

POLITECNICO DI TORINO

Corso di Laurea Magistrale
in Ingegneria Aerospaziale

Tesi di Laurea

Progettazione di un banco di prova per la misura delle prestazioni di un micro-motore mci



Relatore
prof. Michele Ferlauto

Candidato
Carlo Loi

Anno Accademico 2021-2022

Sommario

Prendendo come riferimento il Saito FG-11, si progetta un banco di prova in grado di misurare le prestazioni di un motore a combustione interna attraverso un metodo che sfrutta le forze di reazione generate dal propulsore. Il sistema può essere utilizzato per la caratterizzazione delle eliche.

Indice

1	Introduzione	4
2	Motori a Combustione Interna	5
2.1	Principi di Funzionamento e Saito FG-11	5
3	Eliche	13
4	Valutazione delle Prestazioni di un Motore	17
4.1	Definizione e Caratterizzazione	17
4.1.1	Potenza e Coppia	17
4.1.2	Rendimento Termico e Meccanico	22
4.1.3	Rendimento Globale	22
4.1.4	Consumo Orario e Consumo Specifico	23
4.2	Curve Caratteristiche	23
5	Progettazione del Banco di Prova	25
5.1	Problemi di Progetto e Metodo di Misura delle Prestazioni	25
5.2	Struttura del Banco di Prova	28
5.3	Controllo del Motore	30
5.4	Misurazione dei Parametri per il Calcolo delle Prestazioni	31
5.4.1	Misurazione della Coppia di Reazione	31
5.4.2	Misurazione del Numero di Giri	32
5.4.3	Misurazione del Consumo di Combustibile	33
5.4.4	Misurazione della Portata di Aria	34
5.4.5	Misurazione delle Condizioni Ambiente	36
5.5	Acquisizione ed Elaborazione dei Dati	38
6	Integrazione dei Sistemi del Banco di Prova	43
7	Descrizione e Fasi del Processo di Misurazione	45
8	Conclusioni	47
A	Descrizione delle Funzioni di Programmazione	48

Capitolo 1

Introduzione

Nell'ambito della propulsione aerospaziale la progettazione di un sistema propulsivo si basa sul raggiungimento di determinati requisiti prestazionali e di efficienza. I sistemi propulsivi possono essere identificati attraverso l'architettura di progettazione oppure classificati a seconda delle prestazioni che essi possono raggiungere. Un velivolo, per poter portare a termine un profilo di missione, ha bisogno di un propulsore capace di assisterlo in tutte le fasi della missione caratterizzate dalla necessità di una determinata energia. È quindi essenziale poter misurare praticamente le grandezze fisiche che definiscono le capacità operative di un sistema propulsivo. Che si tratti di un motore a reazione o di un motore a combustione interna è perciò sostanziale definire quelle che sono le performance attraverso la misurazione di grandezze fisiche tipiche del propulsore considerato. La misura delle prestazioni è fondamentale anche per verificare che il propulsore rispetti i requisiti lungo tutta la sua vita operativa soprattutto a seguito di pesanti interventi di manutenzione o riparazioni. La misura delle prestazioni viene effettuata per mezzo di sistemi dedicati a cui il propulsore è vincolato. La grandezza di tali sistemi è direttamente proporzionale alla grandezza del propulsore. I sistemi di misurazione destinati alla misura delle prestazioni di motori di piccole dimensioni vengono anche chiamati "banchi di prova". In particolare, in questo elaborato, si vogliono illustrare le fasi di progettazione di un banco di prova per la misura delle prestazioni di un micromotore a combustione interna destinato all'utilizzo su aeromodelli. Le prestazioni saranno valutate correlando le principali grandezze coinvolte nel funzionamento del motore e nell'accoppiamento tra il propulsore e l'elica. In particolare, si sfruttano le forze di reazione che si sviluppano sul motore e che vengono rilevate da opportuni sensori. Nell'elaborato saranno presentate l'origine delle grandezze fisiche coinvolte nella misurazione, il principio di funzionamento del motore a combustione interna dal punto di vista termodinamico, le fasi di progettazione del banco e la valutazione dei vari componenti fornendo informazioni sui principi di funzionamento.

Capitolo 2

Motori a Combustione Interna

I motori a combustione interna sono delle macchine termiche che sfruttano l'energia chimica contenuta nei combustibili, convertendola in energia termica sotto forma di calore e successivamente, attraverso degli organi, trasformandola in lavoro meccanico. I propulsori possono essere classificati a seconda del meccanismo attraverso cui la macchina sfrutta il lavoro compiuto dal fluido motore. Possiamo differenziarli come:

- Alternativi: motori a scoppio e diesel;
- Rotativi: motori con turbina a gas;
- Statici: motori a razzo.

Il motore studiato è un motore alternativo a scoppio, perciò ci focalizzeremo sul funzionamento dei motori alternativi.

2.1 Principi di Funzionamento e Saito FG-11

I motori a combustione interna alternativi possono a loro volta essere definiti a seconda delle modalità con cui il combustibile viene indirizzato nella camera di combustione. Possiamo distinguere:

- Motori a carburazione: detti anche “ a scoppio ”, in questi motori il combustibile liquido viene nebulizzato e miscelato con il fluido comburente (aria) nel carburatore, formando una miscela gassosa. La miscela viene successivamente introdotta nel cilindro, nel quale viene compressa e combusta attraverso l'ausilio di un dispositivo di accensione, la candela. Questi tipi di motori vengono per questo motivo definiti anche motori ad accensione comandata.
- Motori a iniezione: conosciuti anche come Diesel, sono quei motori nei quali il combustibile, sotto forma di spray, viene iniettato direttamente nel cilindro in cui sono presenti elevate pressioni e temperature. Il combustibile in questo ambiente caratterizzato da comburente ad alte pressioni e temperature si scalda fino ad arrivare alla combustione spontanea. Questi motori vengono anche chiamati motori a combustione spontanea.

L'architettura dei propulsori prevede diverse soluzioni per la disposizione dei cilindri nel caso di motori con più cilindri. Possiamo trovare configurazioni con cilindri:

- in linea;
- a V;
- stellari.

A seconda delle potenze che il motore dovrà erogare, alcune soluzioni sono più adatte di altre.

I motori alternativi trovano la loro definizione poiché utilizzano un sistema biella-manovella per convertire il moto alternato del pistone in un moto rotatorio dell'albero motore. Le modalità con cui il motore esegue il ciclo di lavoro caratterizzano ulteriormente due principali classi di motori:

- Motori a due tempi: in questo caso, per ogni ciclo di lavoro completato, il pistone compie nel cilindro due corse che corrispondono ad un giro dell'albero motore.
- Motori a quattro tempi: in questo caso il pistone compie quattro corse del cilindro per ogni ciclo di lavoro completato che corrispondono a due giri dell'albero motore.

Il motore di riferimento per la misura delle prestazioni è il Saito FG-11, un micromotore a combustione interna, monocilindrico a 4 tempi, alimentato da una miscela di benzina e olio. Il suo utilizzo è limitato solamente agli aeromodelli.



Figura 2.1. Saito FG-11.

In merito alle specifiche tecniche, il Saito FG-11 è formato da un unico cilindro dal diametro di 27.0 mm e con una cilindrata di 10.9 cm³. La corsa del pistone è di 19.0 mm. Il peso totale, considerando i vari sistemi, si attesta intorno ai 725 g. Per quanto riguarda le prestazioni, la velocità di rotazione è compresa tra i 2000 ÷ 9500 RPM, con un valore massimo raggiungibile a terra di 8800 RPM. La spinta generata dal propulsore varia in funzione dall'elica montata, ma si aggira intorno ai 1.5 Kgf.

Il costruttore definisce quali eliche è possibile imbarcare sul motore, ma in generale essa deve essere ben bilanciata, in quanto uno sbilanciamento comporterebbe notevoli vibrazioni e una diminuzione delle prestazioni.

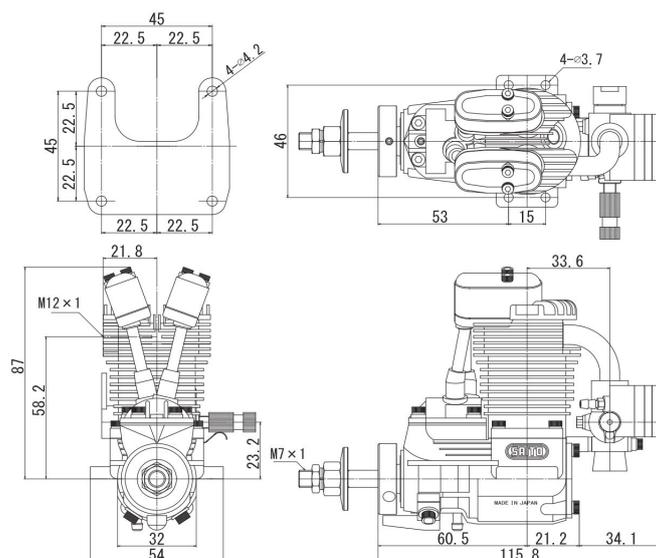


Figura 2.2. Dimensioni del motore Saito FG-11.

Il carburante utilizzato è una miscela di benzina e olio. Il rapporto di miscela deve essere di circa 20:1. Quando l'elica determina elevati carichi, il rapporto tra aria e carburante deve prevalentemente essere ricco. L'olio presente nella miscela funge da lubrificante applicando una lubrificazione a soffio nella quale l'olio trafile attraverso le fessure presenti tra il pistone ed il cilindro e raggiunge il carter.

Un filtro del combustibile è necessario in quanto la benzina potrebbe contenere delle impurità che potrebbero ostruire la pompa del combustibile. In assenza di un filtro le prestazioni del motore potrebbero degradarsi fino al completo spegnimento dello stesso dovuto alla mancanza di alimentazione. È quindi consigliato l'utilizzo di un filtro con peso.

La capacità del serbatoio può variare a seconda delle esigenze. È consigliato l'utilizzo di un filtro con peso per raccogliere le impurità che si depositano sul fondo di esso. Il serbatoio, così come tutte le tubazioni, tappi e guarnizioni devono essere resistenti al combustibile. Tutte le connessioni devono essere sigillate con del nylon per evitare al minimo le perdite di combustibile o di aria lungo le tubature. Il serbatoio deve essere posizionato il più vicino possibile al motore. In Figura 2.3 è rappresentata una possibile soluzione.

Il sistema di accensione di questo motore, rappresentato in Figura 2.4, prevede una candela di accensione con testa esagonale. Questo componente è fortemente soggetto ad usura. Il sistema di accensione è completamente automatico e genera scariche ad alta tensione da fornire alle candele. Nonostante il sistema sia progettato per creare le minori interferenze elettromagnetiche possibili, deve essere completamente isolato dal ricevitore, dal servo e dalla batteria per evitare radio-interferenze con gli altri sistemi di misurazione. Un sensore di posizione è presente per facilitare l'accensione, sia che venga

eseguita manualmente e sia che venga eseguita tramite l'ausilio di uno starter elettrico.

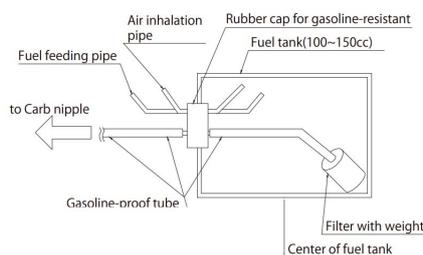


Figura 2.3. Serbatoio, condotti di aspirazione e filtro combustibile.

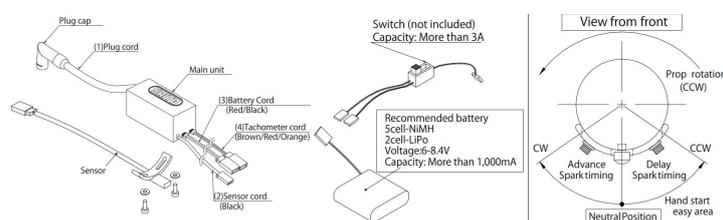


Figura 2.4. Sistema di Accensione del Saito FG-11.

Il sistema di alimentazione, Figura 2.5, prevede la presenza di un carburatore, formato da una throttle lever, e da due comandi per la gestione del rapporto di diluizione aria combustibile. L'aria all'aspirazione entra nel carburatore attraverso un foro, mentre un condotto è riservato all'ingresso del combustibile.

Una volta avviato il motore, è buona norma effettuare un ciclo di riscaldamento in condizioni di miscela ricca per almeno un minuto. Allo stesso modo è consigliato effettuare un ciclo di raffreddamento al minimo della stessa durata allo spegnimento.

È necessario tenere in considerazione il problema relativo alla dissipazione del calore per garantire l'efficienza ed evitare problemi di surriscaldamento con conseguenti vibrazioni e possibili malfunzionamenti. Generalmente il motore in volo è raffreddato dal flusso di aria che lo investe. Nel nostro caso invece il funzionamento sarà a punto fisso; perciò bisogna prestare particolare attenzione al problema del surriscaldamento.

Il ciclo termodinamico rappresentativo per un motore alternativo a scoppio è il ciclo Otto. Questo ciclo è costituito da quattro trasformazioni, due adiabatiche e due isocore. Il ciclo teorico caratteristico delle condizioni presenti all'interno del cilindro può essere rappresentato sul diagramma PV.

Per la descrizione del ciclo è utile definire due posizioni specifiche del pistone rispetto al cilindro, raffigurate in Figura 2.6. In particolare, definiamo il Punto Morto Superiore (PMS) il punto in cui il pistone si trova nella posizione più vicino possibile alla testa del cilindro. Analogamente, possiamo definire il Punto Morto Inferiore (PMI), la posizione in cui il pistone si trova il più lontano possibile dalla testa del cilindro.

Descrivendo il ciclo per punti considerano la Figura 2.7, abbiamo:

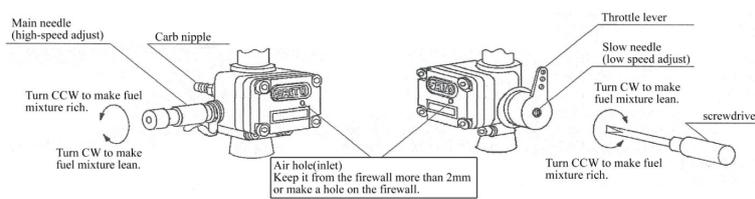


Figura 2.5. Carburatore del Saito FG-11.

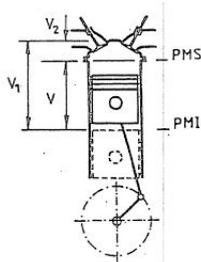


Figura 2.6. Punti Caratteristici del Sistema Pistone-Cilindro.

- Fase di aspirazione (Punti 0-1), in cui il pistone si porta dal PMS al PMI. Questo movimento del pistone, congiunto all'apertura della valvola di aspirazione, genera una depressione che forza la miscela ad entrare nel cilindro. La valvola di aspirazione viene chiusa istantaneamente quando il pistone raggiunge il PMI. Questa fase si ipotizza avvenga ad una pressione costante.
- Fase di compressione (Punti 1-2), in cui il pistone si porta dal PMI al PMS causando una compressione adiabatica della miscela. La miscela in questa fase subisce un aumento della temperatura che deve essere limitata per evitarne l'accensione spontanea. Per questo motivo il rapporto di compressione è limitato.
- Fase di accensione (Punti 2-3), nella quale il sistema di accensione, formato da una o più candele, fa scoccare la scintilla quando il pistone si trova al PMS. Si ipotizza che la combustione avvenga istantaneamente poco prima che il pistone arrivi al PMS dalla fase precedente. L'accensione avviene quindi a volume costante. In questa fase vengono raggiunte le maggiori temperature e pressioni all'interno del cilindro.
- Fase di espansione (Punti 3-4), nella quale i prodotti della combustione ad alte temperatura e pressione spingono il pistone verso il PMI generando così un lavoro meccanico. Questa può essere considerata l'unica fase attiva del ciclo, cioè l'unica fase in cui viene estratto del lavoro meccanico del fluido di lavoro.
- Fase di scarico (Punti 4-1-0), inizia non appena il pistone raggiunge il PMI. Questa fase può essere analizzata in due parti. La prima nella quale lo scarico avviene spontaneamente per via della differenza di pressione tra il cilindro e l'ambiente poiché

la valvola di scarico si apre poco prima che il pistone raggiunga il PMI. La seconda in cui il movimento del pistone dal PMI al PMS causa l'espulsione dei gas di scarico nell'ambiente. Alla fine di questa fase, nel cilindro si ristabiliscono le condizioni iniziali.

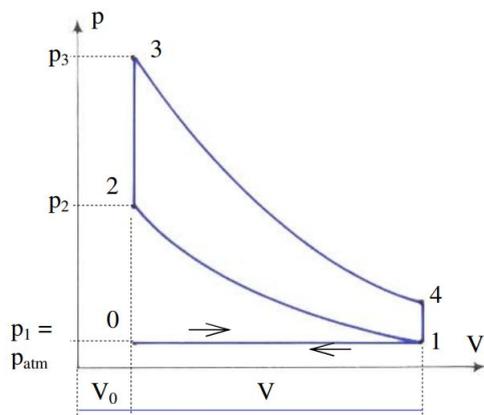


Figura 2.7. Diagramma P-V del Ciclo Otto.

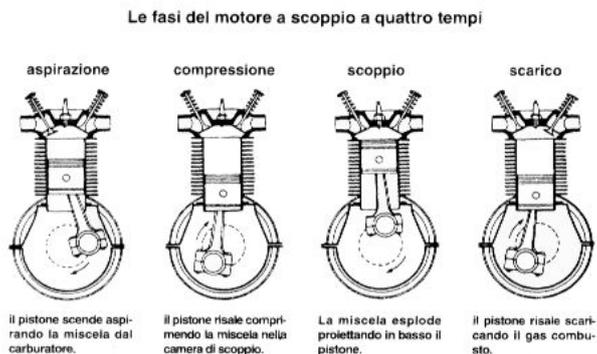


Figura 2.8. Fasi di un Motore 4 Tempi.

Il lavoro teorico prodotto dal ciclo equivale all'area racchiusa dal ciclo stesso, Figura 2.9.

Se confrontassimo il ciclo termodinamico reale con quello teorico considerando la Figura 2.10, noteremo delle differenze e, naturalmente, l'area racchiusa dal ciclo reale è minore di quella teorica, con conseguente minore lavoro estratto. Questo per via delle perdite e resistenze che per le diverse fasi possono essere identificate come:

- Perdite di carico che il fluido subisce nel condotto di aspirazione che porta questa fase ad avvenire in depressione;

- La non adiabaticità della fase di compressione ed espansione, dovuta sia alle perdite di calore per via del non isolamento del cilindro e sia per la variazione del calore specifico del fluido;
- La combustione non realmente istantanea e che quindi non avviene a volume costante. Vengono quindi raggiunti rapporti di compressione più bassi;
- Lo scarico dei gas combusti ad una pressione maggiore di quella ambiente.

Il lavoro, quindi, può essere trovato calcolando l'area geometrica racchiusa dal ciclo.

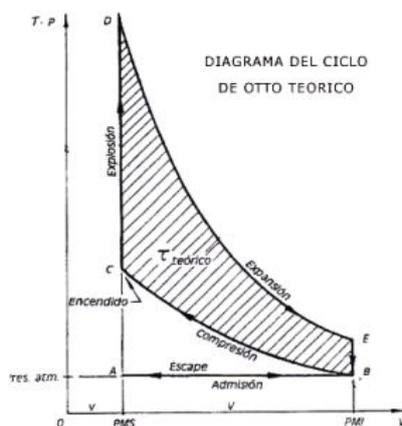


Figura 2.9. Area racchiusa dal Ciclo Otto Ideale.

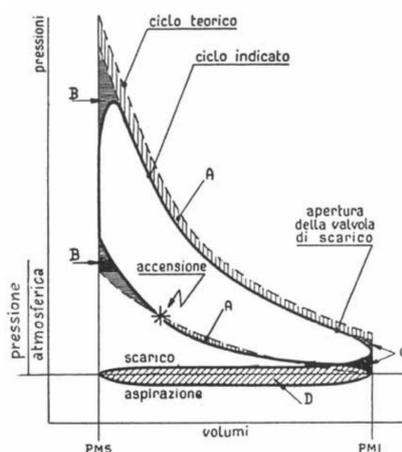


Figura 2.10. Area del Ciclo Reale vs Area del Ciclo Ideale.

Si può notare che il ciclo racchiude due aree, una negativa ed una positiva. L'area negativa è rappresentativa delle fasi di pompaggio, ovvero la fase di aspirazione e scarico,

in cui il motore cede lavoro al fluido. Per trovare quindi il lavoro prodotto dal motore è necessario valutare la differenza tra l'area positiva e quella negativa. Chiamando "A" l'area derivante dalla differenza tra la parte positiva e negativa e conoscendo il volume "V" del cilindro interessato dal ciclo, possiamo definire la retta di compenso del ciclo, ovvero il valore della pressione media indicata p_{mi} .

$$p_{mi} = \frac{A}{V} = \frac{L_i}{V}$$

Possiamo quindi definire la pressione media indicata come il rapporto tra il lavoro ed il volume per unità di cilindrata. Perciò il lavoro può semplicemente essere espresso come:

$$L_i = V \cdot p_{mi} = A$$

Successivamente nella relazione verrà ripreso e approfondito il legame tra il lavoro e la potenza.

Capitolo 3

Eliche

I propulsori ad elica sono contraddistinti da un motore che fornisce potenza ad un albero, il quale, tramite il suo movimento rotatorio, trascina un'elica destinata alla generazione della spinta. La funzione dell'elica è quella di sfruttare opportunamente il suo profilo aerodinamico per indurre, tramite la sua alta velocità di rotazione, una accelerazione al flusso che la attraversa. L'accelerazione del fluido viene bilanciata dalla generazione di una forza di reazione opposta alla direzione di accelerazione del fluido stesso. L'elica è quindi l'organo impiegato per generare spinta.

Le caratteristiche principali di un'elica possono essere definite in termini di diametro, numero, svergolamento e calettamento delle pale e infine dal passo. Il diametro dell'elica e il numero delle pale influiscono direttamente sull'efficienza della spinta, intesa come percentuale di potenza erogata dal motore e convertita in spinta, migliorandola con l'aumento di entrambi i parametri. L'aumento di uno dei due parametri però si scontra con il conseguente aumento delle masse, è necessario quindi valutare un compromesso. Il diametro dell'elica influisce direttamente sulle velocità di rotazioni ammissibili per evitare che si raggiungano zone soniche alle estremità delle pale. Lo svergolamento è necessario per assicurare che la portanza generata sia costante lungo tutta la lunghezza delle pale, onde evitare sbilanciamenti. Considerando che la velocità periferica delle pale aumenta dalla radice alle estremità, il calettamento dell'elica sarà variabile lungo la sua lunghezza, in particolare diminuisce muovendosi verso l'estremità, dove la velocità è massima. Il calettamento nominale dell'elica viene definito prendendo in considerazione il valore di calettamento della pala posta ai $7/10$ del raggio. Considerando il piano del disco dell'elica possiamo identificare alcuni angoli, rappresentati in Figura 3.1.

L'angolo che la corda forma con il piano del disco dell'elica viene definito "angolo di calettamento", mentre l'angolo che il disco forma con la retta di portanza nulla viene definito "angolo di calettamento aerodinamico". L'angolo di calettamento è il parametro utilizzato per la definizione del passo geometrico dell'elica. Il passo geometrico di un'elica è la distanza percorsa in avanti dalle pale a seguito di una rotazione di 360° . Nell'utilizzo effettivo dell'elica il passo geometrico con corrisponde alla reale distanza percorsa dalle pale, questa viene anche chiamata "avanzamento" o "passo reale". La differenza tra questi due parametri prende il nome di "regresso dell'elica". L'efficienza dell'elica può essere interpretata in termini di passo reale e geometrico. Si ha infatti che l'efficienza è maggiore

tanto quanto è minore il regresso dell'elica. La valutazione effettiva dell'efficienza dell'elica viene comunque valutata attraverso considerazioni energetiche.

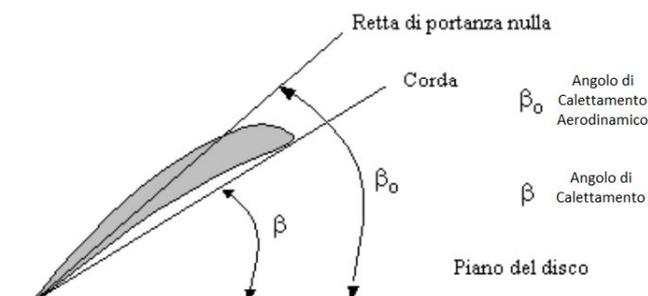


Figura 3.1. Rappresentazione degli Angoli di Calettamento.

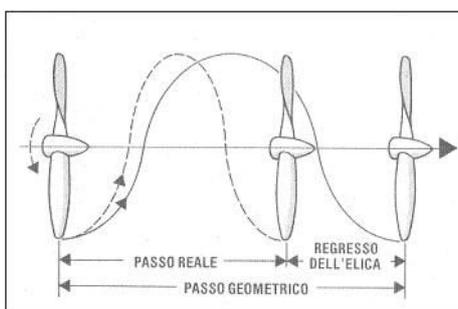


Figura 3.2. Significato del Passo di un'Elica.

Le eliche imbarcate sui motori aeronautici, così come nel Saito FG-11, sono definite “eliche positive” poiché usufruiscono del lavoro generato dal propulsore per ricavarne una coppia. A seconda della velocità di rotazione possiamo distinguere diverse condizioni di funzionamento dell'elica:

- a punto fisso;
- traente;
- frenante;
- a trazione nulla.

Nel nostro progetto l'elica funzionerà a punto fisso poiché essa durante il funzionamento assorbirà potenza dal motore e genererà una trazione ma poiché, come vedremo più avanti, il motore sarà vincolato alla traslazione, rimarrà nulla la velocità di avanzamento. Le eliche utilizzate sul Saito FG-11 sono del tipo a passo fisso, in cui non è possibile variare il calettamento delle pale e di conseguenza il passo. La potenza per questo tipo di eliche

può variare soltanto agendo sulla throttle lever del motore. A seconda del propulsore, alcuni passi di elica sono più indicati di altri.

Per portare l'elica in rotazione, il motore deve sviluppare una certa potenza in quanto l'aria che fluisce attraverso le pale induce una resistenza che si oppone al movimento delle pale. La resistenza indotta sulle pale è direttamente proporzionale all'angolo di incidenza e alla velocità di rotazione. In particolare, l'aumento dell'angolo di incidenza e l'aumento della velocità di rotazione, determina un aumento della resistenza all'avanzamento. La resistenza all'avanzamento si trasmette sul motore che, a parità di forza applicata, tenderà sotto sforzo a ridurre il numero di giri. Quella che l'elica induce sul motore è una coppia resistiva che il propulsore dovrà necessariamente equilibrare. Per ogni posizione della manetta, assimilabile ad un valore di potenza erogata, il propulsore si stabilizza su un determinato regime corrispondente allo stato in cui la coppia motrice è equilibrata dalla coppia resistente dell'elica. A parità di potenza erogata quindi, se aumenta la resistenza, il numero di giri diminuisce e viceversa. La scelta dell'elica influenza quindi il campo di funzionamento del motore.

Considerando l'influenza dell'elica sul motore, si può intuire come le prestazioni del motore siano direttamente riconducibili alla capacità del motore stesso di far girare l'elica e di farle raggiungere un determinato numero di giri. Conoscendo le caratteristiche geometriche dell'elica è possibile quantificare la resistenza che essa indurrà sul motore e quindi la coppia resistiva che si dovrà equilibrare per permettere la rotazione a quel determinato numero di giri. Facendo riferimento ad una specifica elica ed avendo a disposizione le sue caratteristiche aerodinamiche, è possibile valutare la potenza di un motore mettendo in relazione il numero di giri con la coppia resistiva imposta dalle pale a quel regime di rotazione. La caratterizzazione di un'elica può essere valutata sperimentalmente sfruttando il fatto che la coppia resistiva in condizioni stazionarie è sempre equilibrata dalla coppia erogata dal motore, per cui misurando quest'ultima è possibile ottenere i valori della coppia resistiva dell'elica in funzione del numero di giri. Allo stesso modo a partire dal valore della coppia resistiva dell'elica, noto il numero di giri, è possibile risalire alla coppia erogata dal motore, e quindi alla sua potenza.

Attraverso il banco di prova è quindi possibile caratterizzare le eliche a partire dalla misurazione delle prestazioni del motore e studiare le differenze tra diversi tipi di eliche. Una volta ottenuti i dati si possono tracciare delle curve che rappresentano i valori di coppia e potenza necessari per portare l'elica ad un determinato regime di giri.

I grafici in Figura 3.3 e Figura 3.4 rappresentano la potenza e la coppia che il motore deve erogare per portare l'elica al regime di rotazione indicato. Sono raffigurate le curve relative ad un'elica di diametro 12'' per diversi passi. Si può osservare come all'aumentare di quest'ultimo la potenza e la coppia necessaria aumenta a parità di numero di giri. Ritroviamo, come anticipato prima, che all'aumentare del numero di giri, aumenta la resistenza creata dall'elica e quindi la coppia necessaria e la potenza erogata.

La caratterizzazione dell'elica, in correlazione con la misura delle prestazioni del motore, può essere ottenuta attraverso diverse modalità. La soluzione scelta per questo progetto verrà presentata nei prossimi capitoli.

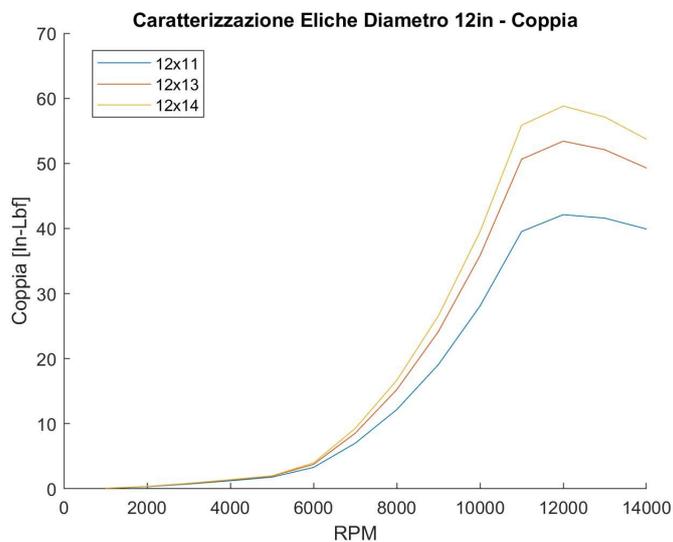


Figura 3.3. Caratterizzazione della Coppia Necessaria per Elica con Diametro 12' per Diversi Passi.

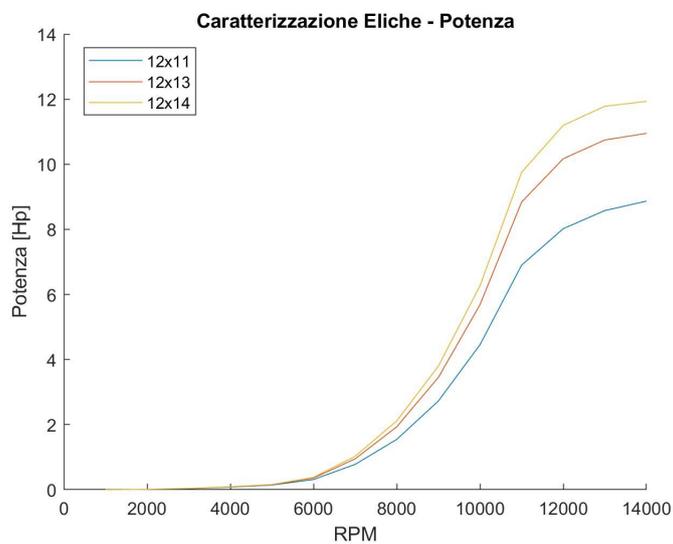


Figura 3.4. Caratterizzazione della Potenza Assorbita dall'Elica con Diametro 12' per Diversi Passi.

Capitolo 4

Valutazione delle Prestazioni di un Motore

Lo studio del funzionamento del motore ci porta a capire quali siano le caratteristiche principali che definiscono un propulsore e che gli permettono di raggiungere determinate prestazioni. Attraverso lo studio del ciclo termodinamico si possono valutare i parametri prestazionali che, una volta definita la geometria e tipologia di motore ci portano alla prima stima delle prestazioni.

4.1 Definizione e Caratterizzazione

Qualsiasi sistema fisico che operi erogando una potenza, sia essa elettrica, meccanica ecc., può essere definito in base alle proprie capacità. Lo studio delle prestazioni consente di quantificare numericamente queste capacità traducendole in delle grandezze caratteristiche. Nell'ambito dei motori a combustione interna, le prestazioni sono rappresentate da delle curve caratteristiche rilevate testando il sistema su di un banco di prova. Le prove al banco vengono solitamente eseguite in condizioni di massima alimentazione. Le misure che generalmente si vogliono ottenere per caratterizzare un motore sono quelle relative alla potenza, alla coppia motrice e al consumo di combustibile al variare del numero di giri del motore. Le altre grandezze fondamentali per caratterizzare appieno un motore sono i rendimenti, i consumi orari e quelli specifici. Essi sono definiti attraverso delle considerazioni energetiche.

4.1.1 Potenza e Coppia

Fisicamente la potenza è definita come il rapporto tra l'energia necessaria per compiere un lavoro e il tempo impiegato per eseguirlo. La sua unità di misura è il Watt. Per capire l'origine della definizione della potenza su un motore a combustione interna si fa riferimento al concetto di lavoro e lo si applica alle curve del ciclo termodinamico. In prima approssimazione possiamo confondere le curve del ciclo ideale con quello del ciclo reale. Il lavoro prodotto è pari all'area del ciclo.



Figura 4.1. Area del Ciclo Otto Ideale.

$$L_i = A$$

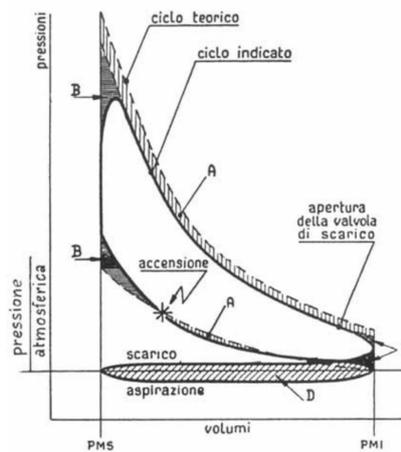


Figura 4.2. Area del Ciclo Otto Reale.

Tramite le curve del ciclo termodinamico in Figura 4.2 possiamo identificare un'area positiva ed un'area negativa, rappresentativa della fase in cui il motore compie lavoro sul fluido. Per ricavare il lavoro occorre quindi valutare la differenza tra le due aree.

$$L_A = L_{utile}$$

$$L_D = L_{speso}$$

$$L_i = L_{utile} - L_{speso} = Area_{ciclo}$$

Il lavoro indicato ottenuto per ogni ciclo è inferiore al lavoro teorico L_t per via delle resistenze passive negli organi di trasmissione e per le perdite dovute all'azionamento dei componenti e accessori. Il lavoro indicato rappresenta il lavoro raccolto effettivamente sulla testa del pistone. Seguendo la curva della trasformazione, in ogni punto possiamo determinare il valore della pressione reale presente nel cilindro, tale pressione prende il nome di pressione indicata p_i . Si deduce che la pressione all'interno del cilindro varia considerevolmente al variare della posizione del pistone durante la sua corsa. Per il calcolo del lavoro indicato, si può pensare di approssimare l'area del ciclo con l'area equivalente di un rettangolo che abbia come base il valore della cilindrata e per altezza la pressione media costante del ciclo p_{mi} .

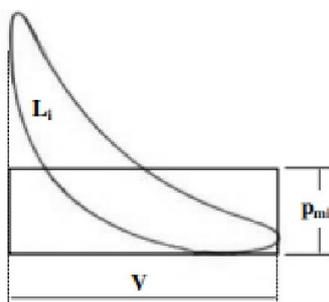


Figura 4.3. Approssimazione dell'Area del Ciclo con un Rettangolo.

In questo modo si ha che:

$$\text{Area del ciclo} = L_{\text{indicato}} = L_i$$

$$\text{Area del Rettangolo} = p_{mi} \cdot V$$

Perciò possiamo definire il lavoro indicato come:

$$L_i = p_{mi} \cdot V$$

La p_{mi} può essere corretta attraverso la definizione dei rendimenti del motore, che verranno analizzati in seguito. La pressione media indicata, tenuto conto delle varie perdite, prende il nome di pressione media efficace e rappresenta la pressione media che effettivamente è presente nel cilindro.

$$p_{me} = p_{mi} \cdot \eta$$

Considerando le forze agenti sul pistone possiamo esprimere il lavoro effettivo come:

$$L_e = F_e \cdot s$$

Dove F_e è la forza che agisce sulla testa del pistone, mentre s è la sua corsa. Esprimendo la forza in termini di pressione abbiamo che:

$$F_e = p_{me} \cdot \text{Area di Azione} = p_{me} \cdot \frac{\pi D^2}{4}$$

dove D è il diametro interno del cilindro. Perciò il lavoro L_e può essere espresso come:

$$L_e = p_{me} \cdot \frac{\pi D^2}{4} \cdot s = p_{me} \cdot V$$

Partendo dal lavoro effettivo si può ricavare la potenza effettiva erogata dal motore. Dalla definizione della potenza, espressa come lavoro nell'unità di tempo, applicata all'azione di un motore:

$$P_e = \frac{L_e \text{ di un ciclo}}{t_{\text{per compiere un ciclo}}} = L_e \cdot f$$

dove f è la frequenza, intesa come numero di cicli completati nell'unità di tempo. La frequenza f è direttamente riconducibile al numero di giri del motore, espressi come numero di giri per unità di tempo. Per un motore a quattro tempi, dove ogni ciclo corrisponde a due giri dell'albero motore, la frequenza f è espressa in funzione del numero di giri n come:

$$f = \frac{1}{2} \cdot \frac{n}{60}$$

Perciò per un motore monocilindrico, come il Saito FG-11, la potenza effettiva all'albero motore segue la relazione:

$$P_e = L_e \cdot f = p_{me} \cdot V \cdot f = \eta \cdot p_{mi} \cdot V \cdot \frac{1}{2} \cdot \frac{n}{60}$$

La potenza effettiva può essere espressa in funzione del momento generato dal motore, cioè può essere espressa in termini di coppia. Dalla definizione di potenza per un moto rotatorio abbiamo che:

$$P_e = C \cdot \omega$$

dove C , espressa in Nm, è la coppia motrice e ω , espressa in rad/s, è la velocità angolare dell'albero.

$$C = \frac{P_e}{\omega} = P_e \cdot \frac{60}{2\pi} \cdot \frac{1}{n} = \frac{P_e}{n} \cdot 9.549$$

La coppia di un motore può essere interpretata come il momento meccanico che le forze generate dal motore esercitano sull'albero motore. La coppia è quindi proporzionale alla potenza generata dal motore. Il valore della coppia non è costante ma è variabile durante un giro dell'albero motore. La coppia viene perciò intesa nel senso di valore medio.

Relativamente all'analisi delle prestazioni del motore Saito FG-11, al fine della progettazione del banco di prova, è necessario determinare in prima approssimazione quelle che possono essere le prestazioni massime in termini di potenza e coppia del propulsore, in modo da avere un'idea sulle grandezze in gioco. La conoscenza della coppia massima è essenziale per la corretta selezione di alcuni componenti e sensori utili alla misurazione della stessa. Per il calcolo delle prestazioni si è fatto affidamento alla relazione che lega la potenza alle dimensioni e caratteristiche del motore per poi ricavarne la coppia. Riprendendo l'equazione della potenza e della coppia:

$$P_e = L_e \cdot f = p_{me} \cdot V \cdot f = \eta \cdot p_{mi} \cdot V \cdot \frac{1}{2} \cdot \frac{n}{60}$$

$$C = \frac{P_e}{\omega} = P_e \cdot \frac{60}{2\pi} \cdot \frac{1}{n} = \frac{P_e}{n} \cdot 9.549$$

Con uno studio parametrico al variare della pressione media efficace e per diversi valori del numero di giri del motore per il quale si ipotizza venga raggiunta la massima coppia è possibile avere dei riscontri numerici. L'unica assunzione da dover fare è quella relativa alla pressione media efficace, che per motori come il Saito FG-11 può essere assunta come $p_{me}=8\div 10$ bar. Considerando i dati relativi al Saito, impostando il calcolo della potenza si ottengono dei diagrammi che rappresentano il valore della potenza e della coppia massima per un determinato numero di giri e valore di pressione media efficace.

Ipotizzando che il Saito FG-11 abbia una $p_{me}=10$ bar, e che raggiunga il picco di potenza a 8500 RPM, si ottiene una potenza massima di 722 W=1.035 CV e una coppia massima di 0.867 Nm.

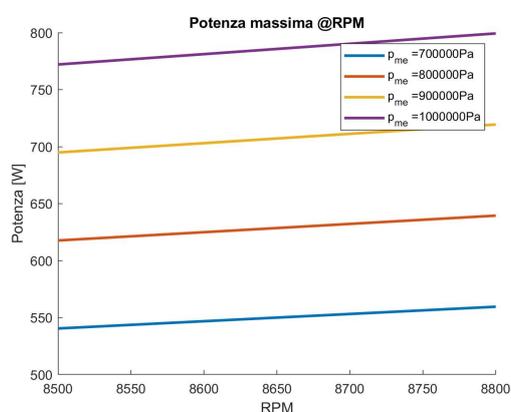


Figura 4.4. Grafico della Potenza Massima al variare di RPM e Pressione Media Efficace.

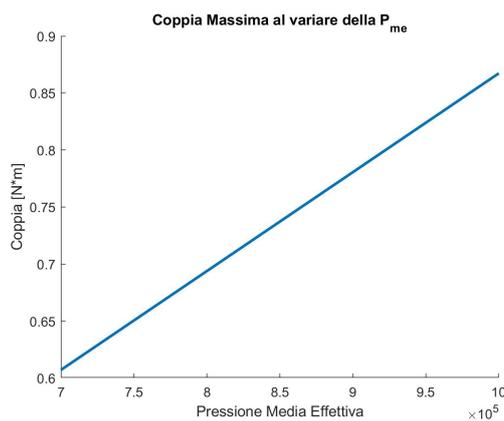


Figura 4.5. Grafico della Coppia Massima al variare della Pressione Media Efficace.

4.1.2 Rendimento Termico e Meccanico

Il rendimento termico di una macchina è il rapporto tra il lavoro fornito ed il calore ricevuto. Può essere definito con la formulazione:

$$\eta_{ti} = 1 - \frac{1}{r^{(k-1)}}$$

dove k è l'esponente dell'adiabatica e r è il rapporto di compressione. La soluzione più efficace per aumentare il rendimento termico è quella di aumentare il rapporto di compressione del motore, tenendo in considerazione i limiti della macchina in termini di pressioni e temperature.

Il rendimento del ciclo indicato è definito come il rapporto tra il lavoro ottenuto nel ciclo reale e quello ottenuto considerando il ciclo ideale.

$$\eta_i = \frac{L_{indicato}}{L_{teorico}} < 1$$

Il rendimento termodinamico è dato dal prodotto dei rendimenti sopra definiti:

$$\eta_t = \eta_{ti} \cdot \eta = \frac{L_i}{Q}$$

Per i motori con le attuali tecnologie il rendimento termodinamico si aggira intorno al 35%. Il rendimento meccanico η_m tiene invece conto di tutte le resistenze interne dovute agli attriti e all'azionamento degli accessori. È strettamente dipendente dalla velocità di rotazione del motore e dai carichi ad esso associati. Il valore massimo del rendimento meccanico lo si raggiunge quando il motore è sottoposto ad elevati carichi e a basse velocità di rotazione. Sostanzialmente il lavoro effettivamente disponibile all'albero motore L_e è inferiore al lavoro indicato L_i per via delle perdite sopra citate.

$$\eta_m = \frac{L_{effettivo}}{L_{indicato}}$$

Il valore medio del rendimento meccanico per quanto riguarda i motori aeronautici si attesta intorno al 80%.

4.1.3 Rendimento Globale

Il rendimento globale di un motore è definito come il rapporto tra il lavoro meccanico effettivo ricavato all'albero e l'energia immessa nel sistema sotto forma di calore.

$$\eta_g = \frac{L_e}{Q}$$

Può essere visto semplicemente come il rapporto tra il rendimento termodinamico e quello meccanico.

$$\eta_g = \eta_i \cdot \eta_m = \frac{L_i}{Q} \cdot \frac{L_e}{L_i} = \frac{L_e}{Q}$$

Il rendimento globale, per quanto riguarda i motori aeronautici, è nell'ordine del 25%.

Quindi, in generale, per ogni ciclo il lavoro effettivo ottenuto all'albero introducendo una quantità di calore Q è:

$$L_e = \eta_g Q$$

4.1.4 Consunumo Orario e Consumo Specifico

Uno dei parametri fondamentali per un motore aeronautico è quello relativo al consumo. Questo perché il consumo di combustibile determina le capacità di un velivolo di poter rimanere in volo per determinati tempi e distanze ed eseguire quindi le missioni assegnate. In casi generali il consumo è massimo nelle condizioni di massima pressione media efficace quando il motore lavora a bassi regimi, mentre aumenta all'aumentare della velocità di rotazione quando ci si avvicina ai giri di massima potenza. In condizioni di bassi regimi viene persa una maggiore quantità di calore rispetto alle condizioni ad alti regimi per via del maggiore scambio termico che avviene tra i cilindri. Il consumo è influenzato fortemente dal rapporto di compressione. Infatti, all'aumentare del rapporto di compressione aumenta il rendimento termodinamico con conseguente diminuzione del consumo di combustibile. Il dato fondamentale per esprimere un giudizio sulla bontà del motore relativamente ai consumi è il consumo specifico q_b , che esprime la quantità di combustibile necessaria per ottenere un lavoro effettivo L_e unitario. Per trovare una relazione che legghi il consumo specifico alle grandezze caratteristiche di un motore, si fa affidamento alla definizione del rendimento globale. Esplicitando i vari termini del rendimento globale si ha:

$$\eta_g = \frac{L_e}{Q} = \frac{L_e}{m_c \cdot P_{ci}}$$

dove m_c è la massa di combustibile immessa e P_{ci} è il potere calorifico inferiore del combustibile. Quando $L_e=1$ J, $m_c=q_b$. Di conseguenza è possibile ricavare la relazione del consumo specifico come:

$$q_b = \frac{1}{\eta_g \cdot P_{ci}}$$

Si può osservare come per alti poteri calorifici e per alti rendimenti globali si possono ottenere dei bassi consumi specifici. È usuale esprimere il consumo specifico in kg/(kWh), da cui è facile intravedere la correlazione tra il consumo specifico ed il consumo in termini di massa oraria di combustibile necessaria per ottenere 1 kW di potenza effettiva all'albero. Il consumo orario definisce la quantità di combustibile consumata dal motore nell'unità di tempo.

4.2 Curve Caratteristiche

Nello studio delle prestazioni, tutte le relazioni ricavate vengono rappresentate sotto forma di curve chiamate curve caratteristiche, che principalmente rappresentano le variazioni di potenza, coppia e consumi in relazione al numero di giri del motore. Osservando queste curve è immediato capire quella che è l'operatività di un motore in determinate condizioni di funzionamento. Queste curve possono essere rilevate sui banchi di prova in condizioni ambientali standard.

Generalmente le curve sono presentate al variare del numero di giri al minuto partendo dal valore minimo di funzionamento. Il minimo del numero di giri rappresenta la velocità alla quale il motore comincia a muoversi vincendo tutte le resistenze in gioco. In linea di massima, all'aumentare della velocità di rotazione si può riscontrare un aumento della

coppia e della potenza fino a raggiungere un picco per un determinato numero di giri. Questi punti individuano i punti di massimo della curva di coppia e di potenza.

In riferimento alle curve in Figura 4.6, osservando l'andamento della di coppia, si intuisce come una volta raggiunto il massimo, la curva comincia a decrescere per via degli alti regimi di rotazione che causano una minore quantità di miscela utilizzabile per ogni ciclo. Osservando la curva di potenza invece, si nota come essa risulti crescente per numero di giri maggiori rispetto a quella della coppia. Questo perché all'aumentare del numero di giri aumenta la miscela disponibile per unità di tempo. Il numero massimo di giri al minuto definisce un limite sulle prestazioni del motore.

Questi tipi di prove al banco possono essere effettuate con carichi differenti per simulare condizioni di funzionamento differenti come ad esempio la velocità relativa, e la quota. Si possono quindi ottenere le curve per condizioni di funzionamento tipiche nelle quali il motore si troverà a funzionare.

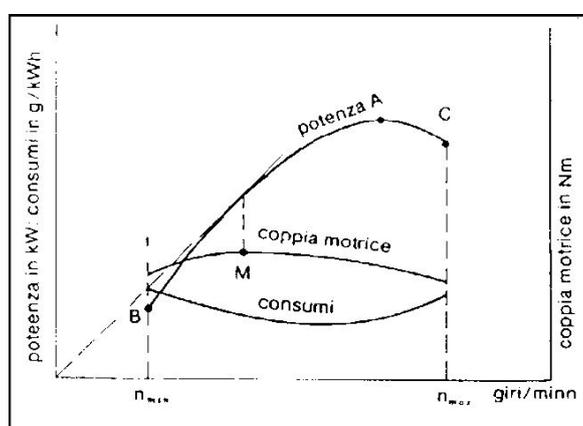


Figura 4.6. Esempio di Curve Caratteristiche.

Capitolo 5

Progettazione del Banco di Prova

In questa sezione verranno presentate le fasi della progettazione del sistema e i problemi di progetto. La prima fase ha come obiettivo quello di ottenere una visione dell'insieme del banco di prova e trovare delle soluzioni per la misura delle prestazioni. Una prima stima delle prestazioni del motore è necessaria per il dimensionamento della struttura e la scelta dei componenti coinvolti nella misurazione. Successivamente verrà trattata la fase di integrazione e configurazione del sistema.

5.1 Problemi di Progetto e Metodo di Misura delle Prestazioni

La misura delle prestazioni si basa sul rilevamento delle grandezze che definiscono il funzionamento del motore analizzate in precedenza. Il banco di prova, perciò, deve essere in grado di determinare tali grandezze, direttamente o per mezzo di alcune correlazioni. Per il progetto in questione, considerate le dimensioni del motore e data la semplicità del metodo, si è scelto di impostare la misurazione delle prestazioni sfruttando la rilevazione delle forze di reazione generate all'interno del motore. La correlazione tra le forze di reazione del motore ed il numero di giri ci permette di determinare le prestazioni in termini di coppia e potenza. Sono invece state scartate altre soluzioni di misurazione, come ad esempio l'utilizzo di torsimetri o motori elettrici, per via della loro complessità.

Il banco di prova in questione prevede l'utilizzo di una cella di carico addetta alla rilevazione delle forze di reazione che il motore scarica su un apposito supporto, forze che sono direttamente riconducibili alla coppia erogata dal motore. Il sistema di misurazione prevede che il motore sia libero di ruotare attorno al proprio asse rimanendo sospeso. Esso è vincolato ad un albero supportato da due cuscinetti. Un particolare leveraggio si occupa di trasferire le forze di reazione del motore alla cella di carico. La conoscenza del braccio rispetto alla quale è misurata la forza di reazione ci permette di definire la coppia,

riconducibile direttamente alla coppia disponibile all'albero che, una volta nota la velocità di rotazione, ci permette di ottenere la potenza sviluppata.

Analizzando il comportamento del sistema nell'insieme, la maggiore criticità risiede nell'assicurare la coincidenza dell'asse di rotazione del motore con l'asse di rotazione dell'albero di supporto. In caso di disassamento si incorrerebbe in vibrazioni e fluttuazioni del sistema che renderebbero imprecisa la misurazione. La soluzione a questa eventualità consiste nella valutazione precisa e accurata delle dimensioni dei componenti utilizzati e nella realizzazione del telaio del banco di prova. In particolare, deve essere valutata la distanza tra il ripiano del telaio che ospita i cuscinetti e il centro dei cuscinetti stessi rispetto all'asse di rotazione del motore. Un altro problema di progetto lo si rileva nella lunghezza del braccio necessaria per poter rilevare la forza di reazione, poiché determina le dimensioni della struttura e la scelta della cella di carico. Per poter stimare una misura della lunghezza e la forza da rilevare, è necessario avere un'idea delle prestazioni massime del motore.

Le forze sviluppate ed i carichi agenti sulla struttura sono proporzionali alla potenza erogata dal motore. Sapere approssimativamente le forze in gioco è essenziale per la scelta dei componenti e realizzare il sistema di misurazione. La struttura e i componenti devono invece essere in grado di sopportare determinate sollecitazioni; perciò, è importante stabilire i materiali e le dimensioni della struttura e dei componenti soggetti a sforzi.

Per avere una stima delle prestazioni del motore si studia il comportamento del propulsore nelle condizioni di massima potenza. La massima potenza la si raggiunge in specifiche condizioni, caratterizzate da un determinato numero di giri e per una determinata pressione media efficace. Come riportato nei capitoli precedenti è quindi possibile determinare la potenza massima del motore.

Per capire in che modo la potenza massima vada ad impattare sul sistema, si deve valutare la forza che esso esercita sul sistema di misurazione. Come anticipato precedentemente, la cella di carico addetta alla misurazione delle forze di reazione deve essere in grado di rilevare tali forze. Partendo dalla definizione di coppia:

$$C = F \cdot b$$

$$F = \frac{C}{b}$$

dove F è la forza e b è il braccio, la forza misurata sarà direttamente proporzionale alla coppia, e quindi alla potenza, e inversamente proporzionale al braccio di misurazione. Si vuole quindi trovare un compromesso tra la scelta del braccio di misurazione, non troppo grande per mantenere contenute le dimensioni del sistema e non troppo piccolo per renderne più facile la realizzazione.

A seconda della coppia massima generata dal motore, si avranno diversi valori di forze di reazione in funzione del braccio misurazione, come è possibile osservare nella Figura 5.1.

Relativamente ai carichi a cui è soggetto il sistema, particolare attenzione deve essere posta nella scelta dell'albero su cui è collegato il motore. Nonostante la massa relativamente piccola, si deve essere sicuri che sotto sforzo esso non si deformi significativamente. L'insieme che include il motore, l'elica e la piastra di collegamento ha una massa di circa 1

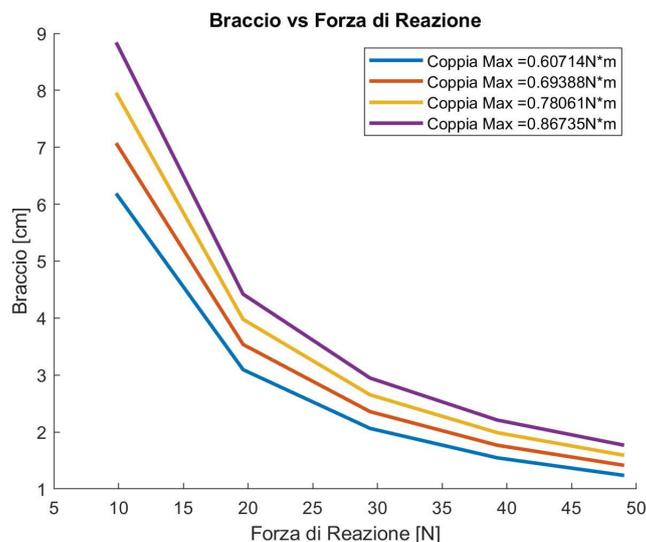


Figura 5.1. Grafico Braccio vs Cella di Carico.

Kg. La massa contenuta permette la scelta di cuscinetti ed alberi senza troppe restrizioni. Date le caratteristiche dei cuscinetti, la selezione più accurata deve essere riservata per l'albero. Considerando il modulo di elasticità e il carico di rottura del materiale di cui è composto l'albero, è possibile determinare quali diametri siano necessari per garantire che i carichi siano supportati. Nonostante la possibilità di utilizzare diametri più piccoli, si ipotizza l'utilizzo di un albero dal diametro di 30 mm, poiché si prevede l'utilizzo del sistema anche con motori di dimensioni maggiori rispetto al Saito FG-11.

La scelta del giusto albero e dei cuscinetti è essenziale per una misura corretta e precisa. Inoltre, particolare attenzione deve essere posta sulla resistenza di questi componenti. I cuscinetti dovranno assorbire tutti i carichi trasmessi dal motore attraverso l'albero, mentre quest'ultimo sarà sollecitato principalmente a torsione, taglio e tensione. La torsione è generata dalla coppia di reazione, grandezza che si vuole misurare, mentre la componente di taglio è generata dalle forze dovute al peso e alle vibrazioni del motore. La tensione è causata dalla trazione generata dall'elica. L'accoppiamento dell'albero ai cuscinetti deve essere valutato in base alle tolleranze in condizioni standard dei due componenti. Un'interferenza insufficiente o eccessiva può causare dei problemi.

Analizzando generalmente il funzionamento albero-cuscinetto, un accoppiamento libero tra albero e anello interno del cuscinetto può determinare uno scorrimento tra le due parti con possibile creep, poiché lo scorrimento usura la superficie di scorrimento con conseguente aumento di gioco tra le parti. Questa situazione potrebbe generare calore e vibrazioni eccessive, riducendo la vita dell'albero. Un'interferenza eccessiva invece può provocare problemi di frattura dell'anello interno al cuscinetto per via delle eccessive sollecitazioni. Nel caso in questione, per quanto riguarda l'accoppiamento albero-cuscinetto del banco di prova, queste problematiche sono secondarie in quanto l'albero non ruoterà se

non di pochi gradi. L'accoppiamento albero-cuscinetto deve soltanto garantire un grado di libertà attorno all'asse di rotazione dell'elica. La minima resistenza deve essere garantita. Sono stati selezionati due cuscinetti a sfere UC206. I due cuscinetti saranno inseriti in due appositi supporti identificati con il codice UC206.

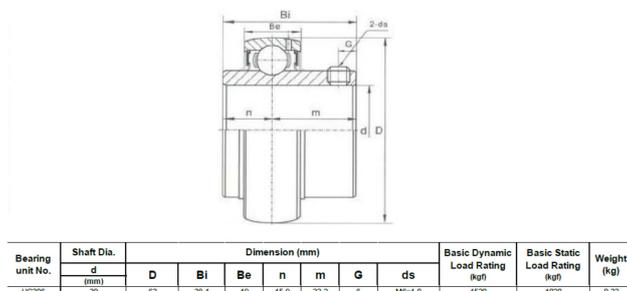


Figura 5.2. Caratteristiche del Cuscinetto UC206.

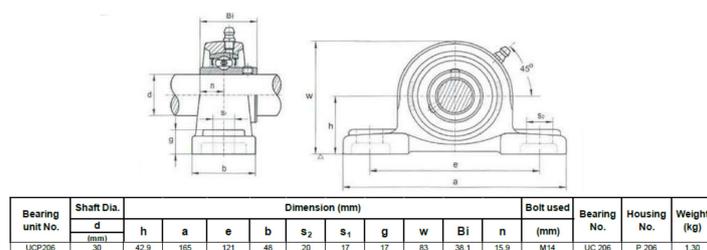


Figura 5.3. Caratteristiche del Supporto per Cuscinetti UCP206.

In definitiva, il progetto del banco di prova può essere ricondotto alla realizzazione di una struttura e ad un sistema di misurazione, quest'ultimo capace di fornire i parametri di coppia, potenza, consumo di combustibile, condizioni di funzionamento in termini di pressioni e temperature al condotto di aspirazione e condizioni ambiente. Una volta definite le modalità con cui ottenere i vari parametri, è necessario che i dati ottenuti vengano elaborati attraverso una scheda di acquisizione dati che si occupa infine di renderli disponibili. Si studia inoltre il meccanismo che permetta un'adeguata e precisa regolazione del funzionamento del motore.

5.2 Struttura del Banco di Prova

Considerata la dimensione del motore e gli ingombri dei vari sistemi, si è scelto di progettare la struttura del banco di prova con dei profilati di alluminio di sezione quadrata. I profilati sono da 20 x 20 mm con spessore 2 mm, e sono giunti tra loro attraverso dei particolari raccordi, uno per ogni angolo della struttura. La struttura prevede la creazione di due ripiani posti orizzontalmente e formati da delle piastre di alluminio: uno di essi è

posto nella parte superiore della struttura, ed il suo compito principale è quello di ospitare il serbatoio del combustibile ed alcuni sensori, mentre l'altro ripiano è posto poco sotto il centro della struttura e ad esso verranno vincolati i supporti dei cuscinetti dell'albero e la cella di carico. Questa piastra assorbirà tutti i carichi scaricati dal motore e sarà sorretta da due travi che corrono longitudinalmente lungo la struttura.

Le dimensioni devono essere compatibili con l'ingombro massimo del motore, prestando particolare attenzione alle dimensioni dell'elica, che deve essere racchiusa all'interno della struttura. La dimensione frontale è perciò vincolata dalle dimensioni di quest'ultima. Ragionando anche sulla possibilità di adattare il banco di prova per motori più grandi ed eliche di diversi diametri, la struttura è stata pensata per avere misure di 50 cm x 50 cm x 60 cm.

La quota del ripiano intermedio è fondamentale affinché l'elica rimanga confinata all'interno della struttura. Perciò è necessario valutare le altezze del supporto dei cuscinetti e stabilire la distanza tra l'asse di rotazione del cuscinetto e l'asse di rotazione dell'albero motore, coincidente con l'asse di rotazione dell'elica. Il ripiano sarà posizionato poco sotto l'asse di simmetria della struttura. Nella parte frontale è prevista l'installazione di una rete metallica di sicurezza per evitare l'interferenza di oggetti estranei e rendere irraggiungibile l'elica durante il funzionamento del motore, se non per l'accensione.

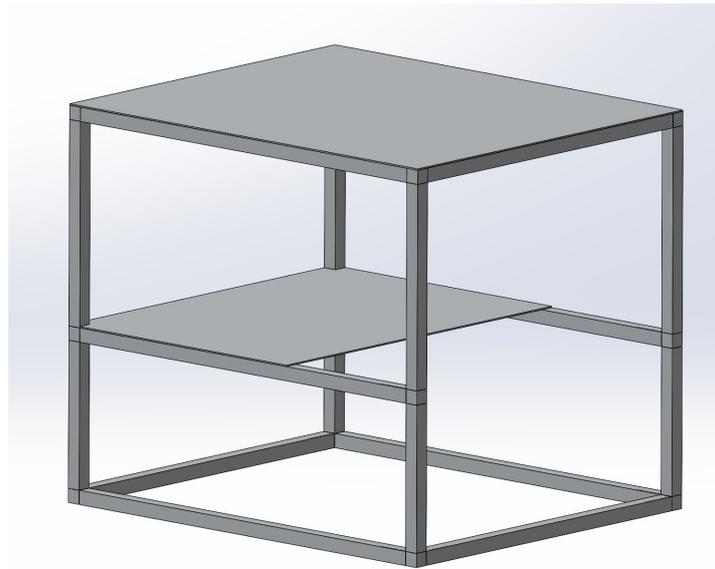


Figura 5.4. Telaio della Struttura del Banco di Prova.

L'asta di leveraggio che trasmette la forza di reazione alla cella di carico si estende perpendicolarmente all'asse di rotazione dell'albero a cui è collegato il sostegno del motore; essendo il motore e l'albero liberi di girare, l'asta andrà a poggiarsi sulla cella scaricando su di essa una forza direttamente proporzionale alla coppia. La lunghezza dell'asta può essere variata a seconda del braccio con cui si vuole misurare la coppia. Una via per

variare la lunghezza dell'asta è quella di utilizzare due elementi filettati che scorrono tra di loro. Il contatto con la cella di carico avviene per mezzo di alcuni cunei utilizzati a seconda della lunghezza voluta.

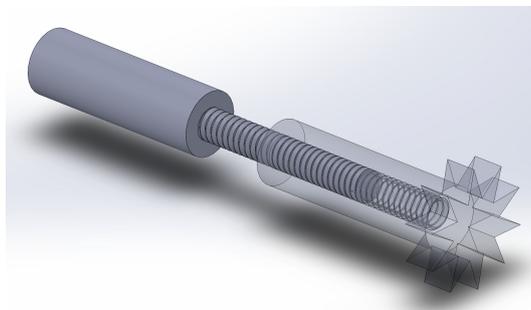


Figura 5.5. Esempio di Asta di Misurazione con Lunghezza Variabile.

5.3 Controllo del Motore

La potenza del motore viene controllata direttamente attraverso la regolazione dell'apertura della valvola di aspirazione presente nel carburatore. La regolazione avviene per mezzo di una throttle lever, al centro della quale è anche presente una vite che permette la regolazione del rapporto tra aria e combustibile.

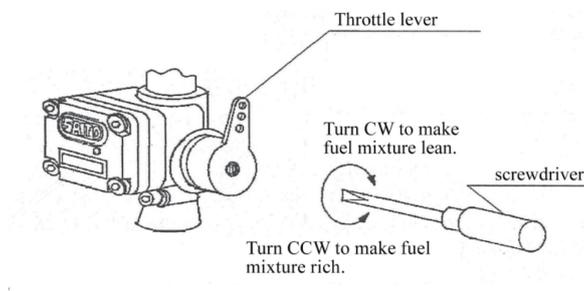


Figura 5.6. Throttle Level e Vite di Regolazione Poste sul Carburatore.

Per consentire una regolazione accurata e definita del motore, si è scelto di equipaggiare la leva di controllo con un servomotore che si occuperà del suo movimento. La rotazione del servomotore viene comandata da un potenziometro a slitta, elemento che varia la sua resistenza a seconda della posizione del cursore nella slitta. Nota la resistenza del potenziometro per ogni posizione del cursore, è possibile associare ad ogni valore di tale resistenza un angolo di rotazione del servomotore. Generalmente questi motori elettrici sono in grado di compiere rotazioni comprese tra $0^\circ \div 180^\circ$. Perciò il campo di manovra della throttle lever sarà valutato in base alle capacità di rotazione del servo. Per esempio,

la condizione di minima manetta coinciderà con un angolo del servomotore di 0° , mentre la condizione di massima manetta coinciderà con un angolo del servo di 180° . Per il pilotaggio del servo è necessario applicare un segnale impulsivo PWM. La gestione degli impulsi determina il senso di rotazione e l'angolo di rotazione.

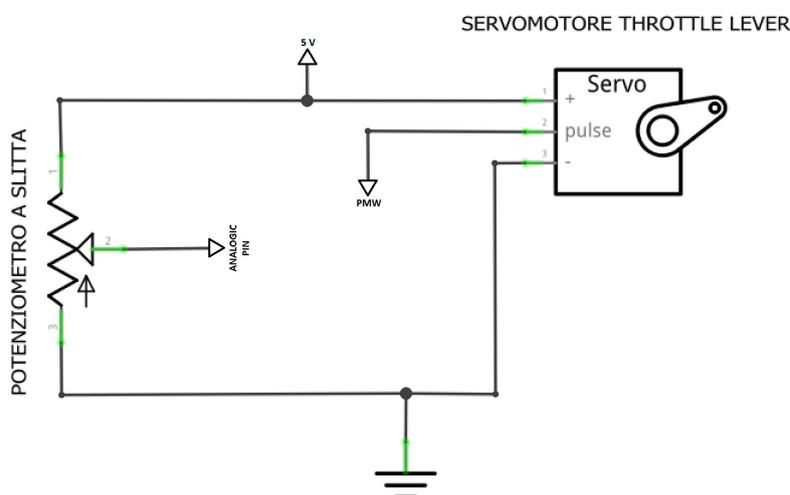


Figura 5.7. Schema Elettrico del Servomotore con Potenzziometro.

5.4 Misurazione dei Parametri per il Calcolo delle Prestazioni

In questa sezione verranno espote tutte le soluzioni valutate per la misura dei parametri necessari per il calcolo delle prestazioni del motore. Saranno descritti alcuni sensori e meccanismi di misura, introducendo i principi fisici che stanno alla base di tali misurazioni. Per alcuni componenti saranno riportate le caratteristiche e specifiche rispetto ad alcuni dispositivi di riferimento.

5.4.1 Misurazione della Coppia di Reazione

La misurazione della forza di reazione del motore è effettuata per mezzo di una cella di carico. La cella di carico è un trasduttore che misura la forza applicata su esso attraverso un segnale elettrico proporzionale alla deformazione che la forza causa sul componente. Per il progetto in questione si utilizza una cella di carico a punto singolo del tipo a trave parallela. Le celle di carico sono composte da un elemento elastico, in acciaio o alluminio, su cui sono posizionati degli estensimetri. Quando sottoposti ad un carico, il materiale elastico subisce una leggera deformazione per poi ritornare alla forma di partenza una volta cessato. La deformazione rilevata dagli estensimetri viene elaborata per determinare il valore del carico applicato.

Gli estensimetri sono il cuore del sistema di misurazione dei carichi applicati alla cella. Generalmente sono formati da una pellicola su cui vengono posati saldamente dei conduttori elettrici. Quando è imposta una deformazione la pellicola tende a deformarsi, costringendo alla stessa deformazione anche i conduttori elettrici. La deformazione dei conduttori elettrici comporta una variazione della resistenza, in particolare aumenta all'aumentare della deformazione.

La disposizione degli estensimetri prevede la formazione di un circuito ponte di Wheatstone, come raffigurato in Figura 5.8. In particolare, quattro estensimetri vengono collegati formando un anello e una griglia di misurazione.

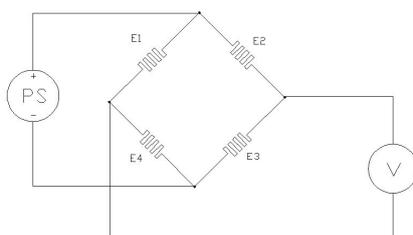


Figura 5.8. Posizione Estensimetri.

In condizioni di riposo il valore resistivo degli estensimetri è lo stesso; perciò, la tensione in uscita è nulla. Nel caso venisse applicata una forza che provoca una deformazione, verrebbe cambiata la resistenza di uno o più estensimetri e quindi la tensione in uscita non sarà più nulla ma assumerà un valore proporzionale allo sbilanciamento del circuito. Per aumentare la sensibilità della cella si posizionano gli estensimetri in modo tale che due di essi siano sollecitati a trazione, mentre gli altri due siano sollecitati a compressione. Con questo accorgimento una piccola deformazione della cella provoca un sensibile aumento del valore della tensione in uscita. Il segnale in uscita dalla cella è un segnale analogico che deve subire una conversione ad un segnale digitale oltre alla necessità di un'adeguata filtrazione, amplificazione. Per questo scopo si utilizza il convertitore analogico-digitale HX711. Il collegamento tra la cella di carico ed il convertitore HX711 è diretto. Oltre alle connessioni relative all'alimentazione, sono due i collegamenti che trasmettono al convertitore il segnale relativo allo stato degli estensimetri.

5.4.2 Misurazione del Numero di Giri

Il numero di giri del motore, oltre a fornirci un'idea sullo stato di funzionamento del motore, ci permette di ricavare il valore della potenza erogata una volta nota la coppia. Questo parametro viene rilevato direttamente dalla scheda di gestione del Saito, valutando la posizione dell'albero motore nel tempo. La posizione dell'albero motore viene determinata per mezzo di un sensore ad effetto Hall integrato all'interno del motore in prossimità dell'albero. Il suo scopo principale è quello di coordinare il funzionamento del

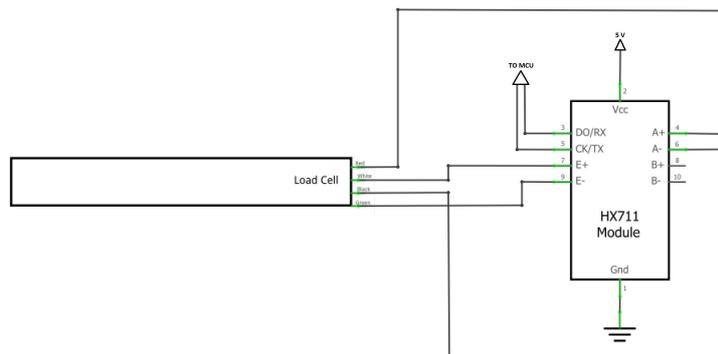


Figura 5.9. Schema Collegamento Cella di Carico - HX711.

sistema di accensione. Il segnale di output può essere reso direttamente fruibile attraverso dei tachimetri dedicati oppure può essere elaborato dalla scheda di gestione dati.

5.4.3 Misurazione del Consumo di Combustibile

Il consumo del combustibile viene valutato con un flussostato. Attraverso questo dispositivo fluisce il combustibile destinato all'aspirazione del motore. Per questa applicazione si utilizza un flussostato a turbina, formato da due piccole camere distinte e a tenuta stagna. Una camera è destinata al passaggio del flusso di combustibile ed al suo interno è presente una turbina formata da alcune palette. Un albero coassiale alla turbina permette ad una calamita, calettata sull'albero stesso, di generare un campo magnetico variabile al fluire del combustibile. Nell'altra camera è invece presente la parte elettronica del dispositivo di misurazione, composta da un sensore ad effetto Hall. Quest'ultimo, sollecitato dal campo magnetico variabile, fornisce in uscita degli impulsi proporzionali alla velocità della turbina, che è direttamente proporzionale alla portata di combustibile che attraversa il flussostato. Alcuni misuratori di flusso, come quello rappresentato in Figura 5.10, pre-

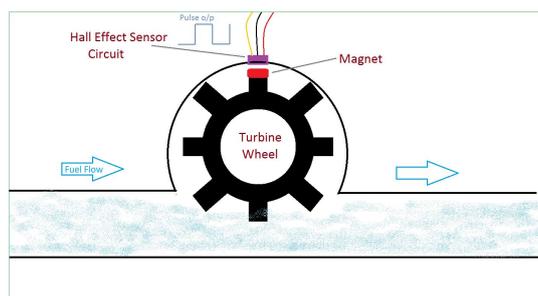


Figura 5.10. Rappresentazione del Funzionamento di un Flussostato.

vedono il posizionamento dei magneti direttamente sulle palette della turbina rendendoli più compatti. A seconda della configurazione del dispositivo si hanno diversi segnali in

uscita. Valutando il numero di giri della turbina nell'unità di tempo è possibile ricavare la portata di combustibile.

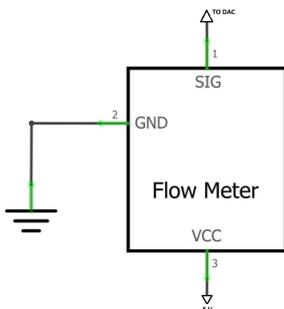


Figura 5.11. Schema Elettrico del Flussostato

5.4.4 Misurazione della Portata di Aria

La portata d'aria che fluisce all'interno del motore può essere valutata attraverso la depressione nel condotto di aspirazione e la temperatura dell'aria in questa regione.

La depressione al condotto di aspirazione può essere misurata attraverso un sensore di pressione differenziale o assoluta. Questi dispositivi sono in grado di rilevare la differenza di pressione presente in due diverse regioni, che nel nostro caso sono la pressione al collettore e la pressione ambiente, oppure misurare direttamente la pressione assoluta. Si è perciò studiato l'utilizzo di alcuni semiconduttori della serie MPX, caratterizzati da diversi range di misurazione. Questi sensori sono dei trasduttori piezoelettrici che forniscono come output dei segnali analogici proporzionali alla pressione applicata su di essi. L'utilizzo del sensore con microcontrollori e microprocessori è possibile attraverso l'utilizzo diretto del segnale analogico di output oppure attraverso una conversione del segnale da analogico a digitale.

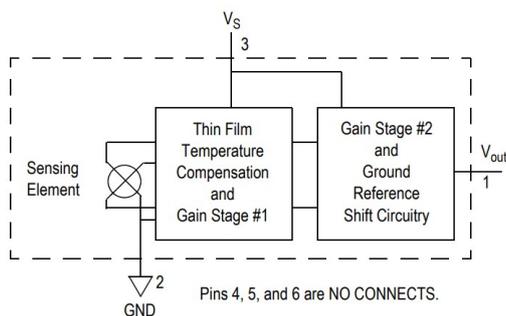


Figura 5.12. Diagramma a Blocchi del Sensore di Pressione.

Ogni valore di pressione rilevata si traduce in una differenza di potenziale come output. Come è possibile notare nella Figura 5.13 e Figura 5.14, ogni segnale analogico rappresentativo della pressione è soggetto ad un errore, dovuto in parte al sistema misurazione e in parte alla temperatura. Il valore di output deve quindi essere corretto considerando due fattori di correzione, uno che riguarda l'errore di pressione, ed uno che riguarda il fattore correttivo della temperatura.

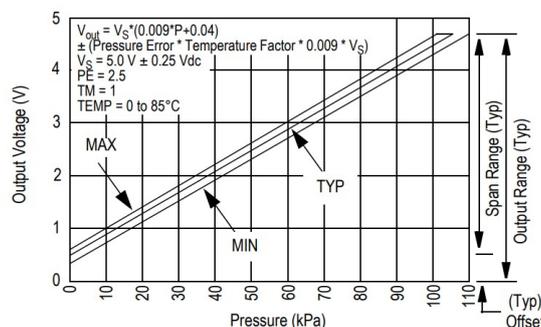


Figura 5.13. Relazione Pressione - Differenza di Potenziale.

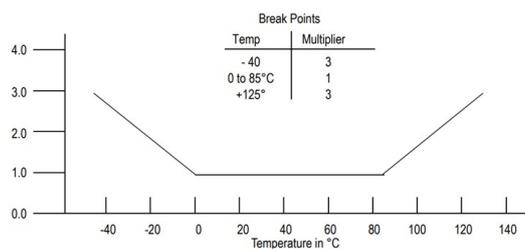


Figura 5.14. Diagramma Fattore Correttivo della Temperatura.

Attraverso le relazioni riportate nella figura precedente, considerando i fattori correttivi e la tensione di alimentazione, è possibile risalire al valore di pressione. I sensori di pressione della serie MPX presentano le seguenti specifiche:

- Range di Pressione Assoluta, 15÷115 kPa;
- Range di Pressione Differenziale, 0÷100 kPa;
- Tensione di Alimentazione, $5 \pm 0.25 V_{DC}$;
- Corrente Assorbita, 7÷10 mA;
- Scostamento Medio, $0.20 V_{DC}$ @ $V_S=5 V_{DC}$;
- Accuratezza, $\pm 2.5\%$ rispetto alla tensione del sensore;

- Tempo di risposta, 1.0 ms.

Per la misura della temperatura dell'aria al condotto di aspirazione si utilizza un sensore, come ad esempio i sensori PT100. Questi dispositivi sono fondamentalmente dei termoresistori che variano la propria resistenza in funzione della temperatura alla quale sono esposti. Sono caratterizzati da una buona risposta nel tempo e accuratezza. La relazione tra la temperatura e la resistenza è approssimativamente lineare per il range di temperature di nostro interesse. In particolare, per una variazione di temperatura di 1 °C corrisponde una variazione di resistenza di 0.384 ohm, perciò un piccolo errore nella misurazione della resistenza comporta un grande errore nella misura della temperatura. L'elemento resistivo del sensore è formato da una striscia di platino, generalmente protetta da un involucro di acciaio inossidabile.

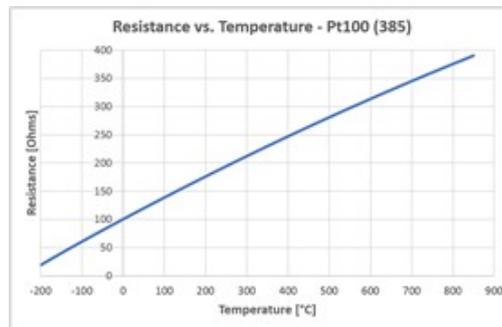


Figura 5.15. Relazione Temperatura – Resistenza.

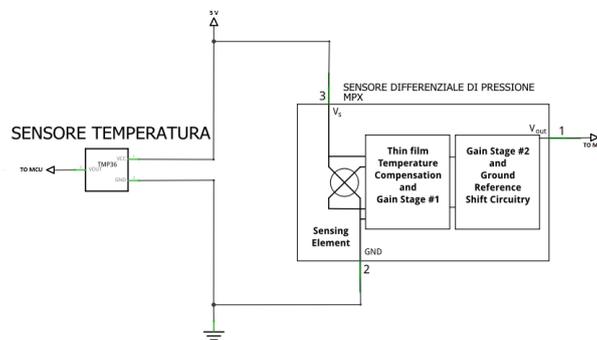


Figura 5.16. Schema Elettrico della Sensoristica per la Misurazione del Flusso d'Aria.

5.4.5 Misurazione delle Condizioni Ambiente

Le condizioni ambiente vengono descritte in termini di temperatura, pressione e umidità dell'aria. Tutti i sensori relativi alla misura di questi parametri sono installati in un'unica scheda, definita come "scheda ambiente".

La misurazione della temperatura e dell'umidità relativa dell'ambiente è affidata ad un dispositivo, il DHT-11, che integra sia un sensore per la temperatura che un sensore per rilevare l'umidità. Il DHT-11 è un sensore digitale formato da una parte resistiva per la rilevazione dell'umidità e da un sensore NTC (Negative Temperature Coefficient) per la misura della temperatura. Entrambe le misurazioni si basano sulla capacità del materiale di condurre e sulla variazione di resistenza a seconda del livello di umidità dell'ambiente.

Il DHT-11 presenta le seguenti caratteristiche:

- Intervallo di misurazione per la temperatura, $0^{\circ}\text{C} \div 50^{\circ}\text{C}$;
- Precisione misurazione temperatura, $\pm 2^{\circ}\text{C}$;
- Risoluzione temperatura, 1°C ;
- Intervallo di misurazione dell'umidità, $20\% \div 90\%$;
- Precisione misurazione temperatura, $\pm 5\%$;
- Risoluzione umidità, 1% ;
- Tensione di alimentazione, $3 \div 5 V_{\text{DC}}$;
- Massima corrente assorbita, $0.5 \div 2.5 \text{ mA}$.

La misura della pressione atmosferica è affidata al sensore Bosh BMP180. Questo sensore permette di misurare pressioni che vanno da 300 hPa a 1100 hPa. La calibrazione viene effettuata durante la produzione e i valori vengono salvati nella memoria interna; perciò, non sono necessarie calibrazioni successive se non l'impostazione della pressione di riferimento. Il sensore alloggia su una basetta in cui sono installati alcuni componenti essenziali per il suo funzionamento. Il BPM180 presenta le seguenti caratteristiche:

- Tensione di alimentazione, $3.3 \div 5 V_{\text{DC}}$;
- Assorbimento: $0.5 \mu\text{A}$;
- Pressione Rilevata: $300 \div 1100 \text{ hPa}$;
- Risoluzione: 0.02 hPa ;
- Interfaccia: I2C – $0x77$;
- Dimensioni: $21 \times 18 \text{ mm}$.

L'integrato BMP180 è inserito in una basetta prefabbricata in cui sono presenti alcuni componenti elettronici che facilitano la connessione. Il BMP180 fornisce come output un valore di pressione non compensato dalla variazione della densità dell'aria. È perciò necessario compensare tale valore e lo si fa attraverso la lettura della temperatura per mezzo di un sensore di temperatura integrato nel BMP180 stesso.

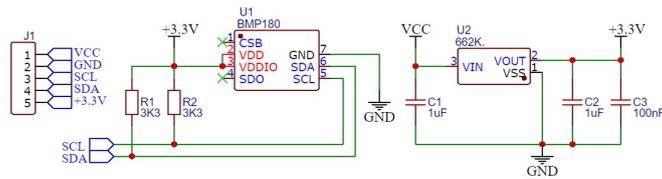


Figura 5.17. Schema dell'Interfaccia per il BMP180 con basetta regolatrice.

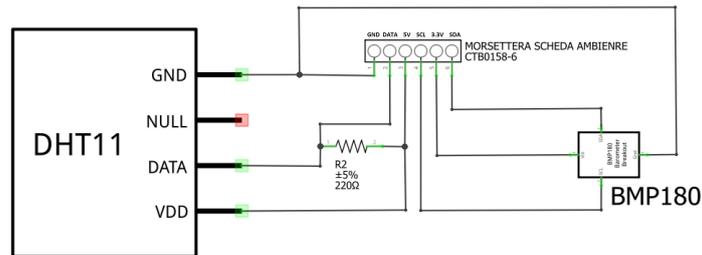


Figura 5.18. Schema Elettrico della Scheda Ambiente.

5.5 Acquisizione ed Elaborazione dei Dati

Il sistema di misurazione e controllo, composto dai vari dispositivi elettronici, è controllato e gestito da un microcontrollore. Tra le varie soluzioni e modalità di gestione si è scelto di utilizzare una scheda Arduino per via della forte integrazione e compatibilità con i sensori utilizzati. La scheda selezionata è un'Arduino Mega. Questa è basata sul microcontrollore Atmel ATmega2560, utilizzata in questo progetto per acquisire ed elaborare tutti i segnali trasmessi dai sensori. Le sue specifiche sono:

- 54 I/O digitali, 15 dei quali supportano la modulazione ad impulsi PWM;
- 16 ingressi analogici;
- Oscillatore al cristallo di quarzo da 16 MHz;
- Porta USB;
- Presa di alimentazione;
- Connessione ICSP;
- Tensione operativa, 5 V_{DC};
- Tensione di alimentazione, 7÷12 5 V_{DC};
- Massima corrente per pin, 40mA;

- Memoria Flash, 256 KB;
- Memoria SRAM, 8 KB;
- Memoria EPROM, 4 KB.

La scheda di acquisizione dati si occuperà interamente della gestione della sensoristica del sistema di misurazione, attraverso l'inizializzazione dei sensori e sfruttando vari protocolli di comunicazione per acquisire i dati in input. La scheda ad ogni avvio si occuperà della comunicazione unidirezionale o bidirezionale con i vari sensori e dispositivi e si renderà disponibile per la ricezione dei dati, segnalando eventuali errori di comunicazione o impossibilità nel reperire i dati. Per poter stabilire una comunicazione e leggere i dati trasmessi è necessario programmare la scheda e, in alcuni casi, calibrare i sensori. Per farlo si utilizzano dei programmi che, una volta caricati nella memoria, vengono eseguiti ciclicamente dal processore. Arduino utilizza il linguaggio di programmazione C++. Oltre alle funzioni e ai comandi base tipici del linguaggio C++, si fa uso di librerie di terze parti, cioè di componenti di codice aggiuntivi da richiamare all'inizio del programma che consentono ai dispositivi di interfacciarsi facilmente con Arduino. La struttura del programma può essere distinta principalmente in tre parti. La prima in cui si vanno a richiamare tutte le librerie utilizzate e si definiscono tutti i parametri ricorrenti utilizzati nel codice. La seconda è una funzione di setup in cui si vanno a esplicitare tutte le connessioni con i vari sensori e dispositivi e si stabiliscono i protocolli di comunicazione. In questa parte si effettuano anche le inizializzazioni e settaggio dei vari sensori. La terza parte è composta dalla funzione di loop, funzione principale del programma che viene ripetuta ciclicamente. All'interno di questa funzione sono riportate tutte le istruzioni che la scheda deve eseguire relativamente all'acquisizione ed elaborazione dei dati. Il tempo necessario per eseguire un singolo ciclo della funzione loop varia a seconda delle istruzioni da completare; esse possono essere racchiuse in sotto-funzioni da richiamare nel loop. I dettagli delle funzioni delle librerie di gestione di alcuni sensori sono riportati in appendice.

Ogni sensore utilizzato stabilisce la propria connessione con il microcontrollore attraverso un definito protocollo di comunicazione. Facendo una panoramica dei sensori analizzati in precedenza, verranno ora esplicitati i tipi di connessioni implementate per la comunicazione con Arduino.

Il servomotore addetto al controllo della throttle lever si interfaccia con Arduino attraverso una comunicazione digitale in cui il microcontrollore piloterà il servo attraverso l'invio di alcuni impulsi. Si sfrutta quindi la comunicazione attraverso impulsi modulati PWM. In particolare, il microcontrollore piloterà il servo attraverso due impulsi inviati a distanza di 20 ms. La durata di ogni impulso andrà a definire il movimento rotativo che il servomotore deve eseguire. Variando la durata dell'impulso è possibile far raggiungere tutte le posizioni possibili all'albero del servomotore, variando anche il senso di rotazione. Il controllo del movimento del servomotore è gestito dal potenziometro a slitta attraverso la variazione della propria resistenza. Il microcontrollore percepisce la posizione del cursore della slitta andando a rilevare la tensione in uscita dal potenziometro stesso, poiché variando la resistenza varia il valore di tensione. Il microcontrollore fondamentale

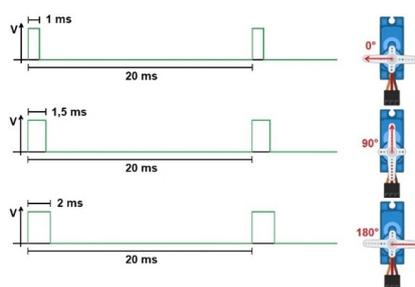


Figura 5.19. Esempio di Risposta del Servomotore per Diversi Impulsi.

è in grado di percepire la posizione del cursore e, impostati opportuni parametri, portare il servomotore in una determinata posizione modulando gli impulsi come visto in precedenza.

La cella di carico comunica con Arduino attraverso il convertitore DAC HX711. Tra il microcontrollore e il DAC si instaura una comunicazione utilizzando il protocollo standard I2C. Il convertitore HX711 è in grado di convertire segnali fino a 24 bit. Presenta due canali selezionabili, uno identificato come “Channel A” e l’altro come “Channel B”. Essi si differenziano per il diverso valore di guadagno corrispondente all’amplificazione. La cella di carico prima dell’utilizzo necessita di essere calibrata. Tutte le misure, infatti, vengono rapportate rispetto ad un parametro di calibrazione. È possibile determinare questo parametro creando un codice che rilevi la massa di un peso noto. Con un processo iterativo si valuta la massa misurata e la massa nota del peso, variando il parametro di calibrazione fino a quando non si giunge alla convergenza delle due misure.

I sensori che sfruttano l’effetto Hall possono essere utilizzati instaurando sia una comunicazione che preveda la lettura di segnali analogici, oppure, convertendo il segnale da analogico in digitale, è possibile sfruttare alcuni protocolli standard come l’I2C.

Il sensore di pressione al condotto di aspirazione può comunicare digitalmente con Arduino attraverso un DAC, instaurando una comunicazione con protocollo I2C, oppure analogicamente. La seconda modalità risulta essere la più semplice. Come visto in precedenza nella descrizione del sensore, il valore fornito in output in termini di differenza di potenziale può essere letto ed elaborato da Arduino applicando le dovute correzioni e relazioni matematiche di conversione.

Il sensore di temperatura al condotto utilizza un DAC per l’amplificazione e conversione del segnale in output dal componente resistivo. Anche in questo caso è possibile instaurare una comunicazione attraverso il protocollo I2C.

La scheda ambiente contenente il sensore di temperatura e umidità ed il sensore della pressione si interfaccia con Arduino sfruttando il protocollo OneWire, che con un unico collegamento permette di stabilire due diverse comunicazioni, in questo caso una per il sensore di umidità ed una per il sensore di temperatura, mentre il sensore barometrico comunica analogicamente attraverso una comunicazione bidirezionale. Una volta valutate tutte le misurazioni necessarie e ottenuti i parametri prestazionali di nostro interesse è necessario che il microcontrollore fornisca in output questi parametri per la visualizzazione.

Questo può avvenire principalmente attraverso due vie. La prima prevede l'utilizzo di un computer tramite il quale si avvia una comunicazione seriale con il microcontrollore. La ricezione dei dati avviene per mezzo di qualsiasi software in grado di elaborare questo tipo di comunicazione. I dati ottenuti possono quindi essere stampati a video e memorizzati. La scheda Arduino presenta un software dedicato per questo tipo di comunicazione che permette anche la creazione di grafici istantanei in funzione del tempo. In alternativa si può impostare una comunicazione seriale tra il microcontrollore e il software di calcolo numerico Matlab, che, una volta definita la comunicazione, permette una gestione dei dati ottenuti più semplice. La seconda soluzione prevede l'utilizzo di un display da posizionare direttamente sulla struttura. La dimensione del display varia a seconda dei dati che si vogliono mostrare. Ipotizzando di dover visualizzare soltanto i dati ambiente, velocità di rotazione e coppia erogata, un display lcd con dimensioni 16x2 è sufficiente.

In generale il sistema è stato pensato per un utilizzo combinato con le informazioni mostrate sul display lcd e con le informazioni gestite ed elaborate attraverso il computer.

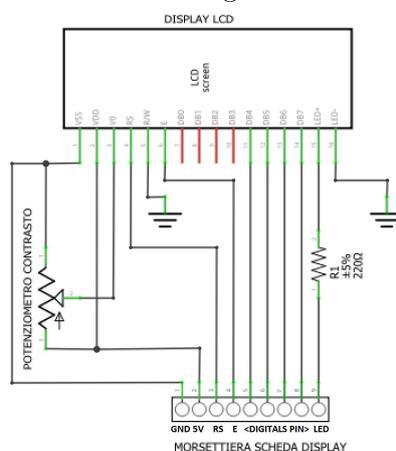


Figura 5.20. Schema Elettrico della Scheda Display.

Nella pagina successiva, la Figura 5.21 rappresenta lo schema complessivo dei collegamenti tra i vari componenti ed il microcontrollore Arduino. Sono messi in evidenza i singoli circuiti destinati alla misurazione di specifiche grandezze.

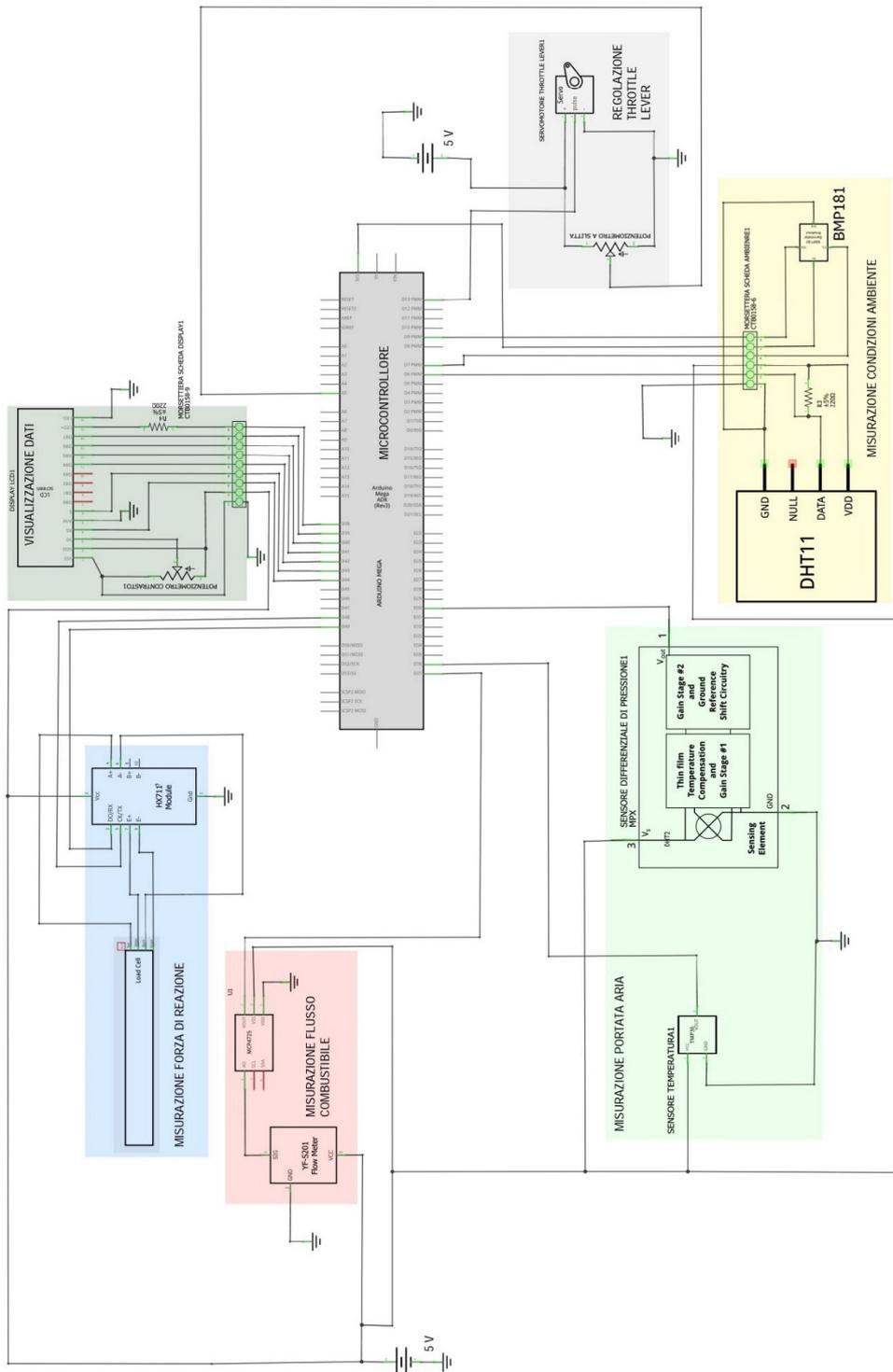


Figura 5.21. Schema di Tutte le Connessioni con il Microcontrollore.

Capitolo 6

Integrazione dei Sistemi del Banco di Prova

L'insieme di tutti i sistemi deve necessariamente interfacciarsi con la struttura, con il motore e con i vincoli operativi di ogni singolo componente. È quindi utile rappresentare schematicamente in che modo i vari componenti si interfacciano tra loro, ed in particolare con il motore.

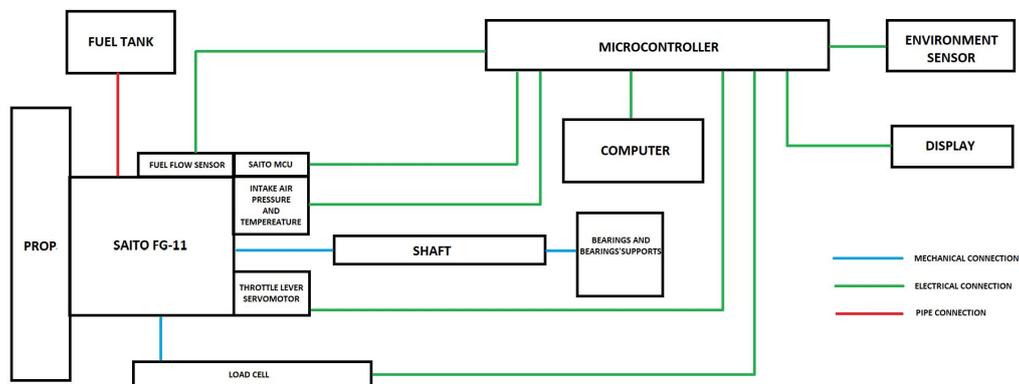


Figura 6.1. Diagramma a Blocchi dei Collegamenti dei Componenti.

Il motore è fissato al proprio supporto, tramite il quale, attraverso una piastra intermedia, si esegue il collegamento con gli organi rotanti del sistema di misurazione della coppia. Attraverso un condotto si predispone l'alimentazione del combustibile che fluisce dal serbatoio verso il motore. La fonte di carburante deve essere posizionata ad una quota maggiore del motore per poterne sfruttare la caduta. Per questo motivo si prevede di

posizionare il serbatoio nel ripiano superiore della struttura. Alcuni sensori saranno connessi direttamente al motore tramite articolazioni, come ad esempio il servomotore della throttle lever, mentre altri saranno posizionati nel condotto di alimentazione e aspirazione. La posizione e le soluzioni di collegamento dei vari sensori, direttamente o indirettamente operanti sul motore, devono essere studiate affinché ci sia la minima interferenza e resistenza alla rotazione.

In merito alla cella di carico, si vuole avere la possibilità di poterla spostare facendola scorrere su delle guide di fissaggio. Questo è necessario per poter variare il braccio di misurazione della forza di reazione, unitamente al leveraggio di applicazione di tale forza che, come visto in precedenza, permette la regolazione della propria lunghezza.

Facendo una panoramica sulle modalità d'installazione e collocazioni previste per i vari dispositivi, avremo che il servomotore, posizionato in prossimità della throttle lever, si interfaccia con quest'ultima attraverso una piccola asta. Il sensore del flusso di combustibile si integra nel condotto di alimentazione. I sensori di pressione e temperatura dell'aria all'aspirazione si posizionano in prossimità del foro di aspirazione presente nel carburatore del motore. In questo caso è necessario valutare la creazione di un condotto esterno di aspirazione. L'elica è fissata all'albero motore per mezzo di un'ogiva. Il microcontrollore, il display, il potenziometro a slitta e la scheda ambiente saranno posizionati nel ripiano superiore della struttura, insieme al serbatoio, affinché siano soggetti a meno vibrazioni possibili.

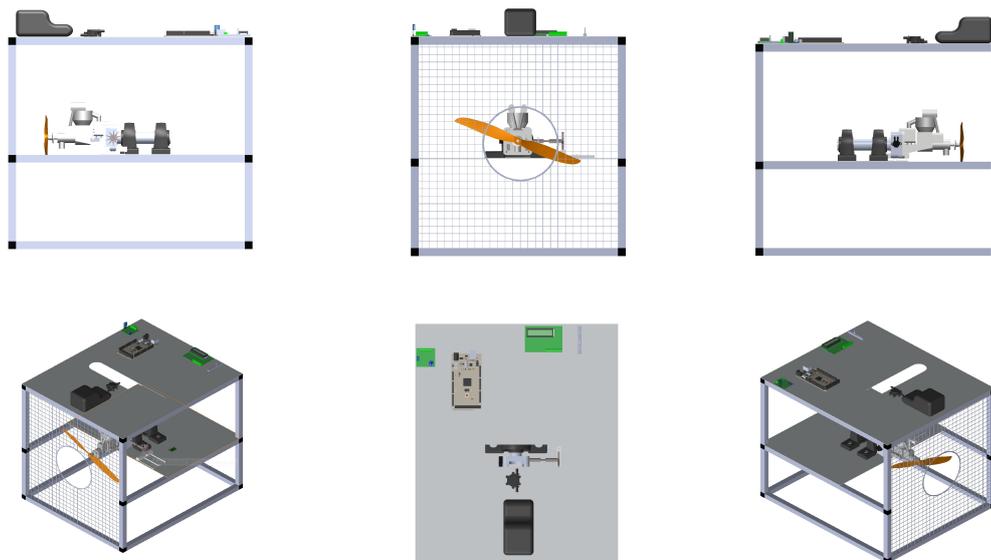


Figura 6.2. Rappresentazione CAD di una Possibile Soluzione di Montaggio del Banco di Prova.

Capitolo 7

Descrizione e Fasi del Processo di Misurazione

In questo capitolo si vogliono esporre le azioni che si dovrebbero eseguire per ottenere le misurazioni dal banco di prova considerate le soluzioni di progetto. La preparazione del banco di prova prevede in primis la verifica di tutte le connessioni e ispezioni sullo stato del motore ed i suoi componenti. Una volta alimentato il microcontrollore e i vari componenti elettrici, è possibile avviare una comunicazione seriale con il computer. In questa fase il microcontrollore è programmato per instradare le comunicazioni con i vari sensori e verificarne la riuscita. Nel monitor seriale saranno mostrate a video tutte le informazioni relative allo stato delle connessioni, avvisando con degli errori eventuale mancate comunicazioni con tutti i componenti del sistema. Ricordando che la cella di carico rapporta le misure ottenute rispetto ad un parametro di calibrazione, è opportuno valutarne il valore prima di ogni misurazione utilizzando un opportuno programma di calibrazione. A questo punto il microcontrollore è pronto per ricevere i dati dai vari sensori. La predisposizione del motore prevede l'installazione dell'elica e la preparazione del carburante rispettando il rapporto di diluizione della miscela tra benzina ed olio. Operando sul potenziometro a slitta, si verifica che la throttle lever abbia libertà di movimento variando tra la posizione di chiusura e apertura massima della valvola. Quindi, portando la throttle lever al minimo, si collega la linea di alimentazione del combustibile del serbatoio al carburatore assicurandosi che non vi siano perdite. Alimentando la scheda di controllo del motore si attiva il sistema di accensione. L'avvio del motore lo si esegue manualmente attraverso un motorino elettrico che porta a far ruotare l'elica fornendo una coppia all'ogiva. Una volta che il motore è in funzione si interviene perfezionando il rapporto tra aria e combustibile. A questo punto il sistema è pronto per la misurazione.

I dati ricavati dal sistema vengono elaborati dal microcontrollore per fornire le informazioni più importanti sul funzionamento del sistema e mostrarle sul display lcd. Attraverso la comunicazione seriale con il computer è possibile invece avere una panoramica totale del sistema. I dati in ingresso possono essere gestiti in diversi modi a seconda dei risultati che si vogliono ottenere. Uno dei possibili obiettivi è quello di ottenere le curve di funzionamento del motore o le curve di caratterizzazione dell'elica. Le varie grandezze

potrebbero essere mostrate in funzione del tempo, ad esempio sfruttando plotter seriale del software di gestione dell'Arduino, oppure utilizzare dei software di calcolo per sfruttare il salvataggio dei dati in dei vettori e per poi proseguire con la fase di post-processing.

L'analisi dei dati e la valutazione delle curve deve necessariamente tenere conto dei transitori di funzionamento del motore. Per dei risultati accurati si dovrebbe anche tenere in considerazione del tempo necessario da parte del microcontrollore per ottenere ed elaborare i dati ed eseguire le istruzioni riportate sul codice del programma.

Capitolo 8

Conclusioni

La progettazione del banco di prova ha portato alla definizione di un sistema capace di misurare tutti i parametri utili alla valutazione delle prestazioni di un micromotore a combustione interna. I risultati che si possono ottenere sperimentando il funzionamento del banco possono essere utilizzati per la rappresentazione delle curve caratteristiche che descrivono il funzionamento del motore in tutte le sue fasi operative. Allo stesso tempo, i dati possono essere elaborati per caratterizzare il funzionamento delle eliche con le relative curve. Le scelte di progetto sono ricadute in soluzioni che prediligono la semplicità del sistema e la compatibilità futura con altri propulsori simili al Saito FG-11, nonché lasciare spazio a futuri sviluppi e installazioni di ulteriori sistemi.

Tra i futuri sviluppi si segnala la possibilità di implementare un sistema che permetta la variazione delle condizioni del flusso di aria al condotto di aspirazione, in modo da simulare il funzionamento del motore in diverse condizioni climatiche e di quota. Questo potrebbe essere ottenuto sfruttando l'effetto Venturi tramite l'installazione di un opportuno condotto in prossimità del foro di aspirazione, oppure cercando di variare la pressione all'aspirazione attraverso la laminazione del condotto ottenuta per mezzo di una valvola. Dal punto di vista della misurazione si potrebbe implementare un sistema di misurazione della trazione generata dall'elica, prevedendo l'installazione di alcune guide scorrevoli e di un dinamometro. L'intero sistema composto da motore-albero-cuscinetti risulterebbe libero di muoversi lungo l'asse di rotazione dell'elica, ma rimarrebbe vincolato alla struttura tramite un dinamometro, sensitivo della forza di trazione generata dall'accoppiamento tra il propulsore e l'elica. Il sistema di gestione del motore potrebbe essere sviluppato in modo tale da permettere non soltanto il settaggio della potenza tramite il potenziometro a slitta ma anche permettendo un controllo automatizzato del funzionamento del motore, come ad esempio la possibilità mantenere costante il numero di giri mentre si variano le condizioni di funzionamento del propulsore. Infine, il progetto della struttura del banco di prova permette la predisposizione per l'installazione di propulsori con dimensioni maggiori rispetto al Saito FG-11, con la possibilità di imbarcare eliche di diverse dimensioni fino a 19".

Appendice A

Descrizione delle Funzioni di Programmazione

Si riportano in appendice alcuni dettagli sul codice di programmazione di alcuni sensori analizzati e selezionati per l'implementazione sul banco di prova. In particolare, verranno segnalate le funzioni da utilizzare per la gestione dei dispositivi.

La gestione del servomotore è ottenuta sfruttando le funzioni presenti nella libreria "Servo.h". Le funzioni presenti in questa libreria permettono di comandare la rotazione del servomotore semplicemente dichiarando l'angolo di rotazione da far imprimere. La posizione angolare da raggiungere dipende dalla posizione del cursore sulla slitta del potenziometro. La funzione che nel loop si occupa della gestione del controllo della throttle lever può essere definita come `engine_control()`. Le funzioni della libreria disponibili per la gestione del servomotore sono:

- `Servo throttle_lever`, definisce l'istanza chiamata `throttle_lever` che identifica il servomotore;;
- `throttle_lever.attach()`, funzione in cui si definisce il pin di collegamento con il microcontrollore;
- `throttle_lever.write()`, è il comando tramite cui si imposta il valore di rotazione del servo.

La cella di carico comunica con Arduino attraverso il convertitore DAC HX711. È possibile gestire il sensore tramite la libreria "HX711.h" che include le funzioni per impostare la comunicazione e l'acquisizione dei dati. La funzione di calibrazione della cella è programmata in modo da realizzare un processo iterativo che, partendo da un valore di calibrazione arbitrario, fornisce la misura rilevata della massa presente sulla cella. Effettuando questa misura utilizzando una massa nota, si ricava il parametro di calibrazione della cella quando la scheda fornirà il valore corretto. Il valore del parametro di calibrazione deve essere inserito nel codice principale prima dell'avvio delle misurazioni. La funzione di lettura della forza applicata alla cella può essere identificata con `read_load()`. Questa funzione verrà richiamata ciclicamente nel loop ogniqualvolta sarà richiesto il valore di

forza. Le principali funzioni presenti nella libreria HX711.h ed utilizzate per la lettura ed il settaggio sono:

- `scale.begin()`, funzione che avvia la comunicazione con la cella di carico e fornisce un codice di errore in caso di mancata comunicazione;
- `scale.tare()`, azzerà il valore del parametro di calibrazione;
- `scale.set_offset()`, la funzione imposta e memorizza il valore del parametro di calibrazione;
- `scale.get_units()`, è la funzione che da come risultato il valore della lettura rapportato al parametro di calibrazione. A seconda degli input di chiamata il valore di output può essere singolo oppure mediato rispetto a più letture.

Il sensore DHT11 utilizzato per la misura della temperatura e dell'umidità, installato nella scheda ambiente, utilizza la libreria "DHT11.h" e comunica con il microcontrollore attraverso un pin digitale. Per la lettura dei valori di temperatura e di umidità sono necessari circa 250 ms. La funzione richiamata nel loop per la lettura dei dati relativi all'ambiente può essere identificata con `read_environment()`. Le principali funzioni della libreria DHT11.h utilizzate e le definizioni presenti nel codice sono:

- `DHT dht ()`, funzione che inizializza l'oggetto DHT utilizzando i parametri di identificazione dei pin di collegamento con il microcontrollore. ;
- `dht.begin()`, funzione che inizializza il sensore e avvia la comunicazione. ;
- `dht.readHumidity()`, funzione che fornisce il valore di umidità di tipo float.;
- `dht.readTemperature()`, funzione che fornisce il valore di temperatura di tipo float. A seconda degli input passati alla funzione si può cambiare l'unità di misura con la quale il comando restituisce il valore di temperatura.

Sempre posizionato nella scheda ambiente, il sensore BMP180 comunica con il microcontrollore utilizzando il protocollo I2C. La comunicazione avviene attraverso due pin analogici. Le librerie utilizzate per la gestione del sensore sono la "Wire.h", che implementa le funzioni per la comunicazione con protocollo I2C, e la "BMP180", che definisce le funzioni per la gestione del sensore. La funzione da richiamare nel loop per l'acquisizione della pressione atmosferica potrebbe essere `read_pressure()`. Il sensore utilizza il valore della pressione atmosferica standard al livello del mare per ottenere la misura, ma dato che tale valore varia non soltanto in funzione dell'altitudine, per misurazioni più accurate si può agire cambiando il valore della pressione di riferimento andando a modificare la variabile `seaLevelPressure`. Le funzioni utilizzate per il funzionamento del sensore sono:

- `Initialize()`, funzione che inizializza il sensore;
- `IsConnected()`, funzione per la verifica della connessione del sensore;
- `GetUncompensatePressure()`, funzione che acquisisce il valore della pressione non compensato con la temperatura;

- GetPressure(), funzione che acquisisce dal sensore il valore della pressione in Pascal;
- SetResolution(), imposta la risoluzione della misurazione;
- GetErrorText(), fornisce un codice se occorre un errore nella misurazione.

Il display comunica con il microcontrollore attraverso dei pin digitali. La comunicazione può avvenire a 4 bit o 6 bit. Per pilotare il display si utilizza la libreria "LiquidCrystal.h". Le funzioni per il pilotaggio del display sono:

- LiquidCrystal lcd (), funzione che crea l'istanza dell'oggetto LiquidCrystal chiamata lcd in cui vengono specificati i pin di connessione;
- lcd.begin(), funzione con cui si inizializza la comunicazione impostando il numero di righe e di colonne del display lcd, nel nostro caso si utilizza un display 16x2;
- lcd.print(" "), funzione che permette di visualizzare il testo scritto tra gli apici all'interno del richiamo della funzione;
- lcd.setCursor(), funzione che permette di posizionare il cursore nella posizione voluta per la prima lettera del testo.

Per la lettura dei dati relativi ai sensori che comunicano per via analogica, si utilizzano le funzioni proprie del linguaggio C++.