

UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI PADOVA

DIPARTIMENTO DI INGEGNERIA INDUSTRIALE

CORSO DI LAUREA MAGISTRALE IN INGEGNERIA  
MECCANICA

PROGETTAZIONE E SVILUPPO DI UN SISTEMA DIGITALE PER LA  
MISURA DELLA VELOCITÀ E IL CONTROLLO AUTOMATIZZATO DEL  
DISTRIBUTORE DELLE TURBINE FRANCIS

RELATRICE: PROF.SSA. ING. GIOVANNA CAVAZZINI

CORRELATORE: ING. GIACOMO ZANETTI

LAUREANDO: WOLFGANG DANIEL BANGONI

MATRICOLA: 2076573

ANNO ACCADEMICO 2023-2024



# Indice

<b>Introduzione</b>	<b>XI</b>
<b>1 Turbine idrauliche</b>	<b>1</b>
1.1 Impianti Idroelettrici . . . . .	1
1.1.1 Concetti fondamentali . . . . .	1
1.1.2 Salto idrico . . . . .	3
1.1.3 Classificazione turbine idrauliche . . . . .	5
1.2 Turbine Pelton . . . . .	7
1.2.1 Principio di funzionamento . . . . .	9
1.2.2 Regolazione della potenza . . . . .	9
1.3 Turbine Francis . . . . .	10
1.3.1 Descrizione e principio di funzionamento . . . . .	11
1.3.2 Regolazione della potenza . . . . .	14
1.3.3 Salto idrico . . . . .	15
1.3.4 Tubo di scarico . . . . .	17
1.3.5 Curve caratteristiche . . . . .	19
<b>2 Tecnologie e metodi</b>	<b>23</b>
2.1 Componenti elettronici . . . . .	23
2.1.1 Fototransistor . . . . .	23
2.1.2 LED ( <i>Light Emitting Diode</i> ) . . . . .	26
2.1.3 Principio di funzionamento dei LED . . . . .	26
2.2 Sensori ottici rotativi di posizione . . . . .	27
2.2.1 Encoder Incrementali . . . . .	28
2.2.2 Encoder Assoluti . . . . .	32

2.2.3	Confronto tra Encoder assoluti e Incrementali . . . . .	35
2.3	Arduino . . . . .	35
2.3.1	Brevi cenni storici . . . . .	35
2.3.2	Architettura Scheda Arduino . . . . .	35
2.3.3	Arduino IDE ( <i>Integrated Development Environment</i> ) . . . . .	37
2.3.4	Struttura di uno <i>sketch</i> . . . . .	37
2.3.5	Arduino Nano . . . . .	38
<b>3</b>	<b>Encoder Incrementale Sperimentale</b>	<b>41</b>
3.1	Progettazione e Sviluppo del prototipo . . . . .	41
3.1.1	Analisi del problema . . . . .	41
3.1.2	Identificazione dei requisiti funzionali . . . . .	42
3.1.3	Scelta dei componenti elettronici . . . . .	42
3.1.4	Costruzione del primo prototipo . . . . .	43
3.1.5	Prove e risultati prototipo . . . . .	44
3.2	Progettazione CAD-3D del sistema finale . . . . .	47
3.2.1	Transizione dal prototipo al sistema finale . . . . .	48
3.2.2	Moduli di interfaccia ottici . . . . .	48
3.2.3	Corona modulare quadrante . . . . .	50
3.2.4	Unità di controllo integrata . . . . .	51
3.3	Stampaggio dei Componenti . . . . .	53
3.3.1	Preparazione alla produzione . . . . .	53
3.4	Sviluppo dello Script Arduino . . . . .	55
3.4.1	Conteggio del numero di tacche . . . . .	56
3.4.2	Calcolo della velocità in RPM . . . . .	57
3.4.3	Rilevazione del verso di rotazione . . . . .	58
3.5	Test Encoder incrementale . . . . .	59
3.5.1	Prove disco 40 tacche . . . . .	60
3.5.2	Prove disco 55 tacche . . . . .	60
3.5.3	Considerazioni finali . . . . .	60
<b>4</b>	<b>Encoder assoluto sperimentale</b>	<b>63</b>
4.1	Progettazione e sviluppo del prototipo . . . . .	63

4.1.1	Analisi del sistema di lettura analogico . . . . .	63
4.1.2	Sviluppo del prototipo . . . . .	64
4.1.3	Prove e risultati del prototipo . . . . .	66
4.2	Progettazione CAD-3D sistema finale . . . . .	67
4.2.1	Transizione dal prototipo al prodotto finale . . . . .	67
4.2.2	Placca in codifica di Gray 8 bit . . . . .	67
4.2.3	Schema elettronico . . . . .	68
4.2.4	Modulo di interfaccia ottico . . . . .	69
4.3	Sviluppo dello script Arduino . . . . .	71
4.4	Prove in-door encoder assoluto 8bit . . . . .	73
4.4.1	Stampaggio modulo di interfaccia ottica . . . . .	73
4.4.2	Montaggio sistema di verifica . . . . .	73
4.4.3	Realizzazione placca di prova codificata . . . . .	74
4.4.4	Prove e risultati . . . . .	75
<b>5</b>	<b>Sistema di controllo automatico del distributore</b>	<b>79</b>
5.1	Analisi del sistema di regolazione manuale . . . . .	79
5.1.1	Principio di funzionamento . . . . .	79
5.1.2	Modellazione del sistema iniziale . . . . .	80
5.2	Progettazione del sistema di controllo automatico . . . . .	82
5.2.1	Dimensionamento del sistema di Azionamento . . . . .	83
5.2.2	Struttura di supporto . . . . .	87
5.2.3	Sistema di sicurezza dell'impianto automatico . . . . .	89
5.2.4	Scelta dei componenti dell'Azionamento . . . . .	90
5.2.5	Logica di controllo ad anello chiuso . . . . .	91
	<b>Conclusioni</b>	<b>95</b>
	<b>Bibliografia</b>	<b>99</b>
	<b>Bibliografia delle immagini</b>	<b>101</b>
	<b>Lista dei Simboli</b>	<b>107</b>



# Introduzione

La presente tesi sperimentale si propone di affrontare il tema della strumentazione digitale e del controllo delle turbine idrauliche. Esse sono fondamentali per la produzione di energia rinnovabile, convertono l'energia cinetica dell'acqua in energia meccanica e successivamente in energia elettrica. La comprensione del loro funzionamento in condizioni variabili è cruciale per ottimizzare le prestazioni e garantire la sicurezza operativa. Le prove in transitorio, che simulano delle variazioni di carico e condizioni operative reali, sono essenziali per valutare la risposta dinamica delle turbine. Queste analisi consentono di migliorare l'efficienza, ridurre i rischi di guasti e prolungare la vita utile delle apparecchiature, contribuendo così a una gestione più sostenibile delle risorse energetiche.

L'obiettivo di questa tesi consiste nell'equipaggiare le turbine idrauliche con un sistema di misurazione e controllo dei parametri fondamentali, come la velocità di rotazione e l'apertura angolare delle palette del distributore, per permettere prove in condizioni transitorie di funzionamento. È stato sviluppato un sistema di acquisizione della velocità di rotazione dell'albero della turbina, un sistema di acquisizione della posizione angolare del distributore ed è stato inoltre progettato e interamente dimensionato un sistema di controllo automatizzato del distributore della turbina Francis.

L'approccio che è stato seguito nello sviluppo dei due encoder è di tipo iterativo e sperimentale, il quale comprende le fasi di concettualizzazione, prototipazione, prove sul prototipo e sviluppo del prodotto finale. Nello sviluppo del sistema di azionamento è stato invece applicato un approccio più analitico e ingegneristico.

L'elaborato è stato suddiviso in 5 capitoli. Nel capitolo 1 viene contestualizzato l'argomento delle turbine idrauliche in generale, spiegandone le basi teoriche

e le varie tipologie e prestando particolare attenzione alle turbine Francis sulle quali si è maggiormente focalizzata la tesi. Nel capitolo 2 vengono presentate ed esaminate le tecnologie e i metodi che sono stati fondamentali per lo sviluppo del progetto. Nel capitolo 3 e nel capitolo 4 si affronta rispettivamente il processo di progettazione, prototipazione e sviluppo dell'encoder incrementale sperimentale e dell'encoder assoluto sperimentale. Infine, nel capitolo 5 è stato descritto il processo di progettazione e dimensionamento completo del sistema di azionamento automatico per il controllo del distributore delle turbine Francis.



# Capitolo 1

## Turbine idrauliche

### 1.1 Impianti Idroelettrici

Gli impianti idroelettrici sono dei complessi sistemi progettati per la produzione di energia rinnovabile che convertono l'energia potenziale idrica in lavoro meccanico.

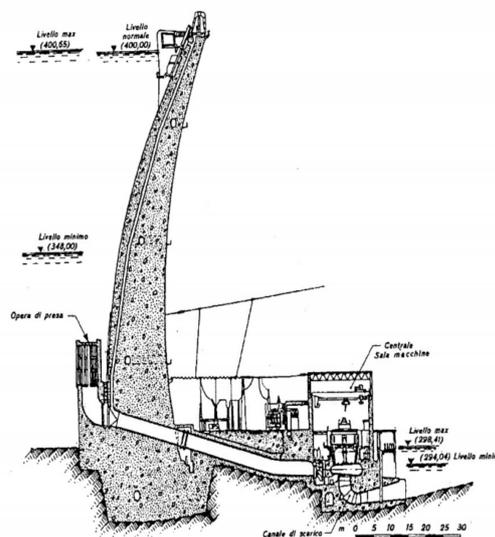


Figura 1.1: Schema impianto idroelettrico [1]

#### 1.1.1 Concetti fondamentali

Nella Figura 1.3 troviamo la schematizzazione di un impianto, il quale si compone di un bacino di raccolta insieme alle opere di sbarramento, gli sfioratori e le opere

di presa, la condotta forzata, la valvola di apertura e chiusura posta all'ingresso della turbina e il tubo di scarico, il quale collega il canale di scarico alla sezione terminale.

L'ubicazione di tutta la centrale, costituita da generatori e turbine, può variare in base alle necessità e si può trovare alla base della diga oppure più a valle di essa se si è ritenuto necessario aumentare il valore del salto idrico utile.

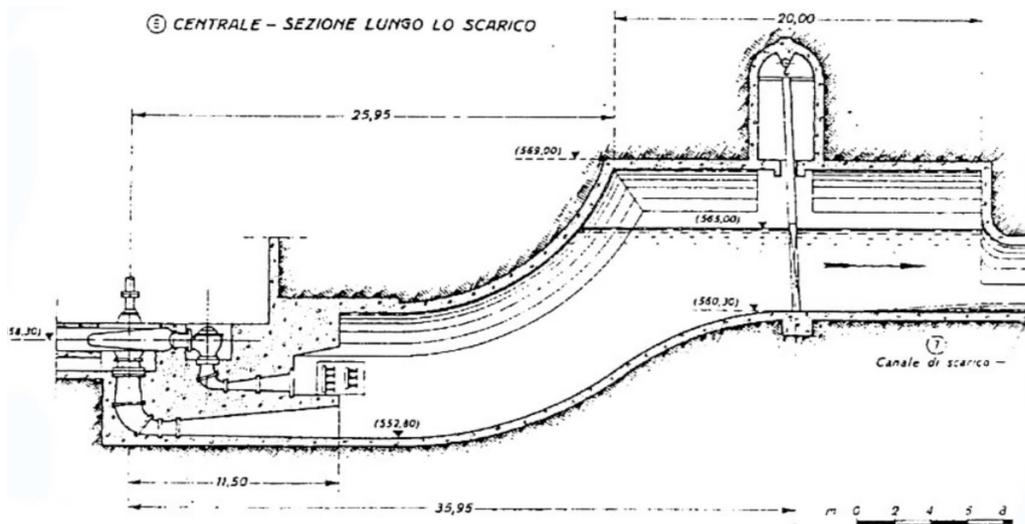


Figura 1.2: Condotta di scarico [1]

Nella figura 1.3 è possibile notare lo scarico sincrono che viene collegato alla camera della turbina, il suo scopo è quello di evitare i colpi d'ariete in corrispondenza di bruschi cali di portata.

Il livello del bacino idrico, e dunque la quota del pelo libero, varia in base agli affluenti che lo alimentano e alla portata sfruttata dalla turbina. Quando la richiesta della turbina è inferiore alla portata degli affluenti, allora il livello del bacino idrico sale finché non eguaglia la quota degli sfioratori che hanno lo scopo di evitare un innalzamento eccessivo del livello dell'acqua nel bacino.

Il livello del canale di scarico non è costante nel tempo, ma bensì varia in base alla portata che lo attraversa. Si definisce quota geodetica  $h_g$  il dislivello idrico tra il bacino a monte della centrale e quello di scarico. La quota del bacino di scarico possiede la maggior influenza sulla quota geodetica in quanto è soggetto a

variazioni di quota più significative rispetto al bacino a monte, difatti il raggiungimento della quota massima per il bacino di scarico implica il raggiungimento della minima quota geodetica.

Nel diagramma 1.3 sono stati riportati i valori delle quote dei bacini e della portata registrati in un lasso temporale di un anno, strettamente legati alle caratteristiche idrologiche del sito in oggetto. Questo diagramma permette il dimensionamento dell'impianto mediante la determinazione dei parametri di portata e caduta idrica.

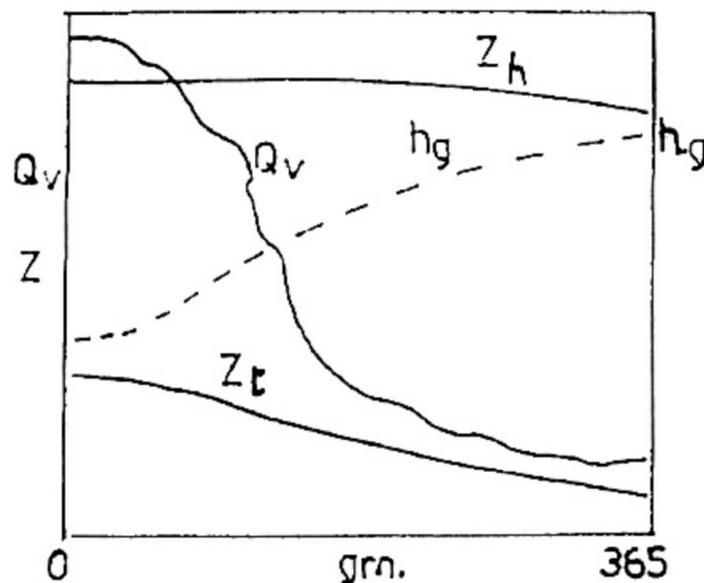


Figura 1.3: Diagramma di dimensionamento [1]

In base al sito, le portate disponibili possono essere anche molto alte; una singola macchina può raggiungere anche valori di potenza intorno ai 350 MW, nel caso in cui la portata disponibile superi la portata massima della turbina si effettua un'operazione di parallelizzazione delle turbine. [1]

### 1.1.2 Salto idrico

Definiamo il salto idrico disponibile in turbina  $h$  partendo dalla quota geodetica e sottraendo le perdite localizzate nell'imbocco, nel tubo di scarico e le perdite distribuite nella condotta forzata.

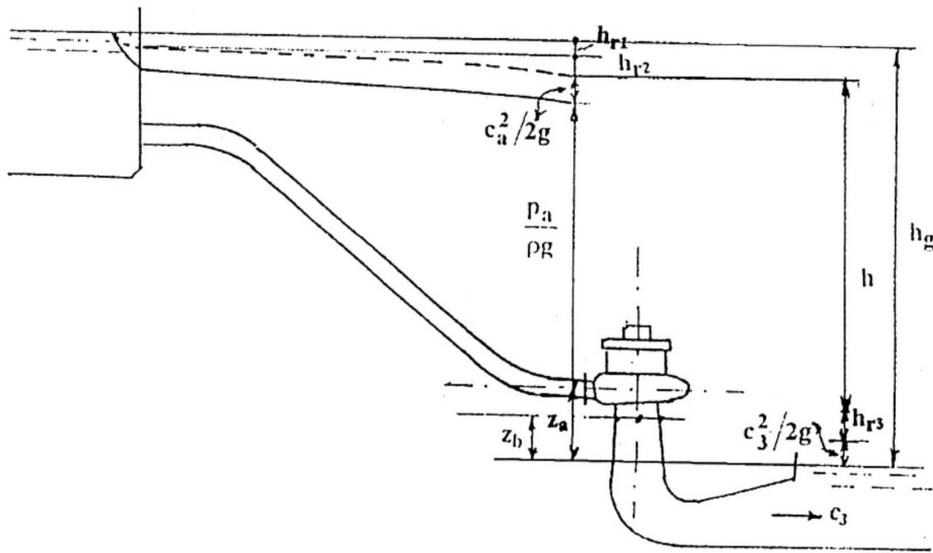


Figura 1.4:  $h_g$  quota geodetica,  $h$  salto idrico utile,  $h_{r1}$  perdita all'imbocco,  $h_{r2}$  perdita nella condotta forzata,  $h_{r3}$  perdita nel tubo di scarico [1]

Il salto idrico è dunque definito dalla formula 1.1.

$$h = h_g - \left( h_{r1} + h_{r2} + h_{r3} + \frac{c_3^2}{2g} \right) \quad (1.1)$$

Il salto idrico  $h$  dovrà eguagliare l'altezza elaborata dalla macchina quando quest'ultima si troverà nelle condizioni nominali di funzionamento, ma tale valore è pari alla differenza di energia specifica totale [1.2] misurata tra la sezione d'ingresso e di uscita.

$$h = h_a^0 - h_b^0 = \left( \frac{p_a}{\rho g} + \frac{c_a^2}{2g} + z_a \right) - \left( \frac{p_b}{\rho g} + \frac{c_b^2}{2g} + z_b \right) \quad (1.2)$$

Nell'equazione precedente,  $\rho$  rappresenta la densità del fluido,  $g$  la costante di gravità,  $p_a$  rappresenta la pressione all'ingresso mentre  $p_b$  indica la pressione all'uscita della turbina. I termini  $z_a$  e  $z_b$  corrispondono rispettivamente alle altezze all'ingresso e all'uscita. Infine,  $c_a$  e  $c_b$  rappresentano le velocità assolute in corrispondenza dei punti considerati.

Il rendimento di una turbina idraulica è definito come nell'equazione che segue dove al suo interno, oltre ai parametri già definiti in precedenza, è possibile identificare anche la portata volumetrica  $Q_v$  e la potenza misurata al giunto  $P_a$ . [1]

$$\eta = \frac{P_a}{\rho Q_v g h} \quad (1.3)$$

### 1.1.3 Classificazione turbine idrauliche

Le turbine idrauliche sono divise in diverse categorie, identificate dal numero tipico di macchina  $K$  [1.4] in base alle indicazioni contenute sulla tabella 1.5. Nella tabella il numero di flusso  $\phi$  ed il numero di pressione  $\psi$  sono stati calcolati in riferimento al diametro massimo della girante,  $\omega$  rappresenta la velocità di rotazione.

$$K = \omega \frac{Q_v^{0.5}}{(g h)^{0.75}} \quad (1.4)$$

	K	$\psi$	$\phi$
<b>Con grado di reazione nullo</b>			
Pelton a un getto	$\leq 0,16$	$\sim 2,2$	-
Pelton a più getti	$0,16 \div 0,35$	$\sim 2,2$	
<b>A reazione</b>			
<b>A flusso centripeto</b>			
Francis lente	$0,35 \div 0,70$	$1,20 \div 0,90$	$0,14 \div 0,22$
Francis medie	$0,70 \div 1,5$	$0,90 \div 0,6$	$0,22 \div 0,28$
Francis veloci	$1,5 \div 2,5$	$0,6 \div 0,4$	$0,28 \div 0,32$
<b>A flusso assiale</b>			
Eliche, Kaplan	$> 2,5$	$0,12 \div 0,25$	$0,25 \div 0,35$

Figura 1.5: Suddivisione in classi delle turbine, ricostruzione tabella da [1]

I rendimenti ottimali ottenibili con le diverse categorie di turbina sono evidenziati in funzione di K nel diagramma 1.6.

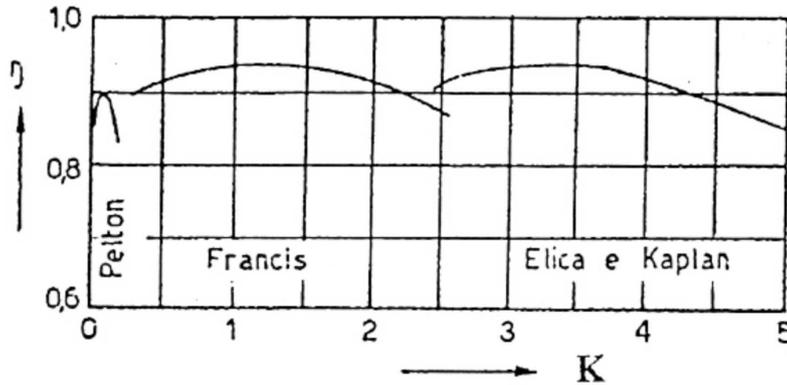


Figura 1.6: Rendimenti ottimali delle diverse tipologie di turbina [1]

Dunque, per individuare la turbina ottimale compatibile con i valori di  $h$  e  $Q_v$  di progetto, è necessario partire dal numero di giri infatti esso è strettamente legato alla velocità di rotazione della macchina condotta; quest'ultima, in un accoppiamento diretto con un motore sincrono, è proprio pari alla velocità di sincronismo della macchina. Definito  $n_p$  numero di poli della macchina e  $f$  la frequenza,  $n_s$  la velocità di sincronismo del motore, la velocità di rotazione è definita dall'equazione:

$$n = n_s = \frac{120 f}{n_p} \quad [\text{giri/min}] \quad (1.5)$$

Citando Giuseppe Ventrone [1] "Procedendo per tentativi, si fissa la velocità di rotazione, e calcolato il numero tipico di macchina K, mediante la tabella vista poc'anzi si risale ai coefficienti  $\psi$  e  $\phi$ , i quali forniscono la velocità periferica  $u_1$ , e quindi il diametro  $D_1$ , e rispettivamente la larghezza  $b_1$  della girante. Se si ritiene che  $u_1$  sia troppo elevato e tale da pregiudicare la resistenza meccanica della girante, o se le dimensioni appaiono inaccettabili, si riproverà con una diversa velocità di rotazione".

Osservando i parametri  $Q_v$  e  $h$ , le alte portate possono essere elaborate solo a bassi giri mentre le portate basse sono associate a bassi valori della velocità di

rotazione. Per quanto riguarda le cadute invece, si denota come le cadute idriche delle Francis abbiano un valore non superiore ai 600 [m] mentre per valori superiori è necessario passare alle turbine Pelton le quali superano anche i 1000 [m].

Infine è possibile definire la potenza  $P_a$ :

$$P_a = \frac{\rho Q_v g h \eta}{10^3} \quad [\text{kW}] \quad (1.6)$$

Per gestire una variazione della richiesta di energia, otterremo un aumento della velocità di rotazione che però comporterebbe una variazione della frequenza, parametro fortemente limitato dalle necessità della rete. Dunque, essendo circa costante il salto idrico  $h$ , l'unico modo per regolare il valore della potenza è quello di intervenire sulla  $Q_v$ . [1]

## 1.2 Turbine Pelton

La turbina Pelton [1.10] è una macchina idraulica che può lavorare con salti idrici molto alti (anche maggiori di 1000 [m]) e con velocità di rotazione altrettanto alte; dunque, di conseguenza, elabora portate relativamente basse.

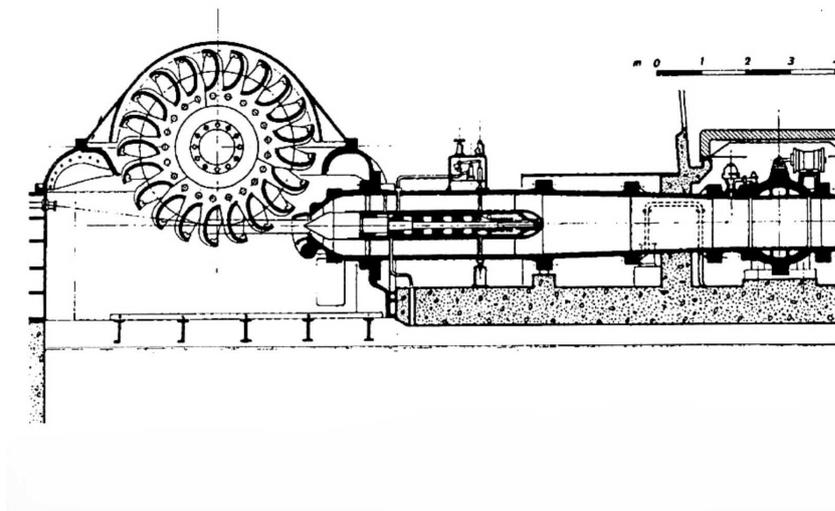


Figura 1.7: Turbina Pelton con introduttore rettilineo [1]

Essa è costituita da una corona di pale a doppio cucchiaio, le quali possono essere imbullonate al disco portante [3.8] oppure fuse con esso, e da uno o più ugelli collocati nella parte finale della condotta di adduzione.

La pala a doppio cucchiaio possiede una geometria molto particolare e accuratamente studiata. Al centro di vi è un tagliente rispetto al quale la pala risulta specchiata in due metà identiche che presentano una forma a cucchiaio [1.8], proprio tale forma permette un corretto deflusso della porzione di getto.

Il tagliente risulta essere inclinato perchè si vuole che il contatto con il getto avvenga in una posizione più ortogonale possibile. La pala viene lavorata sia internamente che esternamente, il suo interno viene lucidato per ridurre al minimo le perdite fluidodinamiche mentre il dorso viene modellato in modo da ottimizzare la penetrazione della pala nel getto.

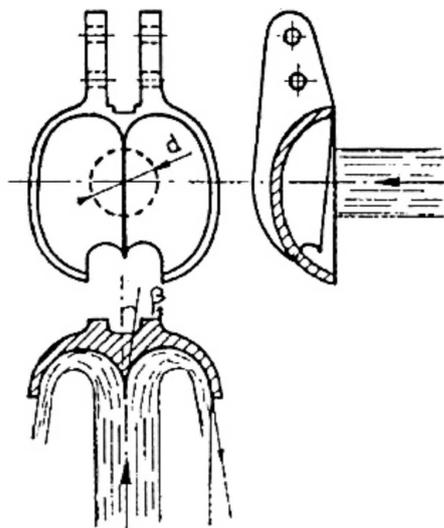


Figura 1.8: Interazione getto-pala ([1])

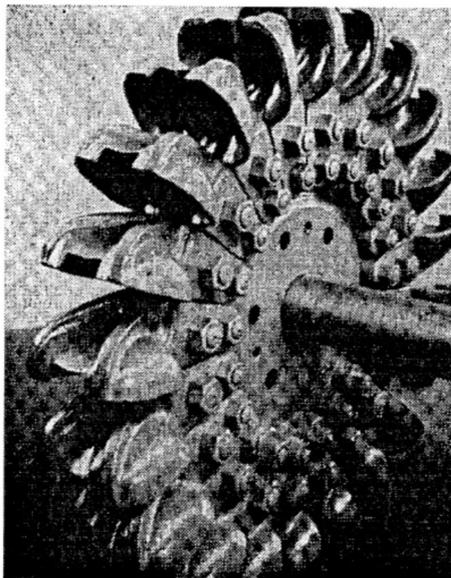


Figura 1.9: Ruota Pelton([1])

Per quanto riguarda l'asse di rotazione della ruota, è possibile trovarla in due configurazioni: ad asse orizzontale o verticale in riferimento al terreno. Essa viene collegata mediante una flangia al motore elettrico, il quale è mantenuto in posizione da un sistema di ancoraggio. [1]

### 1.2.1 Principio di funzionamento

L'acqua viene convogliata nell'introduttore all'interno del quale avviene la conversione tra l'energia di pressione del fluido in energia cinetica.

Il getto uscente dal bocchello si trova a pressione ambiente e procede in direzione tangenziale alla circonferenza media della corona di pale, a questo punto le pale intercettano il getto dividendolo in due e invertendone quasi totalmente la direzione di circa  $170^\circ$ . Dunque, si ottiene una coppia motrice  $M$  a causa della variazione del momento della quantità di moto a cui è soggetto il fluido nella sua interazione con le pale della girante.

$$M = \rho Q_v \Delta(r C_u) \quad [\text{Nm}] \quad (1.7)$$

Dalla 1.7 è possibile ricavare la potenza meccanica trasmessa all'albero:

$$P = M \omega \quad [\text{W}] \quad (1.8)$$

[1]

### 1.2.2 Regolazione della potenza

Come è stato già discusso in precedenza, per controllare la potenza, si agisce sulla portata. Nelle turbine Pelton si va ad agire sul diametro del getto tramite un otturatore costituito dalla Spina Doble [Figura 1.10]. La spina si muove assialmente lungo la direzione del getto, quando arriva in battuta chiude completamente il bocchello riducendo a zero la portata di fluido. Essa è controllata dal regolatore di velocità e ha lo scopo di variare la portata in base alla potenza richiesta, mantenendo la velocità del getto pressochè costante.

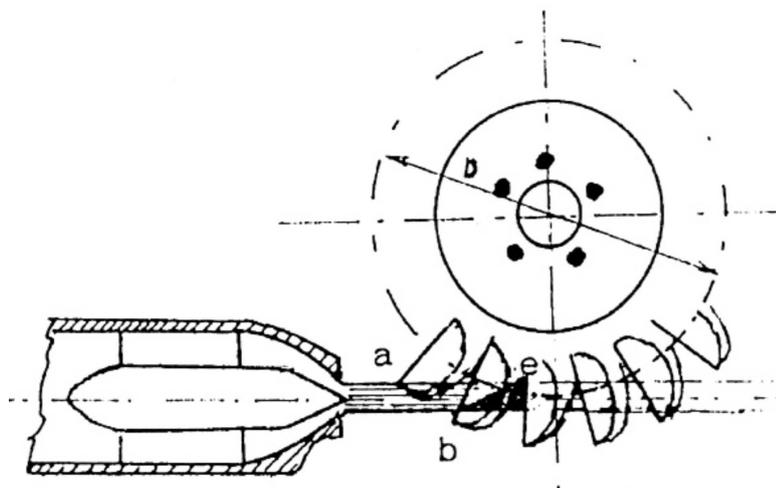


Figura 1.10: Bocchello + Spina doble [1]

Quando la portata viene improvvisamente ridotta in seguito a una variazione del carico, si possono generare pericolose sovrappressioni che dipendono dalla lunghezza della condotta forzata e dal valore del salto idrico  $h$ . Per ridurre gli effetti del colpo d'ariete che si verifica a seguito delle sovrappressioni, interviene il tegolo deviatore che viene azionato dal regolatore di giri e impedisce al getto di raggiungere le pale, deviando quest'ultimo allo scarico in maniera parziale o totale. Infine, per poter frenare la ruota quando la portata è ormai nulla, si interviene con un getto che impatta nel dorso delle pale. [1]

### 1.3 Turbine Francis

Le turbine Francis sono macchine idrauliche a reazione che convertono l'energia potenziale e cinetica dell'acqua in energia meccanica. Esse operano con salti idrici e velocità di rotazione inferiori rispetto alle turbine Pelton appena descritte però possono elaborare portate superiori rispetto ad esse.

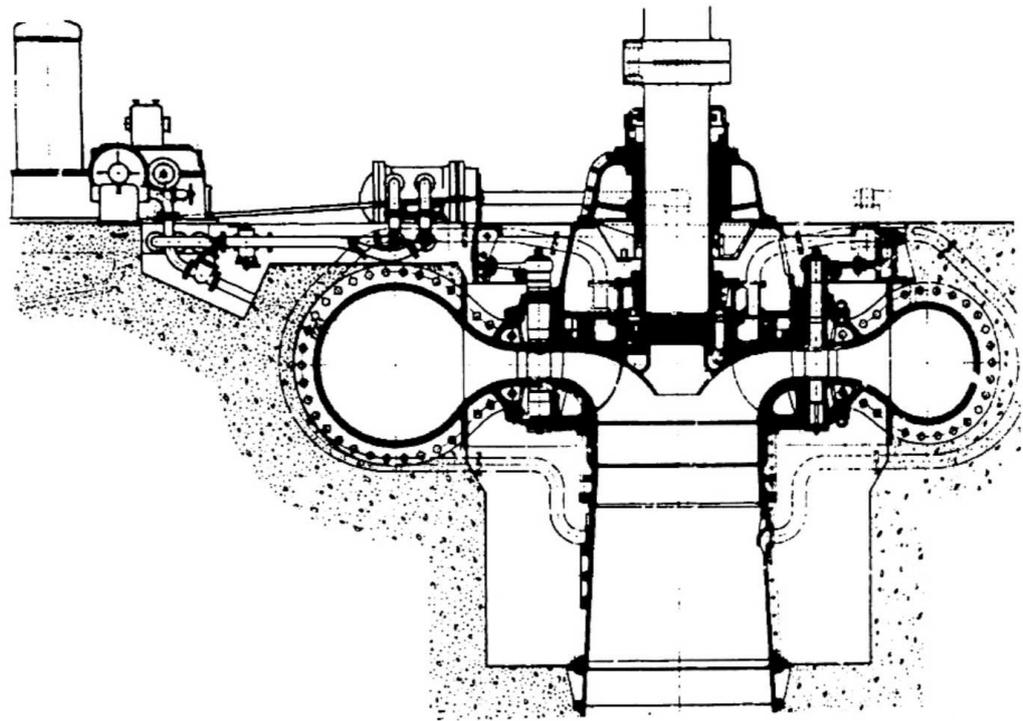


Figura 1.11: Turbina Francis [1]

### 1.3.1 Descrizione e principio di funzionamento

Nella figura 1.11 raffigurante una sezione della turbina Francis, si possono osservare le sue componenti principali: una camera a spirale insieme alle sue pale di irrigidimento, una corona di pale direttrici, la girante e infine il tubo di scarico.

La girante della turbina è composta da un mozzo centrale montato sull'albero della turbina, e da due corone: una interna solidale al mozzo ed una esterna, collegate da una serie di palette curve disposte radialmente come in figura.



Figura 1.12: Girante Turbina Francis, CAD-3D Università degli studi di Padova.

La voluta ha una particolare forma a spirale che avvolge totalmente la girante e grazie alla sua forma permette di distribuire il flusso d'acqua in modo uniforme su tutto il perimetro della girante.

Le pale direttrici ricoprono un ruolo molto importante, la loro geometria è stata progettata per consentire l'ingresso del fluido all'interno della girante con una componente tangenziale proporzionale all'energia meccanica che deve essere convertita in lavoro meccanico.

Il fluido arriva nella voluta tramite la condotta forzata, dopodichè esso viene convogliato attraverso una corona di pale direttrici dove l'angolo di incidenza  $\alpha_1$  viene regolato per ottimizzare l'efficienza della turbina, come verrà descritto in seguito. Dal distributore il fluido entra nella girante al cui interno il fluido rallenta e subisce un calo di pressione trasferendo una parte del momento della quantità di moto dal fluido alla macchina prima di essere scaricato attraverso il tubo di scarico.

Le dimensioni della turbina dipendono dalla portata che deve essere elaborata, aumentando con essa. Fissato il salto idrico "h" e il numero di giri "n", si avrà che il diametro della girante aumenta all'aumentare del numero di flusso

ed al diminuire del numero di pressione, come si evince dal diagramma 1.13  $\psi$  diminuisce mentre  $\phi$  cresce all'aumentare del numero tipico di macchina.

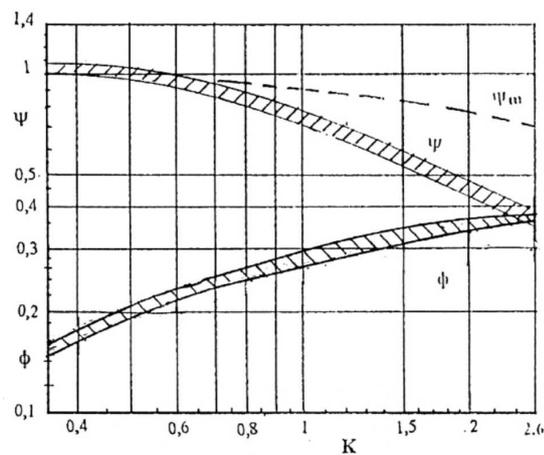


Figura 1.13: Numeri di pressione e di flusso in funzione di K. [1]

Si evince dalla figura 1.14 come all'aumentare di K aumentino la larghezza della girante e il diametro massimo  $D_{2e}$  della sezione di scarico.  $D_{2e}$  dipende dal rapporto  $c_{x_2}/u_{2e}$ , dove  $c_{x_2}$  è la velocità assiale del flusso all'uscita della girante e  $u_{2e}$  è la velocità periferica alla sezione esterna della girante per cui si avrà che, all'aumentare di K e mantenendo costante il rapporto  $c_{x_2}/u_{2e}$ , aumenteranno le dimensioni di  $D_{2e}$  e  $b_1$ . Dunque, la girante tenderà a mutare il proprio assetto passando gradualmente da uno radiale ad uno assiale. [1]

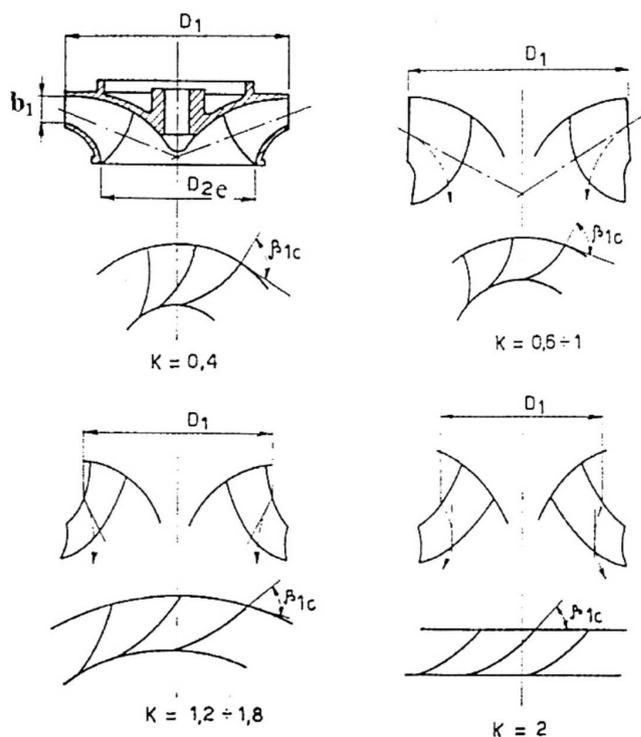


Figura 1.14: Variazione della geometria al variare di  $K$ . [1]

### 1.3.2 Regolazione della potenza

La regolazione della portata a seguito di una variazione del carico si effettua proprio agendo sull'inclinazione delle pale direttrici mediante un particolare sistema biella-manovella, le quali sono tra loro connesse con una ghiera [1.15]; tale rotazione è comandata dal regolatore di velocità.

Le pale direttrici possono ruotare attorno al proprio asse, in questo modo possono aprirsi o chiudersi regolando la portata che entra nella girante e controllando inoltre l'angolo di incidenza con cui il flusso colpisce la girante consentendo di mantenere la sua efficienza anche alle basse portate.

Attualmente, in gran parte delle centrali idroelettriche, questo sistema di regolazione della portata è automatizzato mediante un sistema di controllo elettronico che regola l'apertura delle palette in base alla richiesta dell'utenza. [1]



Figura 1.15: Sistema regolazione apertura pale direttrici, Laboratorio macchine idrauliche Univeristà degli studi di Padova.

### 1.3.3 Salto idrico

Riprendendo l'equazione 1.2, l'altezza idrica rappresenta la differenza tra l'altezza totale misurata all'ingresso e allo scarico; sfruttando quest'ultima, è possibile definire la potenza idraulica pari a:

$$P_{idr} = \frac{\rho Q_v g h}{10^3} \quad [\text{kW}] \quad (1.9)$$

Definendo il lavoro specifico  $gh_t$  come:

$$gh_t = u_1 c_{u_1} - u_2 c_{u_2} \quad [\text{J/kg}] \quad (1.10)$$

Nell'equazione 1.10  $c_{u_1}$  e  $c_{u_2}$  sono le componenti periferiche della velocità assoluta del fluido in corrispondenza dell'ingresso e dell'uscita della girante mentre  $u_1$  e  $u_2$  rappresentano le velocità periferiche in corrispondenza degli stessi punti.

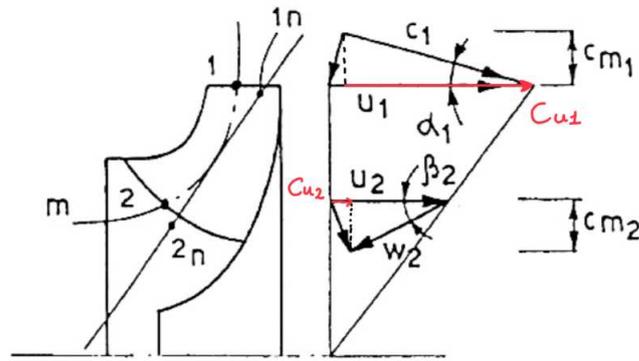


Figura 1.16: Triangoli di velocità,  $u$  velocità periferica,  $c$  velocità assoluta,  $w$  velocità relativa. [1]

L'energia disponibile nel fluido  $gh$  dovrà dunque essere pari al lavoro specifico più la somma delle perdite fluidodinamiche che si verificano sia negli organi statorici che sulla girante, queste si dividono in perdite localizzate e continue.

Si può così definire il rendimento idraulico:

$$\eta_{id} = \frac{h_t}{h} \quad (1.11)$$

Si trovano inoltre altri due rendimenti che contribuiranno al rendimento della turbina, il rendimento volumetrico e quello meccanico. Il primo tiene conto della portata che trafile direttamente allo scarico per via dei gradienti di pressione mentre il secondo delle perdite meccaniche ragionando in termini di potenza.

$$\eta_v = \frac{Q_v - Q_{vf}}{Q_v} \quad \eta_m = \frac{P_a}{P_a + P_m + P_v} \quad (1.12)$$

Si ottiene infine il rendimento della turbina:

$$\eta = \eta_{id} \cdot \eta_v \cdot \eta_m = \frac{P_a}{\rho \cdot Q_v \cdot g \cdot h} \quad (1.13)$$

### 1.3.4 Tubo di scarico

La quota di installazione della sezione di scarico acquisisce una notevole importanza infatti, in sua assenza, si avrebbe all'uscita della turbina un'energia totale pari a:

$$E_2 = \frac{p_b}{\rho g} + \frac{c_2^2}{2g} \quad (1.14)$$

Il tubo di scarico [1.17] consente di recuperare la quota di installazione  $z_2$  della turbina e parte dell'energia cinetica  $c_2^2/(2g)$  sotto forma di depressione allo scarico della girante, infatti  $p_2$  risulta essere minore di  $p_{atm}$ . Ciò implica un aumento del salto idrico  $h$  e di conseguenza, a parità di portata  $Q_v$ , una maggiore potenza disponibile all'albero.

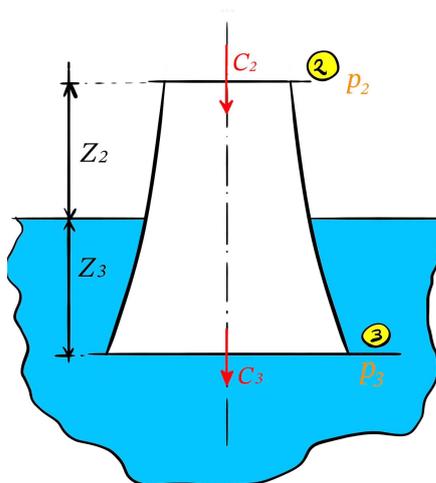


Figura 1.17: Tubo di scarico, ricostruzione figura [1]

Dunque, in presenza del tubo di scarico, in corrispondenza dell'uscita della girante, si troverà un'energia totale  $E'_2$  pari a:

$$E'_2 = \frac{p_2}{\rho g} + \frac{c_2^2}{2g} \quad (1.15)$$

Essendo il tubo di scarico divergente, attraverso di esso il fluido rallenta e si espande raggiungendo così la pressione  $p_3$  e la velocità assoluta  $c_3$ .

Per poter valutare l'energia totale 1.15, si procede applicando il teorema di Bernoulli tra le sezioni 2 e 3 del tubo di scarico (l'origine di  $z$  è nella sezione 2, quote in valore assoluto).

$$\frac{p_2}{\rho g} + \frac{c_2^2}{2g} = \frac{p_3}{\rho g} + \frac{c_3^2}{2g} - z_3 + h_{r3} \quad (1.16)$$

Noto che:

$$\frac{p_3}{\rho g} = \frac{p_b}{\rho g} + z_3 - z_2 \quad (1.17)$$

Allora è possibile esprimere  $p_2/(\rho g)$  sostituendo la 3.2 nella 1.16. Definita quest'ultima, dunque, si può scrivere l'espressione 1.15 e calcolare infine la variazione di energia totale tra i due casi:

$$E_2 - E'_2 = z_2 + \frac{c_2^2 - c_3^2}{2g} + h_{r3} \quad (1.18)$$

In questo modo si può apprezzare l'utilità del tubo di scarico, che riduce l'energia totale all'uscita della turbina, permettendo al fluido di fuoriuscire con meno energia cinetica residua. Ciò significa che il fluido ha potuto scambiare una maggiore quantità di energia nel suo passaggio dentro la turbina.

C'è il rischio che la pressione  $p_2$  cali troppo, ciò dipende da due contributi: uno legato alla quota  $z_2$  di installazione ed uno legato all'azione idrodinamica delle pale, infatti se la pressione  $p_2$  è inferiore alla pressione di saturazione del fluido  $p_{sat}$  si incombe nel rischio di cavitazione all'uscita della girante. Dunque, si agisce sulla quota  $z_2$ , fino ad arrivare anche a disporre la macchina sotto battente con una  $z_2$  negativa.

Per poter ricavare il valore limite della quota di installazione, si sfrutta l'NPSH che rappresenta l'altezza totale al netto della tensione di vapore  $p_v$ , definito come segue:

$$\text{NPSH} = \frac{p_2 - p_v}{\rho g} + \frac{c_2^2}{2g} \quad (1.19)$$

Sfruttando l'espressione della pressione assoluta nella sezione 2, è possibile scrivere:

$$\text{NPSH} = \frac{p_{\text{amb}} - p_v}{\rho g} + \frac{c_3^2}{2g} - z_2 + h_{r3} \quad (1.20)$$

Da cui è possibile ricavare  $z_2$ . [1]

### 1.3.5 Curve caratteristiche

Nelle curve caratteristiche vengono mostrati gli andamenti di alcuni dei parametri fondamentali delle turbine Francis: il rendimento complessivo  $\eta$ , il salto idrico  $h$  e il salto utile totale  $h_t$  espressi in funzione della portata  $Q_v$ . Per esprimere  $h_t$  in funzione di  $Q_v$ , è necessario esprimere la 1.10 in termini delle componenti meridiane della velocità  $[c_m]$ , essendo queste ultime dipendenti da  $Q_v$ . Nella figura 1.18 si possono apprezzare le componenti delle varie velocità insieme agli angoli dei triangoli di velocità che verranno trattati. Nelle turbine Francis,  $c_{u1}$  dipende dall'angolo  $\alpha_1$  delle pale direttrici.

$$c_{u1} = c_{m1} \cdot \cot \alpha_1 \quad (1.21)$$

Per quanto riguarda la componente tangenziale della velocità all'uscita della girante può essere espressa come:

$$c_{u2e} = u_2 - c_{m2} \cdot \cot(\beta_{2b}) \quad (1.22)$$

Il pedice "e" dell'equazione 1.22, indica come l'equazione appena scritta sottintenda il fatto che all'uscita della girante la corrente relativa segua la direzione della tangente al bordo palare, in conformità con il criterio monodimensionale.

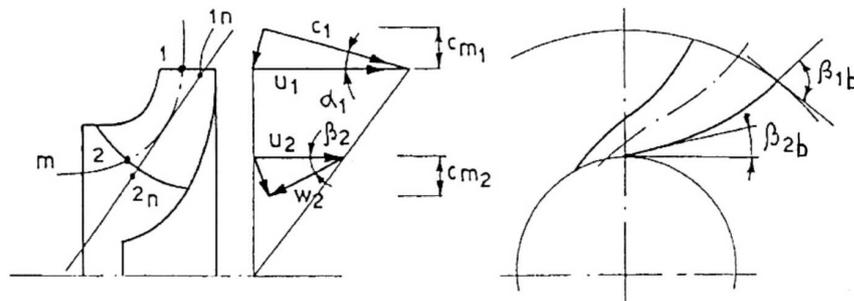


Figura 1.18: Sezione meridiana, sezione conica a destra. [1]

Dunque, si ottiene il lavoro specifico 1.10 espresso come segue:

$$gh_t = u_1 c_{m1} \cot(\alpha_1) + u_2 c_{m2} \cot(\beta_{2b}) - u_2^2 \quad (1.23)$$

— **Curve caratteristiche, caso  $\alpha_1 = cost$  e  $n = cost$**

Le componenti meridiane dipendono direttamente dalla  $Q_v$ , nel caso in questione essendo  $\alpha_1 = cost$  si trova  $h_t$  come funzione lineare della portata  $Q_v$ . Per quanto riguarda il rendimento totale [1.13], si osserva come il rendimento volumetrico e meccanico 1.12 non presentino significative variazioni con le fluttuazioni di portata mentre il rendimento idraulico 1.11 varia con essa. Per questo motivo il rendimento complessivo, prodotto dei tre, mostra un andamento molto simile a quello presentato dal rendimento idraulico il quale è molto sensibile alle perdite per incidenza che si verificano all'ingresso della girante per via della costanza dell'angolo  $\alpha_1$ .

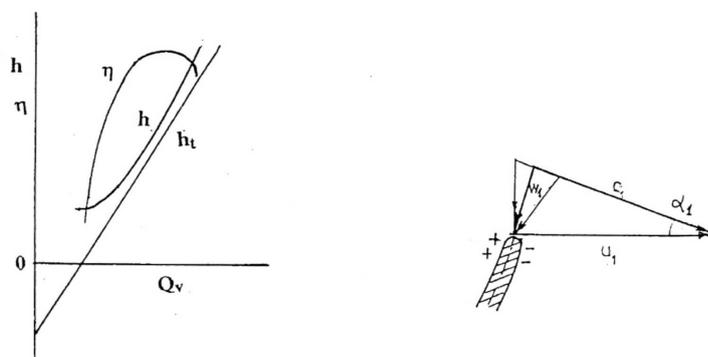


Figura 1.19: Curve a  $\alpha_1 = cost$  e  $n = cost$

[1]

Mantenendo costante l'angolo  $\alpha_1$ , si nota come una portata poco superiore alla portata nominale faccia sì che la velocità relativa  $w_1$  incida sulla faccia in pressione, peggiorando in modo significativo le condizioni di moto nello strato limite del dorso della pala che si trova in depressione; ciò porta ad un rapido calo del rendimento idraulico. [1]

— **Curve caratteristiche, caso  $\alpha_1 = \text{variabile}$  e  $n = \text{cost}$**

Quando è necessario regolare la portata per via di una variazione della richiesta di energia da parte della rete, si agisce sull'angolo di apertura delle pale direttrici  $\alpha_1$  al variare del quale varia anche la componente  $c_{m1}$  della velocità assoluta. Come si evince dalla figura 1.3.5, le curve si spostano al variare dell'angolo  $\alpha_1$ .

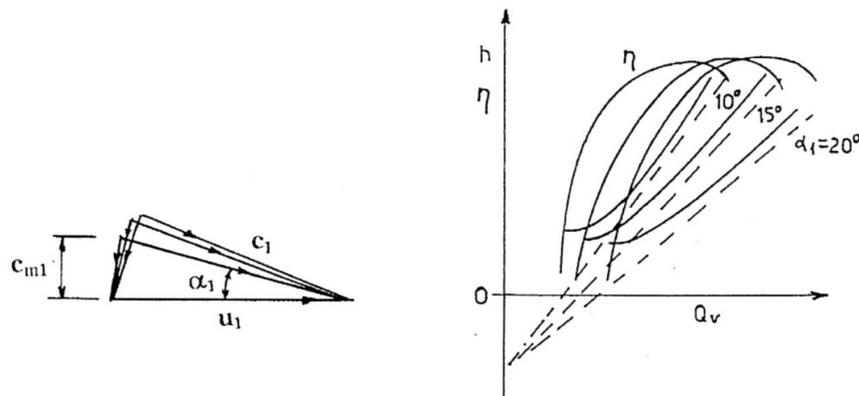


Figura 1.20: Curve a  $\alpha_1 = \text{variabile}$  e  $n = \text{cost}$

[1]

La regolazione della portata tramite le pale direttrici presenta una notevole diminuzione delle perdite per incidenza all'imbocco della girante. Come possiamo apprezzare dalla figura 1.3.5, quando si effettua un'operazione di regolazione della portata variando la sezione di ingresso attraverso la riduzione dell'angolo  $\alpha_1$ , si spostano di conseguenza le curve permettendo alla turbina di lavorare sempre in condizioni di funzionamento ottimale. [1]



# Capitolo 2

## Tecnologie e metodi

### 2.1 Componenti elettronici

Tra i componenti elettronici più importanti che verranno inclusi in questo progetto troviamo i diodi a emissione di luce solida (LED) ed i fototransistor. La coppia LED-fototransistor rappresenta un tassello cruciale per lo sviluppo di questa tesi.



Figura 2.1: Fototransistor ([2])



Figura 2.2: Diodo a emissione di luce solida, LED ([3])

#### 2.1.1 Fototransistor

I fototransistor sono una particolare tipologia di transistor sensibili alla luce che possiamo trovare in diverse configurazioni; la più comune è quella del fototransistor bipolare, composto da soli due pin, nella quale il terminale base è stato

sostituito con una piccola area superficiale sensibile alla luce. I due pin rappresenteranno rispettivamente il collettore e l'emettitore: il primo è collegato all'alimentazione ed è proprio da qui che entra la corrente, il secondo è connesso al circuito di uscita da cui fluisce la corrente. Nei fototransistor a tre pin è possibile agire con dei segnali di controllo attraverso il terminale base, controllando così il passaggio della corrente; ciò non è possibile nella configurazione a due pin poiché il terminale base è inaccessibile, solo la luce esterna può permettere o meno il passaggio della corrente. Quando l'area superficiale viene colpita dalla luce si genera una piccola corrente di base la quale va a controllare la corrente che scorre tra collettore ed emettitore; essa risulta molto maggiore della precedente.

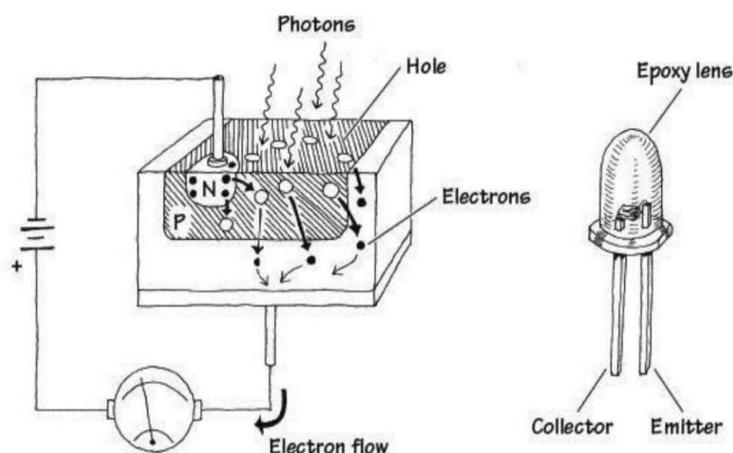


Figura 2.3: Principio funzionamento fototransistor [4]

Come già detto in precedenza, il fototransistor bipolare è molto simile a livello costruttivo al transistor bipolare e possiede una regione semi-conduttrice di tipo P molto ampia ed esposta alla luce più altre due zone di tipo N disposte inferiormente e superiormente. Le zone di drogaggio di tipo P e N sono delle zone in cui sono stati aggiunti particolari elementi che hanno reso tali regioni povere di elettroni come nel caso del tipo P oppure ricche di elettroni come nel caso N. Nelle zone drogate di tipo P si evince la presenza di vacanze o lacune che agiscono come portatori di carica positivi mentre nella zona drogata di tipo N c'è un'abbondante presenza di elettroni in eccesso.

La luce, la quale è composta da fotoni, quando incontra la regione P in questione vede lo scontro tra i fotoni del fascio luminoso e gli elettroni presenti nella regione così questi ultimi acquistano energia permettendogli di oltrepassare la zona di tipo P ed andare in quella di tipo N inferiore leggermente drogata, il collettore. Dunque, analizzando l'esempio della Figura 1.3, gli elettroni che arrivano in questa zona saranno attratti dal polo positivo della batteria mentre gli elettroni presenti nel polo negativo della batteria saranno attratti dal piccolo semi-conduttore di tipo N che rappresenta l'emettitore, presente nella parte superiore. Per far sì che gli elettroni possano oltrepassare la barriera tra P ed N, è necessario che la luce abbia determinate caratteristiche in termini di frequenza ed energia.

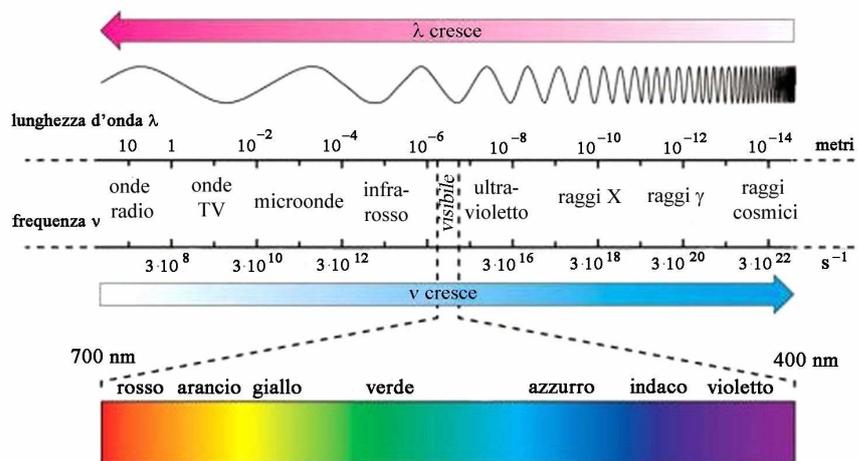


Figura 2.4: Lunghezza d'onda della luce [5]

Ogni fototransistor viene fornito del proprio *datasheet*, all'interno del quale vengono indicati i suoi parametri fondamentali. Tra di essi troviamo: la lunghezza d'onda sensibile, la corrente di collettore e la tensione di collettore-emettitore. La lunghezza d'onda sensibile è fondamentale per determinare la corretta compatibilità con la fonte di luce alla quale tale componente dovrà essere esposto. La corrente di collettore  $I_c$  rappresenta la corrente che scorre tra collettore ed emettitore quando il fototransistor è esposto a una fonte di luce, essa dunque dipende in maniera proporzionale all'intensità di quest'ultima. Infine, la tensione tra collettore ed emettitore  $V_{ce}$  è la tensione massima che possiamo andare ad applicare ai loro capi. [4]

### 2.1.2 LED (*Light Emitting Diode*)

I diodi a emissione luminosa sono particolari tipologie di diodi molto simili ai classici a giunzione p-n ma con la sostanziale differenza che il loro scopo principale è quello di emettere una luce, che può essere visibile o infrarossa.

Il LED è costituito dunque da due semi-conduttori di tipo N e P ed è munito di due pin, anodo (-) in corrispondenza della zona P e catodo (+) nella zona N. Quando si genera una differenza di potenziale positiva (anodo più positivo del catodo), la corrente scorre attraverso il dispositivo emettendo luce. Se invece la differenza di potenziale è negativa (anodo più negativo del catodo) il LED non condurrà.

Possiamo trovare i LED in differenti colorazioni in base al materiale di cui sono costituiti e alla struttura del semi-conduttore. Esistono dei particolari LED chiamati LED-RGB che permettono di mescolare tre colori fondamentali (*red*, *green*, *blue*) per ottenere un'ampia gamma di colori.[4]

### 2.1.3 Principio di funzionamento dei LED

Il LED emette una luce quando avviene un passaggio di elettroni dalla zona drogata N a quella P attraverso la giunzione P-N, quando gli elettroni provenienti dalla zona N arrivano nella zona P si combinano con le lacune emettendo in questo modo dei fotoni. Queste lacune sono delle mancanze di elettroni nel reticolo cristallino di un semi-conduttore drogato di tipo P. [4]

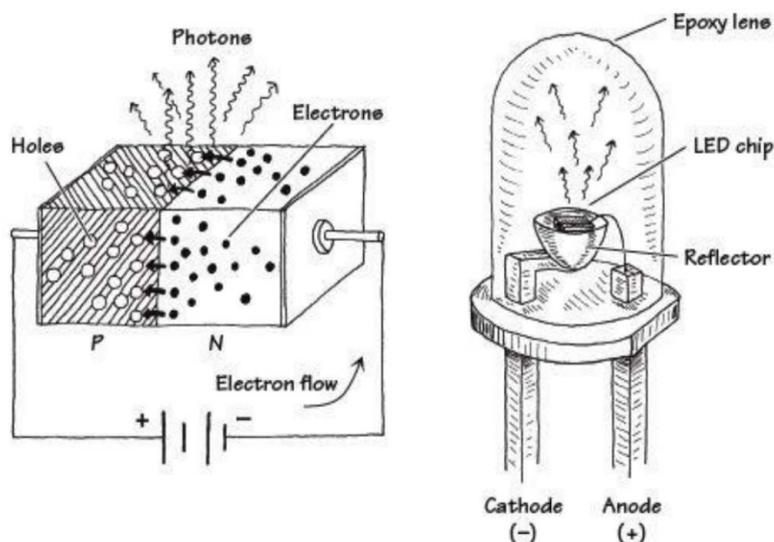


Figura 2.5: Principio funzionamento LED [4]

## 2.2 Sensori ottici rotativi di posizione

Gli encoder ottici sono fortemente implementati nei robot per la misura di posizione e all'interno delle macchine utensili. Essi si suddividono in due principali tipologie : encoder assoluti ed encoder incrementali [Figura 1.6].

Condividono tutti la stessa architettura di base e ognuno è costituito da:

- Sorgente luminosa → può essere di diversi tipi, principalmente diodi ad emissione di luce allo stato solido.
- Ricevitore ottico → nella stragrande maggioranza dei casi è un fototransistor o un diodo che risponde all'intensità della luce ricevuta.
- Disco → è relativo al singolo encoder e costituisce una differenza tra le due tipologie di encoder.
- Collimatore di luce → è uno strumento che ha lo scopo di dirigere i fasci di luce in direzione parallela eliminando dunque i raggi che si propagano rispetto alla sorgente con un angolo diverso da zero; esso viene posizionato tra la fonte di luce ed il fototransistor. Lo troviamo nella figura 1.6 alla voce «*Optical barrier*».

Le due diverse tipologie di encoder si differenziano in base all'informazione contenuta sul disco e alla modalità con la quale vengono letti e interpretati i dati dal sistema di controllo. [6]

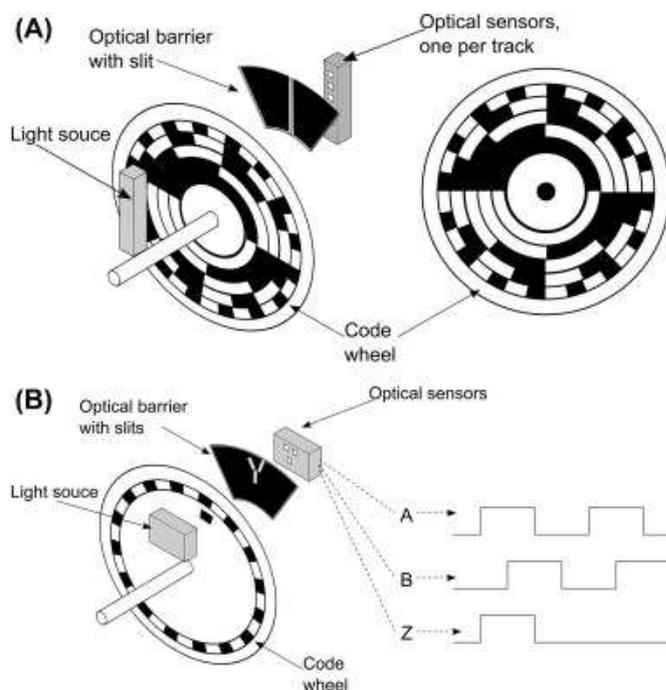


Figura 2.6: A encoder assoluto, B encoder incrementale [6]

### 2.2.1 Encoder Incrementali

Gli encoder incrementali [Figura 2.7] nella loro forma base sono costituiti da tre coppie LED-fototransistor che forniscono tre segnali di output i quali vengono inviati ad un convertitore che ci restituisce tre onde quadre. Le prime due vengono chiamate canale A e canale B mentre l'ultima è comunemente nota come index.

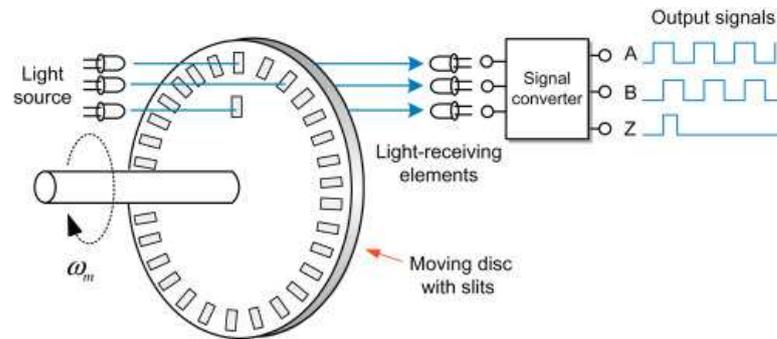


Figura 2.7: Schema funzionale encoder incrementale [6]

Il canale A è un'onda quadra con un certo numero  $n$  di impulsi per giro, il canale B è esattamente identico al precedente ma risulta essere sfasato rispetto a esso di un angolo pari a  $90^\circ$ . Si parla di «sfasamento elettrico», quando ci si riferisce allo sfasamento tra due onde quadre. [Figura 2.8]

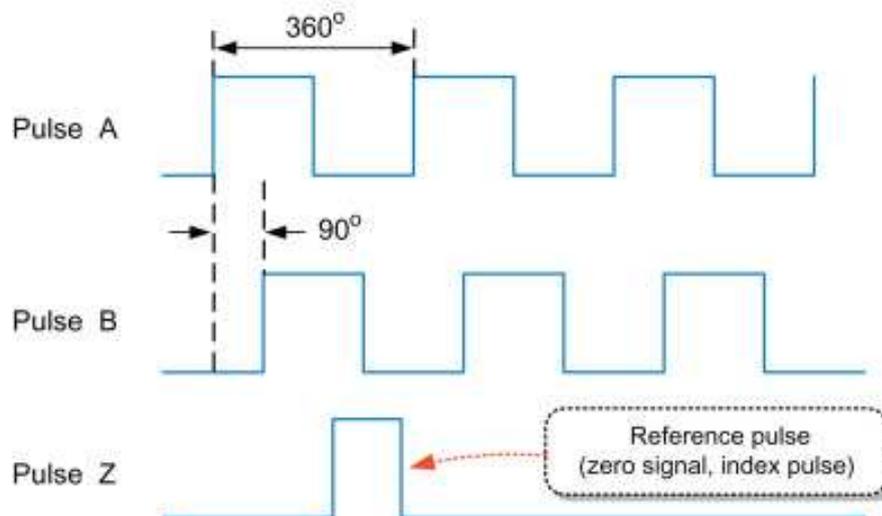


Figura 2.8: Segnali encoder incrementale [6]

L'index è un canale che fornisce un singolo impulso su giro, il suo scopo è infatti quello di segnalare la posizione assoluta sul giro nel momento dell'avvio del sistema; inoltre, esso permette di verificare che il conteggio delle tacche su giro sia corretto. Consideriamo per esempio un encoder incrementale con  $N$  tacche, se in un giro dovessero essere lette  $N-1$  tacche, l'encoder scarta i dati relativi al giro affetto da errori di misura e ricomincia il conteggio così da evitare una propagazione degli errori.

Il disco dell'encoder incrementale è formato da due corone di tacche adiacenti ma non sovrapposte collocate nella zona esterna del disco; esse sono composte da zone scure che interrompono il passaggio della luce e zone chiare, dette anche tacche o fessure, che ne permettono il passaggio. La corona esterna è composta da un certo numero  $N$  di tacche, che definisce la risoluzione dell'encoder, e altrettante zone scure alternate su tutta la corona. La corona interna presenta invece una sola fessura di dimensioni pressochè identiche alle fessure della corona esterna, talvolta la fessura dell'index non è altro che il prolungamento di una singola fessura della corona superiore [Figura 2.9].

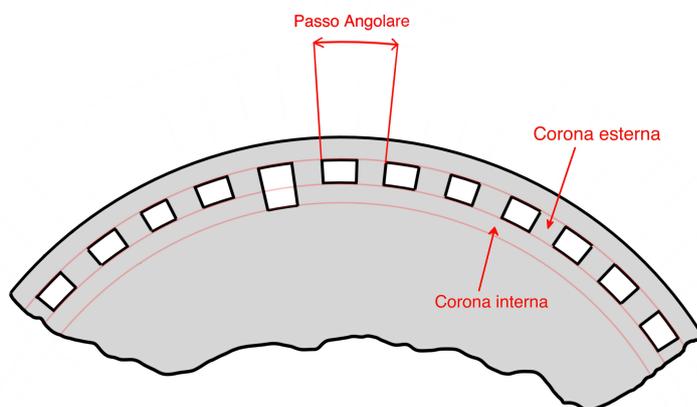


Figura 2.9: Sezione disco encoder incrementale

La suddivisione equispaziata in  $N$  tacche lungo tutta la circonferenza permette di suddividere i  $360^\circ$  in  $N$  archi di circonferenza, l'arco parte dall'inizio della tacca fino all'inizio della successiva la cui dimensione è definita dal passo angolare:

$$\text{Passo angolare } [^\circ] = \frac{360^\circ}{N} \quad (2.1)$$

Il numero di tacche influisce notevolmente sulla risoluzione dell'encoder, più alto sarà il numero  $N$  di tacche maggiore sarà la risoluzione dello strumento [2.2] dunque minore sarà il minimo spostamento che lo strumento sarà in grado di percepire; quest'ultimo è definito dal passo angolare, come possiamo vedere nell'equazione 2.1.

Nel momento in cui si interpone una fessura tra il LED e il fototransistor, la luce prodotta dal LED incontra il fototransistor il quale genera un segnale elettrico che viene amplificato nel circuito elettronico di lettura per poi essere convertito in un'onda quadra attraverso un convertitore di segnale. Esso fornisce un segnale alto quando la tensione supera una certa soglia ed uno basso in caso contrario. Dunque, durante la rotazione del disco, il fototransistor genererà una serie di impulsi elettrici che formeranno un'onda quadra la quale deve essere recepita da un sistema di lettura elettronico; esso, considerando le sue variazioni di stato alto-basso, è in grado di contare le singole tacche associando così l'informazione sul numero di tacche ad uno spostamento angolare.

Dunque, noto il passo tra le tacche e il numero di tacche nel tempo, si è in grado di misurare la posizione derivando la quale ottengo la velocità e infine, derivando ancora, l'accelerazione.

Per quanto riguarda il sistema elettronico di lettura, esso può funzionare in diversi modi. Una volta definito il numero  $N$  di tacche, il metodo più semplice è quello della lettura  $1x$  dove il sistema registra ogni volta che l'onda quadra effettua un passaggio basso-alto, ossia ogni inizio tacca; infatti, nella lettura  $1x$ , il minimo spostamento che possiamo percepire è pari al passo angolare. Possiamo aumentare il numero delle letture, come per esempio la lettura  $2x$ , dove si leggono sia le salite che le discese; così facendo, migliorerà anche la risoluzione del nostro encoder incrementale.

$$\text{Risoluzione} = \frac{1}{\text{numero di letture} \times N} \quad (2.2)$$

Lo scopo principale del canale B è quello di permettere la determinazione del verso di rotazione, ciò è possibile analizzando insieme le due onde quadre e determinando quale delle due presenti per prima un valore alto; ad esempio, considerando la Figura 2.8, quando si ruota in senso antiorario, l'impulso del canale A è in anticipo rispetto a quello del canale B mentre a senso invertito otterremo il canale B in anticipo rispetto al canale A.

Il problema maggiore degli encoder incrementali lo possiamo analizzare considerando l'ambito degli encoders implementati nei motori dei robot. Tale problema sta nel fatto che questi normalmente non dicono da dove si sta partendo ma solo

di quanto il motore si è spostato in termini angolari, per conoscere la posizione iniziale si effettua l'operazione di azzeramento cioè si prende il motore, si porta in battuta meccanica e si comunica al sistema di contare 0 da quel momento. Ci sono dei casi in cui tale operazione non è eseguibile, ad esempio nei robot industriali, a causa del fatto che questi spesso operano in ambienti molto stretti. In questo caso come si fa l'azzeramento asse? Occorre inserire delle batterie nel sistema le quali mantengono alimentati solo gli encoder dunque, anche se il robot rimane fermo per mesi ed i motori vengono mossi, gli encoder continuano a funzionare e il sistema rileva sempre la posizione esatta [4] [7].

## 2.2.2 Encoder Assoluti

L'encoder assoluto, come abbiamo già detto, risulta essere molto simile a quello incrementale in termini di architettura di base tuttavia differisce da esso in quanto possiede una particolare disposizione delle zone scure e di luce che permette di definire in maniera univoca le singole posizioni angolari.

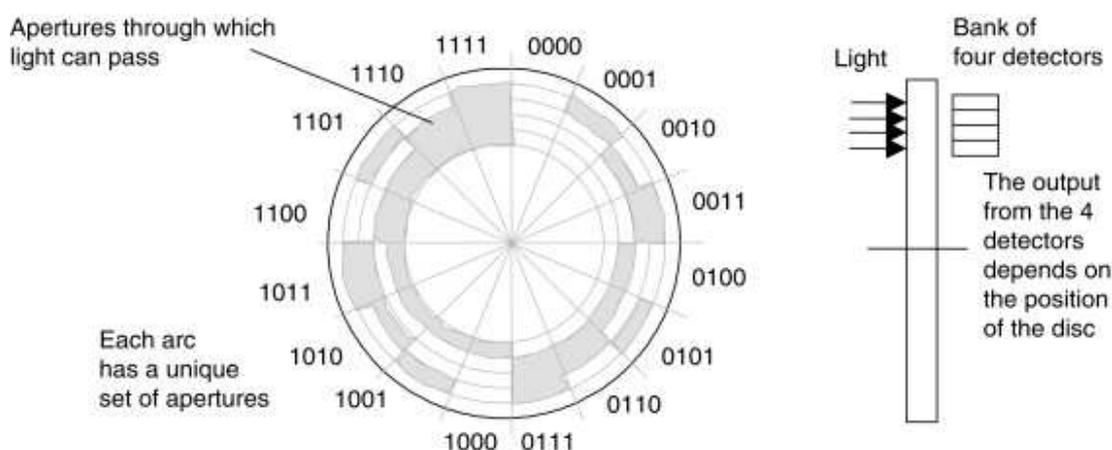


Figura 2.10: Disco encoder assoluto in codifica binaria [6]

Osservando la figura 2.10 possiamo notare come il disco sia suddiviso in questo modo: a livello radiale, abbiamo una suddivisione in anelli concentrici equispaziati mentre, a livello circonferenziale, abbiamo una suddivisione in settori circolari. In questo modo, ogni settore circolare individua una sequenza di zone d'ombra e di luce che è unica e non si ripeterà mai nel disco.

Avremo una fila di coppie fototransistor-LED allineate e disposte in maniera radiale in corrispondenza di ciascun anello [Figura 2.11] per cui le coppie saranno tante quanti saranno gli anelli in cui è stata suddivisa la parte periferica del disco.

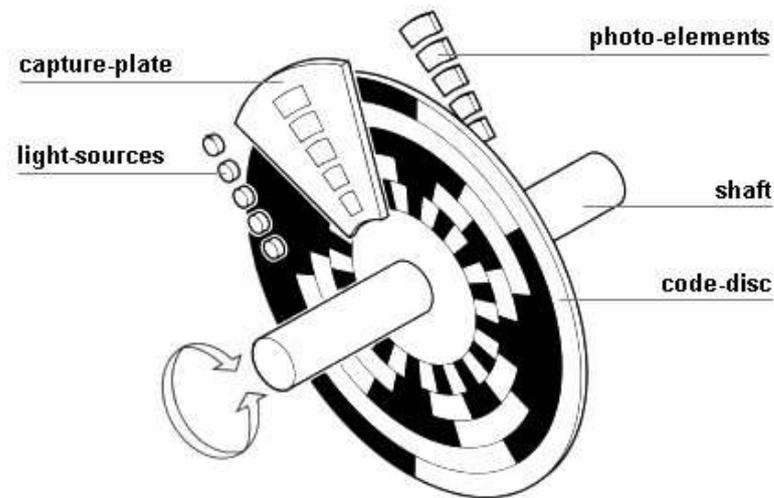


Figura 2.11: Disco encoder assoluto codifica di Gray [6]

Tale valore rappresenta il numero di bit del nostro encoder, per esempio con quattro coppie fototransistor-LED abbiamo quattro anelli quindi quattro bit. Il numero  $x$  di bit vincola il numero massimo di combinazioni possibili chiamato anche PPR (*Pulse Per Revolution*), definito dalla formula:

$$\text{Combinazioni massime (PPR)} = 2^x \quad (2.3)$$

Questo numero di combinazioni (2.3) definisce il numero massimo di settori circolari in cui possiamo suddividere il disco dell'encoder.

Su ogni settore circolare troveremo  $x$  bit, dalla figura 2.12. si evince come ogni bit possa assumere un valore 0 o 1 in base al fatto che la tacca sia una zona d'ombra o di luce. Dunque, la sequenza di bit (001010 nell'esempio sottostante) definisce uno stato digitale che restituisce una precisa posizione angolare sull'encoder.

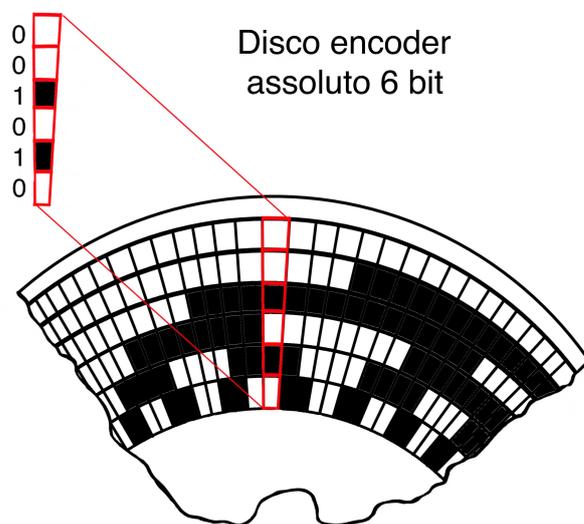


Figura 2.12: Esempio combinazione disco encoder assoluto

La codifica che troviamo nella figura 2.10 è la codifica binaria la quale però presenta degli svantaggi che tendono a rallentare il sistema di acquisizione dati infatti con il codice binario, preso un generico stato digitale, gli stati digitali immediatamente prima e dopo quello corrente possono essere anche molto diversi dallo stato corrente. L'implementazione di tale codifica comporta la variazione di più di un bit durante un singolo passaggio da una configurazione a quella successiva.

Per risolvere questo problema si è passati alla codifica di Gray [Figura 2.12 ] la quale ha una particolare disposizione delle zone d'ombra e di luce che permette di avere la variazione di un solo bit rispetto al precedente e al successivo stato digitale. Ciò semplifica il processo di acquisizione dati.

La risoluzione dell'encoder assoluto dipende dal numero  $x$  di bit, all'aumentare di quest'ultimo essa varia in modo esponenziale e si può stimare con la formula:

$$\text{Risoluzione} = \frac{1}{2^x} \quad (2.4)$$

### 2.2.3 Confronto tra Encoder assoluti e Incrementali

La scelta di implementazione di un encoder incrementale rispetto ad uno assoluto o viceversa, cambia in base a ciò che dobbiamo misurare. Gli encoder incrementali si prestano molto bene alle misure di posizione, velocità e di accelerazione mentre gli encoder assoluti trovano una forte applicazione nelle misure di posizione ad alta precisione ma non possono eseguire misure di velocità e accelerazione. Gli encoder assoluti non presentano il problema della ricerca dello zero visto per gli incrementali tuttavia anche quello assoluto necessita di una batteria perchè, sebbene esso possa determinare la posizione assoluta su giro, non è in grado di comprendere se il sistema ha eseguito un giro completo quando era spento perciò va tenuto alimentato con una batteria a meno di applicazioni in cui non può essere effettuata una rotazione completa di 360 gradi del sistema oggetto di misura. Dunque, la tecnologia dell'encoder incrementale risulta essere più semplice e meno costosa a differenza dell'encoder assoluto dove sono presenti molte più coppie di fototransistor-LED.

## 2.3 Arduino

### 2.3.1 Brevi cenni storici

Arduino è il frutto del lavoro di un gruppo di ingegneri italiani i quali diedero il nome al loro progetto ispirandosi al bar in cui erano soliti incontrarsi. Il loro nobile intento era quello di realizzare un microcontrollore che fosse di semplice utilizzo e con un costo relativamente basso in modo da poter essere utilizzato anche da persone con limitate conoscenze in materia. Arduino si diffuse in maniera rapida nel mondo, in particolare nell'ambito dell'istruzione ed hobbistico. La scheda Arduino più popolare è l'Arduino Uno, verrà dunque presa come riferimento per la descrizione del microprocessore Arduino. [8]

### 2.3.2 Architettura Scheda Arduino

Arduino Uno è una scheda che si basa sul microprocessore ATmega328 che possiede una memoria flash di 32kB dedicata all'archiviazione dei programmi, 1kB

di EEPROM e 2kB di memoria RAM; esso è composto da 28 pin, come possiamo vedere nella figura 2.13, tra i quali troviamo un blocco riservato all'alimentazione e 6 pin analogici che possono essere utilizzati anche come in/out.

L'alimentazione di arduino può essere di due tipi, tramite la presa DC (7-12V) oppure tramite USB.

Nella parte opposta della scheda troviamo i connettori, che permettono di eseguire un'interfaccia I2C, e una fila di pin in/out digitali.

Alcuni di questi pin digitali possono essere sfruttati per la *Pulse Width Modulation* (PWM) dove si va a modulare la larghezza degli impulsi, ad esempio per controllare la potenza erogata ad un motore. I pin 0 e 1 svolgono rispettivamente il ruolo di Rx e Tx che vengono utilizzati per la comunicazione seriale, Tx serve per trasmettere i dati mentre Rx per riceverli.

La differenza di base tra pin digitali e pin analogici è che, mentre i primi lavorano con stati logici (0 o 1), gli analogici leggono un range continuo di valori di tensione e li convertono in dati digitali (0-1023).[4]

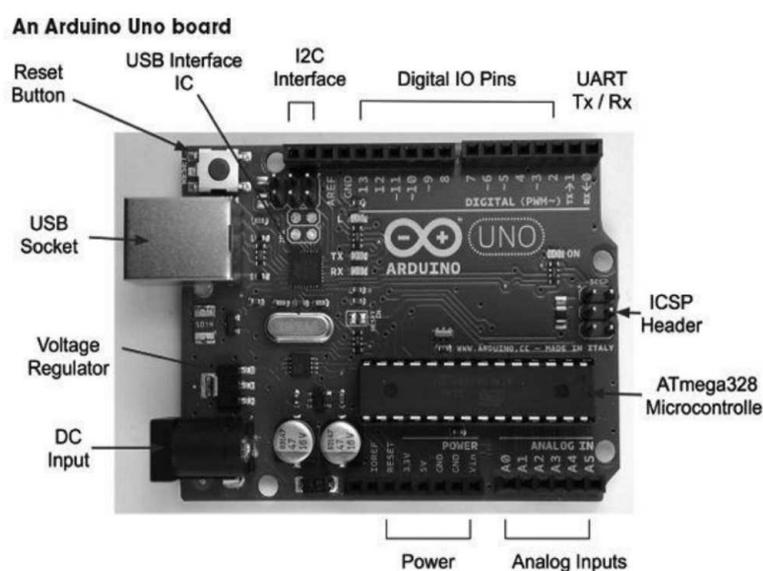


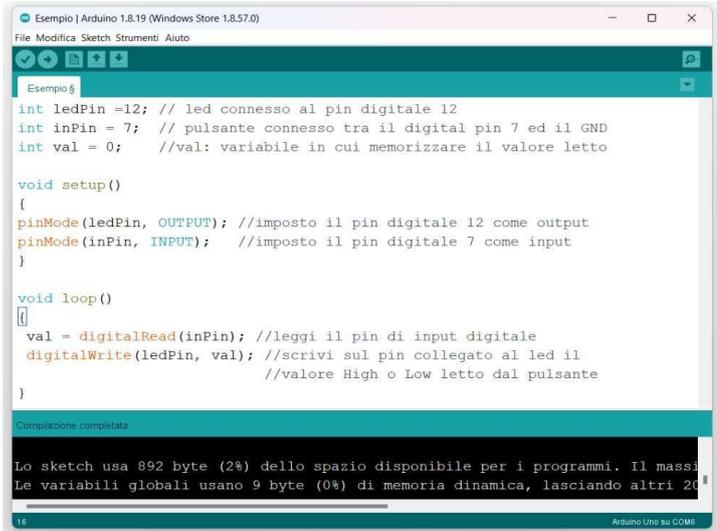
Figura 2.13: Scheda Arduino Uno [4]

### 2.3.3 Arduino IDE (*Integrated Development Environment*)

Arduino offre un ambiente di sviluppo integrato dove si programma in un linguaggio detto «*wiring*» che deriva dal C/C++. Tale ambiente permette di scrivere il programma chiamato «*sketch*» di controllarne la sintassi tramite l'editor, di convertire il programma scritto nel linguaggio sorgente al codice macchina tramite il compilatore, di correggere gli eventuali errori e caricare infine il programma nella memoria flash del microcontrollore. Il caricamento del programma avviene tramite USB, dopodichè è possibile aprire un monitor seriale che ci consente di effettuare una comunicazione bidirezionale; essa consente la visualizzazione dei dati e l'eventuale invio di comandi inerenti al programma.[4]

### 2.3.4 Struttura di uno *sketch*

Un generico *sketch* arduino si presenta come nella figura 2.14, dove troviamo un esempio estremamente semplice. Nella prima parte di programma si va a definire le variabili (`ledPin`) e gli si assegna un pin di riferimento; inoltre, qui è possibile includere nel nostro programma delle librerie che permettono di avere a disposizione ed eseguire facilmente alcune funzionalità extra. Per esempio, ci sono librerie per i motori (`AFMotor`, `DCMotor`, etc..) che ne facilitano considerevolmente il controllo.



```
Esempio | Arduino 1.8.19 (Windows Store 1.8.57.0)
File Modifica Sketch Strumenti Aiuto
Esempio$
int ledPin = 12; // led connesso al pin digitale 12
int inPin = 7; // pulsante connesso tra il digital pin 7 ed il GND
int val = 0; //val: variabile in cui memorizzare il valore letto

void setup()
{
  pinMode(ledPin, OUTPUT); //imposto il pin digitale 12 come output
  pinMode(inPin, INPUT); //imposto il pin digitale 7 come input
}

void loop()
{
  val = digitalRead(inPin); //leggi il pin di input digitale
  digitalWrite(ledPin, val); //scrivi sul pin collegato al led il
  //valore High o Low letto dal pulsante
}

Compilazione completata
Lo sketch usa 892 byte (2%) dello spazio disponibile per i programmi. Il massimo
Le variabili globali usano 9 byte (0%) di memoria dinamica, lasciando altri 20
16 Arduino Uno su COM6
```

Figura 2.14: Esempio sketch Arduino

A seguire troviamo subito la funzione *void setup*, ciò che vi inseriamo viene eseguito una sola volta ad inizio programma con lo scopo di configurare le impostazioni iniziali; nell'esempio della figura 2.14 sono stati definiti i pin come output e input.

Di seguito troviamo la funzione *void loop*, dentro le parentesi graffe viene scritto il codice del programma principale che verrà eseguito in loop fintantochè la scheda non verrà riprogrammata o spenta.

Infine, nella parte finale, vengono inserite eventuali funzioni che vengono richiamate nel programma. [8]

### 2.3.5 Arduino Nano

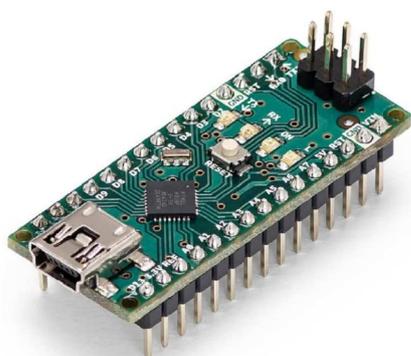


Figura 2.15: Scheda Arduino Nano [9]

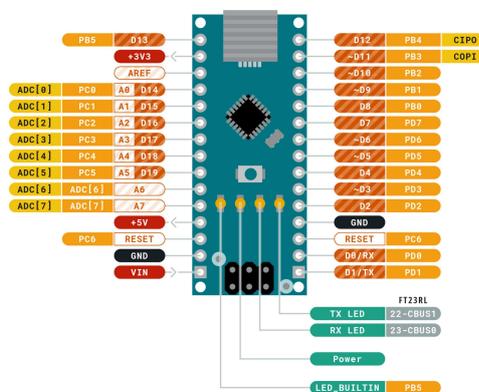


Figura 2.16: Pin Arduino Nano [10]

Un'altra scheda molto diffusa è Arduino Nano 2.15. Come si evince dal confronto dimensionale con le schede Arduino Uno e Arduino Mega nella figura 2.17, Arduino Nano risulta decisamente più contenuto nelle dimensioni rispetto alle altre due schede; ciò avvantaggia questa scheda in tutti gli ambiti in cui si richiede che le dimensioni siano molto ridotte.

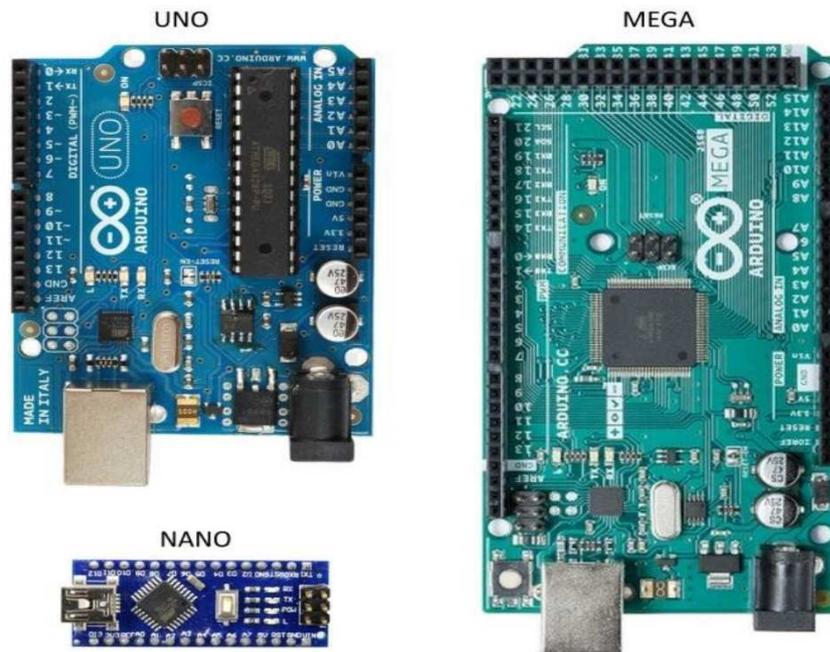


Figura 2.17: Confronto dimensionale delle schede Arduino[11]

Confrontando Arduino Nano con la scheda Arduino Uno, notiamo subito come la prima risulti molto più compatta. Per quanto riguarda il numero di pin analogici e digitali, come si evince dalla figura 2.16, Arduino Nano possiede 30 pin quindi 2 pin (analogici) in più rispetto alla scheda Arduino Uno. A livello di microprocessore non vi è alcuna differenza in quanto entrambi montano l'ATMega328. Troviamo però una differenza nella porta USB, su Arduino Nano vi è una porta micro-USB mentre Arduino Uno monta una porta USB standard di tipo B.



# Capitolo 3

## Encoder Incrementale Sperimentale

### 3.1 Progettazione e Sviluppo del prototipo

#### 3.1.1 Analisi del problema

La misura della velocità di rotazione in una turbina idraulica è una questione molto delicata, la sua precisa conoscenza è infatti molto importante per gestire la turbina al meglio e fare in modo che operi nelle sue condizioni ottimali di funzionamento. Inoltre, essendo l'albero della turbina calettato su quello del generatore, è necessario regolare la velocità di rotazione in modo che produca una frequenza stabile quindi piccoli errori percentuali sulla lettura della velocità possono comportare significative variazioni della frequenza prodotta. Un altro aspetto fondamentale che rispecchia l'importanza della corretta conoscenza della velocità di rotazione è proprio la velocità di fuga. Essa rappresenta la velocità massima che la turbina può raggiungere nel caso in cui si verifichi un'improvvisa perdita del carico, la turbina aumenterebbe così la sua velocità senza alcun freno fino a superare questa velocità limite provocando serissimi danni alla turbina. Infine, il regolatore di velocità è proprio quello che agisce sulla regolazione della portata in ingresso nella girante della turbina, operando sulla regolazione dell'apertura delle pale direttrici.

### 3.1.2 Identificazione dei requisiti funzionali

Sulla base dell'analisi svolta nel paragrafo precedente, è necessario implementare uno strumento di misura che abbia le seguenti caratteristiche:

- **Buona risoluzione**  $\Rightarrow$  consente misure di velocità più precise.
- **Affidabilità**  $\Rightarrow$  lo strumento deve resistere in un contesto dove sono presenti forti vibrazioni, polvere e temperature mediamente alte.
- **Velocità di risposta**  $\Rightarrow$  lo strumento deve monitorare in maniera efficace la velocità di rotazione e, in caso di variazioni, deve poter fornire un feedback in tempo reale.

Noti i requisiti necessari, la tecnologia che di sua natura si sposa meglio con queste richieste è quella dell'Encoder Incrementale. Dunque, sulla base di tale tecnologia, si è pensato di sviluppare un sistema sperimentale su misura per la turbina Francis presente nel laboratorio di macchine idrauliche dell'Università degli studi di Padova.

### 3.1.3 Scelta dei componenti elettronici

Il punto di partenza è stato scegliere i componenti elettronici da utilizzare nel progetto.

- Microcontrollore Arduino Uno
- LED bianco ( $i_f=20\text{mA}$   $V_f=3,5\text{V}$   $\lambda=380-750\text{nm}$ )
- Fototransistor ( $i_c=15\text{mA}$   $V_{ce}=35\text{V}$   $\lambda=380-1150\text{nm}$ )
- Resistenze (3x220 $\Omega$ (led) 3x8,2k $\Omega$ (fototransistor) 1x10 $\Omega$ )
- Display LCD + modulo IC2 ( $V_{dd}=5\text{V}$ )
- Potenziometro (0-5V 10k $\Omega$ )

### 3.1.4 Costruzione del primo prototipo

Il prototipo iniziale si presenta in una forma molto grezza e ha come scopo principale quello di verificare la fattibilità del progetto ed individuare eventuali complicanze prima di entrare nella fase esecutiva del progetto dove le modifiche risultano più costose e meno flessibili.

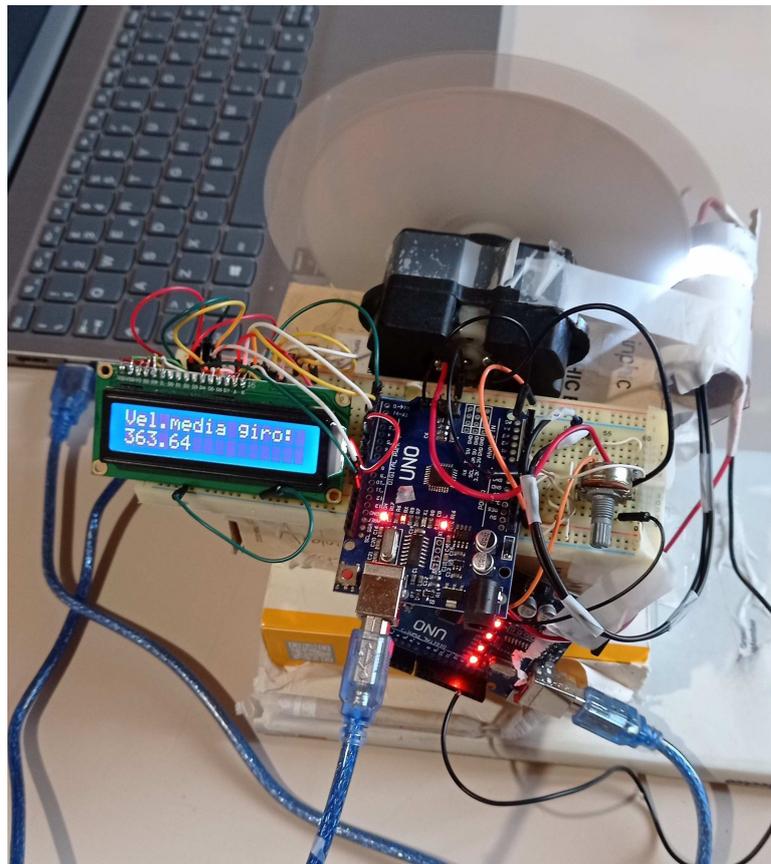


Figura 3.1: Prototipo Encoder Incrementale

Per la sua realizzazione si è partiti dal circuito elettronico montato sulla breadboard, esso comprende i componenti elettronici precedentemente citati i quali sono stati connessi al microprocessore Arduino Uno. Nella figura che segue è possibile apprezzare lo schema elettrico, nella sua fase prototipale non è stato incluso inizialmente nè l'index nè il canale B motivo per cui troviamo una singola coppia LED-fototransistor.

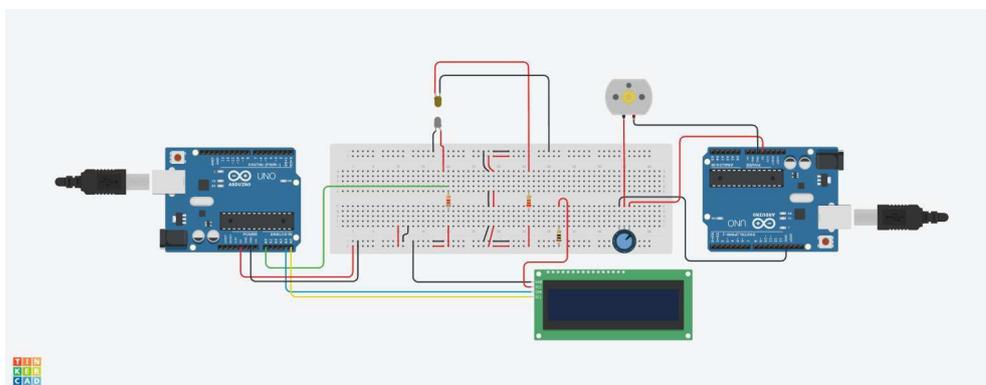


Figura 3.2: Schema elettronico del prototipo dell'encoder incrementale

Ci si è serviti di un motore elettrico DC alloggiato all'interno di una sede zavorrata per simulare la rotazione dell'albero della turbina e potervi calettare il disco dell'encoder. Quest'ultimo è stato realizzato inizialmente in cartone rigido, durante la prototipazione ha visto aumentare sempre più il numero di tacche fino ad arrivare ad una sessantina. Realizzata la parte elettronica, è stato creato un supporto per la coppia LED-fototransistor per fare in modo che i due fossero disposti faccia a faccia; tra loro è stato lasciato uno spazio di circa 6 [mm] per consentire la rotazione del disco dell'encoder in mezzo a essi. Infine, utilizzando una base di supporto, è stato fissato prima il motore con il suo disco e poi sulla stessa base è stata fissata la breadboard con tutto il sistema elettronico compreso del display LCD per la visualizzazione dei dati.

### 3.1.5 Prove e risultati prototipo

Una volta realizzato il prototipo, si è proceduto con la scrittura dello script Arduino il quale rappresenta una forma molto grezza e ridotta dello script definitivo che verrà ampiamente discusso nel sottocapitolo [3.5]; per questo motivo non verrà trattato all'interno di questo paragrafo. Dopo aver caricato lo script sulla scheda, è iniziata la fase di sperimentazione. Si è sfruttato dunque il motore per mettere in rotazione il disco; per quanto riguarda la sua alimentazione, essa non proviene dalla scheda Arduino principale ma da una addizionale così da evitare sbalzi di tensione. La velocità di rotazione del motore è stata regolata mediante l'utilizzo di un potenziometro.

### Principio di funzionamento

Tramite il fototransistor, letto dalla scheda Arduino, è possibile rilevare il livello di luminosità fornito sotto forma di output analogico all'interno di un range (0-1023).

Impostando una soglia di luminosità all'interno di questo range, è stato possibile individuare le zone d'ombra e le zone di luce dovute alla presenza o meno della tacca; le zone d'ombra sono associate al valore "0" mentre le zone di luce sono associate al valore "1". In questo modo è stato possibile ricreare l'onda quadra tramite il plotter seriale di arduino.

La soglia sopra citata non può essere un valore fisso nel tempo, infatti variazioni della luminosità nell'ambiente operativo potrebbero impedire una corretta misurazione. Per questo motivo la soglia presente nello script è variabile e si aggiorna in automatico monitorando a intervalli periodici i parametri di luminosità massima e minima, qualora la luminosità dovesse variare allora la soglia si sposterà con essa. Dunque, per realizzare una lettura 1X, il microprocessore conta le salite da 0 a 1 associando a ogni salita una tacca.

Infine, la velocità di rotazione in RPM (rotazioni per minuto) viene calcolata sfruttando il tempo  $t_{tacca}$  [s], ossia l'intervallo di tempo che intercorre tra una tacca e quella successiva. Dunque, conoscendo il numero N di tacche si può calcolare:

$$\text{RPM} = \frac{60}{N \cdot t_{tacca}} \quad (3.1)$$

In questo modo però il sistema stamperebbe un risultato in termini di RPM per ogni tacca, il che appesantirebbe il microprocessore rallentandolo con una conseguente perdita di dati.

Dunque si è optato per un altro metodo dove le singole velocità vengono calcolate ma non stampate nè sul seriale nè sul display LCD; queste vengono mediate all'interno di un certo intervallo di tempo e infine viene stampato quel valore con una cadenza fissa. In questo modo si trova comunque un'informazione in tempo reale in termini di velocità ma senza sovraccaricare il microprocessore. Queste prove hanno dato risultati molto soddisfacenti, il sistema ha prodotto valori molto stabili della velocità in termini di RPM mostrando un'ottima sensibilità alle variazioni di velocità imposte dal potenziometro che controlla il motore.

A questo punto però non è ancora possibile determinare se la velocità misurata dall'encoder sia corretta o meno, infatti con una sola coppia LED-fototransistor non è possibile stimare il numero di tacche contate durante un giro completo. Per questo motivo è stato introdotto l'Index tramite il quale è stato possibile contare il numero di tacche lette dall'encoder nel corso di ogni giro.

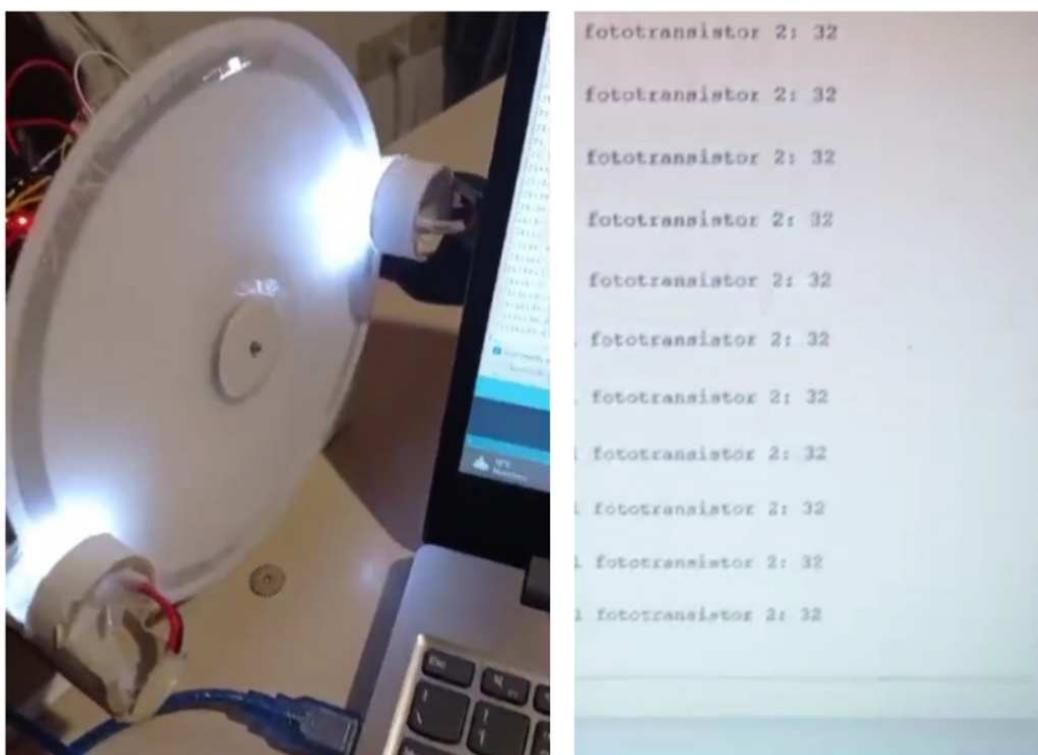


Figura 3.3: Risultati encoder incrementale + index, disco a 32 tacche

I risultati ottenuti sono stati ottimi: come si evince dalla figura 3.3, il sistema è in grado di cogliere ogni tacca su giro. Sulla base di questi risultati si è dunque proceduto allo sviluppo di un sistema più accurato pensato su misura per la turbina Francis presente nel laboratorio.

## 3.2 Progettazione CAD-3D del sistema finale

Sulla base del prototipo si è dunque proceduto alla fase di progettazione del sistema finale. Sono state apportate delle migliorie nel sistema e sono stati corretti gli errori individuati proprio nella parte di prototipazione. Adesso il sistema avrà tre coppie di LED-fototransistor, una per l'Index e due dedicate ai canali A e B; in questo modo sarà possibile rilevare anche il verso di rotazione.

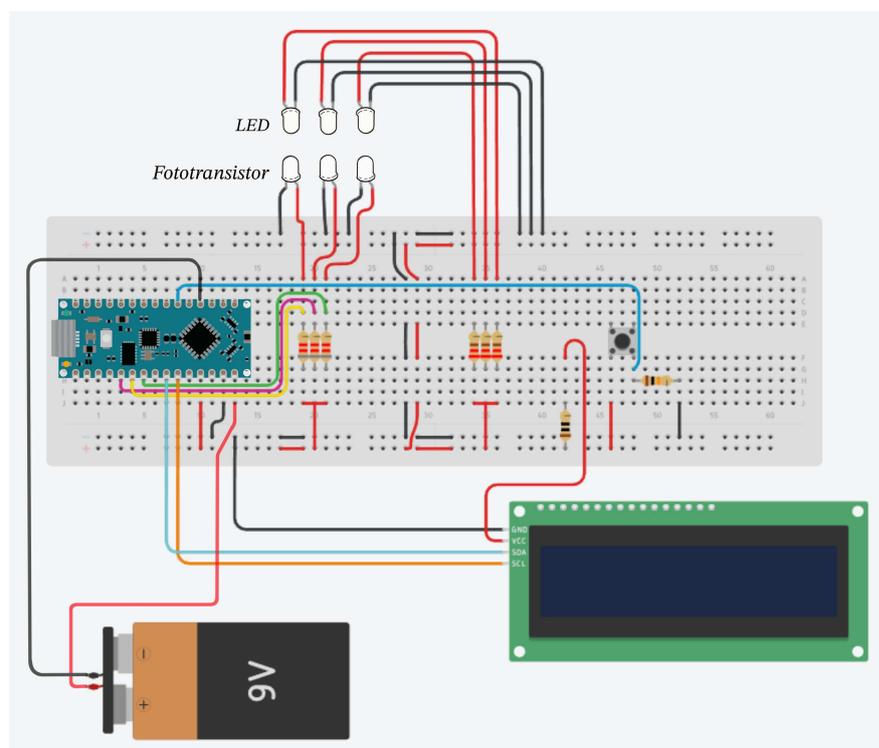


Figura 3.4: Schema elettronico finale dell'encoder incrementale

La geometria del sistema è stata completamente riprogettata e ottimizzata su misura separando il circuito elettronico principale dal sistema ottico di lettura. Anche per quanto riguarda la scheda di Arduino c'è stato un miglioramento passando dalla scheda Arduino Uno a quella Arduino Nano, decisamente più contenuta nelle dimensioni. Inoltre è stata studiata una piccola e compatta "box" contenente tutta l'elettronica e il display LCD, essa verrà chiamata "Unità di controllo integrata".

### 3.2.1 Transizione dal prototipo al sistema finale

Il primo passo è stato quello dell'analisi della turbina nel suo complesso per comprendere come e dove poter collocare il disco dell'encoder e come eseguire la sua lettura. Il punto adatto è stato individuato proprio in corrispondenza dell'albero dell'alternatore il quale è direttamente collegato all'albero della turbina Francis. Il disco verrà dunque posizionato e bloccato a pochi cm dalla cassa dell'alternatore sulla quale sarà fissata una "corona modulare quadrante" che avvolgerà il disco e sulla quale alloggianno i "moduli di interfaccia ottici". Tutto il circuito elettronico sarà staccato da questi componenti e inserito all'interno dell'Unità di controllo integrata la quale, oltre a contenere l'intera parte elettronica, contiene anche il display LCD che permette la visualizzazione dei dati.

### 3.2.2 Moduli di interfaccia ottici

Troviamo due tipologie di moduli, uno dedicato all'Index e uno relativo ai canali A e B. La prima tipologia presenta una struttura decisamente più allungata poichè la tacca relativa all'Index è posta in un anello inferiore rispetto a quello dedicato ai canali. Oltre questa differenza di lunghezza i due componenti sono sostanzialmente identici.

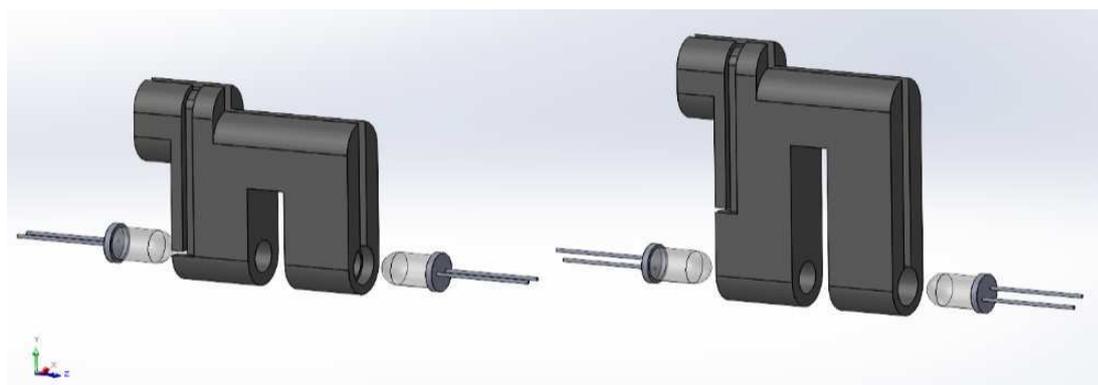


Figura 3.5: Modulo relativo ai canali sulla sx, modulo relativo all'index a dx.

Il modulo ha lo scopo di accogliere la coppia LED-fototransistor, collocando i due componenti faccia a faccia tramite due sedi coassiali separate da una fenditura di 8[mm] all'interno della quale viene inserita una porzione di disco.

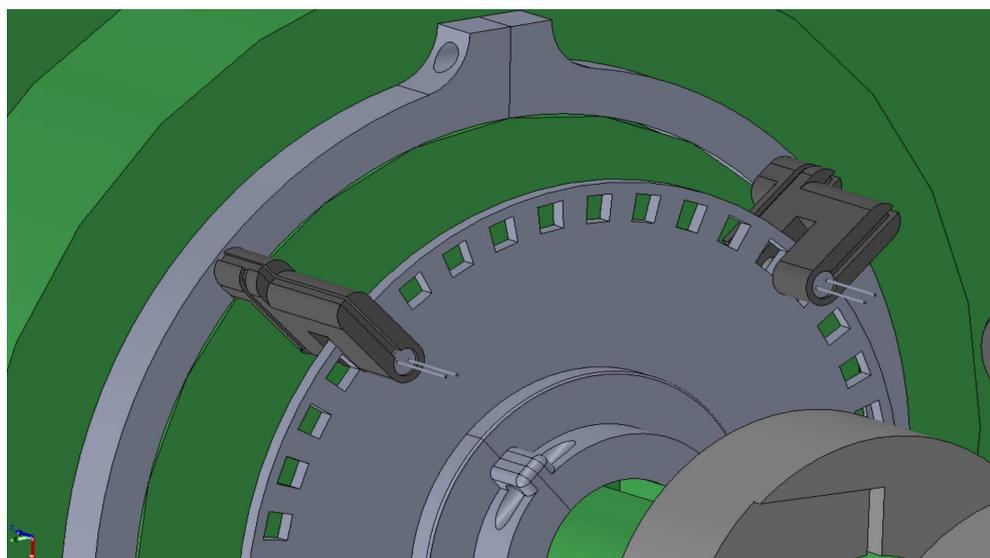


Figura 3.6: Rappresentazione virtuale Solidworks

Il disco dell'encoder [3.6] presenta due anelli: quello più esterno presenta un numero di tacche pari a  $N$  mentre quello più interno possiede una singola tacca. Esso presenta uno spessore di  $3\text{[mm]}$ , in questo modo è possibile garantire sufficiente robustezza al disco e allo stesso tempo ridurre il peso e l'ingombro. Il disco viene fissato all'albero dell'alternatore mediante un bloccadisco composto da quattro parti come in figura.



Figura 3.7: Sezione del blocca disco

Queste quattro sezioni identiche sono poi imbullonate a coppie tramite delle piccole sedi e comporranno infine i due anelli che verranno posti in battuta col disco, realizzando un fissaggio per attrito.

### 3.2.3 Corona modulare quadrante

La corona è composta da quattro sezioni le quali vengono assemblate a coppie di due realizzando un accoppiamento per interferenza mediante una spina cilindrica e due cave nei componenti, dunque le due metà vengono imbullonate nelle due estremità.

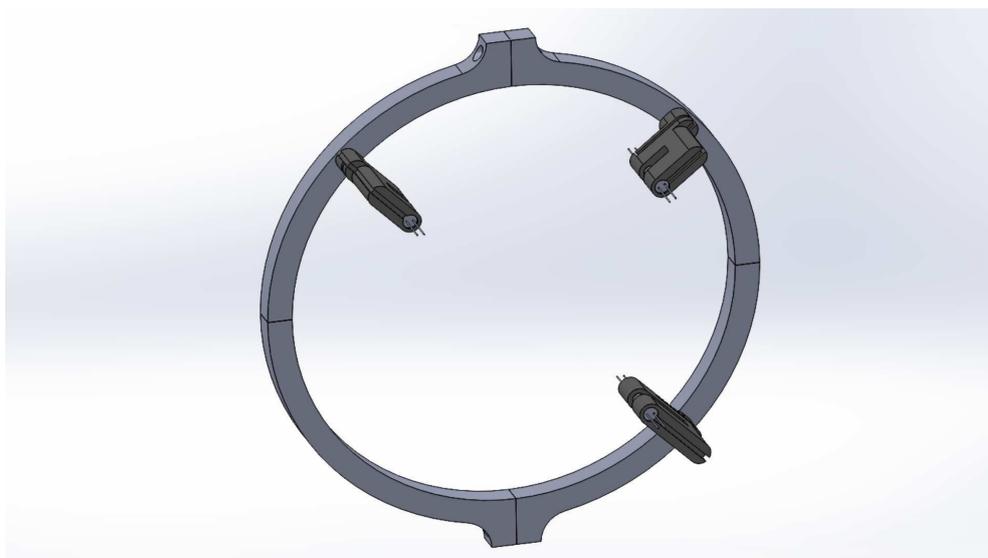


Figura 3.8: Corona Modulare quadrante assemblata

Infine la corona si colloca sulla cassa esterna dell'alternatore, alloggiando in una sede cilindrica preesistente. La corona possiede un diametro interno ed esterno rispettivamente pari a 180[mm] e 200[mm], con uno spessore di 10[mm].

Su tre delle quattro sezioni sono presenti delle sedi nelle quali vengono innestati i moduli di interfaccia ottici.

### 3.2.4 Unità di controllo integrata

L'Unità di controllo integrata [3.9] è una piccola "box" di dimensioni 100x40x40[mm] composta da un corpo centrale e da due coperchi, uno laterale e uno superiore.

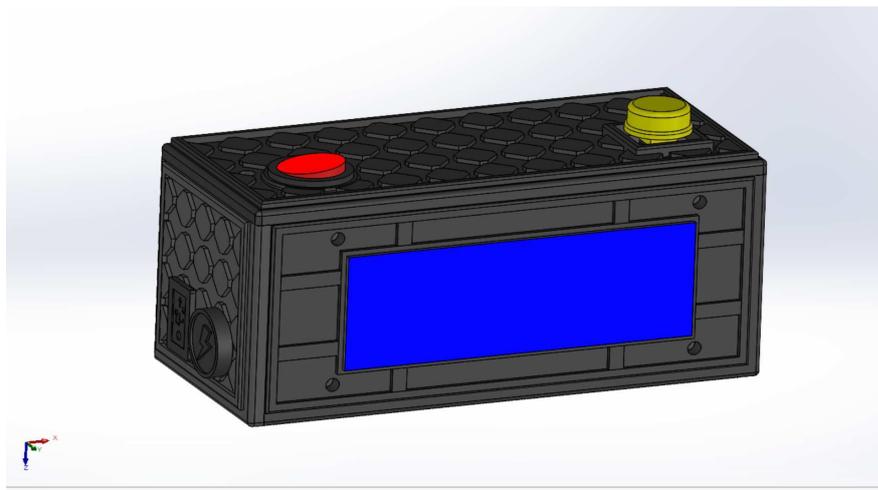


Figura 3.9: Unità di controllo integrata

Nel corpo centrale sono state ricavate le sedi della scheda arduino Nano, della batteria di alimentazione e del display LCD. Inoltre sulla parete laterale destra è presente una piccola fessura dalla quale passano i cavetti che vanno alla corona.

Nel coperchio superiore è presente la sede per un tasto On/Off, per un tastino di controllo e per un piccolo perno disposto internamente che tiene in posizione la batteria.

Nel coperchio laterale invece è presente una fessura per l'accesso alla presa USB della scheda e un'altra fessura dove verrà alloggiato lo spinotto di alimentazione, entrambi possiedono un loro coperchio che garantisce la protezione da eventuali schizzi d'acqua. Il sistema possiede una chiusura a incastro più una piccola vite. Il coperchio laterale si aggancerà sul corpo centrale, dopodiché, inserendo anche il coperchio superiore, si vincola il tutto grazie a un particolare incastro; infine il coperchio superiore viene fissato con una vite.

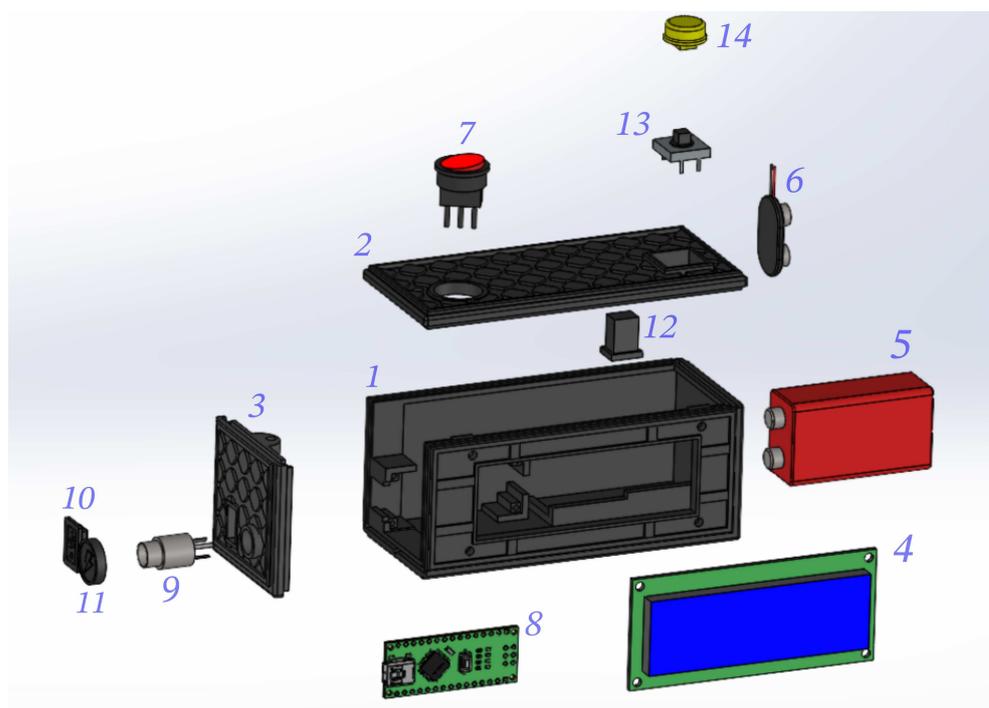


Figura 3.10: 1) Corpo centrale 2) Coperchio superiore 3) Coperchio laterale 4) Display LCD 5) Batteria 9V 6) Clip batteria 9V 7) Interruttore 8) Arduino Nano 9) Spinotto alimentazione 10) Coperchio presa USB 11) Coperchio spinotto 12) Blocca batteria 13) Pulsante a scatto 14) Cappuccio

Nella figura precedente è possibile apprezzare tutti gli elementi contenuti all'interno dell'unità di controllo a meno del cablaggio. Si nota come il sistema di alimentazione sia duplice; dunque, per gestire questo sistema e non avere mai l'alimentazione da entrambe le fonti contemporaneamente, ci si è serviti di uno connettore a tre terminali. Collegando questi ultimi sia alla batteria che ad Arduino Nano, il connettore garantisce l'alimentazione a batteria quando lo spinotto maschio dell'alimentatore esterno non è inserito mentre nel caso contrario esclude la batteria. Il pulsante permette ad un operatore esterno di effettuare l'acquisizione dei dati relativi alla velocità all'interno di un certo intervallo temporale il quale può essere predefinito oppure definito dalla durata della pressione del pulsante.

## 3.3 Stampaggio dei Componenti

Ultimata la fase di progettazione e modellazione 3D dei vari componenti, si è passati alla fase di stampa. La scelta circa le modalità di stampa è ricaduta su una stampante [ELEGOO saturn S] in resina epossidica che garantisce delle superfici lisce, componenti resistenti e un'ottima libertà geometrica.

### 3.3.1 Preparazione alla produzione

Come prima cosa è necessario importare i modelli CAD-3D all'interno del software della stampante, all'interno del quale si vanno ad orientare i componenti e si aggiungono le strutture di supporto se necessario. Successivamente si vanno a definire i parametri di stampa [3.11].

The image shows a software interface for configuring printing parameters. The interface is divided into two main sections: a list of parameters on the left and a set of diagrams on the right.

**Print Parameters:**

Parameter	Value	Unit
Layer Height	0,050	mm
Bottom Layer Count	5	
Exposure Time	3,000	s
Bottom Exposure Time	30,000	s
Transition Layer Count	10	
Transition Type	Linear	
Transition Layer Interval Time Difference	2,45	s
Waiting Mode During Printing	Resting time	
Rest Time Before Lift	0,000	s
Rest Time After Lift	0,000	s
Rest Time After Retract	0,500	s

**Layer Parameters:**

Parameter	Value	Offset
Bottom Lift Distance	7,000	+ 0,000
Lifting Distance	7,000	+ 0,000
Bottom Retract Distance	7,000	+ 0,000
Retract Distance	7,000	+ 0,000
Bottom Lift Speed	70,000	+ 0,000
Lifting Speed	70,000	+ 0,000
Bottom Retract Speed	210,000	+ 0,000
Retract Speed	210,000	+ 0,000

**Diagrams:**

The diagrams illustrate the printing process for two types of layers: "Bottom Layer" and "Normal Layer".

- Bottom Layer:** Shows a cross-section of the printer's nozzle moving up and down to deposit a layer. The nozzle is positioned above the layer, and the layer is shown as a solid block.
- Normal Layer:** Shows a cross-section of the printer's nozzle moving up and down to deposit a layer. The nozzle is positioned above the layer, and the layer is shown as a solid block.

Figura 3.11: Parametri di stampa

Nelle figure sottostanti è possibile visualizzare l'anteprima di stampa e il prodotto finale.

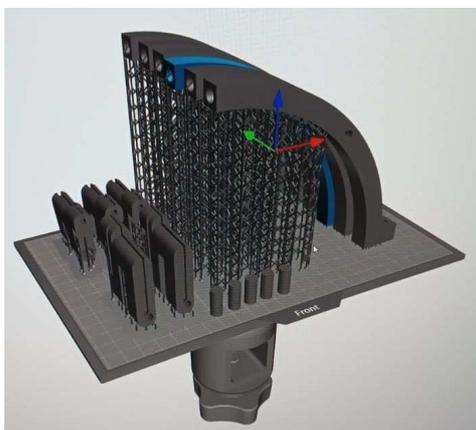


Figura 3.12: Simulazione stampa



Figura 3.13: Risultato stampa

A questo punto vengono rimosse le strutture di supporto e tutto il materiale in eccesso. Successivamente si procede con l'immersione dei componenti all'interno di una vaschetta piena di una soluzione alcolica la quale ha lo scopo di rimuovere tutti i residui di resina non ancora solidificata mediante l'ausilio di un miscelatore a trascinamento magnetico. In seguito al processo di pulizia, i componenti vanno inseriti in una piccola teca all'interno della quale vengono sottoposti a una luce UV; questa completa il processo di polimerizzazione iniziato nella stampante, inducendo così i componenti in via definitiva.



Figura 3.14: Operazioni di pulizia e completamento del processo di polimerizzazione della resina

I componenti ultimati e rifiniti possono dunque essere assemblati per comporre le varie parti dell'encoder incrementale.



Figura 3.15: Corona modulare completa



Figura 3.16: Unità di controllo integrata completa

Per quanto riguarda il disco dell'encoder, esso non verrà realizzato con questa tecnologia ma verrà prodotto in acciaio e sagomato mediante taglio laser. Si procede infine all'implementazione dei componenti elettronici nella corona e nell'unità di controllo così da poter iniziare i test; è tuttavia necessario apportare prima delle modifiche allo script del prototipo.

### 3.4 Sviluppo dello Script Arduino

Lo script rappresenta una delle parti più delicate di questo progetto, infatti la sua buona riuscita e l'affidabilità dei dati rilevati dipendono in gran parte dalla sua buona realizzazione. Per prima cosa si vanno a includere all'interno dello script le varie librerie necessarie per il corretto funzionamento del circuito. Successivamente si procede con l'assegnazione dei pin analogici dedicati ai tre fototransistor e del pin digitale dedicato al pulsante di controllo. Si va dunque a definire le variabili globali all'inizio del codice in modo da essere accessibili sia nel void setup che nel void loop. Tra di esse troveremo variabili relative ai valori assunti dalle

onde quadre, al numero di tacche, ai valori massimi e minimi della velocità, ai diversi valori temporali e infine alle variabili di velocità.

### 3.4.1 Conteggio del numero di tacche

Il conteggio del numero di tacche si basa sulle rilevazioni di luminosità effettuate dai fototransistor, esse forniranno un output analogico in un range 0-1023; "0" rappresenta la situazione con la luminosità più alta mentre "1023" quella in cui vi è la minor luminosità. Ogniqualvolta si interpone una tacca tra il LED e il fototransistor avviene una variazione di luminosità, in questo caso troviamo valori approssimativamente intorno ai 900 per le zone d'ombra e 45 per le tacche. Ponendo una soglia tra questi due valori estremi, è possibile individuare in maniera molto agevole le tacche; quello che si va a fare è associare un valore di luminosità sotto la soglia al valore "1" e "0" al valore di luminosità sopra la soglia, ricostruendo in questo modo un'onda quadra. Ciò viene fatto per tutti e tre i fototransistor ricreando così le tre onde quadre chiamate rispettivamente canale A, Canale B e Index.

Dunque Arduino legge i passaggi di stato da 0 a 1 del canale A, nella figura 3.17 sono riportate le righe di codice relative a questo passaggio e al metodo di calcolo del tempo che intercorre tra la rilevazione di una tacca e quella successiva; questo tempo verrà utilizzato per il calcolo della velocità di rotazione.

```
if (valore_onda_quadra_precedente1 == 0 && valore_onda_quadra1 == 1) {
    conteggio_tacche_fototransistor1++;

    unsigned long tempo_attuale1 = micros();
    if (tempo_precedente1 > 0) {

        float nuovo_t_tacca = (tempo_attuale1 - tempo_precedente1) / 1000000;
```

Figura 3.17: Conteggio tacche e rilevamento tempi relativi al fototransistor 1

Il valore della soglia non può essere fisso poichè altrimenti delle variazioni di luce ambientale potrebbero influenzare il funzionamento dell'encoder, per questo motivo la soglia viene impostata tenendo conto del valore massimo di luminosità (`maxLuminosità`) acquisito nelle ultime 10 rilevazioni; così facendo si realizza una soglia flessibile la quale garantisce affidabilità allo strumento. Nella figura sottostante sono riportate le righe relative alle soglie dei vari fototransistor, si può notare come in generale quest'ultima sia stata ricavata sottraendo al valore massimo una quantità pari a 550, quantità scelta sulla base dell'esperienza maturata durante le prove.

```
int valore_onda_quadra1 = (luminosita1 < (maxLuminosita1 - 550)) ? 1 : 0; // Fototransistor 1
int valore_onda_quadra2 = (luminosita2 < (maxLuminosita2 - 550)) ? 1 : 0; // Fototransistor 2
int valore_onda_quadra3 = (luminosita3 < (maxLuminosita3 - 550)) ? 1 : 0; // Fototransistor 3
```

Figura 3.18: soglie variabili

Il canale A viene utilizzato per il calcolo della velocità di rotazione, il canale B identico nella forma al canale A ma sfasato di 90 gradi rispetto a esso serve per la rilevazione del verso di rotazione, infine l'index serve per monitorare il numero di giri compiuti e verificare la correttezza del conteggio delle tacche all'interno del singolo giro in modo da poter individuare ed eliminare i dati affetti da errori.

### 3.4.2 Calcolo della velocità in RPM

In riferimento al canale A, si calcola il tempo che intercorre tra una tacca e quella successiva; questo tempo, chiamato `nuovo_t_tacca`, verrà memorizzato all'interno di un buffer circolare di 10 unità. Questo, una volta pieno, viene utilizzato per il calcolo del tempo medio tra tacche chiamato `media`. Dopodichè vengono presi singolarmente i valori del buffer e si esegue un filtraggio per eliminare gli *outliers*, dunque tenendo conto solo dei valori buoni presenti nel buffer si fa nuovamente la media ottenendo così il valore di tempo `t_tacca`, mediato e pulito dagli *outliers*.

La velocità di rotazione [RPM] viene dunque calcolata con la seguente formula:

$$\text{RPM} = \frac{60}{N \cdot t_{\text{tacca}}} \quad (3.2)$$

Prima di poter eseguire questo calcolo e dunque ottenere il valore di velocità, è necessario verificare il corretto conteggio delle tacche da parte del canale A; ciò è possibile proprio grazie all'Index. Quest'ultimo delimita un giro preciso e rende possibile definire il numero delle tacche del canale A che sono state contate in quel giro, se tale numero risulta inferiore di quello atteso i dati relativi a quel preciso giro vengono ignorati poichè affetti da errori; quando invece l'esito è positivo, il programma procede al calcolo della velocità (RPM).

### 3.4.3 Rilevazione del verso di rotazione

Il verso di rotazione viene rilevato mediante la comparazione delle onde quadre dei canali A e B le quali sono sfasate di 90° (sfasamento elettrico).

Nello script è stato implementato il seguente ciclo if:

```
if (valore_onda_quadra_precedente1 == 0 && valore_onda_quadra1 == 1 && valore_onda_quadra2 == 0) {  
    verso_rotazione = 'A'; // Senso di rotazione Antiorario  
} else if (valore_onda_quadra_precedente2 == 0 && valore_onda_quadra2 == 1 && valore_onda_quadra1 == 0) {  
    verso_rotazione = 'O'; // Senso di rotazione Orario  
}
```

Figura 3.19: Verifica del verso di rotazione

In questo modo si ottiene la rilevazione del verso di rotazione antiorario (A) quando il canale A presenta una salita da 0 ad 1 mentre il canale B si trova ancora nello stato 0. Se si ruota in senso orario (O) avviene esattamente il contrario, si troverà una salita nel canale B mentre quello A si troverà ancora a 0.

Il valore della velocità, del numero di tacche e del senso di rotazione verranno stampati sul display LCD al termine di ogni giro completo.

## 3.5 Test Encoder incrementale

Una volta conclusa la parte di programmazione, è stato possibile proseguire con le prove di funzionamento dello strumento. Tali prove non sono state condotte in laboratorio ma a casa, si tratta infatti di prove *in-door*.

Nelle fasi di test non è presente l'unità di controllo integrata per motivi di praticità.

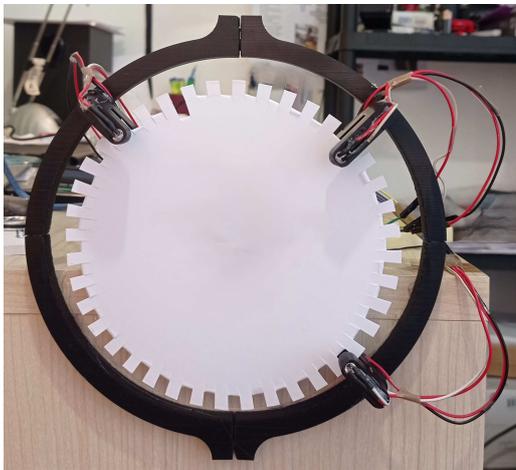


Figura 3.20: Corona modulare assemblata con disco encoder da 40 tacche

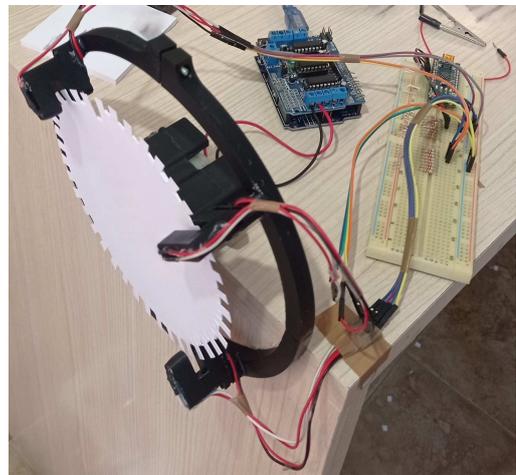


Figura 3.21: Allestimento sperimentale prove in-door

Per le prove sono stati utilizzati diversi dischi di cartone rigido accuratamente sagomati per ottenere le tacche della medesima dimensione, questi sono stati calettati nello stesso motore utilizzato anche nella fase prototipale.

Per il controllo del motore è stata utilizzata una *shield* Arduino alimentata a 12V; quest'ultima, insieme alla libreria "AFMotor", consente di gestire in maniera molto semplice i regimi di rotazione permettendo di condurre i test sia a velocità costante che variabile. La risoluzione dello strumento varierà con il numero di tacche secondo la formula 2.2.

### 3.5.1 Prove disco 40 tacche

Considerando un disco da 40 tacche, l'encoder ha mostrato un'ottima stabilità di funzionamento garantendo una misurazione "pulita" (corretto numero di tacche contate) fino ai 1300[RPM], velocità oltre la quale il sistema non riesce a contare tutte e 40 le tacche compromettendo dunque l'acquisizione della velocità. Tuttavia risulta essere ottimo se applicato alle turbine Francis che nelle condizioni standard non superano le 600[RPM]. Nel caso di applicazioni con turbine più "veloci" come le Pelton, la scelta migliore ricadrebbe su di un disco con un numero minore di tacche (30). Per quanto riguarda la rilevazione del verso di rotazione, posizionando in maniera precisa i moduli del canale A e B in modo da realizzare lo sfasamento richiesto di 90° elettrici, questi hanno fornito risultati ottimi e stabili.

### 3.5.2 Prove disco 55 tacche

Aumentando il numero di tacche a 55, l'encoder restringe leggermente il suo range di funzionamento coprendo le misurazioni in maniera pulita fino a un valore di velocità pari a 1100 [RPM]. Aumentando il numero di tacche se ne riducono anche le dimensioni fino a essere inferiori al diametro del fototransistor, per questo motivo è necessario implementare dei collimatori nei moduli di interfaccia ottici in modo da ripristinare correttamente le zone d'ombra e di luce. In questo caso il sistema presenta un'uscita più stabile rispetto al disco con 40 tacche, dovuto al fatto che aumentando il numero di tacche il sistema è più sensibile alle piccole variazioni di velocità e dunque produce un'uscita più continua.

### 3.5.3 Considerazioni finali

Ciò che si evince dalle prove che sono state condotte è che lo strumento lavora in maniera soddisfacente in un intervallo sufficientemente ampio per l'applicazione richiesta nelle turbine Francis e Pelton, possiede un ottimo margine di miglioramento; andando ad agire sul numero di tacche e sulla dimensione dei fototransistor, si riescono a coprire anche intervalli di velocità ben superiori. Gli ottimi risultati ottenuti con un disco artigianale fanno ben sperare in quelli che

si otterranno in futuro con un disco in acciaio perfettamente sagomato mediante l'operazione di taglio laser.

Inoltre, sfruttando l'Index, è possibile ricavarne una velocità di riferimento - che rappresenta una sorta di velocità di sicurezza da inserire in parallelo alla principale - e stamparla solo quando si supera la velocità massima dello strumento, ossia quando il conteggio delle tacche inizia a dare errori.

Questa velocità possiede la stessa logica di quella calcolata nel canale A con l'unica differenza che in questo caso è presente una sola tacca per giro. Essa risulta essenziale per proteggersi da situazioni di emergenza come quella in cui la turbina va "in fuga", dove la velocità può crescere in maniera spropositata. Si tratta di un valore meno continuo rispetto al precedente, in quanto viene misurato una sola volta per giro, ma altamente affidabile ed efficace poichè l'alta velocità di rotazione implica una velocità di aggiornamento del parametro misurato proporzionale con essa.



# Capitolo 4

## Encoder assoluto sperimentale

### 4.1 Progettazione e sviluppo del prototipo

#### 4.1.1 Analisi del sistema di lettura analogico

La conoscenza precisa dell'angolo di apertura delle pale direttrici è un aspetto fondamentale per eseguire una corretta regolazione della portata. Nella turbina Francis, oggetto di analisi, possiamo osservare come il sistema di lettura dell'angolo di apertura sia di tipo analogico; esso presenta una struttura statica solidale alla parte esterna della voluta e un elemento mobile ossia un'asta solidale all'asse di rotazione di una delle pale direttrici. Nella parte statica troviamo una placca tarata agganciata a una struttura di supporto, questa presenta una taratura angolare il cui centro di riferimento è proprio l'asse di rotazione di una delle pale direttrici. L'elemento mobile si muove rispetto alla placca e, grazie a una tacchetta di riferimento nella parte superiore dell'asta, ne permette la lettura angolare; la risoluzione angolare del sistema analogico è pari a un  $1^\circ$ .

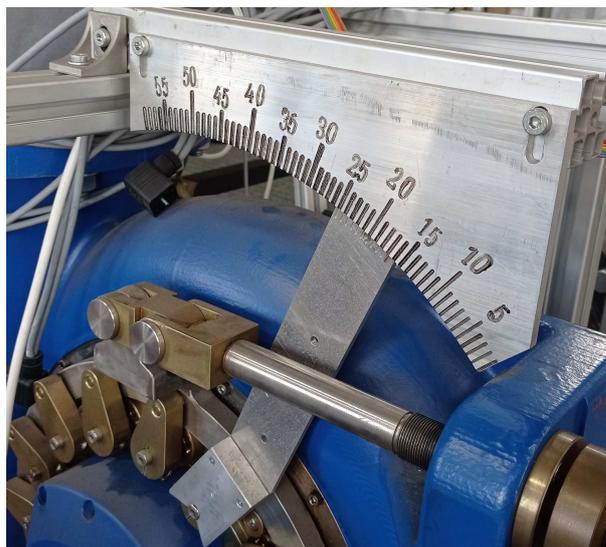


Figura 4.1: Sistema di regolazione della portata

Le problematiche principali di questo sistema sono principalmente due: bassa risoluzione e una scomoda lettura analogica. Sulla base di tali problematiche nasce la necessità di sviluppare un sistema di misurazione con una migliore risoluzione e che fornisca una lettura digitale del valore angolare. La digitalizzazione del parametro angolare, oltre a essere una notevole comodità, è anche necessaria nel momento in cui si desidera implementare tale valore all'interno di un sistema di controllo automatico della portata.

#### 4.1.2 Sviluppo del prototipo

La soluzione pensata per rispondere a tale necessità si basa sulla tecnologia degli encoder assoluti rotazionali dove però, a differenza della tecnologia classica, non sarà più il disco in sé a muoversi ma bensì la strumentazione ottica. L'idea è quella di sostituire la placca presente nel sistema [4.1] con una di dimensioni e forme quasi identiche che abbia nella sua porzione inferiore una sezione di un anello di tacche in codifica di Gray. Quest'ultimo avrà tante file di tacche tanto quanto si vorrà migliorare la risoluzione. Per la lettura di tale placca si utilizzeranno delle coppie di LED-fototransistor in numero pari ai bit scelti per l'encoder assoluto; per la lettura di tali fototransistor verrà utilizzata una scheda Arduino Nano. Per quanto riguarda la disposizione, da una parte della placca viene collocata una fila

di fototransistor e dall'altra una di LED. In questo modo, grazie al movimento dell'asta alla quale sono solidali le coppie, si ottiene in maniera immediata la posizione angolare esatta individuata da un preciso stato digitale.

Come punto di partenza si è ragionato sul metodo di realizzazione del sistema di lettura delle tacche; per fare ciò si è sviluppato un prototipo con un numero limitato di bit tale da definire un corretto sistema di lettura da poter applicare al sistema finale. Si partiti da un semplice sistema 3 bit [4.1] il quale permette la lettura di otto stati digitali differenti.

Per quanto riguarda il circuito elettronico, ci si è serviti di un circuito praticamente identico a quello utilizzato nell'encoder incrementale sperimentale [3.4], facendo a meno del pulsantino e implementando delle coppie LED-fototransistor di dimensioni ridotte.



Figura 4.2: Prototipo encoder assoluto sperimentale

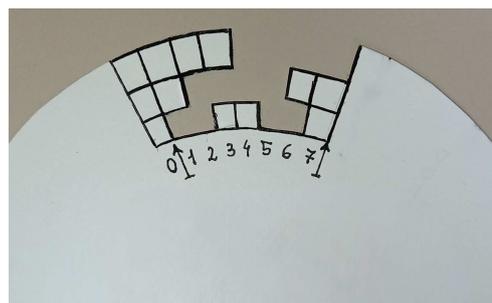


Figura 4.3: Disco encoder assoluto 3 bit

Utilizzando due strisce di materiale polimerico rigido sono stati sviluppati dei supporti dove agganciare le tre coppie di LED-fototransistor, tra di essi è stata posta un'altra striscia presentante nella sua parte centrale una fenditura che si estende nella quasi totalità della sua lunghezza. Quest'ultima svolge il ruolo di collimatore di luce che viene posizionato subito dopo la striscia dei LED. Dopodichè è stato realizzato un piccolo disco in codifica di Gray da 3 bit [4.3].

Nello script dell'encoder assoluto si va a sfruttare la logica di base usata nell'encoder assoluto per il conteggio delle tacche, dunque tramite la lettura contemporanea delle tre onde quadre è possibile leggere stato digitale presente sul disco e in questo modo ricavare esattamente la posizione angolare. Nel caso del 3 bit ci saranno solamente otto stati digitali, dunque il sistema rileverà lo stato digi-

tale e convertirà quel valore dalla codifica di Gray a un valore numerico 0,1,2,3...; è infine sufficiente moltiplicare il valore numerico per il valore della risoluzione per ottenere l'output angolare. Per esempio, scegliendo una risoluzione angolare di  $10^\circ$ , è possibile spaziare da  $0^\circ$  a  $70^\circ$  sfruttando gli otto stati digitali messi a disposizione da un sistema 3 bit.

### 4.1.3 Prove e risultati del prototipo

Le prove sono state eseguite definendo una risoluzione generica di  $20^\circ$ . Si è scelto di utilizzare, oltre al disco visto in precedenza, anche una striscia di carta codificata sempre secondo Gray con delle tacche larghe 1mm in modo da comprendere quanto fosse possibile abbassare un'eventuale risoluzione nel sistema reale.



Figura 4.4: Sistema di acquisizione



Figura 4.5: Visualizzazione dati

I risultati ottenuti sono stati ottimi per entrambi i casi, il disco ha fornito una lettura impeccabile della posizione angolare e la striscia ha dato risultati ancora più soddisfacenti in quanto ha confermato la possibilità di ottenere delle risoluzioni ottime. Lo script generato - che verrà ampiamente discusso nella sua forma finale nel paragrafo 4.4 - ha prodotto un valore angolare molto preciso e stabile senza presentare alcun *outlier*. Dunque, in virtù di tali risultati, si è potuto validare lo script Arduino di acquisizione della posizione angolare e dunque procedere sulla base di esso con lo sviluppo di un sistema ben più complesso e accurato adatto al nostro obiettivo principale.

## 4.2 Progettazione CAD-3D sistema finale

### 4.2.1 Transizione dal prototipo al prodotto finale

Nel sistema prototipale si è sfruttato un semplice 3 bit per realizzare una logica di acquisizione dati e un script Arduino di lettura adeguato; per poter applicare questa tecnologia nel nostro problema in esame, ossia la turbina, necessitiamo di un sistema ben più complesso e strutturato. Considerando il range angolare di  $60^\circ$ , si è optato per un sistema a 8 bit il quale è in grado di realizzare 256 stati digitali differenti; è dunque possibile suddividere il nostro intervallo di  $60^\circ$  usando 256 intervalli da  $0,25^\circ$  ciascuno, ottenendo una scala da 0 a  $63,75^\circ$ . In questo modo la risoluzione è stata di fatto quadruplicata in quanto siamo passati da  $1^\circ$  a  $0,25^\circ$ . Per quanto riguarda la parte mobile su cui alloggianno le coppie LED-fototransistor, essa è stata progettata per essere contenuta nelle dimensioni e di facile applicazione sull'asta di misura.

### 4.2.2 Placca in codifica di Gray 8 bit

Dopo aver ricostruito la placca originale sul software di progettazione Solidworks, si è proceduto alla realizzazione della codifica di Gray all'interno di un settore circolare ampio  $60^\circ$  il quale presenta una suddivisione radiale in otto livelli, tanti quanti sono i bit del sistema di lettura.

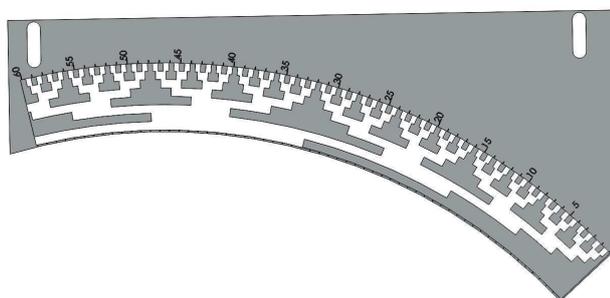


Figura 4.6: Placca in codifica di Gray 8 bit

Questa placca presenterà dunque 240 stati digitali dei 256 posti a disposizione dal sistema 8 bit, determinando dunque la risoluzione prefissata di  $0,25^\circ$ .

Inoltre, per mantenere anche un riferimento ottico, sono state pensate delle tacche numerate che verranno incise sulla piastra; in questo modo è stato digitalizzato il valore angolare ma allo stesso tempo si è mantenuto un prezioso riferimento analogico.

La realizzazione di questa placca verrà affidata a una precisa operazione di taglio laser che garantirà la realizzazione della codifica.

### 4.2.3 Schema elettronico

Lo schema elettronico presenta otto coppie LED-fototransistor con le relative resistenze, una scheda Arduino Nano e un display LCD per la visualizzazione dei dati. Nel dettaglio troviamo i seguenti componenti:

- Microcontrollore Arduino Nano
- LED bianco ( $i_f=20\text{mA}$   $V_f=3,5\text{V}$   $\lambda=380-750\text{nm}$ )
- Fototransistor ( $i_c=15\text{mA}$   $V_{ce}=35\text{V}$   $\lambda=380-1150\text{nm}$ )
- Resistenze (8x220 $\Omega$ (led) 8x8,2k $\Omega$ (fototransistor) 1x10 $\Omega$ )
- Display LCD + modulo IC2 ( $V_{dd}=5\text{V}$ )
- Potenziometro (0-5V 10k $\Omega$ )

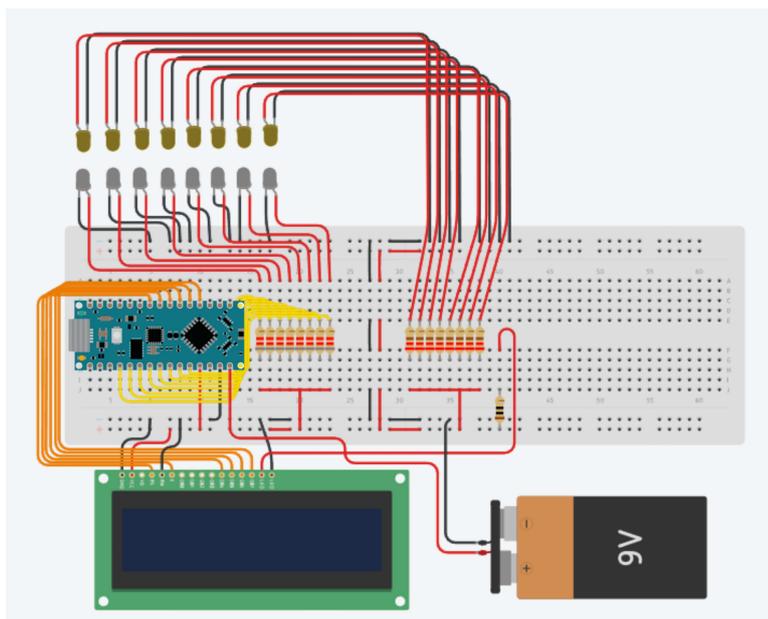


Figura 4.7: Circuito elettrico encoder assoluto sperimentale

Il circuito elettronico viene completamente racchiuso - a meno delle coppie LED-fototransistor - all'interno di un'unità di controllo integrata integrata identica a quella sviluppata nel capitolo precedente [3.9].

#### 4.2.4 Modulo di interfaccia ottico

Il modulo di interfaccia ottico è composto da tre parti: la base di supporto che si aggancia sull'asta mobile, il supporto per la fila di LED e quello per i fototransistor. Nelle figure figure sottostanti troviamo due versioni di questo modulo: la prima è stata utilizzata per i test in-door e per la validazione dell'encoder assoluto 8 bit, mentre la seconda rappresenta il prodotto finito ottimizzato. Quest'ultimo deriva appunto dal precedente e differisce da esso per la sua maggiore robustezza e per la possibilità di eseguire una regolazione orizzontale oltre che in verticale dello strumento; dal punto di vista tecnico di funzionamento è esattamente identico al precedente, motivo per cui la fase di test sul primo modello estende i suoi risultati anche al modello definitivo.

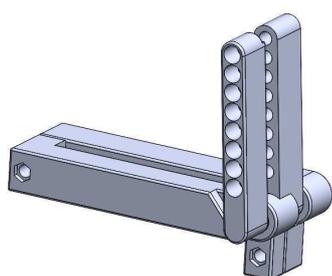


Figura 4.8: Modulo ottico iniziale

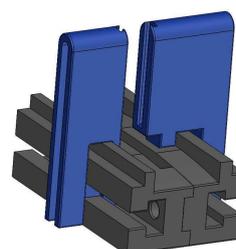


Figura 4.9: Modulo ottico definitivo

Per quanto riguarda il modulo definitivo, nella figura che segue si notano al centro le due basi ed esternamente i due supporti, inoltre è possibile visualizzare la disposizione verticale delle file di LED e fototransistor.

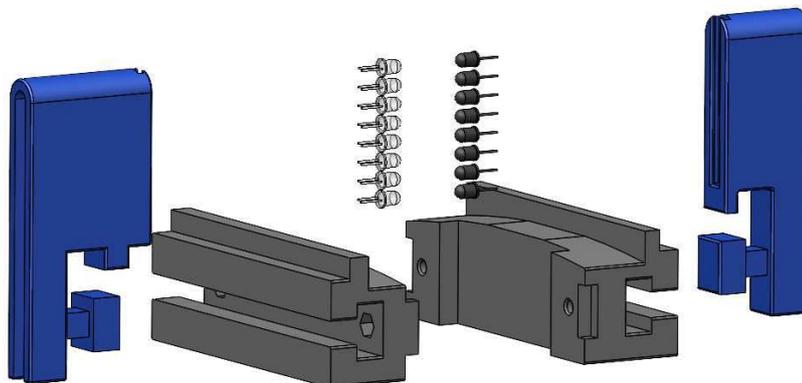


Figura 4.10: Esploso del modulo ottico definitivo

La base è composta da due sezioni le quali vengono congiunte da due piccoli bulloni posti nelle estremità e da un particolare incastro che impedisce il disallineamento delle due porzioni della base. I due supporti presentano otto cavità parallele disposte in maniera verticale, queste hanno due livelli di diametro interno in modo da alloggiare il LED/fototransistor senza che esso ecceda dal supporto e impatti con la placca [4.11]. I supporti presentano inoltre una sottile sede che si estende verticalmente di fronte alle file dei componenti elettronici; essa serve per l'alloggio dei collimatori i quali sono necessari per ottenere un fascio di luce di dimensioni inferiori alla larghezza della tacca e dunque garantire la risoluzione desiderata.

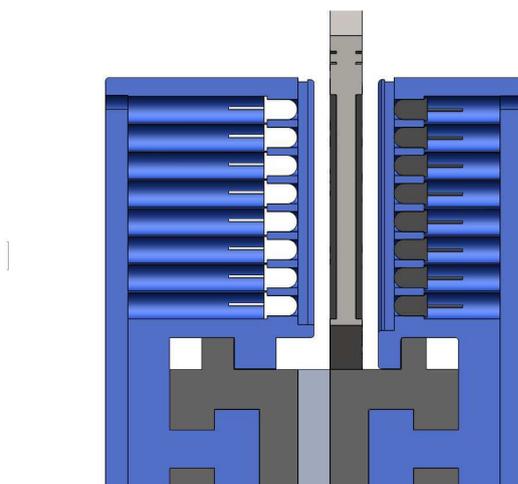


Figura 4.11: Vista in sezione dei supporti

I supporti vengono incastrati sulla base mediante due sedi e vincolati ad essa mediante due perni che scorrono nelle sedi e che si fissano mediante una piccola vite. Dunque la base verrà incastrata nell'asta definita in precedenza, la quale fornisce l'informazione sulla reale posizione angolare della paletta. Infine una volta fissata la placca nel sistema di sostegno solidale alla parte esterna della voluta si ottiene il seguente risultato:

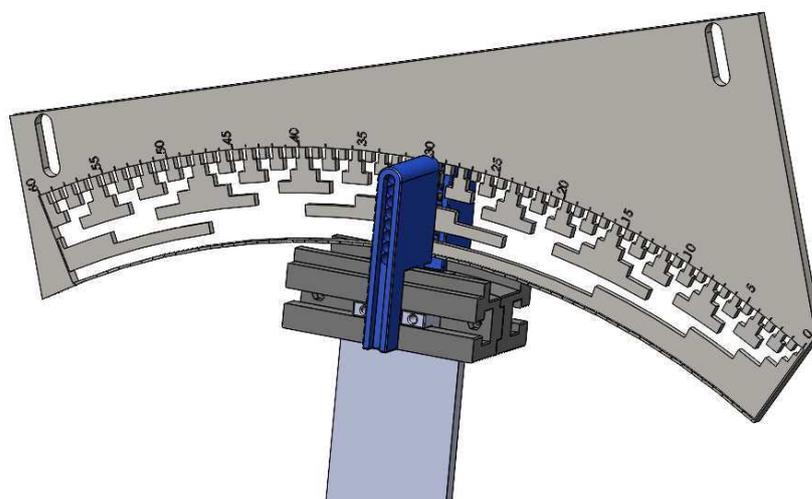


Figura 4.12: Sistema finale

Dunque si nota qui il vantaggio del modulo definitivo, ossia come sia possibile regolare la posizione dei supporti delle coppie LED-fototransistor in orizzontale mediante la sede della base oltre che in verticale mediante l'aggancio sull'asta.

### 4.3 Sviluppo dello script Arduino

Lo script Arduino utilizza il medesimo procedimento di lettura degli stati alto-basso delle onde quadre già discusso nel capitolo precedente. La placca presenta una codifica di Gray 8 bit, dunque Arduino produrrà uno stato digitale "GrayValue" per ogni fila di tacche differenti che andrà a rilevare.

Nella Figura 4.13 sono riportate le righe di codice responsabili della generazione delle onde quadre e del codice in codifica di Gray ossia lo stato digitale.

```

byte grayValue = 0;
for (int i = 0; i < 8; i++) {
    int valore_onda_quadra = (luminosita[i] < (maxLuminosita[i] - 100)) ? 1 : 0;
    grayValue |= (valore_onda_quadra << i);
    // Mantieni il valore precedente
    valore_onda_quadra_precedente[i] = valore_onda_quadra;
}

```

Figura 4.13: Lettura onde quadre e generazione "grayValue"

A questo punto è necessario convertire lo stato digitale che si trova in codifica di Gray in un valore decimale 0,1,2....240. Per fare ciò si utilizza la funzione "GrayToDecimal(GrayValue)", essa ci restituisce il valore decimale che viene moltiplicato per la risoluzione dello strumento per fornire il valore angolare finale.

```

// Conversione del codice Gray in un valore decimale
int decimalValue = grayToDecimal(grayValue);

// Calcolo dell'angolo corrispondente
float angolo = decimalValue * 0.25;

```

Figura 4.14: Conversione dalla codifica di gray al valore decimale"

La funzione "GrayToDecimal(GrayValue)" prende la codifica di Gray, la converte prima in codifica binaria e successivamente da binaria a decimale con la seguente logica:

```

// Funzione per convertire il codice Gray in decimale
int grayToDecimal(byte gray) {
    int binary = gray; // Inizializza binary con il valore Gray
    for (int i = 1; i < 8; i++) {
        binary ^= (gray >> i); // Applica l'operazione XOR per convertire
    }
    return binary; // Restituisce il valore decimale
}

```

Figura 4.15: Funzione grayToDecimal

## 4.4 Prove in-door encoder assoluto 8bit

### 4.4.1 Stampaggio modulo di interfaccia ottica

Per l'esecuzione delle prove in-door e la validazione del sistema 8 bit si è proceduto con la stampa 3D del modulo di interfaccia ottica iniziale, procedimento per cui è stata usata la medesima stampante e lo stesso procedimento di finitura che è stato impiegato per la realizzazione dell'encoder incrementale.

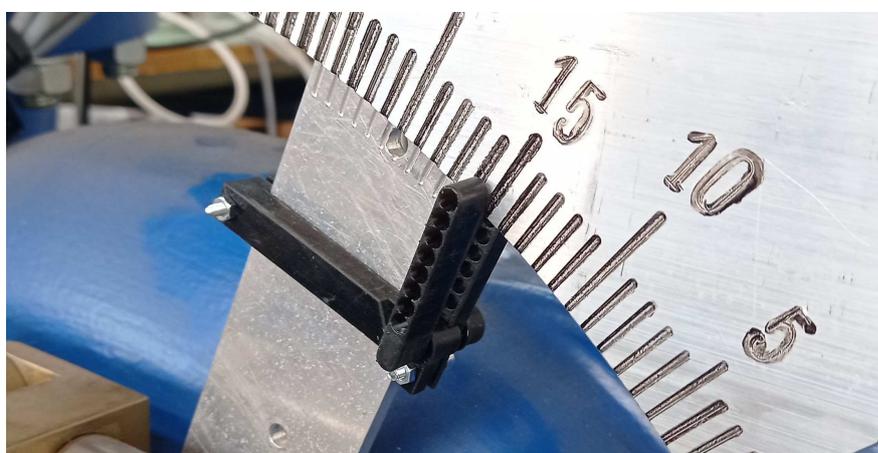


Figura 4.16: Prova di montaggio Modulo stampato 3D

Come è possibile osservare nella Figura 4.16, il modulo è stato montato per verificarne le effettive dimensioni; ciò ha riportato un montaggio molto preciso e solidale all'asta.

### 4.4.2 Montaggio sistema di verifica

Dopo aver stampato i vari componenti del modulo di interfaccia ottica, si è proceduto dunque al suo assemblaggio e alla successiva implementazione delle otto coppie LED-fototransistor [Figura 4.17]. Il circuito elettronico è stato sviluppato su una breadboard la quale è stata fissata insieme al modulo di interfaccia su una base solida. Infine il sistema è stato completato inserendo nel supporto dei LED il collimatore, ossia una striscia opaca con una fenditura centrale di 0,5mm.

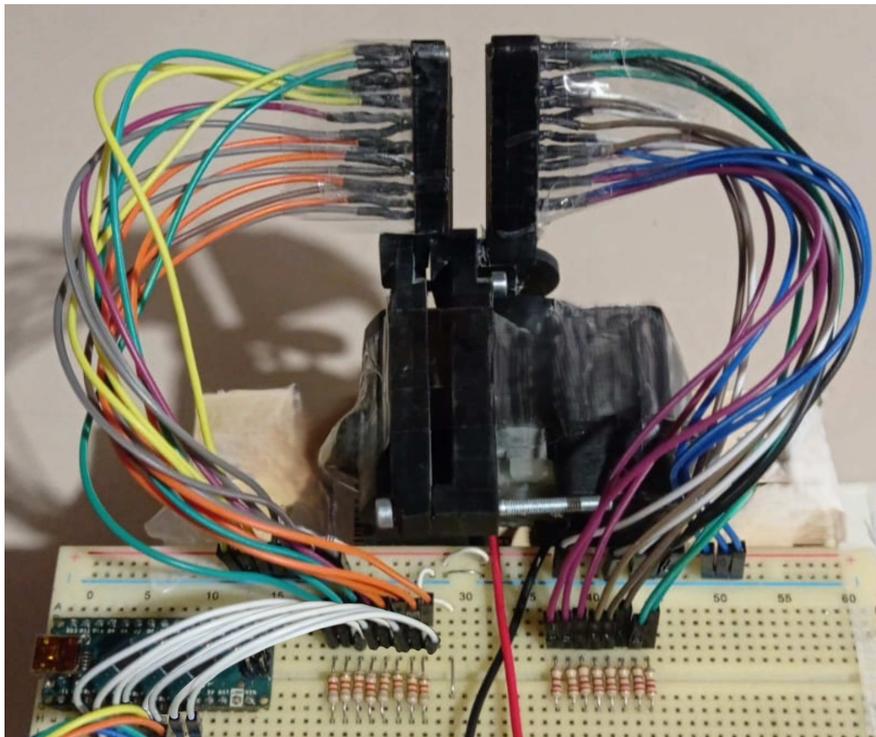


Figura 4.17: Prova di montaggio Modulo stampato 3D

#### 4.4.3 Realizzazione placca di prova codificata

Tramite il modello CAD-3D della placca è stata creata la sua messa in tavola, quest'ultima è stata stampata su un cartoncino rigido in scala 1:1 e successivamente sagomata per realizzare precisamente la codifica.



Figura 4.18: Placca codificata in cartoncino

#### 4.4.4 Prove e risultati

Le prove sono state svolte sia mediante l'uso della placca codificata appena descritta sia mediante una striscia codificata con uno sviluppo lineare a differenza della placca. Come è stato già fatto nella prototipazione, si è scelto di eseguire la doppia verifica poichè la striscia lineare permette di ridurre sempre di più la dimensione delle tacche e comprendere i limiti della sua risoluzione.



Figura 4.19: Prove su striscia codificata

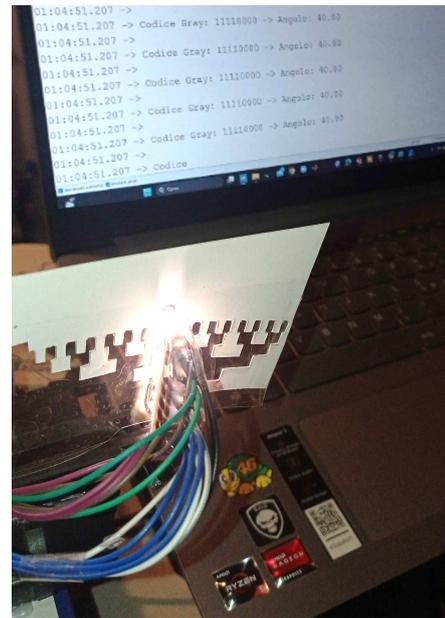


Figura 4.20: Prove su di una porzione di placca

Una volta svolte le prove si è potuto confermare un comportamento eccellente dello strumento, presentando una rilevazione accurata di ogni stato digitale presente sia sulla placca sia sulla striscia lineare. Non è stato rilevato nessun problema anomalo durante la transizione da uno stato digitale a quello immediatamente adiacente, il sistema è molto veloce per via della logica di programmazione molto snella. A livello di codice, è stato testato il suo funzionamento per un tempo prolungato di circa un'ora senza presentare nessuna interruzione. Infine, se il sistema viene spento e poi riaccessò, è in grado di individuare correttamente la posizione in maniera istantanea.

Il sistema ha confermato di poter leggere in maniera precisa veloce e affidabile ogni stato digitale della placca che è stata progettata, confermando così la

risoluzione del sistema di acquisizione dell'angolo di apertura delle pale direttrici a  $0,25^\circ$ .

In tal modo, tramite queste prove, si valida l'encoder assoluto sperimentale come un ottimo strumento di misura da applicare nel progetto.



# Capitolo 5

## Sistema di controllo automatico del distributore

### 5.1 Analisi del sistema di regolazione manuale

#### 5.1.1 Principio di funzionamento

Il sistema di regolazione dell'angolo di apertura delle pale direttrici [5.1] sfrutta un meccanismo biella-manovella: viene utilizzata una barra filettata - che ruota sul proprio asse e contemporaneamente trasla lungo quest'ultimo grazie a una sede filettata presente nella struttura esterna della voluta - per trasferire il moto traslatorio lineare a un cursore il quale è collegato a un'altra biella tramite un perno, la biella è a sua volta imperniata sulla ghiera. Quest'ultima è infine connessa a una serie di bielle disposte circonferenzialmente sulla turbina, esse sono calettate sull'asse di rotazione delle rispettive palette. Il movimento rototraslatorio della barra, e dunque il controllo del sistema, avviene per via della rotazione manuale di un piccolo volante bullonato nell'estremità esterna della barra.

Per quanto riguarda la rilevazione dell'angolo di apertura delle palette direttrici, essa avviene mediante la rotazione di un'asta incernierata sull'asse di rotazione di una delle palette 4.1, quest'ultima possiede una tacca nella sua estremità che funge da riferimento per la lettura della placca tarata solidale alla voluta della turbina.

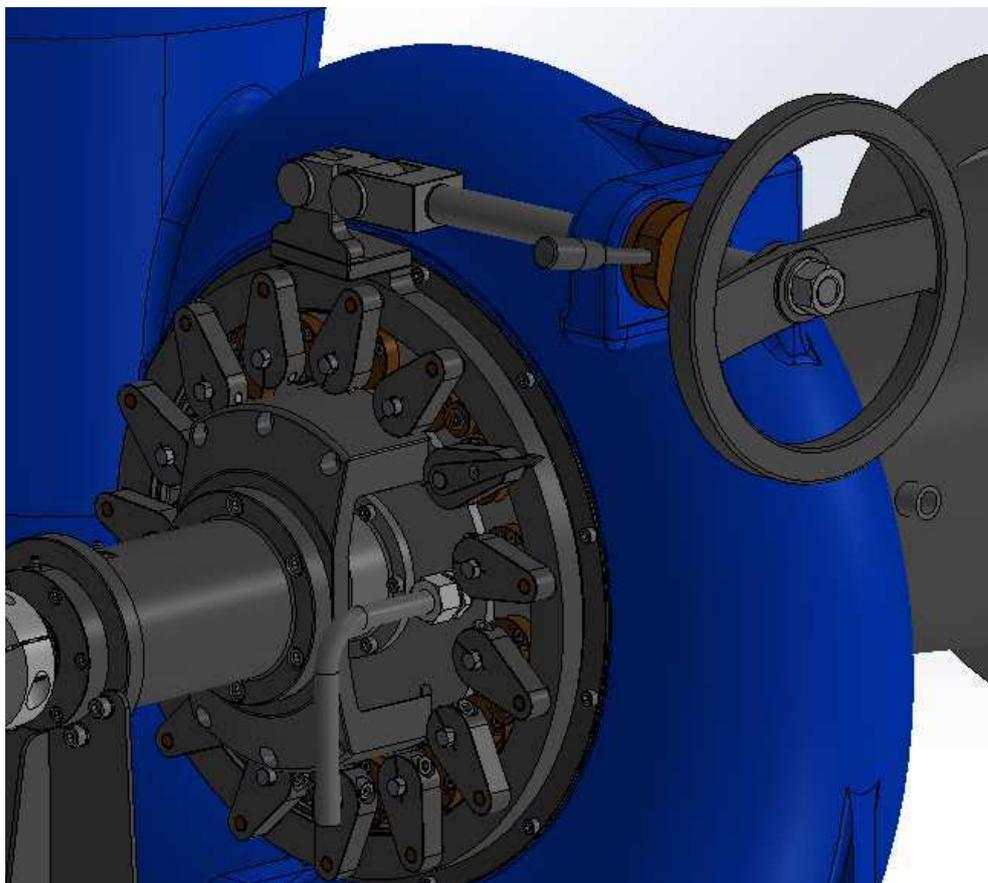


Figura 5.1: Sistema di regolazione manuale della portata  $Q_v$

La regolazione viene eseguita manualmente da un operatore il quale agisce sul volante; questa operazione, oltre a essere fisicamente impegnativa, non è particolarmente precisa. Come è stato già ben discusso nel capitolo precedente, il sistema di lettura ha una risoluzione pari a  $1^\circ$  ed è soggetto a potenziali errori di lettura da parte dell'operatore stesso.

### 5.1.2 Modellazione del sistema iniziale

Per sviluppare un sistema di regolazione automatizzato è stato necessario per prima cosa realizzare un modello fisico del problema in esame, in questo modo è stato possibile valutare i principali parametri del nostro sistema meccanico. La modellazione matematica del problema verrà discussa nei paragrafi successivi. Il



presenterà un rendimento piuttosto basso - che assumeremo pari a 0,6 in favore di sicurezza - e un importante *backlash*.

Questi sono aspetti fondamentali e verranno presi in considerazione nello studio del PLV (principio dei lavori virtuali) del nostro sistema.

## 5.2 Progettazione del sistema di controllo automatico

L'idea è quella di sviluppare un sistema che consenta di eseguire una regolazione automatica dell'apertura del distributore permettendone un controllo preciso e pulito del valore angolare. Per fare ciò, verrà automatizzato l'attuale sistema meccanico sostituendo il controllo manuale tramite volante con un motoriduttore - calettato sullo stesso asse di rotazione - controllato da un accurato sistema di azionamento. Quest'ultimo sfrutterà le informazioni provenienti dagli encoder sperimentali descritti nei due capitoli precedenti per realizzare un preciso sistema di controllo ad anello chiuso. L'albero in uscita dal riduttore verrà accoppiato mediante un giunto rigido alla barra filettata, il giunto permette inoltre di mantenere la connessione tra i due alberi in direzione assiale oltre alla trasmissione della coppia. Il motoriduttore rappresenta un blocco unico composto dal motore e dal riduttore; esso alloggia su una sede bullonata sulla slitta di una guida lineare a rulli disposta come in Figura 5.3, la guida consente al motoriduttore di spostarsi linearmente mantenendo la coassialità tra i due assi.

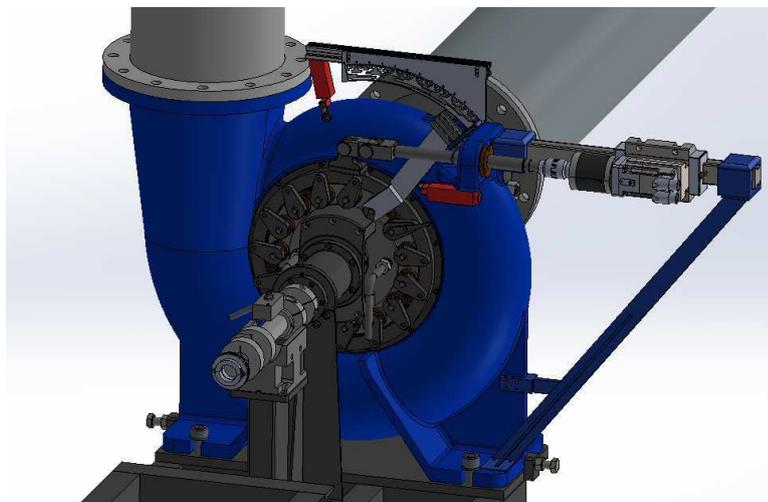


Figura 5.3: Modello CAD 3D del sistema proposto

### 5.2.1 Dimensionamento del sistema di Azionamento

Questo complesso sistema appena descritto può essere rappresentato mediante il modello fisico esposto in Figura 5.4, questo è uno sviluppo del modello trattato nel paragrafo precedente [5.2]. In esso troviamo il blocco del motoriduttore insieme a un nuovo rapporto di trasmissione  $n_1$ , ossia il rapporto che lega motore e riduttore, quest'ultimo può essere espresso anche come il reciproco del rapporto di riduzione "k", proprietà del riduttore.

Dunque la rotazione della barra - in origine prodotta dal volante ( $\theta_v$ ) - verrà imposta dalla rotazione del riduttore, con un angolo pari a  $\theta_r$ .

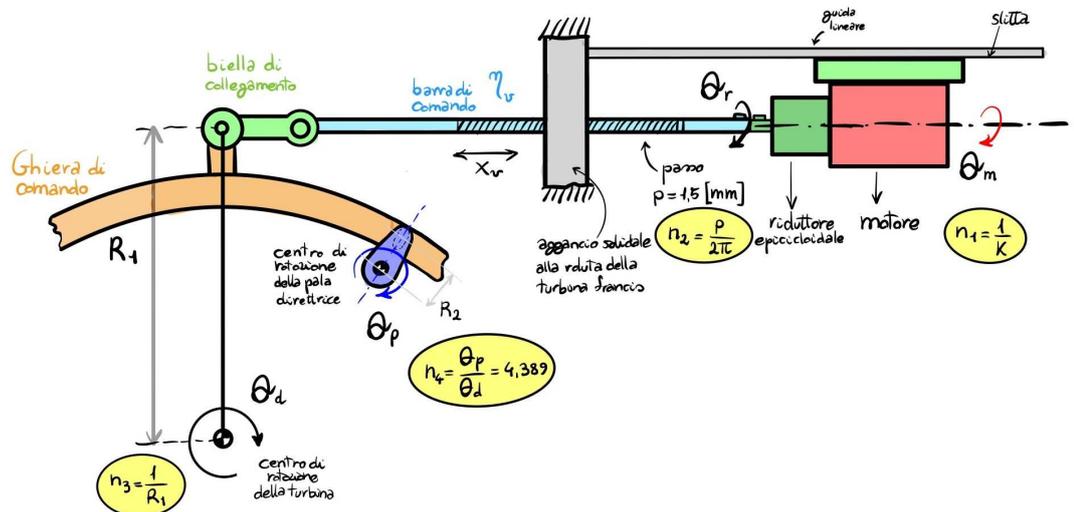


Figura 5.4: Modello fisico del sistema automatico

Noti i seguenti rapporti di trasmissione del nostro modello, si può procedere all'analisi del comportamento dinamico del sistema.

- $n_1$  = rapporto di trasmissione tra l'angolo di rotazione del motore  $\theta_m$  e l'angolo di rotazione del riduttore/barra filettata  $\theta_r$
- $n_2$  = rapporto di trasmissione tra l'angolo di rotazione del riduttore  $\theta_r$  e lo spostamento lineare  $x_v$
- $n_3$  = rapporto di trasmissione tra lo spostamento lineare  $x_v$  e l'angolo di rotazione del distributore  $\theta_d$
- $n_4$  = rapporto di trasmissione tra l'angolo di rotazione del distributore  $\theta_d$  e quello delle pale direttrici  $\theta_p$

Si procede alla costruzione di un file Excel, al cui interno vengono inseriti tutti i rapporti di trasmissione; dopodichè si vanno a studiare, oltre ai rapporti di trasmissione, anche i rapporti di velocità e di accelerazione così da poter verificare i comportamenti dinamici del sistema come ad esempio la velocità di rotazione della paletta conseguente alla rotazione del motore.

Posizione	motore		riduttore	asta			distributore		palette		n1: (θr/θm)	n2: (Xs/θr)	n3: (θp/Xs)	n4: (θp/θd)
	θ [gradi]	θ [rad]	θr [rad]	Xv [m]	θd [rad]	θd [gradi]	θp [gradi]	θp [rad]						
	360	6,28	0,157	0,0000375	0,00013889	0,007961783	0,034944268	0,00060958			0,025	0,00023885	3,7037037	4,389
Velocità	motore		riduttore	asta			distributore		palette		k	p [m]	R1 [m]	R2 [m]
	θ' [rps]	θ' [rpm]	θr' [rpm]	Xv' [m/s]	θd' [rad/s]	θd' [gradi/s]	θp' [gradi/s]	θp' [rpm]			40	0,0015	0,27	0,045
	180	1800	45	0,001125	0,00416667	0,238853503	1,048328025	0,17472134						
Accelerazione	motore		riduttore	asta			distributore		palette		ntot (θp/θm)			
	θ'' [gradi/s^2]	θ'' [rad/s^2]	θr'' [rad/s^2]	Xv'' [m/s^2]	θd'' [rad/s^2]	θd'' [gradi/s^2]	θp'' [gradi/s^2]	θp'' [rad/s^2]			9,7067E-05			
	573,2484076	10	0,25	5,97134E-05	0,00022116	0,012677999	0,055643738	0,00097067						

Figura 5.5: Analisi rapporti di trasmissione, velocità e accelerazione

Successivamente si è proceduto alla valutazione dei momenti di inerzia e delle masse dei componenti in gioco nel nostro sistema, per la loro determinazione è stata applicata la funzione "proprietà di massa" - del software Solidworks - sui singoli componenti del file CAD-3D della turbina.

Infine, il valore della coppia  $C_R$  da fornire all'albero del riduttore, necessaria per vincere la coppia resistente del sistema, è stata stimata direttamente in laboratorio sulla turbina in esame tramite una chiave dinamometrica presentando un valore pari a 23Nm.

Determinati tali parametri, è possibile proseguire utilizzando il principio dei lavori virtuali per poter eseguire il dimensionamento del motoriduttore.

L'equazione del PLV è pari a:

$$C_s \delta\theta = \frac{m_v + m_g + m_r + m}{\eta_v \eta_r} \ddot{x}_v \delta x_v + \frac{I_v + I_r}{\eta_r} \ddot{\theta}_r \delta\theta_r + I \ddot{\theta} \delta\theta + \frac{I_d}{\eta_v \eta_r} \ddot{\theta}_d \delta\theta_d + \frac{I_p}{\eta_v \eta_r} \ddot{\theta}_p \delta\theta_p + C_{attr} \delta\theta \quad (5.1)$$

Nell'equazione identifichiamo  $C_s$  come la coppia necessaria per lo spunto del nostro motore, mentre  $\delta\theta$  ne rappresenta lo spostamento virtuale. Le masse "m", le inerzie "I", gli spostamenti virtuali e reali si riferiscono ai seguenti pedici:

- $-$  = motore
- $r$  = riduttore
- $v$  = barra filettata
- $d$  = ghiera del distributore
- $p$  = paletta direttrice

A questo punto vengono espressi tutti gli spostamenti virtuali in funzione di  $\delta\theta$  sfruttando i rapporti di trasmissione, in questo modo è possibile semplificare  $\delta\theta$  in ambo i lati dell'equazione. Si procede dunque raggruppando i componenti a secondo membro dell'equazione in una somma di tre termini - B, A e C - che moltiplicano rispettivamente  $1/k$ ,  $k$  e 1.

$$C_s = \left[ \left( \frac{m_{tot}n_2}{\eta_r\eta_v} + \frac{I_r+I_v}{n_2\eta_r} + (I_d n_3 + I_p n_4^2 n_3) \frac{n_2 n_3}{\eta_r \eta_v} \right) \ddot{x}_v \right] \cdot \frac{1}{k} + \left[ \frac{I \ddot{x}_v}{n_2} \right] \cdot k + C_{attr} \quad (5.2)$$

$$C_s = [B] \cdot \frac{1}{k} + [A] \cdot k + [C] \quad (5.3)$$

Esprimeremo  $A=[A'] \cdot \ddot{x}_v$  e  $B=[B'] \cdot \ddot{x}_v$ , in questo modo è possibile definire le costanti  $A'$  e  $B'$  legate solo ai parametri noti e costanti del sistema.

È bene chiarire che non si sta andando a effettuare una valutazione della coppia di spunto, infatti questa la conosceremo immediatamente non appena avremo determinato il rapporto di riduzione. Adesso l'obiettivo è proprio quello del dimensionamento del riduttore, e dunque della scelta di  $k$ . Una volta determinato quest'ultimo, nota  $C_R$ , potremo immediatamente stimare  $C_s$ .

Per definire  $k$  si procede con la stima del  $K_{ott}$ , parametro chiave per il dimensionamento del motoriduttore; per farlo si deve derivare la formula della coppia di spunto rispetto a  $k$  e porre tale derivata pari a zero per trovare il punto di minimo della funzione di coppia. Quest'ultima rappresenta la coppia ottimale e si verifica in corrispondenza del rapporto di riduzione ottimale  $K_{ott}$ , dunque derivando  $C_s$  e semplificando  $\ddot{x}_v$  sotto la radice otteniamo ( $K_{ott}$ :

$$\frac{dC_s}{dk} = -\frac{B}{k^2} + A = 0 \quad K_{ott} = \sqrt{\frac{B'}{A'}} \quad (5.4)$$

Dal calcolo ottengo  $K_{ott}=15,92$ , trovando in questo modo il valore inferiore del range delle  $k$ . Per identificare il valore superiore bisogna calcolare la  $K_{max}$

[5.5] che si trova dal rapporto tra la velocità limite in ingresso al riduttore fratto la velocità operativa del riduttore;  $\dot{\theta}_{r,lim}$  è pari a 3000rpm e si trova dal catalogo dei vari riduttori tra cui si andrà a scegliere - i quali condividono lo stesso valore -, mentre  $\dot{\theta}_r$  è la velocità in uscita dal riduttore imponendo che le palette del distributore ruotino con una velocità di un grado al secondo.

$$K_{max} = \frac{\dot{\theta}_{r,lim}}{\dot{\theta}_r} = 67 \quad (5.5)$$

Si ottiene un valore di  $K_{max}=67$ , dunque il nostro range di scelta per il valore di K si restringe tra questi due estremi appena determinati. Tenendo in considerazione la coppia meccanica  $C_R$  da trasmettere alla barra filettata e considerando un possibile aumento della richiesta di coppia da parte del sistema nel momento in cui la turbina si trova in regime operativo, andremo a maggiorare la coppia richiesta all'albero del riduttore fino a un valore di 40Nm. Perciò, sulla base di questa considerazione e sul range di K, si è scelto un valore di K=40 così da poter utilizzare un motore che esprima 1Nm di coppia associato a un riduttore epicicloidale con un rapporto di riduzione pari a 40.

Il motore scelto (BMH0701T17A2A) [5.6] è un servomotore brushless 230V monofase con encoder integrato prodotto dalla Schneider Electric, esso possiede una coppia nominale di 1,1Nm e una velocità limite pari a 8000rpm. Il riduttore (GBX080040K) - anch'esso prodotto dalla Schneider Electric - è un epicicloidale ad alta precisione progettato per essere implementato nei servomotori ad alte prestazioni come il precedente; esso possiede un rapporto di riduzione pari a k=40 ed è caratterizzato da un elevato rendimento (0.94%). I due componenti sono pensati proprio per questo genere di applicazioni dove è richiesta la massima precisione, il loro controllo e la loro gestione saranno discussi nei paragrafi seguenti.

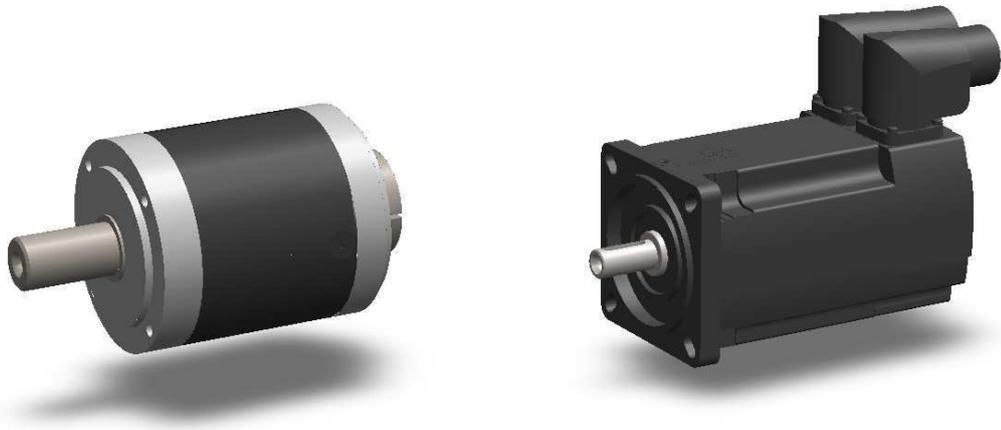


Figura 5.6: Riduttore e Motore scelti per l'applicazione

### 5.2.2 Struttura di supporto

Per poter garantire una corretta trasmissione di coppia dal riduttore alla barra filettata è necessario che esso risulti perfettamente in asse con la barra e vincolato alla slitta della guida lineare; quest'ultima deve essere in grado di contrastare la coppia prodotta dal riduttore senza presentare contributi significativi di torsione o flessione. Per questo motivi è stata scelta una guida lineare profilata sulla quale scorre una slitta a rulli [5.7] per permettere il movimento rettilineo e senza flessioni del motoriduttore.

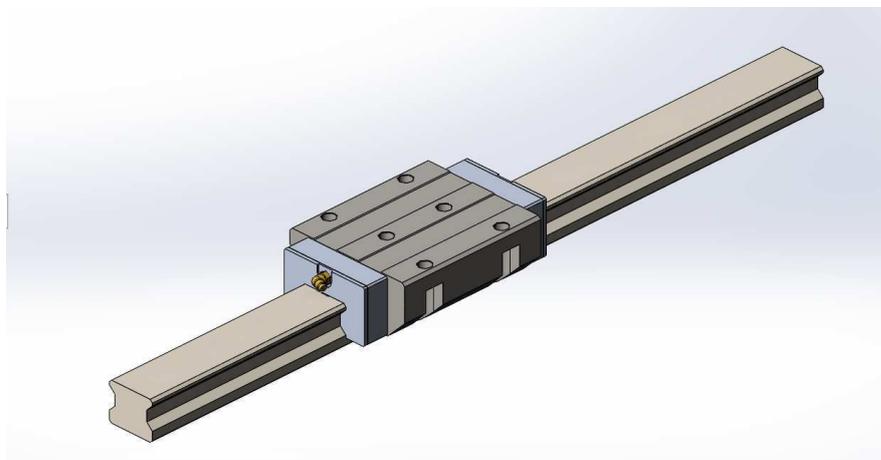


Figura 5.7: Guida lineare a rulli

La sezione del binario presenta un'area di  $1466.96 \text{ mm}^2$  con un'altezza di 37mm, una larghezza di 33mm e uno sviluppo in lunghezza di 568mm.

Il binario è fissato nelle sue estremità mediante due sedi: la prima è saldata sulla voluta della turbina mentre la seconda è saldata sull'estremità superiore di una trave a doppia T inclinata di  $50^\circ$  rispetto al piano terra come mostrato in Figura 5.8. Quest'ultima viene saldata alla base di appoggio della voluta e possiede una nervatura di rinforzo laterale per aumentare la stabilità della trave.

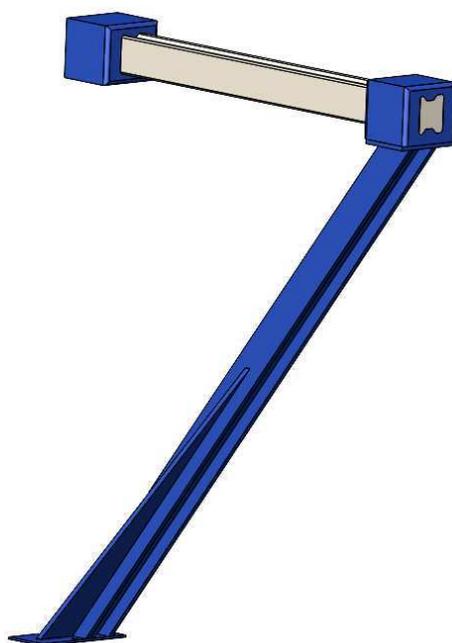


Figura 5.8: Struttura di supporto con binario

Il binario e la sua struttura di supporto sono stati disposti su un piano parallelo al piano terra contenente l'asse di rotazione del motore, come si può vedere dalla Figura 5.3. Questa disposizione è stata pensata appositamente per scaricare in maniera opportuna la coppia di reazione che il motore imprime sulla struttura e limitare al minimo i carichi laterali su di essa; questi infatti porterebbero a un disallineamento degli assi di rotazione (della barra filettata e del motoriduttore).

Per garantire le caratteristiche strutturali adeguate è stata eseguita un'analisi FEM su tutto il sistema appena descritto, simulando l'applicazione di coppie all'albero molto elevate rispetto a quelle reali. Il binario è stato sottoposto a una torsione di 50Nm sommato a un carico centrale di punta pari a 300N. L'analisi

è stata condotta attraverso il software Ansys utilizzando una mesh tetraedrica, sono state eseguite 3 prove per verificare la convergenza dei risultati utilizzando delle dimensioni di elemento pari a 6mm, 5mm e 4mm. Nelle Figure 5.9 e 5.10 è possibile apprezzare i risultati relativi alla mesh più fine, ossia quella con una dimensione di elementi pari a 4mm.

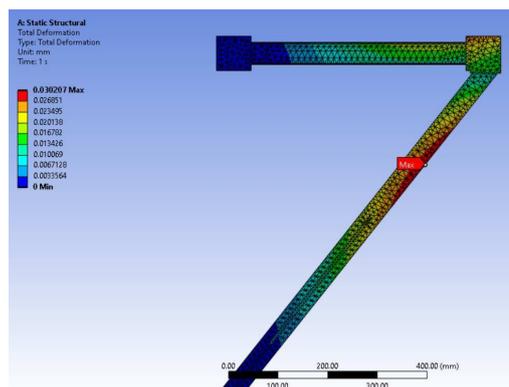


Figura 5.9: Stato di tensione

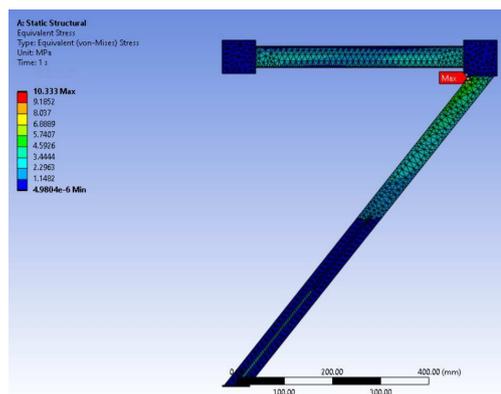


Figura 5.10: Stato di deformazione

Dunque quello che si evince dalle analisi è che la struttura è perfettamente idonea all'applicazione per cui è stata progettata, ciò garantirà un movimento preciso e in asse del nostro motoriduttore.

### 5.2.3 Sistema di sicurezza dell'impianto automatico

Nella progettazione di questo sistema di azionamento automatico è fondamentale prevedere un sistema di sicurezza che impedisca al sistema di oltrepassare i valori estremi del range angolare previsto. Per evitare che ciò accada, oltre alla sicurezza via software, si prevede di inserire due finecorsa meccanici. Si è scelto di implementare dei finecorsa con interruttore a leva i quali presentano una rotella nella loro estremità. I finecorsa [5.11] (TSIXCSP3918P20) scelti sono prodotti dalla Telemecanique Sensor, questi vengono disposti in modo da impattare l'asta - incernierata sull'asse di rotazione di una pala direttrice - nel momento in cui vengono oltrepassati i limiti angolari. Nel dettaglio, questa tipologia di finecorsa non scatta all'immediato contatto ma bensì dopo una rotazione di 20° della sua leva; per questo motivo essi vanno disposti in maniera precisa in modo che entrino in contatto con l'asta prima dell'angolo limite e che scattino proprio in

corrispondenza di quest'ultimo. La rotella presente nella parte terminale consente un perfetto contatto con la superficie inclinata dell'asta che ruota. La posizione di chiusura totale del distributore in corrispondenza dell'angolo  $0^\circ$  necessita di una particolare attenzione, infatti procedere con la rotazione implicherebbe dei danni strutturali alle pale per via di un loro contatto reciproco. Infine è stato pensato un pulsante di emergenza per poter spegnere il sistema in situazioni di pericolo.



Figura 5.11: Finecorsa meccanico

#### 5.2.4 Scelta dei componenti dell'Azionamento

Una volta scelto il motore e il riduttore, è necessario abbinarvi un azionamento compatibile; nel dettaglio si tratta di scegliere un Controllore e un *Driver* per il nostro sistema. Il Controllore è colui che invia i comandi mentre il *Driver* è colui che li svolge sotto le direttive del primo.

Nella scelta si parte dal Driver, dove si va a selezionarne uno compatibile con il motore precedentemente scelto. Nel nostro caso, avendo scelto un servomotore, si è deciso di abbinarvi un servoazionamento (LXM32CU90M2) compatibile e della stessa casa produttrice, ossia la Sneider Elettric.

Per quanto riguarda il Controllore, si è scelto di implementare la scheda Arduino Mega la quale possiede un numero di pin ben superiore rispetto alle altre schede; ciò le permette di gestire nella medesima scheda tutte e 11 le coppie LED-fototransistor richieste dai due encoder sperimentali e allo stesso tempo gestire anche il servoazionamento. In questo modo, dunque, Arduino Mega è in grado di dare dei comandi al servomotore e allo stesso tempo ricevere un *feedback* diretto sulla posizione angolare delle palette direttrici che intende controllare, realizzando così un sistema ad anello chiuso.

Arduino Mega andrà a implementare in un unico grande codice i due sistemi encoder sperimentali e la gestione del *Driver* per il controllo del servomotore.

Per la sua connessione al *Driver*, Arduino necessita di un modulo di interfaccia (RS485) il quale garantisce una corretta comunicazione seriale tra i due; ciò avviene sfruttando i due pin RX e TX di arduino, corrispondenti rispettivamente ai pin Digitali 18 e 19.

Riassumendo quanto detto, per l'azionamento sono stati scelti i seguenti componenti:

- *Controllore* = Arduino Mega
- *Driver* = servozionamento (LXM32CU90M2)
- *Motore* = servomotore brushless (BMH0701T17A2A)
- *Riduttore* = riduttore epicicloidale (GBX080040K)
- *Encoder Assoluto* = encoder assoluto sperimentale
- *Encoder Incrementale* = encoder incrementale sperimentale

### 5.2.5 Logica di controllo ad anello chiuso

Il microcontrollore Arduino Mega svolge un ruolo centrale nella gestione del sistema di azionamento, questo comunica con il *Driver* tramite l'interfaccia RS485 per poter controllare il servomotore. Inoltre Arduino riceve i segnali di feedback provenienti dagli encoder sperimentali - quello assoluto per la misura dell'angolo e quello incrementale per la velocità di rotazione della turbina - e grazie all'assoluto esegue un controllo ad anello chiuso dell'apertura del distributore, confrontando l'angolo reale con l'angolo obiettivo in modo da inviare i comandi corretti al *Driver*. Il modulo di interfaccia RS485 risulta necessario per facilitare la comunicazione tra il *Driver* e Arduino.

Il *Driver*, secondo le istruzioni del microcontrollore, ha il ruolo di controllare in modo altamente preciso il servomotore in quanto esso possiede un encoder assoluto integrato che fornisce la sua posizione direttamente al *Driver*. Infine il complesso sistema meccanico azionato dalla rotazione del servomotore genera la rotazione delle pale direttrici finchè l'angolo non viene raggiunto e il sistema ad anello chiuso interrompe l'azionamento; una volta raggiunto l'angolo desiderato,

il sistema si ferma e il servomotore viene bloccato in coppia per mantenere la posizione.

Nella Figura 5.12 troviamo uno schema a blocchi che sintetizza la logica dietro questo sistema di azionamento.

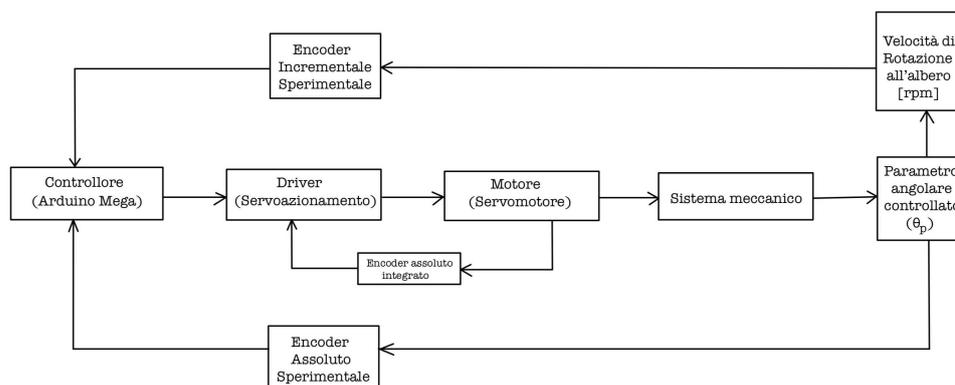


Figura 5.12: Schema a blocchi del sistema di azionamento

Nella logica di programmazione si farà in modo di ridurre progressivamente la coppia man mano che la paletta si avvicina all'angolo obiettivo, questo sarà fondamentale per una corretta gestione della chiusura del distributore e dunque per il raggiungimento dell'angolo  $0^\circ$ . Per gestire tale situazione in sicurezza - evitando che scattino i dispositivi fisici - si riduce la coppia in maniera significativa quando ci si avvicina a bassi valori angolari come ad esempio  $5^\circ$ ; in questo modo si riduce progressivamente la coppia al fine di ottenere una chiusura del distributore molto dolce. La caratteristica dei servomotori è proprio quella di poter regolare coppia e velocità di rotazione in maniera indipendente; ciò è fondamentale in questo caso perchè, se da un lato si desidera ridurre la coppia quando l'angolo tende a zero, dall'altro si vuole che anche il motore rallenti e di conseguenza anche il meccanismo.

Il controllo ad anello chiuso permette inoltre di sopperire alla problematica principale del sistema originale riguardante la presenza di un forte *Backlash* sulla barra filettata; ciò si presenta nelle inversioni di direzione di rotazione della barra. Adesso però, grazie all'encoder assoluto sperimentale, il sistema rileva se effettivamente la pala si è mossa a seguito della rotazione o meno grazie al controllo retroattivo; perciò, se il sistema meccanico resta fermo per via del *Backlash*, il

sistema di azionamento non sbaglia il posizionamento angolare delle palette ma anzi continua il movimento finchè non viene esaurito il gioco e arriva esattamente al suo obiettivo.

L'azione di controllo effettiva sul sistema può essere svolta direttamente tramite una pulsantiera montata nella zona di supporto del motoriduttore, oppure mediante computer agendo direttamente sul monitor seriale di Arduino.



# Conclusioni

Dati gli obiettivi della tesi inizialmente prefissati - quali la strumentazione delle turbine idrauliche e la progettazione di un sistema di azionamento automatico per il controllo dell'apertura del distributore delle turbine Francis - si è giunti alle seguenti conclusioni.

Per quanto riguarda la strumentazione sono stati proposti due encoder sperimentali: un encoder incrementale per rilevare la velocità di rotazione della turbina e un encoder assoluto per l'acquisizione della posizione angolare dell'apertura delle pale del distributore. Invece per la realizzazione del sistema di azionamento è stato pensato di automatizzare il sistema precedente sostituendo l'*input* del sistema - attualmente azionato da un volante che genera la rototraslazione di una barra di comando - con un motoriduttore traslante alloggiato su una guida lineare.

La sperimentazione *indoor* sugli encoder sviluppati ha riportato dei risultati ottimi: quello incrementale esegue una lettura stabile e affidabile della velocità di rotazione e un corretto conteggio delle tacche, quello assoluto presenta un eccellente sistema di lettura degli stati digitali che gli consente di acquisire la posizione angolare con una risoluzione pari a  $0.25^\circ$ .

Per quanto riguarda la progettazione e il dimensionamento del sistema di azionamento, è stata eseguita la modellazione fisica e matematica del problema per studiarne la statica e la dinamica al fine di poter dimensionare il sistema di azionamento adeguato. Sono stati definiti i componenti dell'azionamento - quali motore, riduttore, *driver* e controllore - e della sicurezza.

Successivamente è stata progettata e verificata strutturalmente la struttura di supporto del motoriduttore traslante. Infine è stata definita la logica di controllo e gestione del sistema realizzando un controllo ad anello chiuso mediante

l'implementazione dei dati forniti dagli encoder sperimentali.

Gli sviluppi futuri di questo progetto comprenderanno sicuramente l'acquisto del materiale scelto e il suo assemblaggio per la realizzazione del sistema progettato, dopodichè verrà sviluppato lo script di controllo e infine si procederà con le fasi di test. Per quanto riguarda gli encoder sperimentali invece il lavoro risulta concluso, sono stati già testati e in fase di applicazione andranno solamente rispettate le specifiche di montaggio.



# Bibliografia

- [1] G. Ventrone, *Macchine per allievi ingegneri*, 2nd ed. Padova: Libreria internazionale cortina padova, 2002.
- [2] <https://aelectronics.com.mx/sensores/31-fototransistor-5mm.html>.
- [3] <https://www.centroelettronica.net/elettronica/componenti-elettronici/diodi-led/diodo-led-5mm-trasparente-bianco-alta-luminosita-superluminoso/>.
- [4] S. M. Paul Scherz, *Practical Electronics for Inventors*, 3rd ed. USA: McGraw Hill Professional, 2013.
- [5] <https://scienzeescienze.blogspot.com/2014/01/la-doppia-natura-della-luce.html>.
- [6] R. Crowder, *Azionamenti elettrici e sistemi elettromeccanici*. Netherlands: Elsevier, 2020.
- [7] E. O. Doebelin, *Strumenti e metodi di misura*, 2nd ed. Milano: McGraw Hill Professional, 2004.
- [8] G. N. Antonino Liberatore, *Manuale Cremonese, Elettrotecnica*, 4th ed., Italia, February 2002.
- [9] <https://www.electrorules.com/learn-about-arduino-nano-board-features-pinout/>.
- [10] <https://store.arduino.cc/products/arduino-nano>.

- [11] [https://www.researchgate.net/figure/Examples-of-Arduino-computers-boards-Arduino-Nano-and-Arduino-Uno-boards-have-the\\_fig1\\_354607944](https://www.researchgate.net/figure/Examples-of-Arduino-computers-boards-Arduino-Nano-and-Arduino-Uno-boards-have-the_fig1_354607944).



# Bibliografia delle immagini

1.1	Schema impianto idroelettrico [1] . . . . .	1
1.2	Condotta di scarico [1] . . . . .	2
1.3	Diagramma di dimensionamento [1] . . . . .	3
1.4	$h_g$ quota geodetica, $h$ salto idrico utile, $h_{r1}$ perdita all'imbocco, $h_{r2}$ perdita nella condotta forzata, $h_{r3}$ perdita nel tubo di scarico [1] .	4
1.5	Suddivisione in classi delle turbine, ricostruzione tabella da [1] . .	5
1.6	Rendimenti ottimali delle diverse tipologie di turbina [1] . . . . .	6
1.7	Turbina Pelton con introduttore rettilineo [1] . . . . .	7
1.8	Interazione getto-pala ([1]) . . . . .	8
1.9	Ruota Pelton([1]) . . . . .	8
1.10	Bocchello + Spina doble [1] . . . . .	10
1.11	Turbina Francis [1] . . . . .	11
1.12	Girante Turbina Francis, CAD-3D Università degli studi di Padova.	12
1.13	Numeri di pressione e di flusso in funzione di K. [1] . . . . .	13
1.14	Variazione della geometria al variare di K. [1] . . . . .	14
1.15	Sistema regolazione apertura pale direttrici, Laboratorio macchine idrauliche Univeristà degli studi di Padova. . . . .	15
1.16	Triangoli di velocità, u velocità periferica, c velocità assoluta, w velocità relativa. [1] . . . . .	16
1.17	Tubo di scarico, ricostruzione figura [1] . . . . .	17
1.18	Sezione meridiana, sezione conica a destra. [1] . . . . .	19
1.19	Curve a $\alpha_1 = cost$ e $n = cost$ . . . . .	20
1.20	Curve a $\alpha_1 = variabile$ e $n = cost$ . . . . .	21
2.1	Fototransistor ([2]) . . . . .	23

2.2	Diodo a emissione di luce solida, LED ([3]) . . . . .	23
2.3	Principio funzionamento fototransistor [4] . . . . .	24
2.4	Lunghezza d'onda della luce [5] . . . . .	25
2.5	Principio funzionamento LED [4] . . . . .	27
2.6	A encoder assoluto, B encoder incrementale [6] . . . . .	28
2.7	Schema funzionale encoder incrementale [6] . . . . .	29
2.8	Segnali encoder incrementale [6] . . . . .	29
2.9	Sezione disco encoder incrementale . . . . .	30
2.10	Disco encoder assoluto in codifica binaria [6] . . . . .	32
2.11	Disco encoder assoluto codifica di Gray [6] . . . . .	33
2.12	Esempio combinazione disco encoder assoluto . . . . .	34
2.13	Scheda Arduino Uno [4] . . . . .	36
2.14	Esempio sketch Arduino . . . . .	37
2.15	Scheda Arduino Nano [9] . . . . .	38
2.16	Pin Arduino Nano [10] . . . . .	38
2.17	Confronto dimensionale delle schede Arduino[11] . . . . .	39
3.1	Prototipo Encoder Incrementale . . . . .	43
3.2	Schema elettronico del prototipo dell'encoder incrementale . . . . .	44
3.3	Risultati encoder incrementale + index, disco a 32 tacche . . . . .	46
3.4	Schema elettronico finale dell'encoder incrementale . . . . .	47
3.5	Modulo relativo ai canali sulla sx, modulo relativo all'index a dx. . . . .	48
3.6	Rappresentazione virtuale Solidworks . . . . .	49
3.7	Sezione del blocco disco . . . . .	49
3.8	Corona Modulare quadrante assemblata . . . . .	50
3.9	Unità di controllo integrata . . . . .	51
3.10	1) Corpo centrale 2) Coperchio superiore 3) Coperchio laterale 4) Display LCD 5) Batteria 9V 6) Clip batteria 9V 7) Interruttore 8)Arduino Nano 9) Spinotto alimentazione 10)Coperchio presa USB 11) Coperchio spinotto 12) Blocca batteria 13) Pulsante a scatto 14) Cappuccio . . . . .	52
3.11	Parametri di stampa . . . . .	53

---

3.12	Simulazione stampa . . . . .	54
3.13	Risultato stampa . . . . .	54
3.14	Operazioni di pulizia e completamento del processo di polimerizzazione della resina . . . . .	54
3.15	Corona modulare completa . . . . .	55
3.16	Unità di controllo integrata completa . . . . .	55
3.17	Conteggio tacche e rilevamento tempi relativi al fototransistor 1 . . . . .	56
3.18	soglie variabili . . . . .	57
3.19	Verifica del verso di rotazione . . . . .	58
3.20	Corona modulare assemblata con disco encoder da 40 tacche . . . . .	59
3.21	Allestimento sperimentale prove in-door . . . . .	59
4.1	Sistema di regolazione della portata . . . . .	64
4.2	Prototipo encoder assoluto sperimentale . . . . .	65
4.3	Disco encoder assoluto 3 bit . . . . .	65
4.4	Sistema di acquisizione . . . . .	66
4.5	Visualizzazione dati . . . . .	66
4.6	Placca in codifica di Gray 8 bit . . . . .	67
4.7	Circuito elettrico encoder assoluto sperimentale . . . . .	68
4.8	Modulo ottico iniziale . . . . .	69
4.9	Modulo ottico definitivo . . . . .	69
4.10	Esploso del modulo ottico definitivo . . . . .	70
4.11	Vista in sezione dei supporti . . . . .	70
4.12	Sistema finale . . . . .	71
4.13	Lettura onde quadre e generazione "grayValue" . . . . .	72
4.14	Conversione dalla codifica di gray al valore decimale" . . . . .	72
4.15	Funzione grayToDecimal . . . . .	72
4.16	Prova di montaggio Modulo stampato 3D . . . . .	73
4.17	Prova di montaggio Modulo stampato 3D . . . . .	74
4.18	Placca codificata in cartoncino . . . . .	74
4.19	Prove su striscia codificata . . . . .	75
4.20	Prove su di una porzione di placca . . . . .	75

---

5.1	Sistema di regolazione manuale della portata $Q_v$ . . . . .	80
5.2	Modello del sistema di regolazione manuale . . . . .	81
5.3	Modello CAD 3D del sistema proposto . . . . .	82
5.4	Modello fisico del sistema automatico . . . . .	83
5.5	Analisi rapporti di trasmissione, velocità e accelerazione . . . . .	84
5.6	Riduttore e Motore scelti per l'applicazione . . . . .	87
5.7	Guida lineare a rulli . . . . .	87
5.8	Struttura di supporto con binario . . . . .	88
5.9	Stato di tensione . . . . .	89
5.10	Stato di deformazione . . . . .	89
5.11	Finecorsa meccanico . . . . .	90
5.12	Schema a blocchi del sistema di azionamento . . . . .	92



# Lista dei Simboli

## Simbolo Descrizione

---

$i$	Corrente
$V$	Tensione
$\lambda$	Lunghezza d'onda
$\Omega$	Resistenza elettrica
$N$	Numero di tacche
$\theta$	Rotazione motore
$\theta_v$	Rotazione barra
$\theta_r$	Rotazione riduttore
$\theta_d$	Rotazione ghiera
$\theta_p$	Rotazione paletta
$p$	Passo angolare
$x_v$	Spostamento lineare barra
$x'_v$	Velocità lineare barra
$x''_v$	Accelerazione lineare barra
$\theta''$	Accelerazione angolare motore
$C_s$	Coppia spunto motore
$C_R$	Coppia resistente barra
$n$	Rapporto di trasmissione
$k$	Rapporto di riduzione
$k_{ott}$	Rapporto di riduzione ottimale
$k_{max}$	Rapporto di riduzione massimo
$m$	Massa

$I$  Inerzia

$\eta_v$  Rendimento barra

$\eta_r$  Rendimento riduttore

$\delta\theta$  Spostamento infinitesimo angolare del motore

$\delta x$  Spostamento infinitesimo lineare della barra