



Corso di laurea magistrale in Ingegneria Energetica

---

Esame di:  
**Gestione ed economia dell'energia e fonti rinnovabili**

Docente:  
**Prof. Angelo Spena**

Titolo relazione:  
**Progetto di massima di una centrale idroelettrica ad acqua fluente**

Alunno: **Valerio Pagliarella**

Matricola: **0287800**

*Anno accademico: 2021-2022*

# Indice

<b>1</b>	<b>Introduzione</b>	<b>3</b>
1.1	Dati progetto . . . . .	3
<b>2</b>	<b>Dimensionamento di massima dell’impianto</b>	<b>5</b>
2.1	Curva di durata . . . . .	5
2.2	Portata massima economicamente derivabile . . . . .	5
2.3	Producibilità media annua . . . . .	7
2.4	Potenza di concessione dell’impianto . . . . .	7
2.5	Scelta delle macchine idrauliche . . . . .	7
2.6	Analisi di sensitività . . . . .	10

## Elenco delle figure

1	Istogramma portata media mensile . . . . .	3
2	Modello schema impiantistico . . . . .	4
3	Curva di durata delle portate . . . . .	5
4	Nomogramma macchine idrauliche . . . . .	8
5	Scelta macchina idraulica tramite nomogramma . . . . .	9
6	Turbina Kaplan . . . . .	9
7	Variabilità della portata ottimale in funzione del tasso di interesse $i$ . . . . .	10
8	Variabilità della portata ottimale in funzione del costo dell'energia $c$ . . . . .	11
9	Ricavi impianto al variare del costo dell'energia prodotta . . . . .	11
10	Ricavi impianto al variare del tasso di interesse . . . . .	12

## Elenco delle tabelle

1	Dati tecnico/economici impianto . . . . .	4
2	Calcolo iterativo grandezze economiche . . . . .	7
3	Analisi di sensitività: range di variazione di $i$ e $c$ . . . . .	10

# 1 Introduzione

Lo scopo della relazione è determinare le caratteristiche di un impianto idroelettrico ad acqua fluente con canale derivatore attraverso un dimensionamento di massima e un'ottimizzazione tecnico/economica. Prima di entrare nell'analisi del progetto, verranno brevemente richiamate quelle che sono le potenzialità e applicazioni tipiche di un impianto idroelettrico ad acqua fluente. In questa tipologia di impianto la caduta idraulica è realizzata mediante un'opera di sbarramento, che permette di realizzare dei modesti salti idraulici sfruttabili dalla turbina idraulica della centrale per la produzione di energia elettrica. La centrale può essere situata in prossimità dello sbarramento oppure, se la pendenza del corso d'acqua è elevata, a valle dello stesso. Tale tecnologia presenta costi di realizzazione ridotti se confrontata con le altre soluzioni impiantistiche caratterizzanti l'idroelettrico (impianti a serbatoio), ma soffre di due penalizzanti svantaggi: come accennato, le cadute sono modeste, dell'ordine della decina di metri se la centrale è in prossimità dello sbarramento e, soprattutto, la portata del corso d'acqua, ovvero il fattore quantitativo dell'impianto, è fortemente dipendente da fattori meteorologici. Pertanto, per gli impianti ad acqua fluente la modulazione del carico è piuttosto lenta e vincolata alla situazione idrodinamica del corso d'acqua: per questo motivo a tali centrali è assegnata la copertura del carico di base nella distribuzione dei carichi di una rete interconnessa.

## 1.1 Dati progetto

Il primo dato fondamentale per il dimensionamento dell'impianto è la portata disponibile del corso d'acqua. In base al disciplinare di concessione, deve essere garantita una portata minima continua di  $5 \text{ m}^3/\text{s}$ , detta **deflusso minimo vitale**. Le portate medie mensili utilizzabili dall'impianto sono riportate in figura 1:

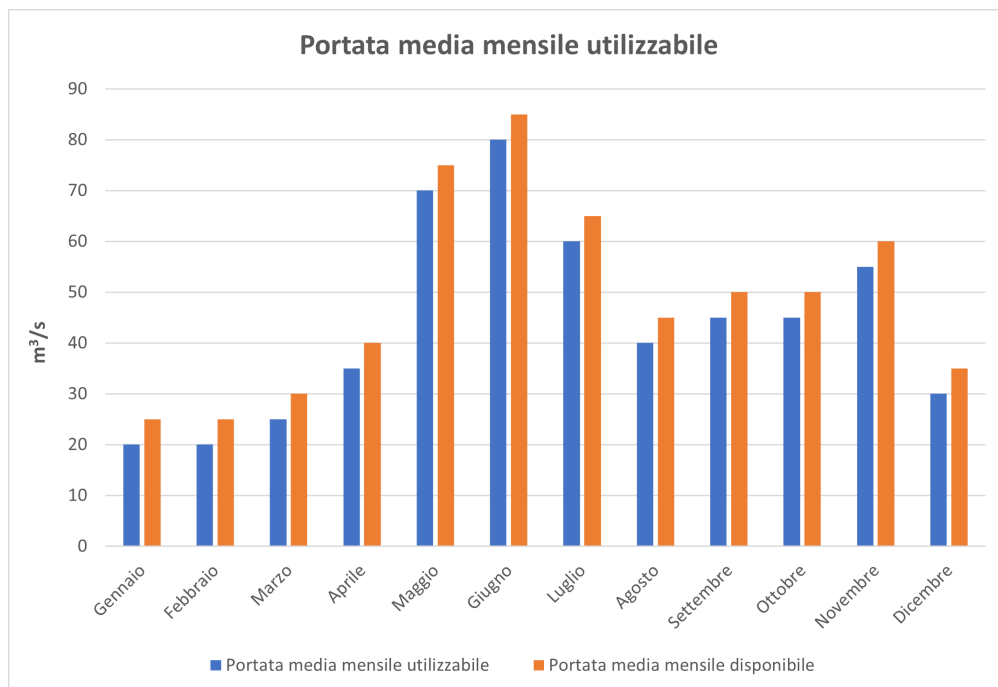


Figura 1: Istogramma portata media mensile

Le caratteristiche orografiche permettono la realizzazione di un rigurgito a quota 188 m sul livello del mare mediante la traversa di monte. La restituzione avviene a quota 173 m sul livello del mare. Il canale derivatore ha una lunghezza di 4 km e una pendenza di 0,025%.

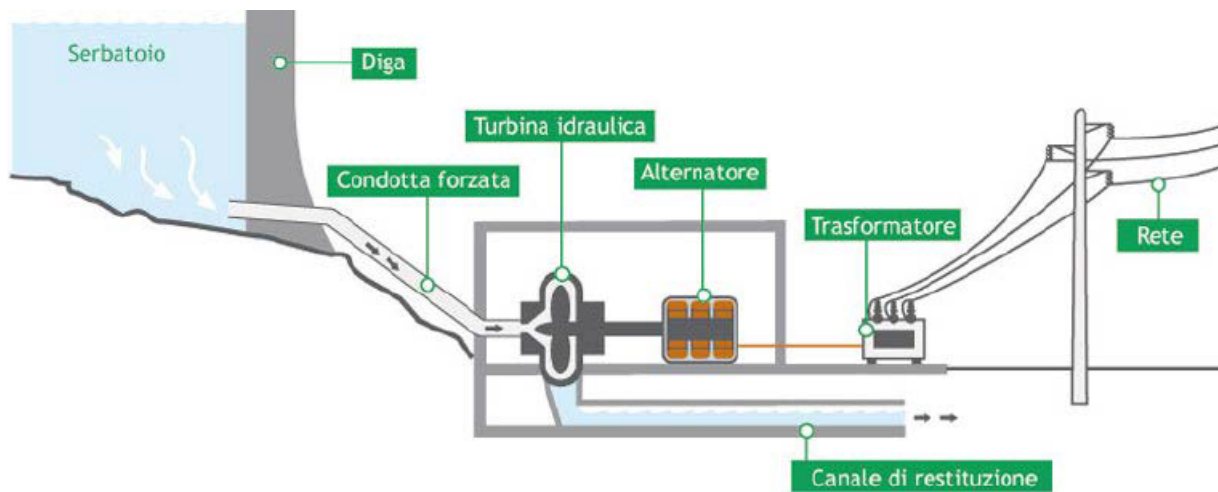


Figura 2: Modello schema impiantistico

Per valutare la fattibilità economica dell'impianto sono necessari i dati sui costi di costruzione ed esercizio della centrale riportati in tabella 1:

<b>Costo costruzione impianto</b>	C	€	$(2,5+0,35 \cdot Q_{\max}) \cdot 10^6$
<b>Valutazione media energia prodotta</b>	c	€/kWh	0,1
<b>Tasso l'accettazione dell'investimento</b>	i	%	8
<b>Durata dell'impianto</b>	n	anni	30
<b>Spese di esercizio</b>	Se	€	$0,005 \cdot C$
<b>Rendimento dell'impianto</b>	$\eta$	%	85

Tabella 1: Dati tecnico/economici impianto

Il dimensionamento di massima dell'impianto prevede di determinare:

- la curva di durata delle portate;
- la portata massima economicamente derivabile  $Q_{\max}$ ;
- la producibilità media annua dell'impianto;
- la potenza di concessione dell'impianto;
- tipo, numero e potenza dei macchinari idraulici da installare;
- analisi di sensitività rispetto al costo dell'energia da 0,05 €/kWh a 0,2 €/kWh, e al tasso di interesse, dal 4% al 12%.

## 2 Dimensionamento di massima dell'impianto

### 2.1 Curva di durata

Negli impianti ad acqua fluente il deflusso dell'acqua non è regolato, quindi risulta fondamentale lo studio della portata in relazione alla potenza generata, essendo quest'ultima proporzionale alla quantità di acqua che scorre nelle condotte forzate. Storicamente, infatti, le curve di durata sono nate per questo tipo di impianti, poiché bisogna correlare la potenza generata con la distribuzione di frequenze della portata. Nello specifico, la curva di durata delle portate del corso d'acqua mostra la relazione tra tutti i valori assunti dalla portata nel corso d'acqua nel periodo di osservazione (in ordinata e in ordine decrescente) e le rispettive durate in ascissa (tipicamente espresse in giorni per il settore idroelettrico). Per durata di una portata  $Q$  si fa riferimento all'intervallo di tempo in cui le portate naturali del corso d'acqua si mantengono superiori o uguali al valore  $Q$  considerato:

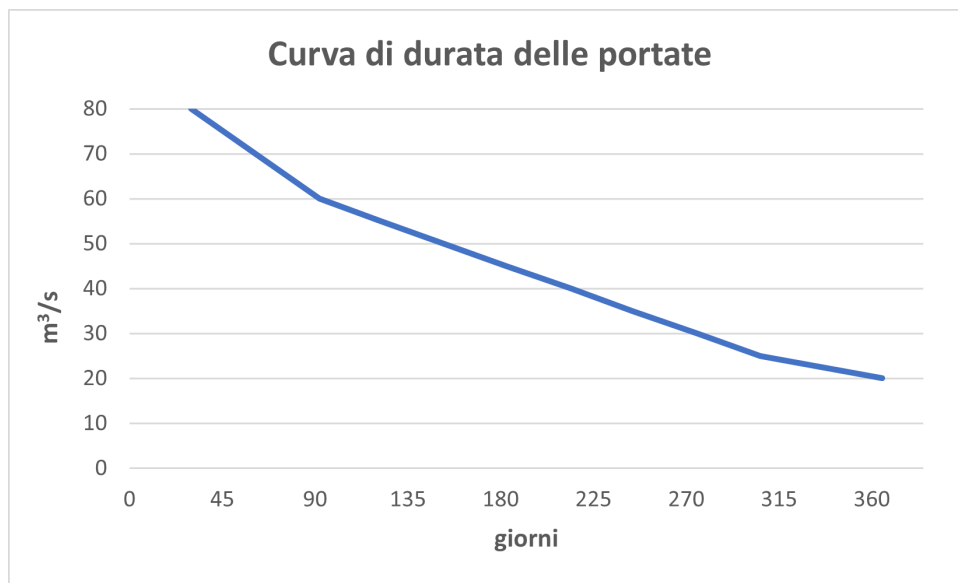


Figura 3: Curva di durata delle portate

### 2.2 Portata massima economicamente derivabile

Per determinare la portata massima economicamente derivabile  $Q_{\max}$ , ovvero la massima portata elaborabile che garantisca la convenienza economica dell'installazione dell'impianto, è necessario massimizzare i **ricavi**  $R$ , dove:

$$R = I - C_i \quad (2.1)$$

$I$  rappresenta l'**introito annuo** e  $C_i$  i **costi di impianto**:

$$I = c \cdot E \quad (2.2)$$

$$C_i = A + S_e \quad (2.3)$$

con A corrispondente all'**ammortamento** dell'investimento:

$$A = \frac{C}{\alpha} \quad (2.4)$$

Il parametro  $\alpha$  permette di calcolare l'attualizzazione dell'investimento A rispetto la vita utile dell'impianto n:

$$\alpha = \frac{(1+i)^n - 1}{i(1+i)^n} \quad (2.5)$$

L'energia prodotta dall'impianto E è data dalla equazione 2.6:

$$E = \eta g \rho H Q_m \frac{8760}{1000} \quad [kWh] \quad (2.6)$$

Il **salto utile** H viene calcolato al netto delle perdite dovute alla pendenza del canale derivatore:

$$H = \Delta H \cdot 0,00025 = 14 \text{ m} \quad (2.7)$$

Si definisce la **portata media utilizzabile** come:

$$Q_m = \frac{\min \sum [Q_{max}, Q_{ti}]}{12} \quad (2.8)$$

ovvero la sommatoria, estesa a tutti i valori di portata osservati, dei minimi valori tra la  $Q_{max}$  considerata e la  $Q_{ti}$  del mese in esame, diviso i dodici mesi dell'anno. Per calcolare tutte le grandezze di interesse appena introdotte si utilizza un processo iterativo partendo dal calcolo del coefficiente  $\alpha$  e facendo variare  $Q_{max}$  all'interno di un certo range di portate (in questo caso da 20 m<sup>3</sup>/s a 80 m<sup>3</sup>/s):

$$\alpha = \frac{(1+i)^n - 1}{i(1+i)^n} = 11,26 \quad (2.9)$$

Si calcolano le portate medie  $Q_m$  al variare di  $Q_{max}$  con l'equazione 2.8:

$Q_{max}$ [ $m^3/s$ ]	$Q_m$ [ $m^3/s$ ]	C [€]	Ci [€]	I [€]	R [€]
20	20,00	9500000,00	891360,62	2045267,28	1153906,66
25	24,17	11250000,00	1055558,63	2471364,63	1415806,00
30	27,92	13000000,00	1219756,63	2854852,25	1635095,61
35	31,25	14750000,00	1383954,64	3195730,13	1811775,48
40	34,17	16500000,00	1548152,65	3493998,27	1945845,62
45	36,67	18250000,00	1712350,66	3749656,68	2037306,02
50	38,33	20000000,00	1876548,67	3920095,62	2043546,95
55	40,00	21750000,00	2040746,68	4090534,56	2049787,88
60	41,25	23500000,00	2204944,68	4218363,77	2013419,08
65	42,08	25250000,00	2369142,69	4218363,77	2013419,08
70	42,92	27000000,00	2533340,70	4303583,24	1934440,54
75	43,33	28750000,00	2697538,71	4388802,71	1855462,00
80	43,75	30500000,00	2861736,72	4431412,44	1733873,73

Tabella 2: Calcolo iterativo grandezze economiche

## 2.3 Producibilità media annua

La producibilità media annua dell'impianto viene calcolata con l'equazione 2.6 utilizzando come portata la  $Q_m$  corrispondente alla  $Q_{max}$  che massimizza i ricavi R:

$$E = \eta g \rho H(40) 8760 \cdot 10^{-9} = 40,90 \text{ GWh} \quad (2.10)$$

## 2.4 Potenza di concessione dell'impianto

La potenza di concessione viene calcolata con la seguente equazione, impostando come portata quella relativa alla  $Q_{max}$  che massimizza i ricavi R:

$$P = \eta g \rho H(55) \cdot 10^{-6} = 6,42 \text{ MW} \quad (2.11)$$

## 2.5 Scelta delle macchine idrauliche

Una volta individuata la potenza di concessione dell'impianto occorre identificare il tipo di turbina da installare. Per farlo è necessario stabilire il **numero di giri caratteristico**  $n_s$ , definito come:

$$\frac{n_s}{n} = \frac{\sqrt{P_{cv}}}{H^{\frac{5}{4}}} \quad (2.12)$$

dove P è la potenza di concessione dell'impianto espressa in CV, mentre n è il **numero di giri** della macchina:

$$n = \frac{60f}{p} \quad (2.13)$$

f è la frequenza di rete, ipotizzata pari a 50 Hz, p è il numero di coppie polari. Fisicamente



il numero di giri caratteristico corrisponde alla velocità di rotazione necessaria per ottenere, con una turbina simile a quella in esame, la potenza unitaria con un salto idraulico pari ad 1 m. Si procede allora graficamente utilizzando il **nomogramma** per identificare le macchine, un diagramma bi-dimensionale che permette il calcolo grafico approssimato di una generica funzione (in questo caso  $n_s$ ):

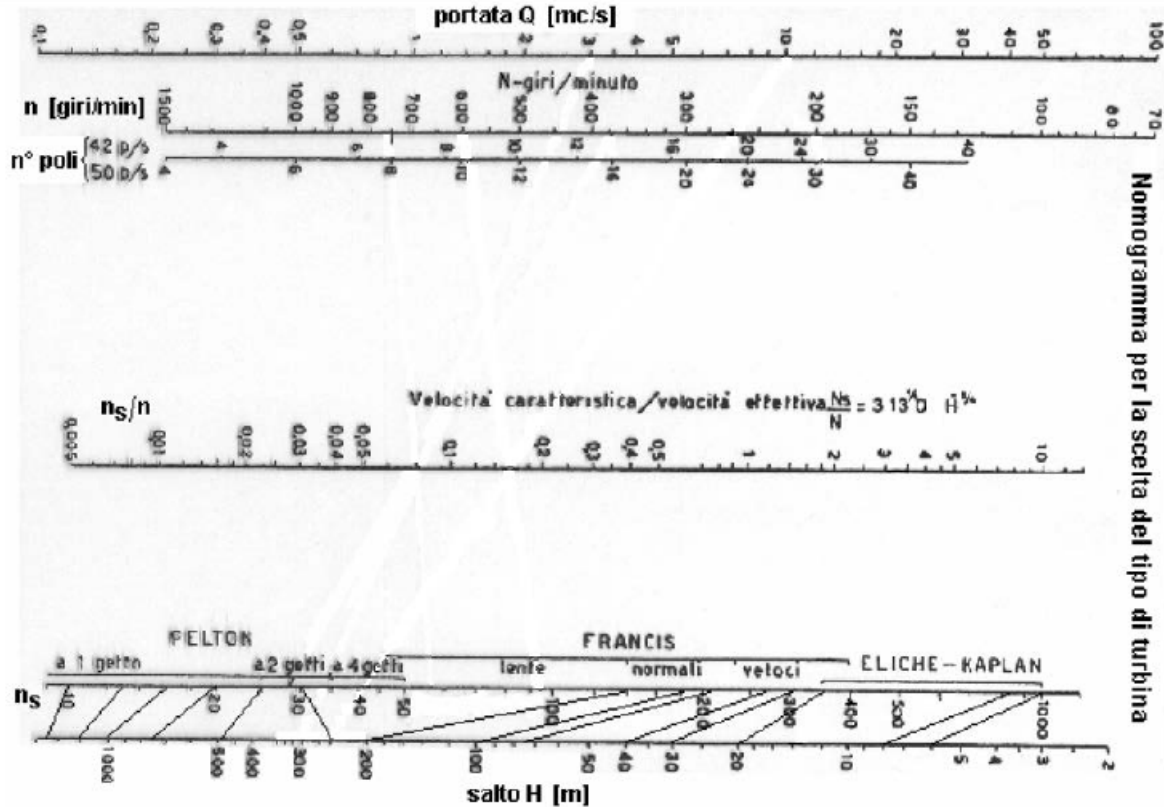


Figura 4: Nomogramma macchine idrauliche

Si traccia una retta entrando nella figura 4 con  $Q_{\max}$  e il salto utile  $H$ , individuando così  $n_s/n$ . Per interpolazione delle rette del nomogramma si individua  $n_s$ . Infine, si traccia una retta passante per  $n_s/n$  e  $n_s$ , ricavando il numero di giri  $n$  e le coppie polari  $p$ . Dalla figura 5 viene individuata una turbina **Kaplan** con le seguenti caratteristiche:

- $Q_{\text{ott}} = 55 \text{ m}^3/\text{s}$
- $H = 14 \text{ m}$
- $n = 150 \text{ giri/minuto}$
- $n_s \simeq 500$
- $n_s/n \simeq 3,45$

Tali risultati sono quelli corrispondenti alle linee tracciate nel nomogramma in figura 5:

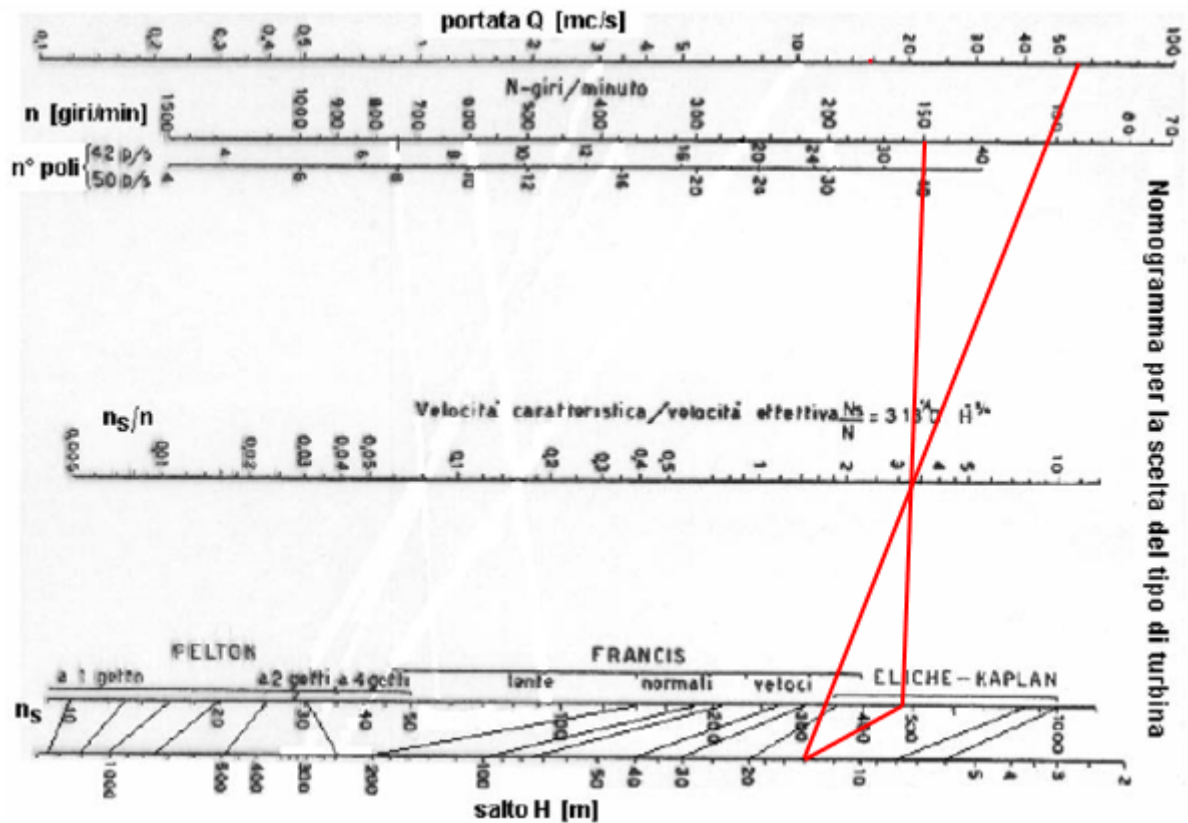


Figura 5: Scelta macchina idraulica tramite nomogramma

La scelta della turbina Kaplan è coerente con i dati di progetto: è una turbina ad elica con pale della girante orientabili (sono essenzialmente una evoluzione delle turbine ad elica nate dalla necessità di superare la limitazione in fase di regolazione). Tali turbine vengono utilizzate per sfruttare salti idraulici modesti, che vanno da pochi m fino a 20-25 m, e per elaborare portate che possono superare i centinaia di  $\text{m}^3/\text{s}$ . Il numero delle pale della girante è definito sperimentalmente ed oscilla tra 4 e 10.

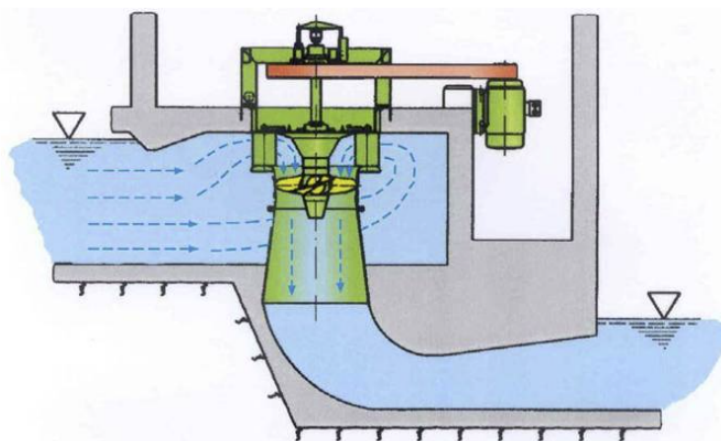


Figura 6: Turbina Kaplan

## 2.6 Analisi di sensitività

Viene effettuata una analisi di sensitività riferita alla portata ottimale  $Q_{\max}$  rispetto a variazioni di tasso di interesse  $i$  e costo dell'energia  $c$ . In tabella 3 sono riportati i range di variazione delle due grandezze:

$i$ [-]	$c$ [€/kWh]
0,04	0,05
0,05	0,07
0,06	0,1
0,07	0,12
0,08	0,13
0,09	0,15
0,1	0,17
0,11	0,19
0,12	0,2

Tabella 3: Analisi di sensitività: range di variazione di  $i$  e  $c$

Come è lecito aspettarsi, all'aumentare del tasso d'interesse tende a diminuire il rapporto  $Q_{\max}/Q_0$ , ovvero la portata economicamente elaborabile dall'impianto (in grado di massimizzare i ricavi) si riduce. Viceversa, all'aumentare del costo dell'energia  $c$ , il rapporto  $Q_{\max}/Q_0$  aumenta, rendendo economicamente più vantaggiosi impianti di taglia superiore. I risultati dell'analisi condotta sono mostrati di seguito:

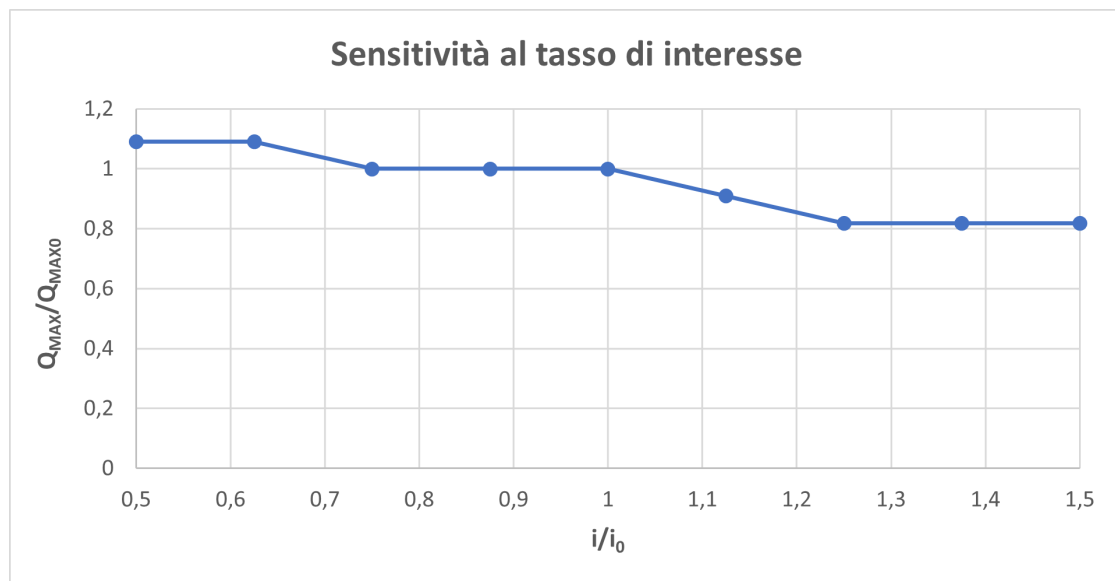


Figura 7: Variabilità della portata ottimale in funzione del tasso di interesse  $i$

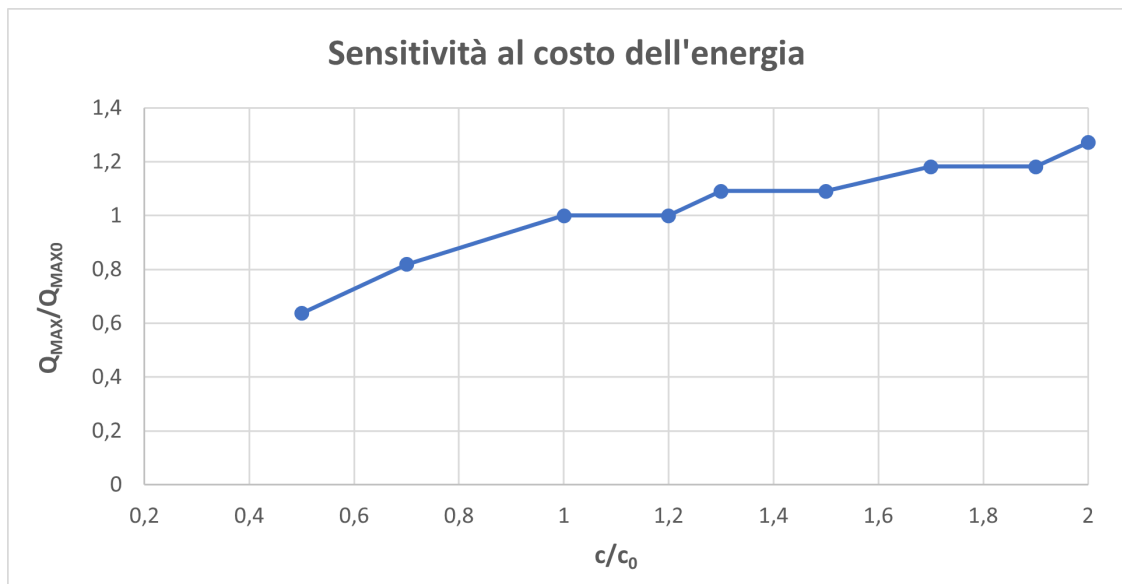


Figura 8: Variabilità della portata ottimale in funzione del costo dell'energia  $c$

In figura 9 e figura 10 viene infine mostrato l'andamento dei ricavi dell'impianto in funzione del costo dell'energia prodotta e del tasso d'interesse:

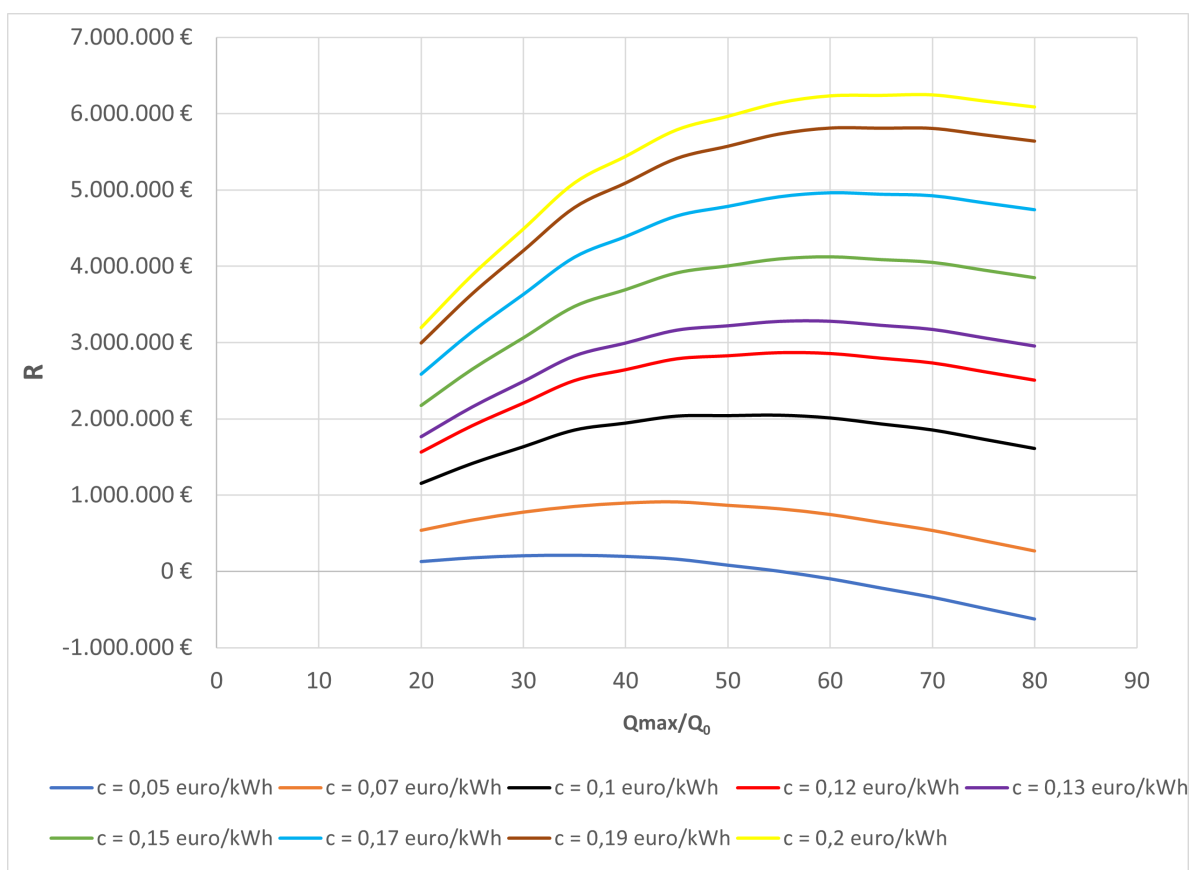


Figura 9: Ricavi impianto al variare del costo dell'energia prodotta

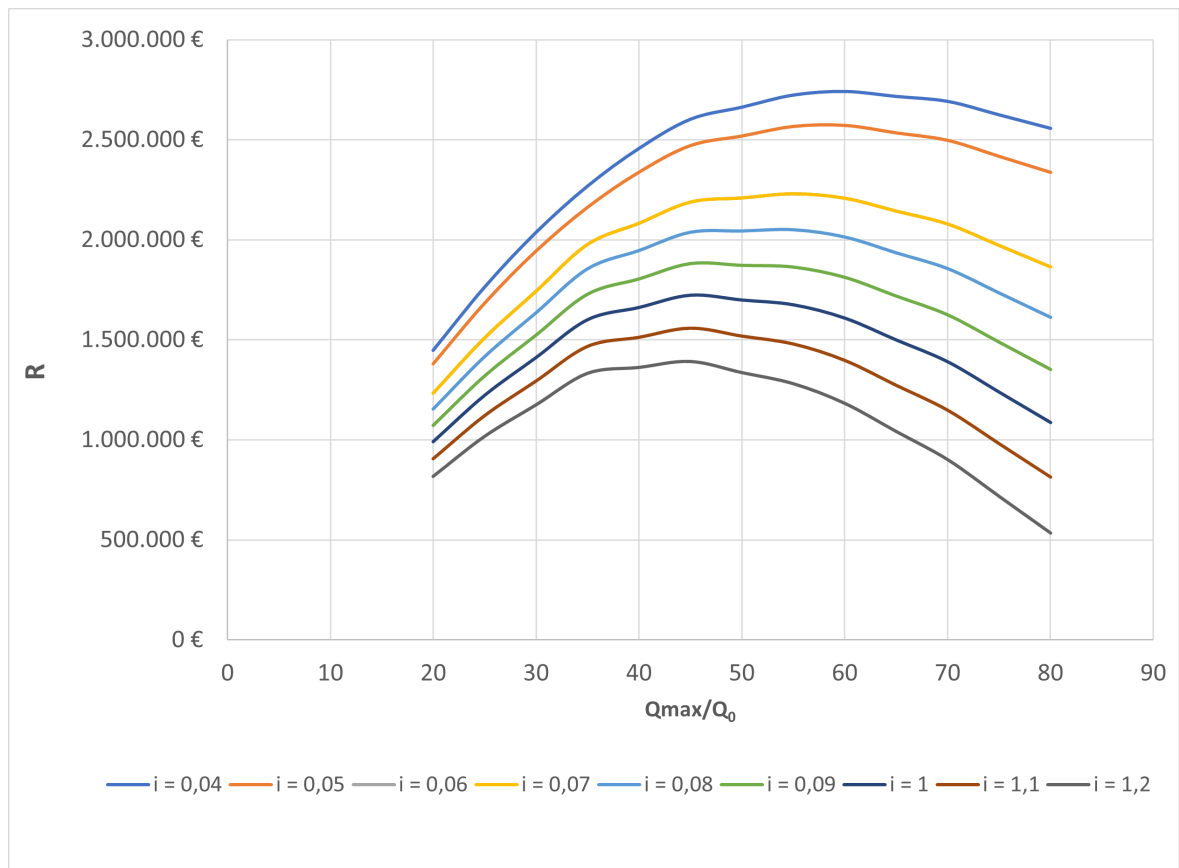


Figura 10: Ricavi impianto al variare del tasso di interesse