus definito come "ottico".

2.1 Spiegazione dell'effetto Magnus sfruttando la differenza di velocità del flusso tra i lati opposti del corpo

Uno degli approcci con i quali è possibile spiegare l'effetto Magnus è quello di considerare la diversa velocità del flusso che si instaura tra i due lati opposti del corpo (che, come detto, è un cilindro od una sfera) posto in rotazione. Lungo il lato che ruota nella direzione concorde al verso di moto del flusso, la velocità di quest'ultimo, in prossimità del corpo, tenderà ad aumentare proprio grazie ad una rotazione ad esso favorevole. Per il teorema di Bernoulli, la pressione su questo lato del corpo sarà quindi inferiore rispetto al corpo non rotante. Viceversa, lungo il lato che ruota nella direzione contraria a quella del flusso, la velocità di quest'ultimo sarà rallentata a causa del verso di rotazione discorde e, sempre per il teorema di Bernoulli, in prossimità di questo lato si registrerà una pressione maggiore rispetto a quando il corpo non ruota.

La diversa simmetria di pressione che si avrà tra i due diversi lati del cilindro o della sfera genera una forza diretta dal lato sul quale si ha una pressione maggiore verso quello che presenta una pressione inferiore.

Da quanto detto, la causa che genera una diversa velocità sui due lati del corpo è la rotazione, favorevole o contraria, del corpo stesso. Essa tende su di un lato ad accelerare gli strati di fluido attigui al corpo e sull'altro a rallentarli. Più in generale è quindi possibile parlare di viscosità, cioè dell'analogo fluidodinamico delle forze di attrito studiate dalla Meccanica. Poiché essa si oppone allo scorrimento di uno strato fluido rispetto a quelli ad esso vicini, si può affermare che sul lato del corpo dove la viscosità è maggiore la velocità sarà minore e, viceversa, sul lato del corpo dove la

viscosità è minore, la velocità sarà maggiore. Non è quindi del tutto sbagliato dire che una differenza di velocità si genera per una diversa viscosità, che non è altro che la componente di sollecitazione tangenziale di uno sforzo.

Si può applicare il teorema di Bernoulli solo se la viscosità possa essere trascurata, e questo accade quando si è in presenza di elevati numeri di Reynolds. Il principio che la pressione è bassa quando il flusso è veloce ed alta quando il flusso è lento, si applica perché il fluido è solo accelerato o decelerato, nella direzione delle linee di flusso, da un gradiente di pressione in assenza di viscosità e ovviamente di forze esterne. Se, infatti, supponiamo che la differenza di velocità sia dovuta a forze viscosive, non è più necessario assumere una differenza di pressione su ciascun lato dell'oggetto come un'altra potenziale causa della differenza di velocità. Di conseguenza, la teoria per lo sviluppo di una forza non risulta essere più valida. Va inoltre sottolineato che tale spiegazione esclude anche il fenomeno noto come "effetto Magnus negativo" (che si verifica quando solo uno degli strati limite, a contatto con i due diversi lati del corpo, passa allo stato turbolento) nonché presenta un'evidente contraddizione: non si capisce bene se sia la differenza di velocità a generare una differenza di pressione o se sia una differenza di pressione a generare una differenza di velocità; inoltre, se la differenza di velocità è generata dalla viscosità e non possiamo applicare il teorema di Bernoulli per calcolare la differenza di pressione, mancano le ipotesi per lo sviluppo di una forza.

Tuttavia, risulta certo, che quando sui due diversi lati del corpo c'è una distribuzione asimmetrica di pressione si vada a generare, a seconda dei casi, una portanza o una deportanza. Se concentriamo la discussione su elevati numeri di Reynolds (come ad esempio $Re > 10^3 - 10^4$), è possibile non considerare l'ipotesi secondo cui la differenza di velocità sia generata da una differenza di viscosità (poiché, come detto, quest'ultima è trascurabile per elevati numeri di Reynolds). Manteniamo però valida la relazione tra una differenza di pressione e una differenza di velocità, la quale è osservabile anche utilizzando l'equazione di Bernoulli. Abbiamo così ottenuto un ragionamento semplificato: escludendo le forze viscosive, la rotazione del corpo genera una diversa velocità del flusso in prossimità dei due lati dell'oggetto, questa genera un'asimmetria di pressione e la differenza di pressione genera una forza. Tale ragionamento, come detto, risulta però semplificato in quanto non ci sono ancora degli studi accreditati che abbiano spiegato, con certezza, che cosa vada, di preciso, a generare una differenza di velocità. Tuttavia, seguendo tale ragionamento, si riescono a spiegare, senza errori o paradossi, sia l'effetto Magnus tradizionale che quello negativo.

Un ulteriore problema che sorge però con tali considerazioni risulta il seguente: ad elevati numeri di Reynolds, lo strato limite, a contatto con il corpo, tende via via sempre di più a distaccarsi da quest'ultimo, tanto che, per i valori di Reynolds prima citati, si è visto che circa la metà della superficie dell'oggetto si trovi a contatto con

una regione di scia per la quale non è possibile applicare il teorema di Bernoulli. Per tale regione non si hanno quindi distribuzioni note di velocità o pressione.

Infine, ulteriore precisazione, è importante osservare che la teoria di studiare l'effetto Magnus sfruttando il teorema di Bernoulli non è più applicabile per bassi valori del numero di Reynolds proprio perché ritornerebbe a presentarsi il problema della viscosità.

Tale studio risulta pertanto limitato e incompleto.

2.2 Spiegazione dell'effetto Magnus attraverso considerazioni di carattere meccanico

Oltre la spiegazione dell'effetto Magnus già fornita nel paragrafo precedente sfruttando il teorema di Bernoulli, è possibile darne un'altra più dal punto di vista meccanico.

2.2.1 Relazione tra l'asimmetria dei punti di separazione e l'effetto Magnus

Parlando dell'effetto Magnus, uno dei fenomeni fisici di maggior rilevanza è l'asimmetria dei punti di separazione delle linee di corrente dal corpo. Nel caso in cui si verifichi un "effetto Magnus positivo", il punto di separazione sul lato dell'oggetto che viaggia nella stessa direzione del flusso, si trova in una posizione più a valle rispetto al punto di separazione sul lato del corpo che ruota in una direzione contraria a quella di percorrenza del flusso. Tuttavia, nel caso in cui si verificasse un "effetto Magnus negativo" tale fenomeno sarebbe invertito. Si può osservare una rappresentazione di quanto detto in **Figura 7a** e in **Figura 7b**.

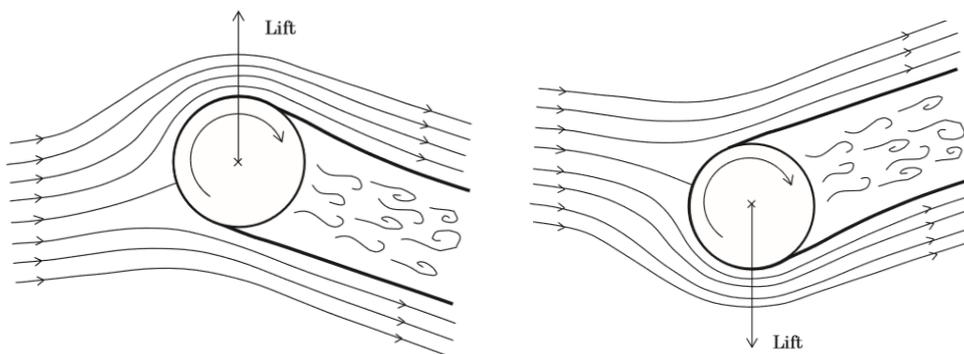


Figura 7a: Effetto Magnus positivo. Figura 7b: Effetto Magnus negativo.

Molti sono stati gli esperimenti che hanno trattato la posizione dei punti di separazione, e le conseguenze ad essi relative, attorno ad un corpo quando su di esso si generava una forza causata dall'effetto Magnus.

Da un punto di vista storico, uno dei più antichi fu condotto nel 1957 dal ricercatore S. Teneda che fu tra i primi a dimostrare sperimentalmente l'asimmetria dei punti di separazione [2]. Il suo studio si concentrò sul flusso intorno ad una sfera immersa in

un serbatoio d'acqua. Nello specifico, egli notò che per un valore del numero di Reynolds pari a $2,5 \times 10^5$ e un rapporto tra la velocità tangenziale della sfera e quella del flusso pari a 0,6 od anche inferiore, si generava sul corpo una deportanza (causata dall'effetto Magnus negativo) tale per cui lo strato limite sul lato della superficie della sfera con la velocità inferiore era ancora laminare, mentre il flusso attorno al lato con velocità più alta era già diventato turbolento. Teneda concluse il suo esperimento, senza però entrarne più nel dettaglio, che fosse proprio l'asimmetria dei punti di separazione del flusso dal corpo a generare l'effetto Magnus negativo.

Successivamente, nel 1961, W. M. Swanson effettuò molti test in galleria del vento con un cilindro rotante [3]. Rispetto al caso della sfera, con il cilindro le incertezze sulla determinazione di punti di separazione aumentano, in quanto c'è maggiore possibilità di formazione della scia di von Karman. Per tale ragione, i suoi esperimenti furono condotti solo nel caso di strato limite laminare. Arrivò ad osservare che nella regione dove il flusso è accelerato il punto di separazione si sposta verso valle, mentre in quella dove il flusso è rallentato, il punto si sposta verso monte. Registrò altresì una differenza di pressione sui due diversi lati del cilindro che davano origine ad una forza di sollevamento. Nel caso della deportanza e quindi di effetto Magnus negativo, anche Swanson, come Teneda prima di lui, trovò un'inversione dei punti di separazione, tanto da fargli concludere che la forza così generata fosse dovuta ad un flusso non simmetrico negli strati limite a ridosso del corpo che si separano da quest'ultimo in posizione diverse.

H. Tanaka e S. Nagano al contrario di Swanson che ha usato solo valori temporali medi nei suoi esperimenti, hanno effettuato test nella galleria del vento, intorno al 1973, prestando particolare attenzione alle variazioni non stazionarie [4]. Sono arrivati a vedere che i punti di separazioni si spostano in modo quasi periodico. Un ulteriore risultato importante è stato osservare che la velocità del flusso rallenta quando il punto di separazione arretra verso monte ed aumenta quando il punto di separazione avanza verso valle.

Unendo i risultati di questi e molti altri esperimenti, si può arrivare a concludere che quando si verifica un sollevamento o un abbassamento del corpo, c'è sempre asimmetria nella posizione dei punti di separazione su entrambi i lati dell'oggetto, e nell'ambito del rilevamento, non sono mai state trovate eccezioni (cioè, non c'è mai stata portanza o deportanza quando i punti di separazione risultavano essere simmetrici e c'è sempre stato un sollevamento o un abbassamento quando i punti erano invece asimmetrici).

2.2.2 Meccanismi di generazione di portanza

Si definisce "portanza" la componente di forza che un corpo, immerso in un fluido, riceve da questo ed è perpendicolare alla direzione del flusso. Sfruttando la terza legge della Meccanica (nota anche come "principio di azione e reazione"), il fluido riceve dal corpo una forza uguale in modulo e direzione ma opposta in verso. Grazie a questa

forza, il fluido risulterà accelerato in una direzione perpendicolare a quella di moto della corrente. L'accelerazione, che inizialmente nasce in prossimità del corpo, va via via a diffondersi in strati di fluido sempre più lontani dall'oggetto considerato andandone a modificare la velocità. Poiché, per questo motivo, la velocità tende a variare, risulta difficile andare a misurarla con precisione ed è altresì ostico andare a calcolare un valore preciso della quantità di moto del fluido.

Il teorema della quantità di moto fornisce equazioni che stabiliscono una relazione tra i guadagni di quantità di moto del fluido e le forze agenti sul corpo. Questo teorema può tranquillamente essere applicato anche in una regione che, come in questo caso, presenti un gradiente di velocità. Tuttavia, come accennato in precedenza, è difficile identificare accuratamente il valore della quantità di moto del fluido proprio perché non si riesce bene a trovare un valore preciso della velocità. Pertanto, non è semplice fare un calcolo accurato della portanza agente sul corpo sfruttando questo teorema. Si può però ricorrere ad un modello semplificato. Prendendo come schema di riferimento quello riportato in **Figura 8**, si vada a considerare il flusso presente solo nella regione avente spessore h .

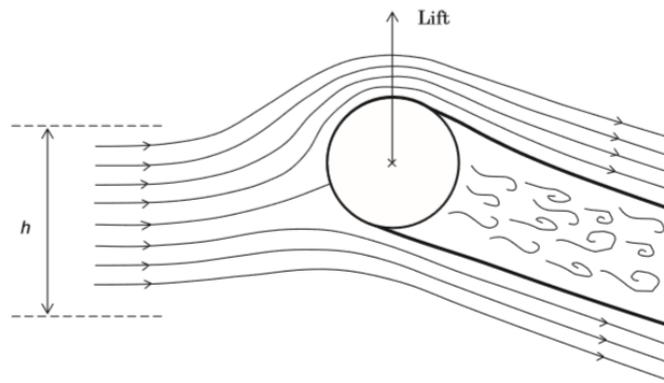


Figura 8: Schema del diagramma della relazione tra asimmetria del punto di separazione, orientamento della scia e portanza.

Al di fuori della regione considerata, la pressione del flusso è costante ed uguale alla pressione statica del flusso uniforme. Come si può osservare dallo schema, la direzione del flusso, dopo essere entrata a contatto con il corpo, risulterà deviata verso il basso, mentre l'oggetto tenderà a sollevarsi verso l'alto. Il coefficiente di portanza del corpo sarà dato dalle seguenti formule: $C_l = \frac{8}{\pi} \cdot \frac{h}{d} \cdot \sin \theta$ (nel caso di una sfera) o $C_l = \frac{2h}{d} \cdot \sin \theta$ (nel caso di un cilindro), dove d è il diametro della sfera o del cilindro che corrisponde anche, in maniera più o meno approssimativa, allo spessore di flusso deviato verso il basso. Il $\sin \theta$ nasce invece dal fatto che come area se ne considera

una di riferimento che nasce dalla proiezione della superficie del cilindro o della sfera (a seconda dei casi) su un piano perpendicolare alla direzione del flusso uniforme.

La variazione nella direzione dei flussi in prossimità del corpo e la forza di sollevamento che agisce sull'oggetto sono legate tra loro proprio dal teorema della quantità di moto. La direzione del flusso del fluido che passa vicino all'oggetto è deviata dall'asimmetria dei punti di separazione, e in reazione, una forza di sollevamento dal fluido opera sull'oggetto. Tale concetto si applica sia nel caso di "effetto Magnus positivo" che nel caso di "effetto Magnus negativo".

Osserviamo anche che, per lo schema riportato in **Figura 8**, in base a quanto detto nei paragrafi precedenti, la velocità del flusso sul lato superiore dell'oggetto sarà maggiore rispetto a quella presente sul lato inferiore. Per le pressioni vale quindi un discorso inverso.

2.3 Effetto Magnus ottico

Una delle applicazioni fisiche sicuramente più affascinanti e recenti che si possono citare sull'effetto Magnus è "l'effetto Magnus ottico", detto anche "effetto ping-pong" [5]. Essa corrisponde alla versione fotonica dell'effetto Magnus studiato dalla Fluidodinamica.

Dalla Fisica Quantistica sappiamo che il fotone è una particella di luce dotata di energia ma non di massa o carica elettrica. Esso però possiede un momento angolare intrinseco, chiamato spin, che può assumere solo due valori: +1 o -1. L'influenza dello spin sulla traiettoria del fotone può essere considerata l'analogo ottico dell'effetto Magnus meccanico. Infatti, il fotone, soggetto allo spin, come una sfera che ruota e trasla in un fluido in movimento, dopo riflessioni multiple durante la sua propagazione all'interno di una fibra, sarà deviato dalla sua traiettoria iniziale.

Studi recenti hanno dimostrato, più nello specifico, che tale fenomeno dipenda dall'interazione spin-orbitale che si registra in un campo d'onda e questa, almeno in teoria, non risulta influenzata dall'indice di energia artificiale del mezzo ottico. Per i raggi che si propagano nello spazio libero, è generalmente ritenuto che l'effetto Magnus ottico non abbia luogo, in quanto il gradiente dell'indice di rifrazione è nullo.

Unendo l'Elettrodinamica Classica alla Fisica Quantistica è possibile dare una spiegazione di tale fenomeno: se infatti all'interno di una corrente elettrica gli elettroni sono soggetti ad una variazione di momento, anche i fasci di luce, generati dai fotoni, che a loro volta sono liberati dagli elettroni, subiscono, per così dire, una rotazione. Tale rotazione dipenderebbe dalla polarizzazione del baricentro del fascio e, a seconda della rotazione, il fascio d'onda e quindi i fotoni potranno subire una rotazione in senso orario o antiorario.

CAPITOLO 3

L'EFFETTO MAGNUS NELLO SPORT

Quando si parla dell'effetto Magnus, non si può non citare quello che tra tutti è sicuramente il suo campo di studio più famoso: ovvero lo sport. Sebbene possa sembrare strano, e per certi versi insolito, scienza e sport hanno più punti in comune di quanti si riesca a pensare e l'effetto Magnus è uno di questi. Infatti, è proprio partendo dalle applicazioni sportive, più semplici, meno pericolose e di più facile realizzazione, che scienziati ed ingegneri hanno potuto, nel corso degli anni, avvicinarsi e studiare questo fenomeno, per poi implementare e potenziare tali risultati passando ad applicazioni tecnologicamente e scientificamente più evolute come quelle missilistiche, aeronautiche, navali ed anche mediche. Per queste ragioni, sport nei quali è obbligatorio l'uso di una pallina quali tennis, golf o baseball o l'uso di un pallone, come nel calcio, hanno ricevuto molta attenzione a causa delle traiettorie curve che assumono le palle dopo essere state colpite. Una pallina od un pallone possono infatti, senza alcun problema, essere assimilate ad una sfera rotante in un fluido in movimento (l'aria) e, come già spiegato in precedenza, esse sono soggette ad una forza, perpendicolare sia alla direzione di moto della corrente fluida che al loro asse di rotazione, che le devia dalla loro normale traiettoria.

3.1 Effetto Magnus su un pallone da calcio rotante ad elevati numeri di Reynolds

Tra i vari esperimenti, condotti su diverse tipologie di palle, c'è sicuramente, tra i più degni di nota, quello eseguito da un team di ricercatori tedeschi tra il 2012 e il 2013, composto da Thorsten Kray, Jörg Franke e Wolfram Frank, del dipartimento di Fluidodinamica e Termodinamica dell'università di Siegen, in Germania [6]. Nello specifico, i loro studi si sono concentrati sull'effetto Magnus sul pallone da calcio Teamgeist, ovvero quello utilizzato nei Mondiali di Calcio del 2006.

Prima di avvicinarsi allo studio del pallone vero e proprio, essi sono partiti con il creare e studiare un modello preparatorio con il quale andare, in seguito, a confrontare e paragonare i dati ricavati dagli esperimenti sul pallone reale. Infatti, in una prima fase, hanno analizzato una sfera in lega di alluminio del diametro di 218 mm e dalla superficie molto liscia con una finitura a specchio. Successivamente, hanno ripetuto gli stessi esperimenti con una seconda sfera che però presentava delle scanalature tali

da renderla più simile ad un pallone, ed hanno valutato i fenomeni aerodinamici che agivano sull'uno e l'altro corpo, nonché la variazione dei coefficienti di forza media con il numero di Reynolds (Re) e il parametro di spin (S). Il parametro di spin è definito come $S=R\omega/v$ dove R è il raggio della sfera, ω la sua velocità angolare e v la velocità.

Gli esperimenti sono stati condotti nella galleria del vento di Gottinga. L'ugello, dal quale veniva fatto uscire il getto d'aria, era a sezione quadrata di lati 1,02 m x 1,02 m ed era lungo 2,04 m. In particolar modo, per la sfera, il numero di Reynold è stato fatto variare nell'intervallo di valori $0,68 \times 10^5 < Re < 5,07 \times 10^5$ e la velocità massima con la quale il flusso poteva uscire dall'ugello era pari ad $u_\infty=55\text{m/s}$.

Studiare il flusso attorno a una sfera rotante in una galleria del vento non è un problema banale poiché il meccanismo di guida per il movimento rotatorio può influenzare il campo di flusso in modo apprezzabile. Per ovviare, per quanto possibile, a questo problema, sono stati usati due diversi sistemi di supporto delle sfere.

Un primo tipo di approccio, definito "classico", consisteva in una sfera sostenuta da sottili alberi da entrambi i lati, i quali le consentivano di ruotare fino a 1200 giri al minuto. Gli alberi, del diametro di 4 mm, erano azionati da un motore elettrico a corrente continua posizionato fuori dalla portata del flusso uscente dall'ugello. Su entrambi gli alberi era montato un profilo alare di tipo NACA 0019 il cui scopo era quello di ridurre la resistenza sul corpo. Era inoltre stata fatta particolare attenzione alla posizione del telaio, cioè della struttura che sorreggeva tutti gli elementi citati precedentemente. Esso infatti era stato posto in una posizione elevata, affinché non avesse contatto con il pavimento della galleria del vento, e fosse anch'esso fuori dalla portata del flusso uscente dall'ugello. La sfera, con tutto il sistema di supporto, era stata posizionata a 0,3 m dall'uscita dell'ugello. In **Figura 9** è possibile osservare lo schema di questo primo tipo di approccio.

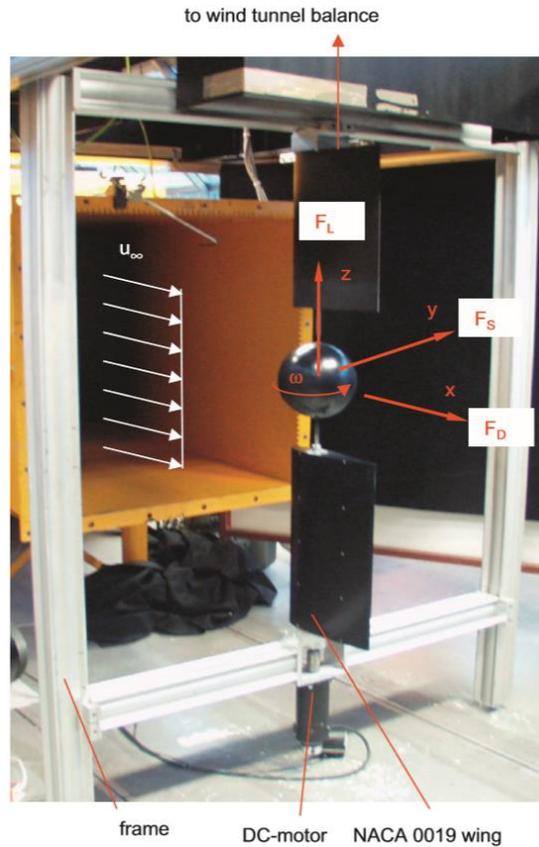


Figura 9: Schema dell'”approccio classico”.

Definita ω la velocità angolare di rotazione della sfera (vedere sempre **Figura 9**), si ha che la forza, scaturita dall'effetto Magnus, risulta essere positiva se diretta in direzione dell'asse y ma con verso rivolto al semiasse negativo ($F_M = -F_S$, dove F_S è la forza laterale). Sempre per come è stato realizzato il sistema, si ha che la resistenza F_D sarà diretta in direzione dell'asse x , mentre la portanza F_L sarà diretta in direzione dell'asse z .

La seconda disposizione sperimentale consisteva in una sfera montata su una punta a forma di L, dove la parte verticale era stata inglobata all'interno di un profilo alare NACA 0015. In questo secondo caso, la sfera era stata divisa in due emisferi cavi al cui interno era stato posto un motore elettrico che generando corrente continua permetteva la rotazione della sfera stessa. La rotazione massima era di 540 giri al minuto. Si può osservare una rappresentazione di questo secondo schema in **Figura 10a**, mentre in **Figura 10b** è possibile notare la sezione di un emisfero con all'interno il motore elettrico.

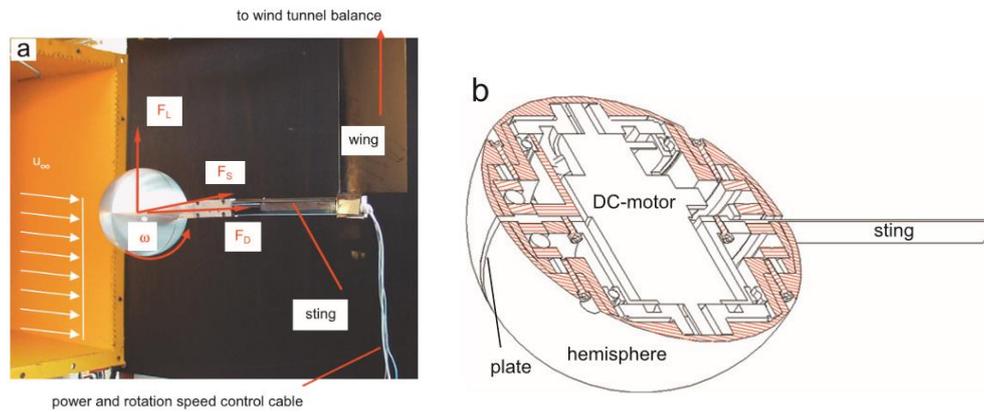


Figura 10a: Schema del supporto ad L.

Figura 10b: Dettaglio costruttivo.

Anche in questo caso la resistenza F_D è stata misurata in direzione dell'asse x, la forza laterale F_S in direzione dell'asse y e la portanza F_L in direzione dell'asse z. A causa del verso di rotazione scelto però (guardare **Figura 10a**), questa volta la forza generata dall'effetto Magnus F_M risulta positiva se diretta in direzione dell'asse z ma con verso rivolto al semiasse negativo ($F_M = -F_L$). Risulta invece negativa se parallela e concorde all'asse z.

Per tutte le misurazioni delle forze, i dati sono stati ricavati e corretti per intervalli di tempo di 40 secondi e sono state eseguite dalle tre alle sei serie di test per valutare la ripetibilità di tali dati. Infine, sfruttando la tecnica del flusso d'olio o quella dell'aerosol si è riuscito a valutare e stimare la posizione media della separazione dello strato limite dal corpo della sfera.

Per entrambe le configurazioni prima citate, gli esperimenti si sono concentrati sul determinare i coefficienti di forza C_D , C_L e C_S in due configurazioni differenti: nel caso in cui la sfera fosse ferma e nel caso in cui stesse ruotando. I coefficienti di forza, così calcolati, sono stati utili per capire meglio e prevedere la traiettoria della palla.

Nel caso di sfera non rotante, i coefficienti di forza sono stati espressi in funzione del numero di Reynolds, mentre nel caso di sfera rotante gli stessi coefficienti sono stati espressi in funzione del parametro di spin ponendosi a un fissato valore del numero di Reynolds. Nello specifico, i valori del coefficiente di resistenza, calcolato in funzione del numero di Reynolds, sono stati poi confrontati con una curva teorica calcolata da Achenbach nel 1972.

Di primo acchito si è visto che nella configurazione definita "classica" i valori del coefficiente di resistenza si discostavano molto di più dalla curva di Achenbach rispetto alla configurazione ad L e, per tale motivo, nel riproporre l'esperimento con il prototipo del pallone, invece che con la sfera, si è preferito svolgere indagini solo con la seconda configurazione strutturale tralasciando la prima. Tale discostamento è inoltre maggiormente marcato nel caso di numeri di Reynolds supercritici in cui il C_D raggiunge un valore di 0,4.

Nel caso di numero di Reynolds subcritico il regime di separazione dello strato limite asimmetrico provoca una forza laterale che persiste quando la sfera sta ruotando; si verifica cioè l'effetto Magnus. Con l'aumentare del parametro di spin si verificano improvvisi cambiamenti della direzione di tale forza. Inoltre, per una vasta gamma di numeri di Reynolds e parametri di spin si origina un "effetto Magnus negativo".

Nel passare dalla sfera al pallone, come si è poc'anzi detto, si è preferito usare solo la configurazione ad L in quanto essa presentava dei valori del coefficiente di resistenza più prossimi alla curva teorica di Achenbach. In questo secondo caso si è costruito un modello che fosse ancora più simile al Teamgeist usato nei Mondiali del 2006 [7]. Tale prototipo, più accurato della sfera, era anch'esso in lega di alluminio ma, anziché avere una superficie liscia, presentava 14 pannelli disposti in maniera identica al pallone originale. Per rendere l'esperimento il più realistico possibile, si è inoltre deciso di lavorare con un numero di Reynolds che variasse tra $0,96 \times 10^5 < Re < 4,62 \times 10^5$, essendo questi dei valori pertinenti al gioco del calcio. In questa seconda tipologia di esperimenti si è visto che, nello stato non rotante, la variazione dei coefficienti di forza con il numero di Reynolds e i punti di separazione dello strato limite rientrano nell'intervallo che si trova per i veri palloni da calcio. Nello stato di rotazione, si sono verificati cambiamenti considerevoli dei coefficienti di forza media con il numero di Reynolds e il parametro di spin. Anche quindi il pallone concorda molto bene con gli studi dell'effetto Magnus sulle sfere: nel subcritico e regimi dello strato limite supercritico, in cui lo strato limite era o sottoposto a separazione completamente laminare o completamente turbolenta, la forza scaturita all'effetto Magnus aumentava con l'aumentare della velocità angolare, mentre nel regime di flusso critico è stata osservata un "effetto Magnus negativo". Il motivo era la laminarizzazione dello strato limite sul lato in movimento a valle e il corrispondente spostamento a monte del punto di separazione, mentre la transizione allo strato limite turbolento sul lato in movimento verso l'alto spostava il punto di separazione a valle, rispetto al caso rotante.

Una forza scaturita da un effetto Magnus positivo si verificava quando lo strato limite a contatto con la sfera ed il prototipo del pallone era o completamente laminare o completamente turbolento su entrambi i lati dell'oggetto.

3.2 Portanza generata su una palla da baseball che non ruota o si muove molto lentamente

Nel 1995, un team di ricercatori giapponesi composto da T. Mizosa, H. Kuba e A. Okajama, hanno misurato le forze aerodinamiche su una palla da baseball non rotante, posta in galleria del vento, per un valore del numero di Reynolds pari a $1,02 \times 10^5$ [8]. Essi hanno analizzato l'andamento della portanza e la variazione della resistenza in base alla direzione del flusso uniforme che investiva la palla, nonché della posizione e

dell'andamento delle cuciture presenti sulla sua superficie. Hanno anche misurato la distribuzione della velocità in prossimità e a valle della superficie della sfera. Al termine dei loro esperimenti, hanno ipotizzato che l'orientamento della scia fosse alterato dall'asimmetria dei punti di separazione sotto l'influenza della posizione della giuntura e che una forza di sollevamento fosse generata nella direzione opposta allo spostamento della scia.

Successivamente hanno posto in rotazione la palla e hanno osservato che si generava portanza anche in questo caso. In questa seconda parte dell'esperimento, il numero di Reynolds variava in un intervallo compreso tra $7,1 \times 10^4 < Re < 1,8 \times 10^5$, mentre il rapporto di velocità era stato impostato su valori non superiori a $1,20 \times 10^{-2}$, cioè due ordini di grandezza in meno per poter osservare l'effetto Magnus. I cambiamenti di posizione delle cuciture che accompagnavano la rotazione della palla hanno determinato sia un coefficiente di sollevamento positivo che uno negativo. Hanno potuto osservare che la scia si spostava nella direzione opposta al sollevamento ed ipotizzato che il verificarsi dell'effetto Magnus dipendesse dalla posizione dei punti di separazione dello strato limite a contatto con l'oggetto, nonché dalla natura del flusso (laminare o turbolento) all'intero del suddetto strato.

3.3 Misure di portanza e resistenza su varie tipologie di palle

Rod Cross e Crawford Lindsey, fisici dell'università di Sydney, nel 2017 hanno concordato con i risultati degli esperimenti, presentati in questo capitolo, proponendo, a loro volta, delle notevoli applicazioni con diverse tipologie di palle [9]. Nello specifico, i loro studi si sono concentrati su tre differenti tipologie di palle: una pallina di gomma vuota, una palla da tennis opportunamente rasata e un pallone da basket. Chi più, chi meno, queste tre palle presentavano una superficie liscia. Delle tre analizzate, hanno potuto osservare che solo la palla da basket poteva presentare, in alcune circostanze, un "effetto Magnus negativo". Nello specifico, tale effetto si verificava quando si avevano contemporaneamente un $Re > 5 \times 10^4$ e uno $S < 0.7$.

In **Figura 11** è possibile osservare la regione, in funzione del numero di Reynolds e del parametro di spin, dedotta da questo esperimento, per la quale si ha l'"effetto Magnus negativo".

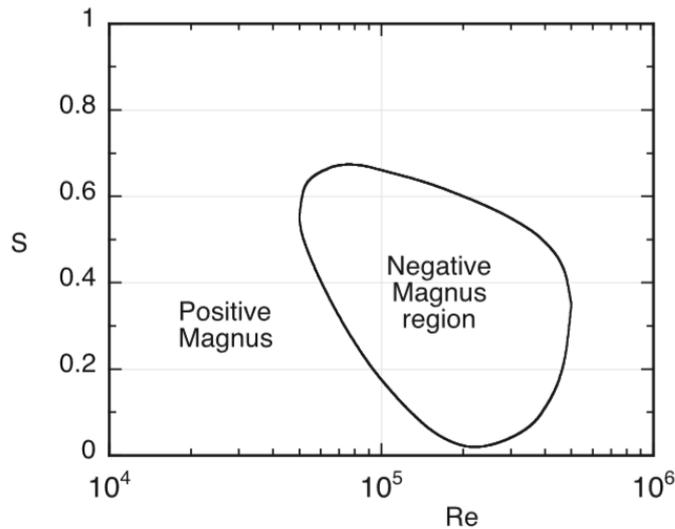


Figura 11: Regione dell'effetto Magnus negativo sul piano Re-S.

La disposizione utilizzata nel seguente esperimento è invece mostrata in **Figura 12**. Per evitare effetti del vento, l'esperimento è stato condotto all'interno di un corridoio lungo circa 9 m, delimitato da tre pareti di mattoni ed una di vetro, contenente diverse porte scorrevoli. Le sfere venivano lanciate da un'estremità del corridoio, in una direzione parallela alle pareti laterali, in modo che avessero un impatto sulla parete terminale. Tutte le palle venivano lanciate con degli appositi lanciatori e due telecamere, poste in posizioni differenti, riprendevano la scena e permettevano di calcolare la velocità raggiunta dalle sfere nonché la loro altezza dal suolo.

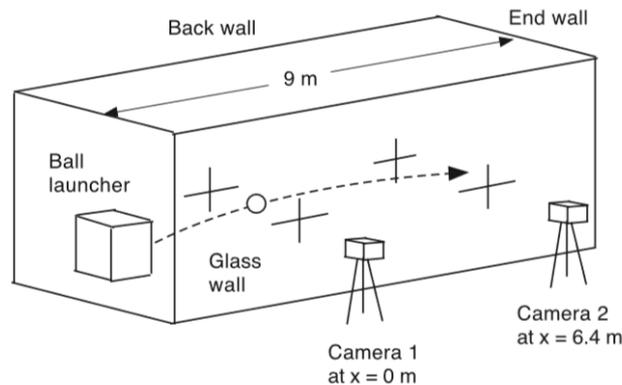


Figura 12: Schema dell'esperimento effettuato.

Come già notato, i risultati, trovati in questo esperimento, risultano coerenti con quelli trovati in altri esperimenti. Anche i due ricercatori australiani, al di là di quanto presentato, hanno implementato le loro ricerche studiando i punti di separazione dello strato limite nonché la natura del flusso presente in esso. Hanno anche però osservato che tutte le sfere differiscono in termini di effetto Magnus, a seconda della rugosità

della superficie, del diametro della sfera, della velocità della palla e della rotazione. Tuttavia, tutte le sfere possono essere categorizzate in termini di tre possibili risultati mostrati nella **Figura 13**. Per le palle con una superficie ruvida, il coefficiente di portanza aumenta con la rotazione dalla palla. Per le palle con una superficie liscia, il coefficiente di sollevamento può subire una “crisi di sollevamento” in cui il C_L si avvicina a zero prima di aumentare nuovamente a velocità più elevate. A valori più alti del numero di Reynolds, più comunemente osservati con palle di grande diametro, il flusso d’aria può essere fortemente turbolento su un lato della palla e laminare sull’altro. In tal caso, l’effetto Magnus può invertire il segno.

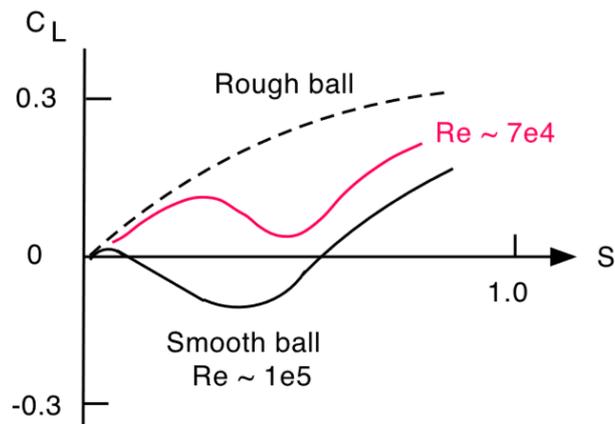


Figura 13: Andamento del C_L in funzione di S .

CAPITOLO 4

APPLICAZIONI INGEGNERISTICHE DELL'EFFETTO MAGNUS

Come si è visto nel capitolo precedente, l'effetto Magnus presenta innumerevoli applicazioni in ambito sportivo per migliorare le condizioni aerodinamiche di qualsiasi tipo di palla, pallina o pallone. Il ramo sportivo però non è l'unica disciplina pratica nella quale è possibile trovar presente questo fenomeno, infatti, nel corso dei decenni, anche l'Ingegneria si è interessata a svelare tutti i segreti dell'effetto Magnus per poterlo al meglio utilizzare in svariate invenzioni tecnologiche. Ad esempio, studi sull'"effetto Magnus negativo" sono oggi via via sempre più importanti per le potenziali applicazioni aerodinamiche sui satelliti artificiali. Non solo in ambito spaziale, ma anche in quello aeronautico, navale, missilistico, balistico e in molti altri, studi sull'effetto Magnus, oggi più che mai, stanno sempre di più prendendo piede per poter migliorare e implementare nuovi modelli di tecnologia e realizzare nuove invenzioni.

Pertanto, in questo e nel prossimo capitolo, si passa ad analizzare alcune applicazioni ingegneristiche che hanno saputo sfruttare al meglio l'effetto Magnus dando alla luce nuovi e sorprendenti risultati.

4.1 Disco ruvido rotante che si muove all'interno di un fluido

Nel 2010 un team internazionale di ricercatori inglesi e portoghesi, costituito da Alexander Plakhov, Tatiana Tchemisova e Paulo Gouveia, hanno effettuato delle ricerche particolari: invece di studiare corpi sferici che ruotano e traslano all'interno di un fluido, hanno preferito concentrare i loro sforzi su un disco che, immerso all'interno di un fluido alla temperatura di 0°C , compiva i medesimi movimenti [10].

Un secondo punto "insolito" dei loro studi è stato quello di inglobare nelle loro ricerche la rugosità dell'oggetto, che quindi non veniva più considerato come avente una superficie perfettamente e totalmente liscia. Il loro modo "diverso" di approcciarsi allo studio del loro modello non si può di certo considerare sbagliato, in quanto la ruvidità è sempre presente sulla superficie dei corpi. Il tipo di rugosità (cioè la forma di fossette microscopiche, cavità, calchi, ecc.) dipende dal materiale del corpo. A causa della ruvidità, le particelle tendono a rimbalzare sulla superficie del corpo in direzioni

diverse da quelle prescritte dall'orientamento visibile della superficie e possono anche presentare riflessioni multiple.

Questo nuovo approccio all'effetto Magnus si basa sull'esame della forma delle cavità del corpo e si suppone che gli urti tra particelle di fluido e disco siano di natura elastica. Tale studio incontra però delle evidenti difficoltà: c'è una grande varietà di forme che governano la ruvidità: gaussiana, non gaussiana, frattale, ecc. Ognuno di essi fornisce un tipo speciale di legge di riflessione, che può essere molto difficile da determinare. Fortunatamente, c'è un modo più semplice per sbarazzarsi di queste difficoltà. Invece di calcolare la legge di dispersione per ogni data ruvidità, si può considerare una sorta di problema inverso: determinare l'insieme delle leggi di dispersione per tutte le possibili forme di rugosità. Avendo risolto questo problema, il team è stato in grado di determinare le caratteristiche principali dell'effetto: la gamma di forze e momenti che agiscono sul corpo.

Nello specifico, l'esperimento considerava il disco come un corpo tridimensionale rotante che si muoveva, attraverso un mezzo omogeneo, su di un piano. Il mezzo risultava essere estremamente rarefatto, quindi la lunghezza del libero cammino medio delle particelle era molto più grande delle dimensioni dell'oggetto considerato. In tal caso, l'interazione del corpo con il mezzo poteva essere descritta in termini di flusso molecolare libero, dove le particelle puntiformi cadevano sulla superficie del corpo interagendo con esso, ma non con le altre particelle. Venivano trascurati gli effetti dovuti alla forza gravitazionale e le particelle sul piano rimanevano a riposo, tanto che la temperatura assoluta del mezzo potesse essere considerata pari a 0°C . In una struttura di riferimento che avanzava insieme al corpo, si aveva quindi un flusso parallelo di particelle che cadevano sull'oggetto. In **Figura 14** è possibile osservare uno schema di quanto appena descritto.

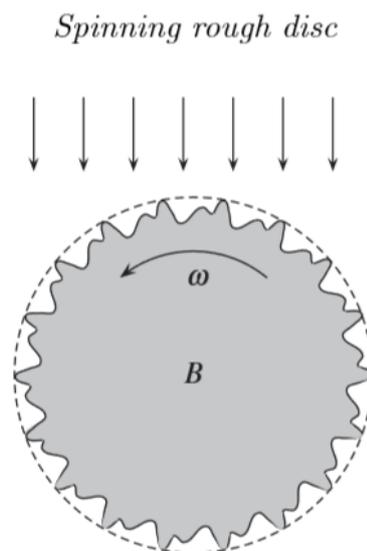


Figura14: Disco ruvido rotante in un flusso parallelo di particelle.

Trascurando il momento angolare delle particelle, ognuna di esse veniva identificata come un corpo puntiforme (cioè avente una massa diversa da zero ma dimensioni pressoché nulle) che, avvicinandosi al corpo, collideva con esso e poi se ne allontanava. Tutti gli urti erano considerati perfettamente elastici.

Il team è riuscito ad osservare che, sotto particolari condizioni di questo esperimento, si generava sul corpo una forza dovuta all'effetto Magnus. A differenza delle teorie sui punti di separazione dello strato limite e della natura del flusso (laminare o turbolenta) in esso contenuta e analizzate nei precedenti capitoli, in questo esperimento si sono scoperte due nuove cause della generazione dell'effetto Magnus.

La prima di queste sarebbe imputabile proprio alla natura del corpo stesso: per quanto detto, infatti, il corpo si è considerato ruvido e, a detta dei risultati trovati, il fatto che la superficie dell'oggetto non fosse convessa ma contenesse delle microscopiche cavità, sarebbe un valido motivo della nascita di una forza dovuta all'effetto Magnus.

La seconda causa invece dipenderebbe dalla resistenza, che nasce sul corpo quando esso viene investito dalla corrente fluida, e dagli urti tra le particelle di fluido e il corpo stesso. La forza di resistenza, nonché il momento da essa generato, dipendono dalla natura della rugosità della superficie, dall'angolo di rotazione, dalla velocità angolare e dalla velocità di traslazione. Quando le particelle collidono con il corpo, una parte della componente tangenziale del loro momento viene trasmessa all'oggetto, determinando la creazione di una componente trasversale della resistenza che si traduce in una deflessione del corpo. In questo caso si incontrerebbe l'effetto Magnus che può essere positivo o negativo. Nello specifico, se il verso di tale componente coincidesse con quello della velocità tangenziale del punto anteriore del corpo, allora ci sarebbe un "effetto Magnus positivo", altrimenti se i due versi fossero discordi, l'effetto Magnus sarebbe "negativo".

Come si può vedere nella **Figura 15a**, la freccia blu (che rappresenta la velocità tangenziale nel punto superiore del disco che è investito per primo dalla corrente) è parallela e concorde alla componente R_T della resistenza. In **Figura 15b**, invece, la freccia rossa che rappresenta la stessa velocità di prima è qui parallela ma discorde alla componente R_T della resistenza. La freccia gialla indica invece la direzione di avanzamento del disco.

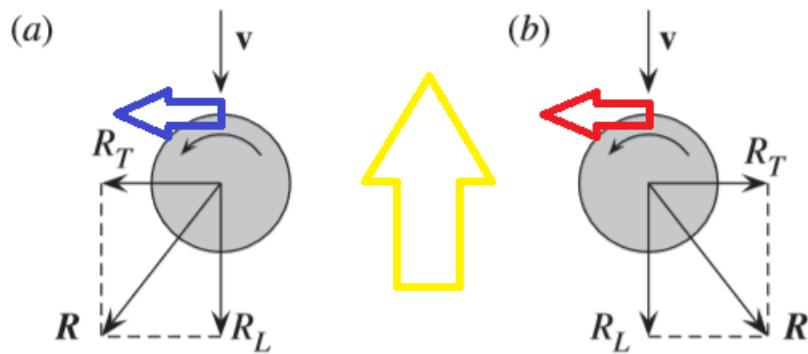


Figura 15: (a) Effetto Magnus positivo; (b) Effetto Magnus negativo.

4.2 Turbina eolica basata sull'effetto Magnus

Una delle invenzioni ingegneristiche che meglio ha saputo sfruttare l'effetto Magnus è sicuramente la turbina nota con il nome di Darrieus-Magnus visibile in **Figura 16**. Il suo progetto venne consegnato per la prima volta all'ufficio brevetti degli Stati Uniti d'America nel 1931 dall'ingegnere G. J. M. Darrieus e, più di ottant'anni dopo, nel 2015, Lahouari Khadir dell'Università di Scienza e Tecnologia di Oran in Algeria e Hatem Mrad dell'Università del Quebec in Canada hanno, per la prima volta, condotto delle ricerche e degli esperimenti per studiarne l'aerodinamica [11].

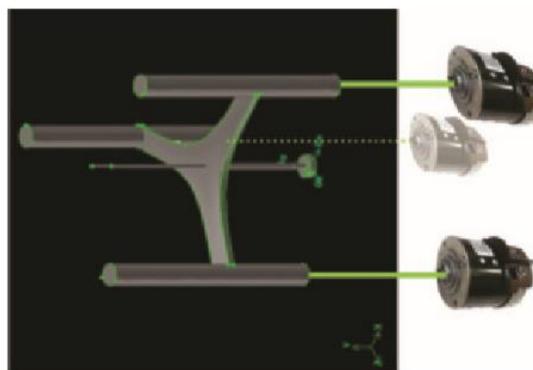


Figura 16: Turbina eolica Darrieus-Magnus.

Di conseguenza, sono stati praticati dei test in galleria del vento per accertare le prestazioni complessive della turbina e sono stati generati modelli fluidodinamici computazionali (CFD) bidimensionali per aiutare a comprenderne l'aerodinamica.

Come si può vedere dalla **Figura 16**, le pale della turbina sono dei cilindri ad asse verticale che vengono fatti girare quando sono investiti da una corrente d'aria; è

pertanto facile intuire che, in determinate circostanze, possa nascere una forza dovuta all'effetto Magnus.

Il primo problema che sorge, nel cercare di calcolare le prestazioni della turbina, è quello di determinare la velocità del vento che andrà ad azionare le sue pale. Nel caso specifico di questo esperimento, dopo aver posto la turbina nella galleria del vento, si è deciso di farla investire da un flusso d'aria avente velocità pari a $U_\infty = 9$ m/s.

Una volta decisa la velocità del vento che investiva la turbina, il passo successivo, nella sua progettazione, è stato selezionare un rapporto di velocità in prossimità delle estremità della turbina stessa definito come: $TSR = R \cdot \frac{\omega_T}{U_\infty}$, dove R [m] è il raggio della turbina e ω_T [rad/s] è la velocità angolare della turbina.

Nella maggior parte dei casi di ricerca sulle turbine eoliche Darrieus, i coefficienti di potenza medi dipendono solo dal TSR, ma per quelle di tipo Darrieus-Magnus è stato introdotto un nuovo fattore chiamato λ e definito come: $\lambda = R \cdot \omega_C / U_\infty$, dove ω_C [rad/s] è la velocità angolare del cilindro.

Il passo finale, nel prevedere le prestazioni della turbina eolica, è quello di determinare la potenza che è in grado di estrarre dal vento e quanto efficacemente può portare a termine questo compito. La quantità di potenza che l'aerogeneratore è in grado di assorbire dal vento è data da: $P_{ave} = \omega_T \cdot T$, dove T [N · m] è la coppia di torsione della turbina eolica.

Pertanto, l'efficienza della turbina eolica è semplicemente il rapporto tra la potenza prodotta dalla turbina e la potenza disponibile nel vento data dall'espressione: $C_{p,ave} = \frac{P_T}{P_W} = P_{ave} / (\frac{1}{2} \rho A_S U_\infty^3)$, dove ρ [kg/m³] è la densità dell'aria e A_S [m²] è l'area spazzata dal rotore.

L'equazione del $C_{p,ave}$ è significativa in questo lavoro, perché rappresenta un coefficiente di prestazione non dimensionale che è funzione dalla coppia T da utilizzare per l'ottimizzazione della forma aerodinamica.

Da quanto detto, dopo aver calcolato e implementato le prestazioni della turbina, sono emersi i seguenti grafici. In **Figura 17a** è riportato l'andamento del coefficiente di potenza C_p in funzione del rapporto di velocità TSR per una velocità del vento incidente pari a 9 m/s. Il funzionamento del rotore è stato simulato numericamente per cinque diversi valori del parametro η [-], dove η è il rapporto di velocità di rotazione tra quella della turbina e quella del cilindro.

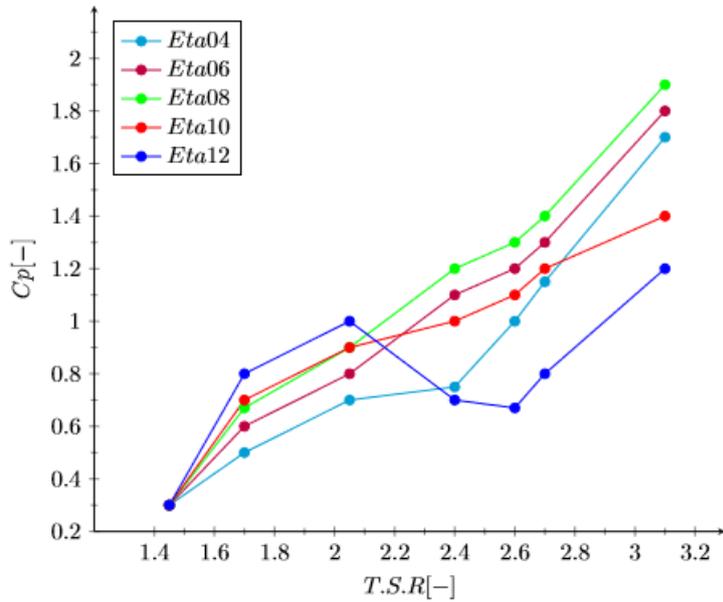


Figura 17a: Andamento del C_p in funzione del rapporto TSR per diversi valori di η .

In **Figura 17b** è invece riportato sempre l'andamento del coefficiente di potenza C_p della turbina ma questa volta è espresso in funzione del parametro λ . I valori di η per il quale sono state tracciate le varie curve del seguente grafico sono gli stessi del grafico precedente. Anche la velocità del vento è sempre $U_\infty = 9$ m/s.

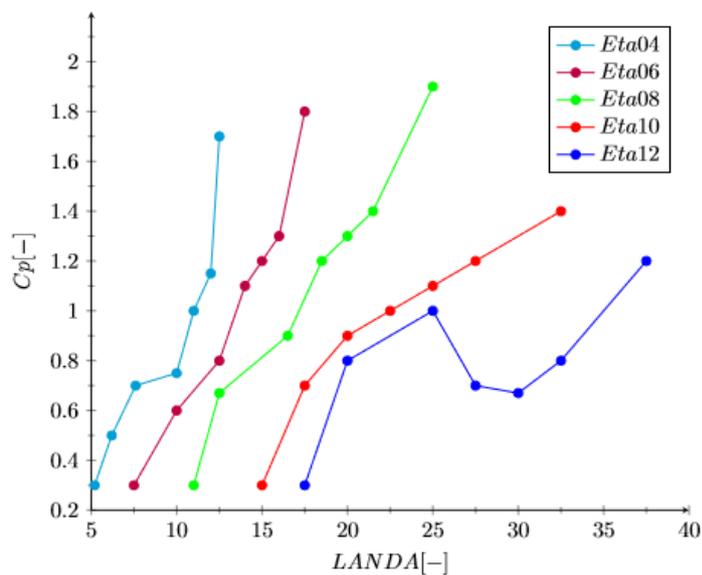


Figura 17b: Andamento del C_p in funzione del parametro λ per diversi valori di η .

Come si può evincere dai due grafici, al termine di tutte le simulazioni in galleria del vento, è stata realizzata la turbina con la migliore configurazione. Per questo motivo, sono stati simulati diversi valori di η per individuare le potenziali zone in cui la macchina fornisce effettivamente un lavoro da turbina eolica. In tali condizioni si presuppone che la coppia T ad essa applicata sia positiva. Al contrario, nel caso in cui questa coppia fosse negativa, la macchina realizzata potrebbe funzionare benissimo come motore meccanico. Nel grafico di **Figura 18** sono riportate le varie zone in cui le applicazioni della macchina mettono in luce i diversi tipi di funzionamento.

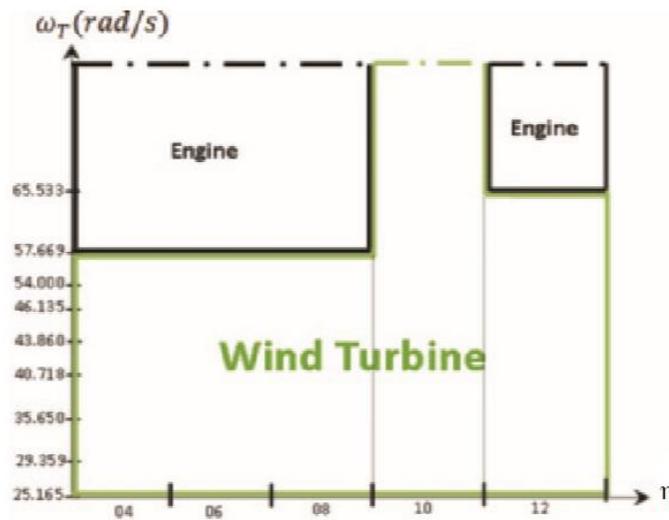


Figura 18: Zone di funzionamento della macchina in funzione della velocità angolare della turbina ω_T e del rapporto di velocità di rotazione η . In verde ci sono le zone in cui si ha il funzionamento da turbina eolica, mentre in nero le zone di funzionamento da motore meccanico.

Dal confronto dei tre grafici trovati, si è capito che il funzionamento migliore per la turbina Darrieus-Magnus è quello che si ha per $\eta = 10$.

4.3 Effetto Magnus su un proiettile rotante in un flusso supersonico

Molti proiettili ruotano attorno al loro asse longitudinale, durante il volo, per ottenere vantaggi quali la stabilità attraverso l'effetto giroscopico, diminuire o eliminare gli effetti negativi causati dall'eccentricità e semplificare il sistema di controllo. Tuttavia, la rotazione può indurre un campo di flusso asimmetrico attorno al piano di moto del proiettile, provocando una forza laterale perpendicolare al piano di moto e un momento di imbardata, che sono responsabili della deviazione della traiettoria. Quanto descritto, come oramai è noto, dipende dall'effetto Magnus. Sebbene la forza, generata dall'effetto Magnus, sia solo da 1/100 a 1/10 della forza normale, la combinazione di forza laterale e forza longitudinale può indurre un moto conico del

proiettile, che influenza significativamente la sua stabilità. Negli ultimi decenni, l'effetto Magnus sul proiettile è stato studiato da molti ricercatori e i risultati delle loro ricerche indicano che, a piccoli angoli di incidenza, la distorsione dello strato limite è la fonte principale dell'effetto Magnus, mentre, per grandi angoli di incidenza, la causa preponderante diventa la separazione del flusso asimmetrico sulla superficie del proiettile.

Con il trascorrere degli anni, le tecniche di ricerca si sono sempre più evolute e modernizzate, infatti, se inizialmente gli studi venivano effettuati utilizzando prevalentemente modelli teorici e sperimentali, al giorno d'oggi, la Fluidodinamica, per studiare i suoi modelli, utilizza strumenti potenti quali la tecnologia computazionale (CFD) e le simulazioni RANS. Grazie a questi strumenti si è, ad esempio, scoperto che per piccoli angoli di incidenza (cioè minori di $4,2^\circ$) e se il proiettile presentasse delle pinne terminali, la forza generata dall'effetto Magnus su queste ultime avrebbe una direzione opposta rispetto a quella generata sul corpo. Inoltre, la prima sarebbe preponderante sulla seconda.

Degno di nota risulta essere l'esperimento condotto tra il 2016 e il 2017 da un team di professori cinesi, dell'Istituto di Tecnologia di Pechino, costituito da Jintao Yin, Xiaosheng Wu e Juanmian Lei [12]. I loro studi si sono concentrati sulla struttura del campo di flusso su proiettili alettati in flussi supersonici ad angoli di attacco dai $4,0^\circ$ ai $30,3^\circ$. L'intuizione profonda della relazione tra caratteristiche aerodinamiche e struttura dei flussi può fornire una guida per la progettazione della configurazione e del sistema di controllo del proiettile.

Nell'esperimento, per studiare il flusso del fluido, è stata utilizzata la forma integrale delle equazioni di Navier-Stokes combinate con il metodo di stepping a due tempi. Tale metodo consiste in una fase temporale fisica, che descrive il movimento del modello, ed una fase temporale interna utilizzata per convergere le equazioni RANS. Le RANS (equazioni di Navier-Stokes mediate alla Reynolds), nello specifico, sono poi state molto utilizzate per lo studio dei flussi turbolenti, mentre una simulazione di stato stazionario senza spin, avviata per ottenere un campo di flusso convergente, è stata utilizzata come stato iniziale.

L'influenza di diverse strutture di flusso sulle caratteristiche termodinamiche è riflessa dalla pressione sulla superficie del proiettile e dalle sollecitazioni di taglio. Da un punto di vista del calcolo, la pressione perpendicolare e la forza tangente alla superficie del proiettile possono essere ottenute dopo aver risolto le RANS. Integrando tutte queste pressioni e questi sforzi viscosi sui vari elementini infinitesimi di superficie del corpo e delle alette del proiettile è possibile ottenere la forza laterale, dovuta all'effetto Magnus, agente su tutto il proiettile. Tuttavia, il contributo della forza viscosa sulla forza laterale totale è, solitamente, molto più piccolo di quello generato dalle pressioni e, pertanto, può essere trascurato.

Il proiettile, preso come oggetto di studio nell'esperimento, aveva un diametro del corpo pari a $d = 45,72 \text{ mm}$ e in **Figura 19** è possibile vederne la geometria.

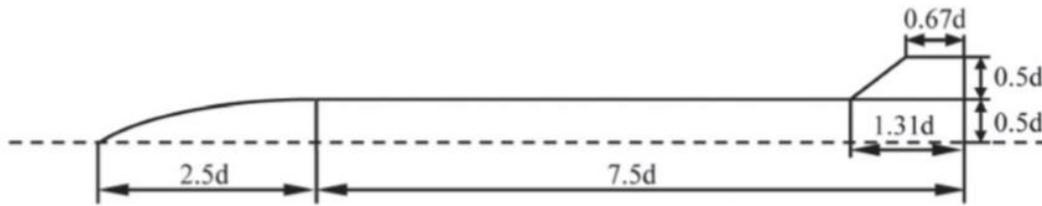
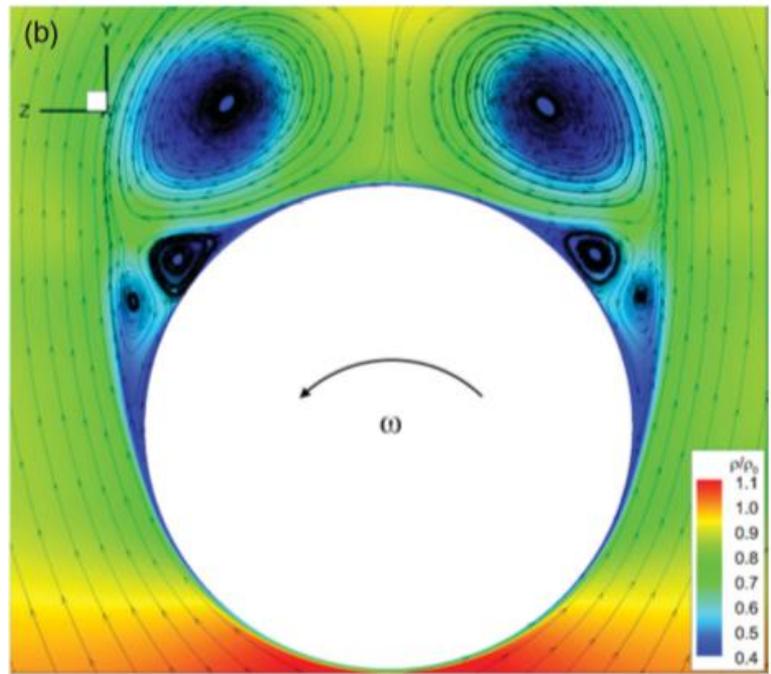
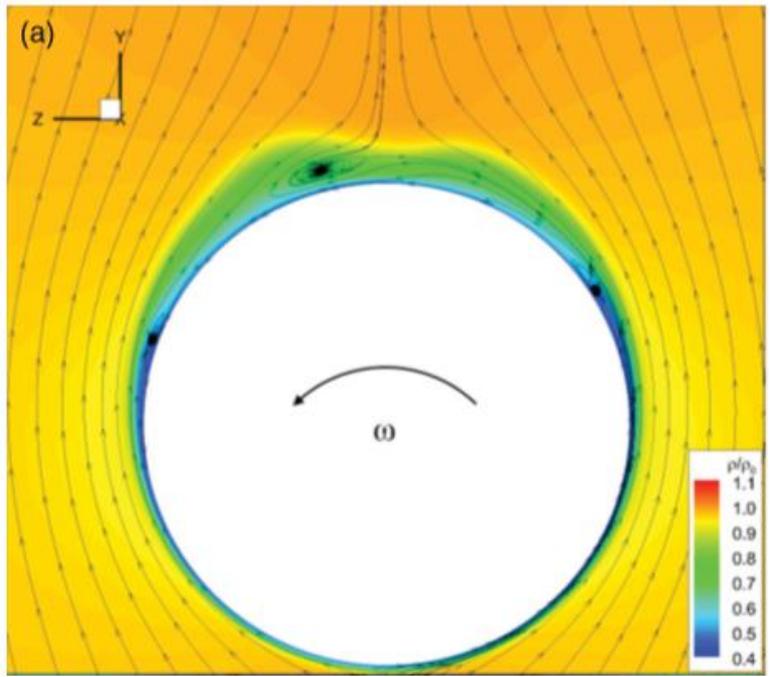


Figura 19: Geometria del proiettile.

Nelle condizioni sperimentali erano invece stati presi un valore del numero di Mach pari a $M = 2,5$ e un valore del numero di Reynold pari a $Re = 2,6 \cdot 10^5$. La pressione totale era $p^0 = 61360 \text{ Pa}$, la temperatura totale era di $T^0 = 311 \text{ K}$, l'angolo di incidenza α variava tra $4,0^\circ$ e $30,3^\circ$, mentre la velocità angolare era $\omega = 0,025 \frac{\text{rad}}{\text{s}}$. Le corrispettive condizioni di flusso libero erano invece: $p_\infty = 3624,5 \text{ Pa}$, $T_\infty = 137,66 \text{ K}$, $\rho_\infty = 0,092 \text{ kg/m}^3$, $V_\infty = 588 \text{ m/s}$ e $\omega = 642 \frac{\text{rad}}{\text{s}}$.

Sulla base delle equazioni RANS, combinando un metodo di stepping a doppio tempo e diversi modelli di turbolenza, l'effetto Magnus su un proiettile è stato studiato attraverso la simulazione numerica della fluidodinamica computazionale (CFD). Si è notato un aumento della forza dovuta all'effetto Magnus all'aumentare del valore dell'angolo di attacco. La **Figura 20** mostra le curve di livello per il rapporto di densità ρ/ρ_∞ per diversi angoli di attacco, prendendo in esame una generica sezione del proiettile vista frontalmente. Lo schema della separazione del flusso cambia con l'angolo di incidenza. Quando $\alpha = 4,0^\circ$ non si verifica separazione del flusso dal proiettile. Quando $\alpha = 12,6^\circ$ si iniziano a formare vortici secondari di separazione e quando $\alpha = 30,3^\circ$ la velocità del flusso trasversale aumenta e i punti di separazione dello strato limite si spostano verso l'alto.



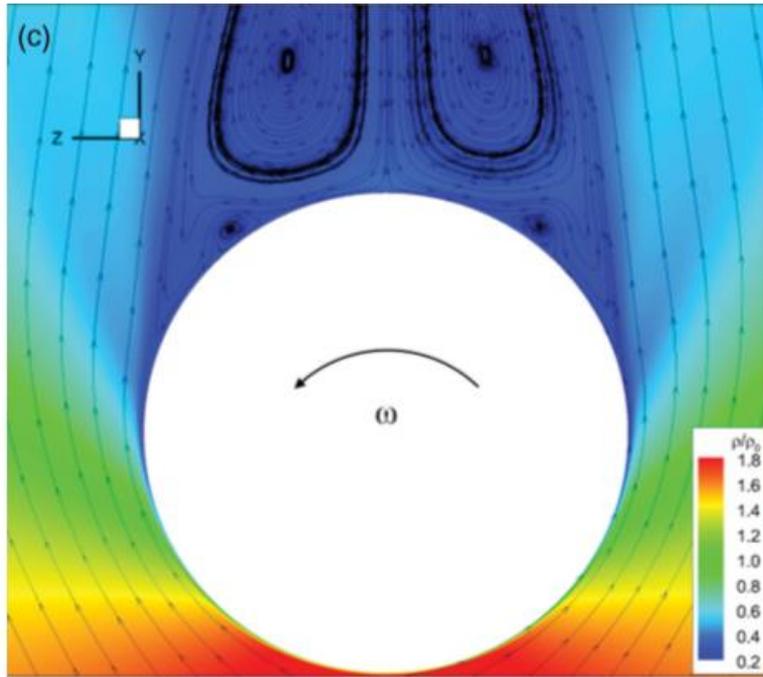


Figura 20: Curve di livello per la densità a diversi angoli di attacco: (a) $\alpha = 4, 0^\circ$, (b) $\alpha = 12, 6^\circ$ e (c) $\alpha = 30, 3^\circ$.

Sempre sfruttando la fluidodinamica computazionale, è stato possibile fare delle rilevazioni anche sul coefficiente di pressione $C_p = \frac{p}{p_\infty}$. Si è osservato che la distribuzione di pressione del proiettile alettato, sebbene interrotta vicino alle pinne 2 e 4, è relativamente coerente con quella del proiettile non alettato. Inoltre, con l'aumentare dell'angolo di attacco, si è registrato un aumento della velocità del flusso. In **Figura 21** è possibile osservare l'andamento del coefficiente di pressione su parte del corpo del proiettile e sulle sue pinne. Per il proiettile studiato, le pinne presentano un angolo di inclinazione rispetto all'asse longitudinale del corpo pari a $\varphi = 24,2^\circ$.

Nelle **Figura 21** confrontando il caso (a) con il caso (c), si può osservare come il coefficiente di pressione, per piccoli angoli di incidenza, sia più elevato di quello che si registra per angoli di incidenza maggiori. La sezione 2 inoltre non risulta influenzata dall'urto tra il flusso e le alette. Paragonando invece i casi (b) e (d) si nota un andamento contrario: il coefficiente di pressione aumenta all'aumentare dell'angolo di

incidenza e la sezione 3 risulta invece influenzata degli urti tra flusso e pinne del proiettile.

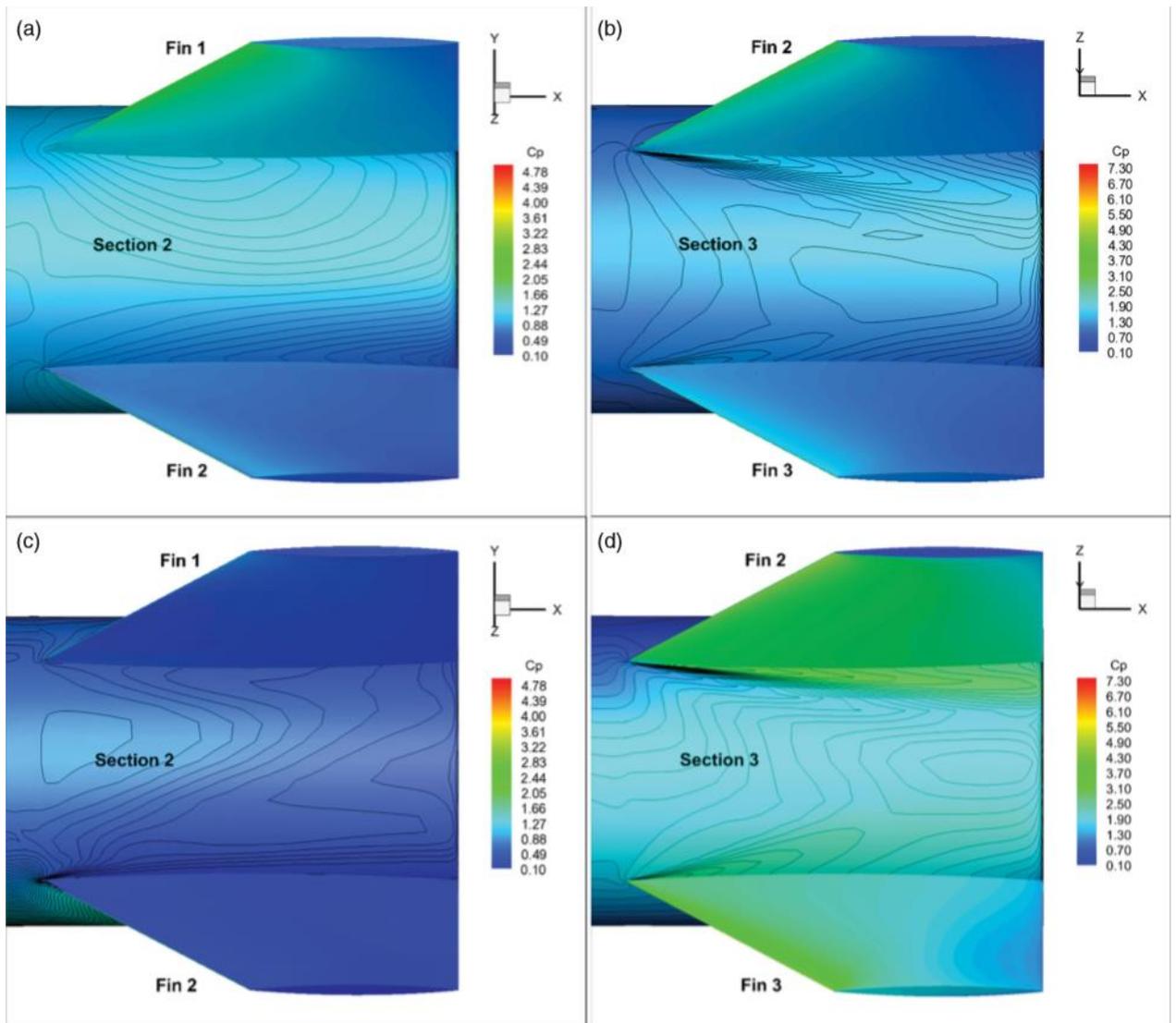


Figura 21: Coefficiente di pressione sul corpo e sulle alette del proiettile per diversi angoli di incidenza: (a) $\alpha = 4, 0^\circ$ Sezione 2, (b) $\alpha = 4, 0^\circ$ Sezione 3, (c) $\alpha = 20, 2^\circ$ Sezione 2, (d) $\alpha = 20, 2^\circ$ Sezione 3.

CAPITOLO 5

L'EFFETTO MAGNUS IN AMBITO NAVALE ED AERONAUTICO



Figura 22: Anton Flettner (Eddersheim, 1° novembre 1885 – New York, 25 dicembre 1961).

Come si è visto nei capitoli precedenti, al giorno d'oggi, sempre maggiori sono le applicazioni pratiche che, sfruttando l'effetto Magnus, cercano di produrre una forza di sollevamento facendo girare un corpo su di un asse perpendicolare alla direzione di moto del fluido. Nel capitolo 3 sono stati trattati numerosi esperimenti che, basandosi su tale principio, hanno cercato di migliorare l'aerodinamica di diverse tipologie di palle, mentre nel capitolo 4 sono state analizzate delle moderne innovazioni in ambito ingegneristico. Tuttavia, nel corso della storia, pochissimi sono stati i dispositivi, basati sull'effetto Magnus, che hanno saputo attrarre l'attenzione della comunità scientifica e sono stati incoronati al successo. Tra tutte le varie applicazioni, trattate precedentemente, nessuna è infatti così degna di nota e importante come quella presentata in quest'ultimo capitolo: il rotore Flettner [13].

Nel 1924, l'ingegnere aeronautico tedesco Anton Flettner (**Figura 22**) riscosse un grande successo di pubblico e critica quando presentò al mondo Buckau (**Figura 23**), la prima nave ad estrarre la forza propulsiva necessaria alla navigazione dal flusso d'aria attorno a due grandi cilindri rotanti. La nave attraeva l'attenzione in ogni porto in cui attraccasse tanto che iniziò ad ispirare scienziati ed ingegneri sulla possibilità di utilizzare un cilindro rotante come dispositivo per estrarre energia eolica (turbina Darrieus-Magnus), far navigare altri tipi di imbarcazione e, soprattutto, far volare gli aerei.

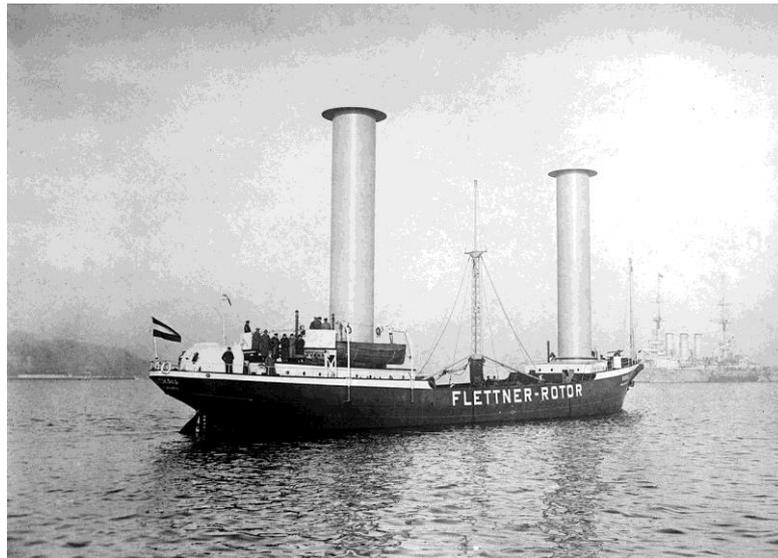


Figura 23: La nave a rotore Buckau.

Per realizzare la sua invenzione, Flettner si rivolse a Ludwig Prandtl che negli anni '20 era a capo del gruppo di ricerca dell'università di Gottinga, uno dei più all'avanguardia in Europa in ambito scientifico. Fu proprio il team di ricercatori tedeschi ad indicare a Flettner che questo metodo di propulsione fosse fattibile e da Prandtl stesso venne l'idea di applicare delle piastre terminali alle estremità dei rotori. L'effetto di tali piastre permise un raddoppio della forza di sollevamento.

Il rotore Flettner, data soprattutto la fama via via crescente che ebbe in Europa e negli Stati Uniti d'America negli anni successivi alla sua realizzazione, iniziò ad essere il protagonista di nuove idee e visioni. Gli ingegneri, infatti, si ponevano domande su quali potessero essere i meccanismi di azionamento di tale rotore, come il rotore Flettner potesse essere combinato con altri dispositivi per la generazione di forze di sollevamento e come si potesse implementare e potenziare l'effetto Magnus agente su di esso. In ogni caso, sia che il rotore fosse applicato in campo navale, sia che fosse applicato in ambito aeronautico, lo scopo principale era quello di generare una spinta per far muovere l'aereo o la nave.

Nel caso della nave Buckau, i rotori Flettner, su di essa montati, erano fatti girare da un motore elettrico. La ragione di tale decisione risiedeva nella semplicità di poter cambiare il verso di rotazione del rotore in base alla direzione di provenienza del vento. Ciò permetteva, ovviamente, di manovrare con comodità e agilità l'imbarcazione. Tuttavia, data la complessità di questo sistema e per cercare di migliorarne la sicurezza, gli ingegneri hanno cercato un metodo alternativo per azionare i rotori Flettner montati a bordo delle navi. Flettner stesso propose, ad esempio, di montare un rotore Savonius (che è noto come un convertitore di energia eolica) alla base del suo. In questo caso il primo, mosso dal vento andava a far ruotare il secondo e quest'ultimo

generava la forza propulsiva per far muovere la nave. In **Figura 24** è possibile vedere la realizzazione di quanto appena descritto.

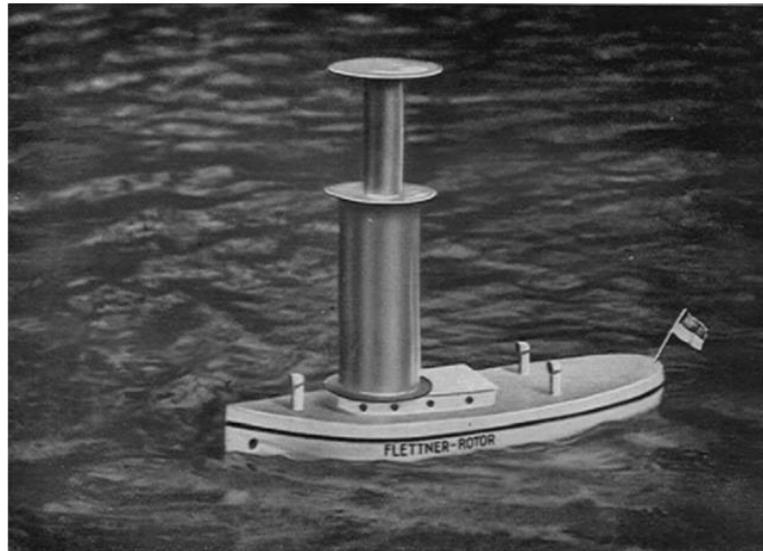


Figura 24: Modello di una barca che utilizza un rotore Savonius per far ruotare un rotore Flettner montato su di esso.

Per quanto riguarda i velivoli, un primo modello di aereo a rotore è mostrato in **Figura 25**. Come si può vedere dalla foto, se paragonato con un aereo normale, le uniche parti di questo velivolo ad essere sostituite sono le ali. Nello specifico, esse vengono rimpiazzate da un rotore che, grazie all'effetto Magnus, è in grado di generare portanza. Il motivo di utilizzare una forma così particolare per il rotore è stata quella di fornire un meccanismo che consentisse all'ala di ruotare nel flusso d'aria. Il vantaggio di tale soluzione potrebbe essere la sicurezza in caso di guasto del motore, poiché l'ala continuerebbe a ruotare e quindi a fornire una forza di sollevamento. Uno svantaggio sarebbe il rapporto di velocità fisso tra la velocità relativa e la velocità tangenziale, risultante dall'auto-rotazione. Di conseguenza, la forza di sollevamento non può essere controllata indipendentemente dalla velocità.

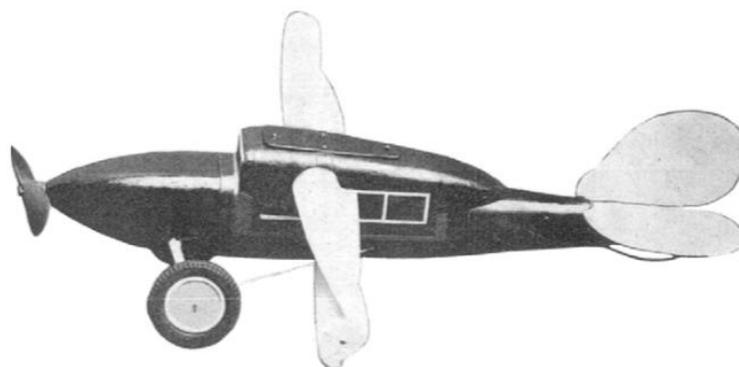


Figura 25: Monoplano a rotore.

In campo aeronautico, diversi furono i tentativi di combinare uno o più rotori Flettner con altre architetture degli aerei per consentire a quest'ultimi di volare. Tra tutte le possibili accoppiate, quella che riuscì meglio fu l'unione tra il rotore e le ali del velivolo: il primo infatti possedeva un'elevata capacità di sollevamento, mentre le seconde erano particolarmente affidabili. Ciò nonostante, molti furono gli ingegneri a creare degli strani ibridi con parti diverse. Un disegno di aeroplano a rotore di Ernest Zeuzem è presentato in **Figura 26**. Esso mostra quattro rotori Flettner guidati da motori separati, mentre l'ala, al centro dell'architettura, oltre a fornire un ulteriore contributo alla portanza complessiva, aveva anche il compito di ospitare i passeggeri. I due rotori, posti al di sotto dell'ala, avrebbero invece dovuto funzionare anche da carrello di atterraggio, cosa abbastanza complicata dato che, per produrre un sollevamento in volo in avanti, avrebbero dovuto ruotare in verso discorde l'uno rispetto all'altro.

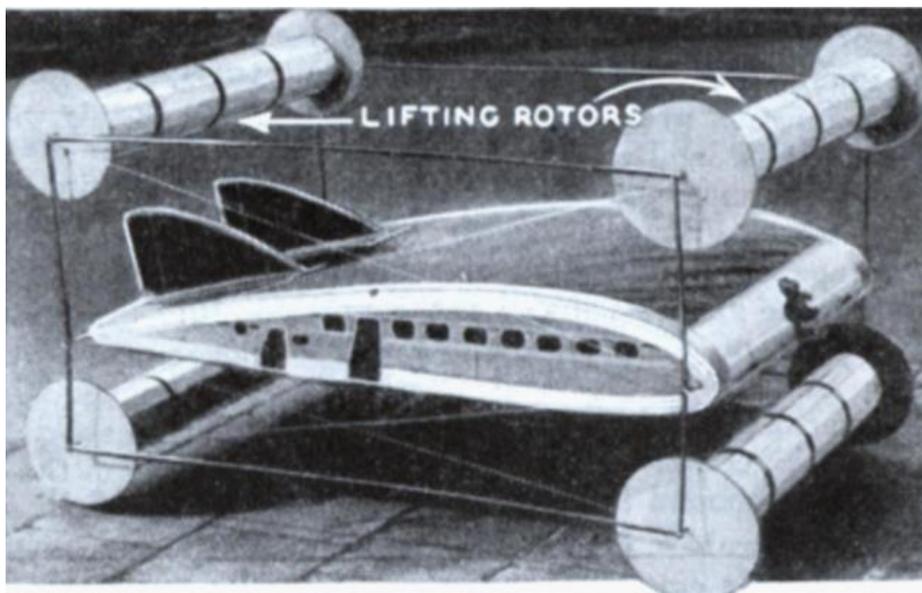


Figura 26: Progetto di aeroplano a rotore di Ernest Zeuzem.

Gerhard Wilke propose il biplano in **Figura 27**. Nel suo progetto, l'ala rotante inferiore doveva essere utilizzata come dispositivo di sollevamento solo durante le fasi di decollo e di atterraggio. Durante le fasi di volo di crociera, il cilindro, avrebbe invece contribuito a ridurre la resistenza aerodinamica. A basse velocità, i rotori dovrebbero essere utilizzati per migliorare la forza di sollevamento e la loro velocità di rotazione dovrebbe essere indipendente dalla velocità del motore dell'aeromobile, che dovrebbe fungere da meccanismo di guida per i rotori.

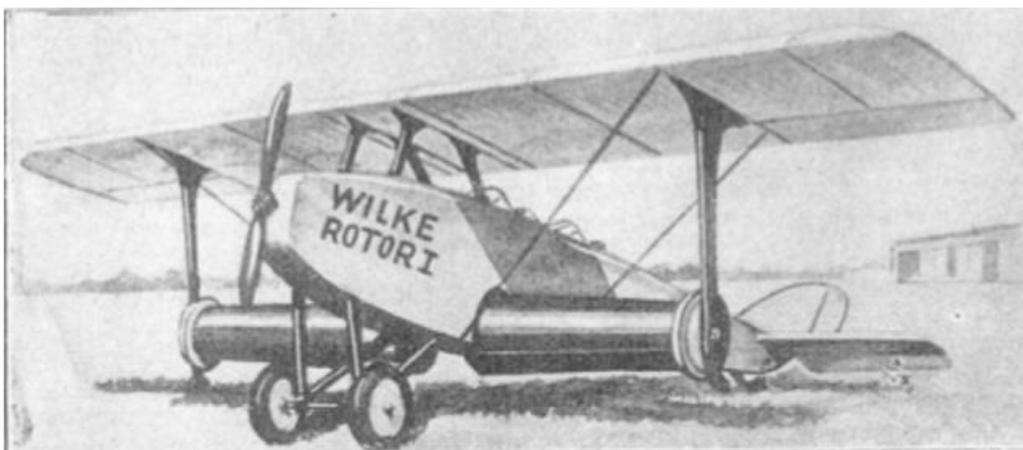


Figura 27: Progetto di aeroplano a rotore di Gerhard Wilke.

Nel 1925 l'austriaco Karl Gligorin progettò un aeroplano che possedeva un'ala composita con un rotore Flettner incorporato in essa. La sua configurazione di aeromobile, visibile in **Figura 28**, comprendeva una fusoliera convenzionale con un'elica montata nella parte anteriore, una coda anch'essa convenzionale e delle ali, dette a "tela", basate su degli studi dello stesso Flettner.

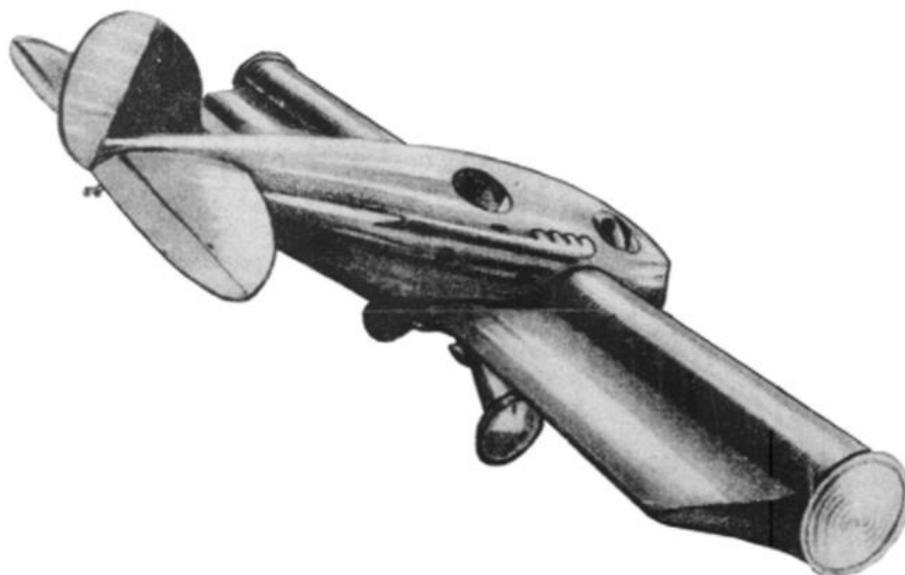


Figura 28: Progetto di aeroplano a rotore di Karl Gligorin.

Per quanto riguarda il potenziamento dell'effetto Magnus, agente sul rotore, anche in questo caso, l'idea più particolare venne da Ernest Zeuzem. Egli comprese che una superficie ruvida o addirittura degli urti avrebbero potuto migliorare la circolazione attorno al cilindro e quindi implementare l'effetto Magnus, fornendo una portanza ancora maggiore rispetto ad una superficie liscia. In **Figura 29** è possibile osservare un secondo modello di aeromobile progettato da Zeuzem: in questo caso, i rotori,

montati al posto delle ali, sono la realizzazione pratica delle idee appena avanzate. Si dice che Zeuzem nel disegnare la superficie ruvida e piena di fossette dei rotori sia stato ispirato da una pallina da golf.

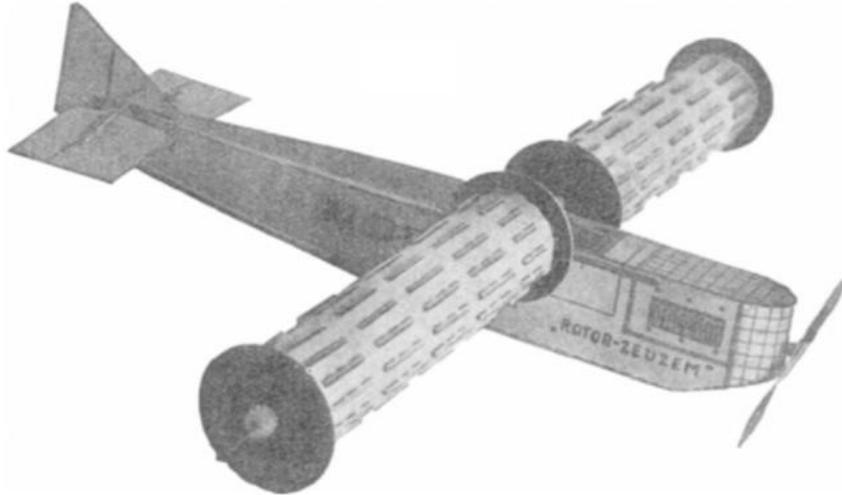


Figura 29: Progetto di aeroplano a rotore di Ernest Zeuzem.

Dopo il breve excursus degli ultimi tre paragrafi sui possibili metodi alternativi di azionamento del rotore Flettner, sulla sua combinazione con altri componenti dei velivoli e sui possibili potenziamenti dell'effetto Magnus, si può tornare a parlare di Anton Flettner e della nave Buckau. Sebbene infatti, come si è detto, è noto l'indiscusso successo che l'imbarcazione ebbe nelle fasi successive alla realizzazione, è anche certo che, quando Flettner la realizzò, l'era delle navi era giunta al termine del loro ciclo vitale per lasciar spazio ai più moderni e veloci aerei. Questo, unito ad un lungo periodo di ammortamento degli investimenti, causato dal basso prezzo del carburante, e a domande che, a lungo andare, la gente iniziava a porsi quali "Cosa accadrebbe in un uragano dato che il rotore non può essere accorciato come le vele di una normale imbarcazione?" o "Come gestire le vibrazioni forzate dei cilindri rotanti?", le fecero avere vita breve, tanto da compiere un unico viaggio attraverso l'Oceano Atlantico. Così, dopo essere stata danneggiata da un fulmine in un porto della costa est degli Stati Uniti, Buckau non fu più riparata e venne dismessa.

Nel 1926 venne realizzata una seconda nave a rotore chiamata Barbara e visibile in **Figura 30**. Fu la seconda nave della storia ad essere equipaggiata di rotori Flettner, ma a differenza di Buckau, essa presentava delle notevoli migliorie: infatti, invece di utilizzare dei cuscinetti a scorrimento per i perni, vennero preferiti dei cuscinetti a sfera e venne utilizzato l'alluminio per realizzare i rotori. Barbara era inoltre molto più veloce e potente di Buckau e rimase in servizio per oltre sei anni di attività, soprattutto nel Mar Mediterraneo. Fu soprattutto grazie a lei se si riuscì a dimostrare l'affidabilità e la funzionalità del sistema propulsivo basato sui rotori Flettner.



Figura 30: Nave a rotore Barbara.

In ambito aeronautico le cose andarono diversamente. Dopo la prima presentazione al pubblico di Buckau, iniziarono a circolare molte idee su come poter applicare l'effetto Magnus per far volare i velivoli. Ovviamente, nell'utilizzare tale fenomeno, ci sarebbero dovuti essere dei vantaggi rispetto ad un aeroplano convenzionale, altrimenti, in passato, non sarebbero mai stati costruiti degli aeroplani che sfruttassero l'effetto Magnus. Come dimostrato da Buckau, una nave a rotore Flettner poteva raggiungere un coefficiente di portanza molto elevato. Questa caratteristica è stata considerata molto utile sia per una configurazione di velivoli ad alto carico alare che per raggiungere una bassa velocità all'atterraggio. Come però si è anche visto in precedenza, nella maggior parte dei casi, era opinione comune che la sostituzione dell'ala con un cilindro rotante fosse l'unica cosa necessaria per ottenere un buon design del velivolo a rotore. Le restanti parti dell'aeromobile erano identiche a quelle di un aereo convenzionale.

A seguito del trattato di Versailles, che rimase in vigore dal 1919 al 1924, dopo la Prima Guerra Mondiale, alla Germania era severamente proibito costruire aerei e così i disegni e i modelli degli ingegneri tedeschi, presentati precedentemente, rimasero tali. Pertanto, le navi Buckau e Barbara rimasero gli unici mezzi a rotore costruiti in territorio tedesco.

Ben diversa invece fu la storia dell'aviazione a rotore su suolo statunitense. Negli Stati Uniti infatti vennero costruiti e testati aeromobili a rotore sperimentali facendo nascere una nuova categoria di velivoli. Uno dei primi e più importanti ad essere realizzato fu il Plymouth A-A-2004 nel 1930, visibile in **Figura 31**, sviluppato da tre inventori anonimi di Long Island nello stato di New York. Questo aeroplano a rotore era azionato da un motore turboelica a tre pale identico a quello di un aereo convenzionale ed era inoltre dotato di un motore alternativo ausiliario a quattro cilindri

raffreddato ad aria. Oltre ad una coda convenzionale, erano montate speciali superfici di controllo verticali vicino alla parte anteriore della fusoliera. Il loro scopo era probabilmente il controllo del rollio generalmente svolto dagli alettoni ad ala standard.

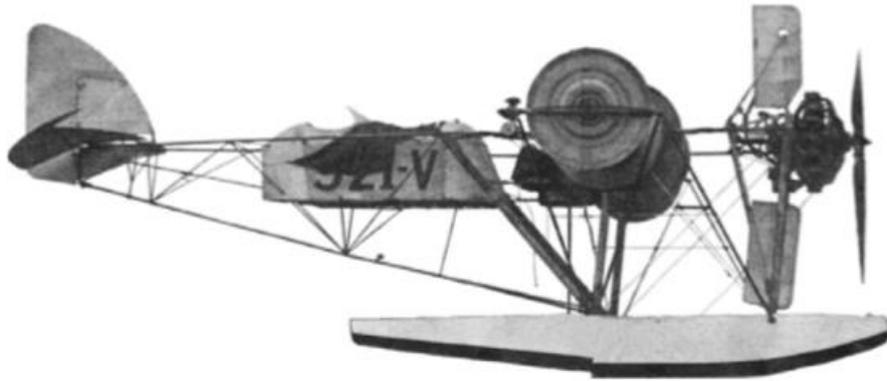


Figura 31: Aereo a rotore Plymouth A-A-2004.

Nel 1931, sempre a Long Island, Isaac C. Popper e John B. Guest realizzarono un secondo aereo a rotore (**Figura 32**) per la Union Aircraft Corporation. Sul loro velivolo quattro rotori dalla forma conica, posizionati all'interno di un telaio aperto, e azionati da due motori da 21 kW andavano a sostituire le ali. I due grandi rotori nella parte anteriore producevano il sollevamento, mentre i due più piccoli nella parte posteriore fungevano da stabilizzatori. Questo velivolo fu un esperimento per cercare di generare una portanza sfruttando l'effetto Magnus. Sebbene però i progettisti affermassero che i rotori avessero il doppio della potenza di sollevamento delle ali convenzionali e potesse atterrare a metà della velocità degli aerei normali, non c'è alcuna fonte o registrazione che il velivolo abbia volato.



Figura 32: Aereo a rotore Union Aircraft X772N.

A partire dal 1972 anche la NASA ha iniziato ad interessarsi ai velivoli a rotore costruendo la serie di aeromobili con il nome YOY-10. Questi aerei erano dotati di un'ala convenzionale per la generazione di portanza e di un rotore aggiuntivo per

l'effetto Magnus che serviva a migliorare le prestazioni aerodinamiche. A differenza degli altri aerei a rotore menzionati in questa trattazione, per i velivoli della NASA, è disponibile una grande quantità di dati e risultati sulle loro prestazioni e sul fatto che abbiano effettivamente volato. Tra tutti i velivoli della serie YOY, il migliore è stato il terzo realizzato, dominato YOY-10A, e visibile in **Figura 33**. Quest'ultimo modello includeva un cilindro rotante di grandi dimensioni, azionato per via idraulica, e due motori turboelica che producevano una potenza maggiore di 745,7 kW ciascuno. Tali motori vennero equipaggiati con eliche a quattro pale del diametro di poco più di 3 m ed erano interconnessi ad un albero di trasmissione in caso uno dei due si guastasse. L'aereo possedeva un'apertura alare di 10,36 m e la velocità del cilindro in esso montato, durante il volo, era di 7500 giri/minuto.

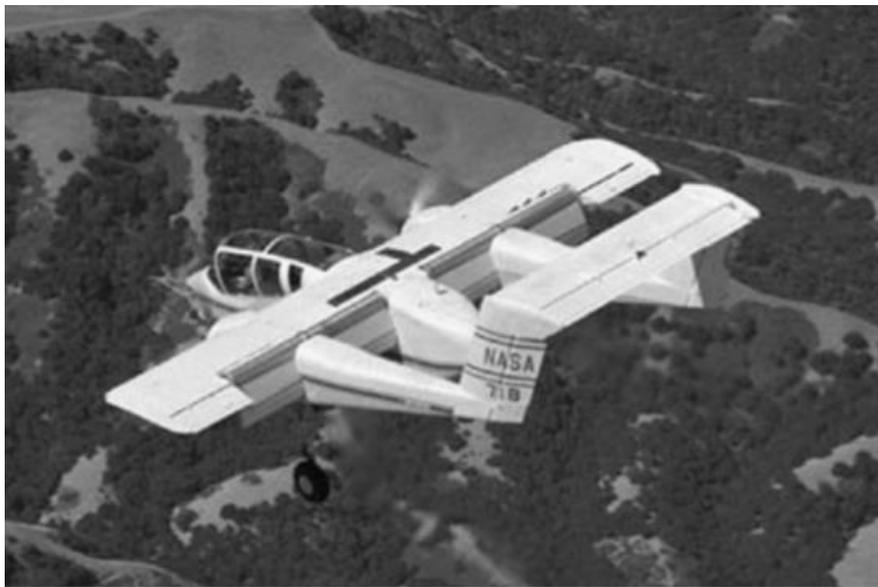


Figura 33: Aereo a rotore della NASA YOY-10A.

Per lo YOY-10A furono effettuati un totale di 34 voli e i risultati delle sue prestazioni indicavano che gli atterraggi potevano avvenire con velocità di avvicinamento comprese tra i 102 e i 120 km/h con angoli di discesa di 6-8° e flap inclinati di 60-75°. In volo poteva raggiungere velocità fino a 87 km/h, ma già intorno ai 55 km/h risultava essere instabile e di difficile manovrabilità, così furono apportate delle piccole modifiche per renderlo più maneggevole alle basse velocità. I decolli furono effettuati con angoli di apertura dei flap di 30-45° e durante questa fase il velivolo raggiungeva delle velocità comprese tra i 140 km/h e i 150 km/h, con angoli di salita di 4-8°.

Sono anche state condotte misurazioni aeroacustiche sul rumore prodotto facendo volare l'aereo a una velocità costante di 140 km/h ad una quota di 15 m al di sopra di una pista sulla quale erano stati montati dei microfoni. Il rumore percepito era al di sotto degli 86 dB per distanze superiori ai 2 km.

Tutti questi esperimenti hanno dimostrato da un lato l'efficacia così elevata di un sistema di sollevamento quale il rotore Flettner, ma dall'altro la debolezza nella gestione delle qualità dovute alle forze giroscopiche in una tale configurazione di volo.

Un'altra sorprendente applicazione del rotore Flettner la si è avuta in campo energetico, quando l'industria californiana Magenn Power Inc ha realizzato un dispositivo ibrido tra un pallone aerostatico e un generatore di energia elettrica rinnovabile chiamato MARS. Questo pallone, riempito d'elio, viene sollevato in aria ma mantenuto ancorato a terra da cavi lunghi 305 m. Quando è investito da una corrente d'aria, il rotore, presente al suo interno, viene messo in moto e fatto girare e questo genera corrente elettrica che è trasferita a terra attraverso gli stessi cavi menzionati prima. Oltre a generare energia rinnovabile, la rotazione del rotore produce anche un effetto Magnus che fornisce un ulteriore sollevamento, mantiene il MARS stabilizzato e lo colloca in una posizione controllata. Emettendo bassissime onde acustiche, il dispositivo risulta essere inoltre completamente compatibile con l'ambiente circostante, non disturbando né di giorno il volo degli uccelli e né di notte quello dei pipistrelli. Ad oggi sono stati realizzati due tipi di dispositivi MARS: il primo nel 2008 generante 10 kW di potenza e visibile in **Figura 34** ed il secondo nel 2009 generante dai 10 kW ai 25 kW di potenza e visibile in **Figura 35**.



Figura 34: MARS da 10 kW della Magenn Power Inc.



Figura 35: MARS da 10-25 kW della Maggen Power Inc.

Oltre ai generatori MARS, al giorno d'oggi, sono state registrate altre applicazioni dell'utilizzo dei rotori Flettner, soprattutto in campo navale. Il settore dal quale Flettner era partito per l'applicazione della sua tecnologia e nel quale inizialmente aveva suscitato grande ammirazione e stima, ma anche grandi dubbi e perplessità, sembra, ad oggi, chiederli una mano.

Nello scenario globale il trasporto marittimo è diventato indispensabile per scambiare merci: si conta infatti che il 90% delle merci scambiate in tutto il mondo avvenga via nave. Ciò contribuisce per circa dal 2,8% al 3% delle emissioni annuali globali di gas a effetto serra, in particolare di CO_2 . Il trasporto marittimo dovrebbe aumentare ulteriormente poiché la domanda di merce scambiata dovrebbe crescere del 25% entro il 2040. Di conseguenza, le preoccupazioni ambientali per la riduzione delle emissioni di CO_2 costringono l'industria marittima a ridurre i consumi di combustibili fossili aumentando l'efficienza del trasporto marittimo e adottando fonti di energie rinnovabili per le spedizioni. L'energia eolica per il trasporto marittimo è abbondante e il suo potenziale è particolarmente adatto per i viaggi in mare aperto. È proprio basandosi su questo scenario che l'invenzione di Flettner, realizzata quasi un secolo fa, risulta, nell'età contemporanea, più moderna e utile che mai.

I ricercatori indiani Akshay Lele e K. V. S. Rao del Dipartimento di Energie Rinnovabili dell'Università di Kota nel 2017 hanno analizzato un rotore Flettner, visibile in **Figura 36**, per stimare la produzione netta di energia da esso generata [14].

Il cilindro del rotore era alto 12,5 m ed aveva un diametro di 2,1 m ed era sottoposto a delle forze aerodinamiche tali per cui il coefficiente di portanza risultava pari a $C_L = 12,5$ e quello di resistenza uguale a $C_D = 0,2$. I calcoli iniziali sono stati fatti prendendo una velocità del vento di 5 m/s e una velocità della nave pari a 27,78 km/h. Sono state considerate inoltre tutte le possibili direzioni di provenienza del vento rispetto al rotore, quindi per angoli compresi da 0° a 360° . Le prestazioni del rotore Flettner dipendono da tutti questi parametri appena considerati e dal coefficiente di rotazione.

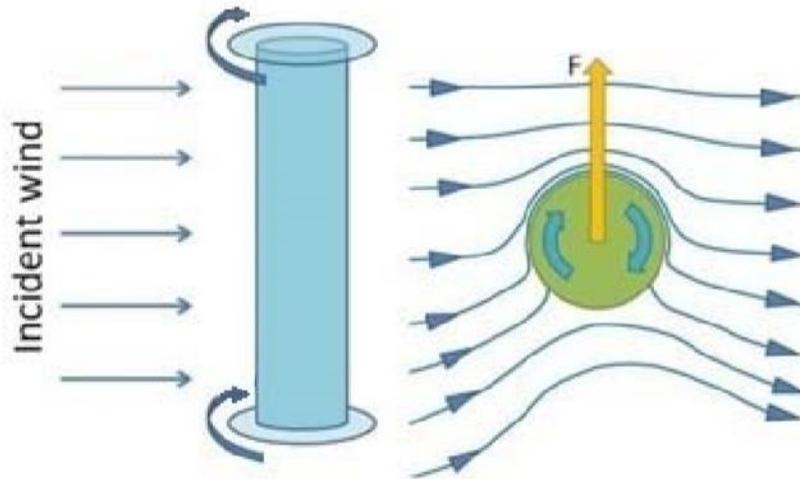


Figura 36: Effetto Magnus su un rotore Flettner.

Al termine dell'esperimento sono stati rilevati e registrati i seguenti dati:

- 1) Alla velocità della nave di 27,78 km/h, la potenza netta del sistema rotore Flettner aumenta all'aumentare della velocità del vento reale. I valori massimi della potenza netta sono di 42,2 kW, 124 kW, 239,9 kW e 386,7 kW rispettivamente alle velocità del vento di 5 m/s, 10 m/s, 15 m/s e 20 m/s.
- 2) Per una maggiore velocità della nave, il rotore fornisce una potenza maggiore. Alla velocità della nave pari a 37,04 km/h, i valori massimi della potenza netta sono di 68,2 kW, 189,5 kW, 358,8 kW e 575,2 kW rispettivamente alle velocità del vento di 5 m/s, 10 m/s, 15 m/s e 20 m/s.
- 3) La potenza netta del rotore Flettner diminuisce all'aumentare del coefficiente di rotazione poiché la potenza assorbita dal rotore aumenta con l'aumento del coefficiente di rotazione.
- 4) La potenza massima assorbita è di 2,3 kW, 7,44 kW, 17,0 kW, 32,29 kW e 54,49 kW corrispondenti rispettivamente ai valori di coefficienti di rotazione di 2, 3, 4, 5 e 6. I valori massimi della potenza netta generata sono invece di 54,62 kW, 52,39 kW, 48,81 kW, 43,23 kW e 35,96 kW corrispondenti ai valori di coefficienti di rotazione di 2, 3, 4, 5 e 6.

Da quanto detto, si può quindi capire come l'utilizzo di rotori Flenner stia diventando nuovamente un tema scottante a causa dell'aumento dei costi energetici e dei problemi legati al cambiamento climatico. Nell'agosto del 2010, sempre la Germania, ha realizzato una nuova nave a rotori denominata E-Ship 1 (**Figura 37**) e di proprietà dell'industria Enercon, attiva nella realizzazione e nello sviluppo di turbine eoliche per la generazione di energie rinnovabili. La Enercon sfrutta la nave cargo proprio per trasportare le sue turbine in tutte le parti del mondo. La nave è equipaggiata con quattro rotori Flettner alti 27 m e dal diametro di 4 m grazie ai quali riesce a raggiungere la massima velocità di navigazione in mare aperto. Una nave mercantile convenzionale, al giorno d'oggi, costa 4,5 milioni di dollari di carburante l'anno, ma l'E-Ship 1 è riuscita a ridurre questi costi del 30-40 %, in quanto l'investimento in questo sistema propulsivo addizionale è stato ammortizzato in meno di cinque anni.

Esistono pertanto nuove idee su come utilizzare l'effetto Magnus in ambito ingegneristico e, forse, l'E-Ship 1 della Enercon potrebbe stimolare nuovamente la comunità aeronautica, come è successo in passato.



Figura 37: Nave a rotore E-Ship 1 della Enercon.

CAPITOLO 6

CONCLUSIONI

Questo lavoro, per quanto possibile, si è proposto di spiegare, studiare e approfondire l'effetto Magnus, uno dei fenomeni più interessanti e misteriosi dell'Aerodinamica.

Come si è visto in più parti, da quando il fenomeno è stato scoperto, sempre maggiori sono stati gli studi che hanno cercato di carpirne la natura fisica e implementarlo per poterlo utilizzare al meglio in numerose applicazioni pratiche ed innovative. Tuttavia, ancora oggi, per molti questo strano effetto fluidodinamico rimane ancora un mistero e per altri, sebbene ne siano a conoscenza, resta un argomento secondario rispetto a fenomeni più noti dei quali si è già potuto apprendere tutto lo scibile possibile.

Il problema fondamentale quindi non risiede tanto nella mancanza di personale (scienziati ed ingegneri) che cercano di studiare questo argomento, quanto più che altro nella "scarsa" applicazione ed utilità che questo fenomeno possiede. Infatti, al di là dell'ambito sportivo e di qualche studio in campo missilistico e balistico, ben pochi dispositivi basati sull'effetto Magnus si sono concretamente riusciti a realizzare. Ciò forse riesce anche a spiegare il perché, a livello universitario, nei corsi di Aerodinamica questo argomento spesso ha una trattazione limitata e sintetica ed in altri casi risulta essere del tutto trascurato.

Tuttavia ciò non deve trarre in inganno ed indurre a classificare o etichettare tale fenomeno come "inutile" o "di scarsa importanza". Sebbene infatti tra le varie applicazioni ingegneristiche, concretamente realizzate, al di là della turbina eolica Darrieus-Magnus e del rotore Flettner (entrambi risalenti alla prima metà del XX secolo) effettivamente non ci sia altro, si è comunque visto che, al giorno d'oggi, questi dispositivi sono stati riesumati, riapplicati e reinventati e si è arrivato a creare i grandi palloni aerostatici MARS e la nave E-Ship 1. Ciò quindi lascia sperare che, in futuro, sempre maggiori possano essere le invenzioni basate su questo fenomeno e sempre più numerosi possano essere i campi di applicazione nei quali l'effetto Magnus potrà spaziare e diffondersi.

In ambito aeronautico ovviamente si spera di poter realizzare un nuovo dispositivo che, sfruttando l'effetto Magnus, riesca ad essere un organo di sollevamento e/o propulsivo per il suddetto velivolo.

BIBLIOGRAFIA

- 1) Maruyama Yuichi, Study on the Physical Mechanism of the Magnus Effect, Trans. Japan Soc. Aero. Space Sci., Vol. 54, No. 185/186, pp. 173-181, 2011.
- 2) Teneda S., Negative Magnus Effect, Reports of Research Institute for Applied Mechanics, Vol. 20, pp. 123-128, 1957.
- 3) Swanson W. M., The Magnus Effect: A Summary of Investigations to Date, Trans. ASME J. Basic Eng. Vol. 83, pp. 461-470, 1961.
- 4) Tanaka H., Nagano S., Study of Flow around a Rotating Circular Cylinder, Bulletin of JSME, Vol. 16, pp. 234-243, 1973.
- 5) Hailu Luo, Shuangchun Wen, Weixing Shu, Dianyuan Fan, Role of transverse-momentum currents in the optical Magnus effect in free space, PHYSICAL REVIEW, Vol. 81, 2010.
- 6) Thorsten Kray, Jörg Franke, Wolfram Frank, Magnus effect on a rotating sphere at high Reynolds numbers, Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, Vol. 110, pp. 1-9, 2012.
- 7) Thorsten Kray, Jörg Franke, Wolfram Frank, Magnus effect on a rotating soccer ball at high Reynolds numbers, Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, Vol. 124, pp. 46-53, 2014.
- 8) Mizota T., Kuba H., Okajima A., Erratic Behaviour of Knuckleball Wake Field and Aerodynamic Forces, J. Wind Eng., Vol. 62, pp. 15-21, 1995.
- 9) Rod Cross, Crawford Lindsey, Measurements of drag and lift on smooth balls in flight, European Journal of Physics, Vol. 38, 2017.
- 10) Alexander Plakhov, Tatiana Tchemisova, Paulo Gouveia, Spinning rough disc moving in a rarefied medium, Proceedings Of The Royal Society, Vol. 466, pp. 2033-2055, 2010.
- 11) Lahouari Khadir, Hatem Mrad, Numerical investigation of aerodynamic performance of darrieus wind turbine based on the magnus effect, Int. Jnl. of Multiphysics, Vol. 9, pp. 383-396, 2015.
- 12) Jintao Yin, Xiaosheng Wu, Juanmian Lei, Body-fin interference on the Magnus effect of spinning projectile in supersonic flows, Engineering Applications of Computational Fluid Mechanics, Vol. 11, pp. 496-512, 2017.
- 13) Jost Seifert, A review of the Magnus effect in aeronautics, Progress in Aerospace Sciences, Vol. 55, pp. 17-45, 2012.

- 14) Akshay Lele, K.V.S. Rao, Net Power Generated by Flettner Rotor for Different Values of Wind Speed and Ship Speed, 2017 International Conference on circuits Power and Computing Technologies [ICCPCT], 2017.

RINGRAZIAMENTI

Desidero innanzitutto ringraziare il Professoressa Stefania Scarsoglio per avermi permesso di approfondire le interessanti e stimolanti tematiche trattate, e per avermi aiutato, con eccezionale disponibilità e gentilezza, a superare le difficoltà incontrate nella stesura della presente.

Un ringraziamento speciale va alla mia famiglia che, seppur a distanza, ha saputo supportarmi quotidianamente e continuamente, durante tutto il percorso universitario, sapendomi sempre consigliare al meglio e aiutandomi a superare le avversità. Ringrazio, infine, tutti gli amici e tutte le persone che mi vogliono bene e che, in un modo o nell'altro, hanno fornito il loro appoggio e il loro sostegno, giorno dopo giorno.