



UNIVERSITÀ  
POLITECNICA  
DELLE MARCHE

**UNIVERSITA' POLITECNICA DELLE MARCHE  
FACOLTA' DI INGEGNERIA**

Corso di Laurea Triennale in Ingegneria Meccanica

---

**Caratterizzazione e analisi delle curve di coniugazione di un  
impianto mini-idroelettrico**

**Characterization and analysis of the conjugation curves of a  
mini-hydroelectric plant**

---

**Relatore:**

Prof. Ing. Gianluca Coccia, PhD

**Correlatore:**

Ing. Marco Sotte, PhD

**Tesi di laurea di:**

Leonardo Mazzoli

Anno accademico 2020/2021



# Indice contenuti

INTRODUZIONE.....	XXI
<b>1 Stato dell'arte.....</b>	<b>- 1 -</b>
<b>1.1 Fonti energetiche .....</b>	<b>- 1 -</b>
1.1.1 Fonti energetiche non rinnovabili .....	- 1 -
1.1.2 Fonti di energia rinnovabili.....	- 3 -
<b>1.2 Idroelettrico in Italia .....</b>	<b>- 5 -</b>
<b>1.3 L'impianto idroelettrico.....</b>	<b>- 7 -</b>
<b>1.4 Classificazione turbine .....</b>	<b>- 8 -</b>
1.4.1 Turbina Pelton .....	- 9 -
1.4.2 Turbina Turgo .....	- 9 -
1.4.3 Turbina Francis .....	- 10 -
1.4.4 Turbina Kaplan.....	- 11 -
<b>2 Impianto di studio .....</b>	<b>- 17 -</b>
2.1 Caratteristiche del sito.....	- 17 -
2.2 Concetti base di idraulica .....	- 18 -
2.3 L'impianto .....	- 19 -
<b>3 Raccolta dei dati .....</b>	<b>- 27 -</b>
3.1 Rendimento e caratteristiche d'impianto.....	- 27 -
3.2 Problematiche d'impianto.....	- 28 -
3.3 Metodologia di raccolta dati .....	- 30 -
3.4 Sistema di controllo remoto.....	- 31 -
3.5 Variabili di maggior rilievo.....	- 33 -
<b>4 Analisi dei dati.....</b>	<b>- 35 -</b>
4.1 Obiettivo dello studio.....	- 35 -
4.2 Esempio di una configurazione .....	- 37 -
4.3 Tabelle di sintesi .....	- 41 -
4.4 Discussione dei dati .....	- 45 -
4.5 Considerazioni finali.....	- 47 -
<b>5 Conclusioni.....</b>	<b>- 49 -</b>

<b>A</b>	<b>Raccolta completa delle elaborazioni .....</b>	<b>- 53 -</b>
<b>A.1</b>	<b>Distributore 60.0%.....</b>	<b>- 53 -</b>
A.1.1	Rotore 50.0%.....	- 53 -
A.1.2	Rotore 52.5%.....	- 55 -
A.1.3	Rotore 55.0%.....	- 57 -
A.1.4	Rotore 57.2%.....	- 59 -
A.1.5	Rotore 60.0%.....	- 61 -
A.1.6	Rotore 62.5%.....	- 63 -
A.1.7	Rotore 65.0%.....	- 65 -
A.1.8	Rotore 67.5%.....	- 67 -
A.1.9	Rotore 70.0%.....	- 69 -
<b>A.2</b>	<b>Distributore 70.0%.....</b>	<b>- 71 -</b>
A.2.1	Rotore 60.0%.....	- 71 -
A.2.2	Rotore 62.5%.....	- 73 -
A.2.3	Rotore 65.0%.....	- 75 -
A.2.4	Rotore 67.5%.....	- 77 -
A.2.5	Rotore 70.0%.....	- 79 -
A.2.6	Rotore 72.5%.....	- 81 -
A.2.7	Rotore 75.0%.....	- 83 -
A.2.8	Rotore 77.5%.....	- 85 -
A.2.9	Rotore 80.0%.....	- 87 -
<b>A.3</b>	<b>Distributore 75.0%.....</b>	<b>- 89 -</b>
A.3.1	Rotore 60.0%.....	- 89 -
A.3.2	Rotore 62.5%.....	- 91 -
A.3.3	Rotore 65.0%.....	- 93 -
A.3.4	Rotore 67.5%.....	- 95 -
A.3.5	Rotore 70.0%.....	- 97 -
A.3.6	Rotore 72.5%.....	- 99 -
A.3.7	Rotore 75.0%.....	- 101 -
A.3.8	Rotore 77.5%.....	- 103 -
A.3.9	Rotore 80.0%.....	- 105 -
<b>A.4</b>	<b>Distributore 80%.....</b>	<b>- 107 -</b>
A.4.1	Rotore 70.0%.....	- 107 -
A.4.2	Rotore 72.5%.....	- 109 -
A.4.3	Rotore 75.0%.....	- 111 -

A.4.4 Rotore 77.5% .....	- 113 -
A.4.5 Rotore 80.0% .....	- 115 -
A.4.6 Rotore 82.5% .....	- 117 -
A.4.5 Rotore 80.0% .....	- 119 -
<b>A.4 Distributore 85.0%</b> .....	- 121 -
A.4.1 Rotore 75.0% .....	- 121 -
A.4.2 Rotore 77.5% .....	- 123 -
A.4.3 Rotore 80.0% .....	- 125 -
A.4.4 Rotore 82.5% .....	- 127 -
A.4.5 Rotore 85.0% .....	- 129 -
A.4.6 Rotore 87.5% .....	- 131 -
A.4.7 Rotore 90% .....	- 133 -
A.4.8 Rotore 92.5% .....	- 135 -
A.4.9 Rotore 95.0% .....	- 137 -
<b>A.5 Statore 90%</b> .....	- 139 -
A.5.1 Rotore 87.5% .....	- 139 -
A.5.2 Rotore 90.0% .....	- 141 -
A.5.3 Rotore 92.5% .....	- 143 -
A.5.4 Rotore 95.0% .....	- 145 -
A.5.5 Rotore 97.5% .....	- 147 -
A.5.6 Rotore 100.0% .....	- 149 -
<b>Bibliografia</b> .....	- 153 -



# Indice delle figure

- Figura 1: Consumo elettrico mondiale [4]
- Figura 2: Utilizzo fonti [4]
- Figura 3: Distribuzione regionale del numero di impianti installati [3]
- Fig. 4: Campo di utilizzo in funzione della portata e dell'altezza
- Figura 5: Turbina Pelton [8]
- Figura 6: Turbina Turgo [8]
- Figura 7: Turbina Francis [8]
- Figura 8: Turbina Kaplan [8]
- Figura 9: Schema turbina Kaplan [8]
- Figura 10: Curve di durata [8]
- Figura 11: Salto idrico su Portata [8]
- Figura 12: Rendimento in funzione della portata [8]
- Figura 13: Diagramma di Balje [8]
- Figura 14: Confronto con semplice elica [8]
- Figura 15: Curva rendimento portata ridotta [8]
- Figura 16: Panoramica esterni\_1
- Figura 17: Panoramica esterni\_2
- Figura 18: Sgrigliatore
- Figura 19: Disposizione planimetrica\_1
- Figura 20: Disposizione planimetrica\_2
- Figura 21: Visone palette statore e rotore [8]
- Figura 22: Esempio pressostato [9]
- Figura 23: Canale a pelo libero
- Figura 24: Generatore 1

Figura 25: Schema d'impianto generatore 1

Figura 26: Interfaccia grafica di controllo

Figura 27: Canale di scarico

Figura 28: Configurazione standard

Figura 29: Curva Gaussiana

Figura 30: Istogramma di frequenza

Figura A.1: Grafico D\_60.0%; R\_50.0%

Figura A.2: Grafico D\_60.0%; R\_52,5%

Figura A.3: Grafico D\_60.0%; R\_55,0%

Figura A.4: Grafico D\_60.0%; R\_57,5%

Figura A.5: Grafico D\_60.0%; R\_60.0%

Figura A.6: Grafico D\_60.0%; R\_62.5%

Figura A.7: Grafico D\_60.0%; R\_65.0%

Figura A.8: Grafico D\_60.0%; R\_67.5%

Figura A.9: Grafico D\_60.0%; R\_70.0%

Figura A.10: Grafico D\_70.0%; R\_60.0%

Figura A.11: Grafico D\_70.0%; R\_65.0%

Figura A.12: Grafico D\_70.0%; R\_65.0%

Figura A.13: Grafico D\_70.0%; R\_67.5%

Figura A.14: Grafico D\_70.0%; R\_70.0%

Figura A.15: Grafico D\_70.0%; R\_72.5%

Figura A.16: Grafico D\_70.0%; R\_75.0%

Figura A.17: Grafico D\_70.0%; R\_77.5%

Figura A.18: Grafico D\_70.0%; R\_80.0%

Figura A.19: Grafico D\_75.0%; R\_60.0%

Figura A.20: Grafico D\_75.0%; R\_62.5%

Figura A.21: Grafico D\_75.0%; R\_65.0%

Figura A.22: Grafico D\_75.0%; R\_67.5%

Figura A.23: Grafico D\_75.0%; R\_70.0%

Figura A.24: Grafico D\_75.0%; R\_72.5%

Figura A.25: Grafico D\_75.0%; R\_75.0%

Figura A.26: Grafico D\_75.0%; R\_77.5%

Figura A.27: Grafico D\_75.0%; R\_80.0%

Figura A.28: Grafico D\_80.0%; R\_70.0%

Figura A.29: Grafico D\_80.0%; R\_72.5%

Figura A.30: Grafico D\_80.0%; R\_75.0%

Figura A.31: Grafico D\_80.0%; R\_77.5%

Figura A.32: Grafico D\_80.0%; R\_80.0%

Figura A.33: Grafico D\_80.0%; R\_82.5%

Figura A.34: Grafico D\_80.0%; R\_85.0%

Figura A.35: Grafico D\_85.0%; R\_75.0%

Figura A.36: Grafico D\_85.0%; R\_77.5%

Figura A.37: Grafico D\_85.0%; R\_80.0%

Figura A.38: Grafico D\_85.0%; R\_82.5%

Figura A.39: Grafico D\_85.0%; R\_85.0%

Figura A.40: Grafico D\_85.0%; R\_87.5%

Figura A.42: Grafico D\_85.0%; R\_90.0%

Figura A.43: Grafico D\_85.0%; R\_92.5%

Figura A.44: Grafico D\_85.0%; R\_95.0%

Figura A.45: Grafico D\_90.0%; R\_87.5%

Figura A.46: Grafico D\_90.0%; R\_90.0%

Figura A.46: Grafico D\_90.0%; R\_92.5%

Figura A.47: Grafico D\_90.0%; R\_95.0%

Figura A.48: Grafico D\_90.0%; R\_97.5%

Figura A.49: Grafico D\_90.0%; R\_100.0%

# Indice delle tabelle

Tabella 1: Distribuzione regionale del numero di impianti installati [3]

Tabella 2: Nomenclatura in funzione della potenza installata [7]

Tabella 3: Nomenclatura in funzione del salto disponibile [7]

Tabella 4: Rilevazioni impianto

Tabella 5: Accoppiamenti distributore - pale

Tabella 6: Estratto da analisi in Excel

Tabella 7: Rielaborazione dati di potenza registrati

Tabella 8: Divisione in classi e Frequenza registrata

Tabella 9: Distributore al 60%

Tabella 10: Distributore al 70%

Tabella 11: Distributore al 75%

Tabella 12: Distributore all'80%

Tabella 13: Distributore all'85%

Tabella 14: Distributore al 90%

Tabella 15: Configurazione di massima stabilità

Tabella 16: Configurazione di massimo rendimento

Tabella A.1: Potenza D\_60.0%; R\_50.0%

Tabella A.2: Rielaborazione dati D\_60.0%; R\_50.0%

Tabella A.3: Potenza D\_60.0%; R\_52,5%

Tabella A.4: Rielaborazione dati D\_60.0%; R\_52,5%

Tabella A.5: Potenza D\_60.0%; R\_55,0%

Tabella A.6: Rielaborazione dati D\_60.0%; R\_55,0%

Tabella A.7: Potenza D\_60.0%; R\_57.5%

Tabella A.8: Rielaborazione dati D\_60.0%; R\_57.5%

Tabella A.9: Potenza D\_60.0%; R\_60.0%

Tabella A.10: Rielaborazione dati D\_60.0%; R\_60.0%

Tabella A.11: Potenza D\_60%; R\_62.5%

Tabella A.12: Rielaborazione dati D\_60.0%; R\_62.5%

Tabella A.13: Potenza D\_60.0%; R\_65.0%

Tabella A.14: Rielaborazione dati D\_60.0%; R\_65.0%

Tabella A.15: Potenza D\_60.0%; R\_67.5%

Tabella A.16: Rielaborazione dati D\_60.0%; R\_67.5%

Tabella A.17: Potenza D\_60.0%; R\_70.0%

Tabella A.18: Rielaborazione dati D\_60.0%; R\_70.0%

Tabella A.19: Potenza D\_70.0%; R\_60.0%

Tabella A.20: Rielaborazione dati D\_70.0%; R\_60.0%

Tabella A.21: Potenza D\_70.0%; R\_62.5%

Tabella A.22: Rielaborazione dati D\_70.0%; R\_65.0%

Tabella A.23: Potenza D\_70.0%; R\_65.0%

Tabella A.24: Rielaborazione dati D\_70.0%; R\_65.0%

Tabella A.25: Potenza D\_70.0%; R\_67.5%

Tabella A.26: Rielaborazione dati D\_70.0%; R\_67.5%

Tabella A.27: Potenza D\_70.0%; R\_70.0%

Tabella A.28: Rielaborazione dati D\_70.0%; R\_70.0%

Tabella A.29: Potenza D\_70.0%; R\_72.5%

Tabella A.30: Rielaborazione dati D\_70.0%; R\_72.5%

Tabella A.31: Potenza D\_70.0%; R\_75.0%

Tabella A.32: Rielaborazione dati D\_70.0%; R\_75.0%

Tabella A.33: Potenza D\_70.0%; R\_77.5%

Tabella A.34: Rielaborazione dati D\_70.0%; R\_77.5%

Tabella A.35: Potenza D\_70.0%; R\_80.0%

Tabella A.36: Rielaborazione dati D\_70.0%; R\_80.0%

Tabella A.37: Potenza D\_75.0%; R\_60.0%

Tabella A.38: Rielaborazione dati D\_75.0%; R\_60.0%

Tabella A.39: Potenza D\_75.0%; R\_62.5%

Tabella A.40: Rielaborazione dati D\_75.0%; R\_62.5%

Tabella A.41: Potenza D\_75.0%; R\_65.0%

Tabella A.42: Rielaborazione dati D\_75.0%; R\_65.0%

Tabella A.43: Potenza D\_75.0%; R\_67.5%

Tabella A.44: Rielaborazione dati D\_75.0%; R\_67.5%

Tabella A.45: Potenza D\_75.0%; R\_70.0%

Tabella A.46: Rielaborazione dati D\_75.0%; R\_70.0%

Tabella A.47: Potenza D\_75.0%; R\_72.5%

Tabella A.48: Rielaborazione dati D\_75.0%; R\_72.5%

Tabella A.49: Potenza D\_75.0%; R\_75.0%

Tabella A.50: Rielaborazione dati D\_75.0%; R\_75.0%

Tabella A.51: Potenza D\_75.0%; R\_77.5%

Tabella A.52: Rielaborazione dati D\_75.0%; R\_77.5%

Tabella A.53: Potenza D\_75.0%; R\_80.0%

Tabella A.54: Rielaborazione dati D\_75.0%; R\_80.0%

Tabella A.55: Potenza D\_80.0%; R\_70.0%

Tabella A.56: Rielaborazione dati D\_80.0%; R\_70.0%

Tabella A.57: Potenza D\_80.0%; R\_72.5%

Tabella A.58: Rielaborazione dati D\_80.0%; R\_72.5%

Tabella A.59: Potenza D\_80.0%; R\_75.0%

Tabella A.60: Rielaborazione dati D\_80.0%; R\_75.0%

Tabella A.61: Potenza D\_80.0%; R\_77.5%

Tabella A.62: Rielaborazione dati D\_80.0%; R\_77.5%

Tabella A.63: Potenza D\_80.0%; R\_80.0%

Tabella A.64: Rielaborazione dati D\_80.0%; R\_80.0%

Tabella A.65: Potenza D\_80.0%; R\_82.5%

Tabella A.66: Rielaborazione dati D\_80.0%; R\_82.5%

Tabella A.67: Potenza D\_80.0%; R\_85.0%

Tabella A.68: Rielaborazione dati D\_80.0%; R\_85.0%

Tabella A.69: Potenza D\_85.0%; R\_75.0%

Tabella A.70: Rielaborazione dati D\_85.0%; R\_75.0%

Tabella A.71: Potenza D\_85.0%; R\_77.5%

Tabella A.72: Rielaborazione dati D\_85.0%; R\_77.5%

Tabella A.73: Potenza D\_85.0%; R\_80.0%

Tabella A.74: Rielaborazione dati D\_85.0%; R\_80.0%

Tabella A.75: Potenza D\_85.0%; R\_82.5%

Tabella A.76: Rielaborazione dati D\_85.0%; R\_82.5%

Tabella A.77: Potenza D\_85.0%; R\_85.0%

Tabella A.78: Rielaborazione dati D\_85.0%; R\_85.0%

Tabella A.79: Potenza D\_85.0%; R\_87.5%

Tabella A.80: Rielaborazione dati D\_85.0%; R\_87.5%

Tabella A.81: Potenza D\_85.0%; R\_90.0%

Tabella A.82: Rielaborazione dati D\_85.0%; R\_90.0%

Tabella A.83: Potenza D\_85.0%; R\_92.5%

Tabella A.84: Rielaborazione dati D\_85.0%; R\_92.5%

Tabella A.85: Potenza D\_85.0%; R\_95.0%

Tabella A.86: Rielaborazione dati D\_85.0%; R\_95.0%

Tabella A.87: Potenza D\_90.0%; R\_87.5%

Tabella A.88: Rielaborazione dati D\_90.0%; R\_87.5%

Tabella A.89: Potenza D\_90.0%; R\_90.0%

Tabella A.90: Rielaborazione dati D\_90.0%; R\_90.0%

Tabella A.91: Potenza D\_90.0%; R\_92.5%

Tabella A.92: Rielaborazione dati D\_90.0%; R\_92.5%

Tabella A.93: Potenza D\_90.0%; R\_95.0%

Tabella A.94: Rielaborazione dati D\_90.0%; R\_95.0%

Tabella A.95: Potenza D\_90.0%; R\_97.5%

Tabella A.96: Rielaborazione dati D\_90.0%; R\_97.5%

Tabella A.97: Potenza D\_90.0%; R\_100.0%

Tabella A.98: Rielaborazione dati D\_90.0%; R\_100.0%



# Nomenclatura

## Simboli latini

$D$  – Diametro di girante (m)

$D_s$  – Diametro specifico

$H$  – Salto disponibile (m)

$L$  – Lavoro turbina (J)

$n$  – Numero di giri (RPM)

$P$  – Potenza elettrica (kW)

$p_g$  – Pressione gas (Pa)

$p_{\text{vap}}$  – Pressione di vapore (Pa)

$Q$  – Portata volumetrica ( $\text{m}^3/\text{s}$ )

$q$  – Portata ridotta

$v$  – Numero di giri ridotto

## Simboli Greci

$\alpha$  – Angolo di apertura palette statoriche ( $^{\circ}$ )

$\beta$  – Angolo di apertura palette rotoriche ( $^{\circ}$ )

$\Delta$  – Differenza

$\eta$  – Rendimento

$\sigma$  – Deviazione standard (kW)

$\tau$  – Rapporto tra deviazione standard e potenza media

$\omega_s$  – Numero di giri specifico

## Apici e pedici

$\bar{\quad}$  – Media

con - Concentrate

d – Disponibile

dis - Distribuite

i – Idraulico

g - Gas

in – Ingresso

min – Minimo

max – Massimo

o – Organico

out - Uscita

r – Richiesto

s – Specifico

t – Turbina

u – Utile

v – volumetrico

vap - Vapore

## Acronimi

ENEA : Ente per le nuove tecnologie, l'energia e l'ambiente

IEA : International association for the evaluation of Educational Achievement

MT: Media tensione

TERNa : Trasmissione Elettricità Rete Nazionale



# INTRODUZIONE

Il presente lavoro consiste nell'analisi dei dati sperimentali ottenuti tramite prove empiriche di coniugazione di un'elica Kaplan appartenente ad un impianto mini-idroelettrico. L'obiettivo è quello di trovare la configurazione delle palette statoriche e rotoriche più idonea a massimizzare l'efficienza e a minimizzare l'oscillazione di potenza in output.

Nel primo capitolo sono illustrate le problematiche ambientali legate al cambiamento climatico, contestualizzando ai giorni odierni la potenzialità degli impianti a impatto zero. Nel 2021 è possibile considerare le fonti rinnovabili fondamentali per minimizzare i danni causati dalla sempre crescente domanda di energia elettrica e dunque preservare il pianeta. Particolare attenzione è stata dedicata al settore idroelettrico - campo di applicazione di questo lavoro - e alla sua evoluzione nel contesto italiano. Infine, vengono analizzate le caratteristiche generali legate a un impianto idroelettrico con elica Kaplan.

Nel secondo capitolo viene introdotto l'impianto dal quale sono stati ricavati i dati e le sue peculiarità. Vengono inoltre descritte le caratteristiche del luogo dove è localizzato l'impianto e le caratteristiche ottimali di funzionamento.

Nel terzo capitolo viene affrontato il *modus operandi* dell'analisi ed è illustrato come varia l'intervallo di dati di interesse a seconda del periodo climatico di riferimento. Successivamente si illustra il sistema di controllo remoto utilizzato e come questo può essere sfruttato per costruire manualmente la curva di coniugazione. Il capitolo si conclude con il riassunto di come le prove sono state svolte e le relative tempistiche.

Nel quarto capitolo è trattata l'elaborazione dati con relativi esempi esplicativi. Sono riportate le tabelle riassuntive dei dati sviluppati e la discussione di come questi possono essere sfruttati finalizzando l'esperienza. Quindi i risultati finali e le considerazioni attinenti.

Infine, sono riportate le conclusioni del lavoro svolto, i limiti della particolare esperienza e le possibili evoluzioni future dello studio con l'auspicabile margine di miglioramento.



## ***Ringraziamenti***

*Prima di procedere con la trattazione, vorrei dedicare qualche riga a tutti coloro che mi sono stati vicini in questo percorso di crescita personale e professionale.*

*Ringrazio il mio relatore Prof. Ing. Gianluca Coccia, che in questi mesi di lavoro, ha saputo guidarmi, con suggerimenti pratici e grande disponibilità, nelle ricerche e nella stesura dell'elaborato.*

*Grazie anche al mio correlatore Ing. Marco Sotte, per i suoi preziosi consigli e per avermi dato l'opportunità di toccare con mano l'ambiente di lavoro.*

*Ringrazio di cuore i miei genitori. Grazie per avermi sempre sostenuto e per avermi permesso di compiere gli studi universitari.*

*Un grazie anche alla mia ragazza a tutti gli amici e ai parenti che mi hanno sempre supportato e motivato durante l'intero percorso di studi.*

*Infine, vorrei dedicare questo piccolo traguardo a me stesso, che possa essere l'inizio di una lunga e brillante carriera professionale.*



# Capitolo

## 1 Stato dell'arte

Per misurare il lavoro che un corpo è in grado di compiere la grandezza di riferimento è l'energia. La società moderna è fortemente dipendente dall'energia, questa può essere utilizzata e sfruttata in tutte le forme: meccanica, elettrica, termica o chimica. Questa, infatti, è indispensabile ad innumerevoli settori, e può essere convertita nelle sue diverse forme a seconda della necessità. Dai tempi della rivoluzione industriale la principale fonte energetica utilizzata è stata la fossile, limitata e non rinnovabile nel breve periodo, così, la società negli ultimi anni ha cercato sempre più di sfruttare fonti secondarie che potessero prescindere dalle riserve presenti sul pianeta [1,2]. Inoltre, con l'evoluzione della ricerca è stata evidenziata la forte dipendenza del riscaldamento globale e dell'inquinamento dall'utilizzo di fonti fossili e quindi dalla loro correlata combustione [3].

### 1.1 Fonti energetiche

Le fonti energetiche si possono suddividere in due macrocategorie: non rinnovabili e rinnovabili. Le fonti non rinnovabili sono destinate ad esaurirsi nel tempo, per lo meno nel tempo utile all'uomo, queste inoltre sono anche le più gravose per l'ambiente. Al contrario le fonti rinnovabili sono così chiamate in quanto non necessitano un lungo intervallo di tempo per essere, una volta sfruttate, nuovamente disponibile all'utenza [7].

#### 1.1.1 Fonti energetiche non rinnovabili

Le fonti non rinnovabili sono quelle più facilmente utilizzabili tramite semplici impianti ad alto rendimento, cioè permettono l'ottimizzazione del rapporto energia utile ed energia dispersa. Per di più, i suddetti impianti sono ben noti e studiati da tempo e risultano relativamente semplici da realizzare all'atto pratico [4,5]. Le fonti non rinnovabili maggiormente utilizzate sono:

- **Carbone**
- **Petrolio**
- **Gas naturale**
- **Uranio e Plutonio**

Carbone petrolio e gas naturale costituiscono le fonti fossili [6]. A partire dalla rivoluzione industriale queste fonti furono consistentemente estratte dal pianeta e utilizzate a scopi energetici. Prima tra queste sicuramente il carbone, impiegato per produrre energia utile al trasporto (iconico mezzo di trasporto dell'Ottocento è indiscutibilmente la locomotiva a vapore), per generare energia elettrica utile nelle prime fonti d'illuminazione urbana o per produrre energia termica per il riscaldamento degli edifici abitati. Il carbone è ottenuto dalla fossilizzazione delle piante ed estratto da cave minerarie. Attualmente questa fonte produce circa un quarto della domanda di energia

elettrica globale e in particolare il 10% di quella italiana [7]. Il Petrolio ha progressivamente sostituito il carbone a partire dalla metà del Novecento circa; dato che risulta molto più semplice da trasportare e la sua estrazione richiede forza lavoro notevolmente inferiore [7]. Il petrolio è una miscela liquida di idrocarburi, per natura si accumula nello strato superficiale della crosta terrestre in laghi sotterranei, la sua estrazione avviene tramite pozzi, pompe od eventualmente piattaforme se il giacimento è localizzato in aree marine. Questa preziosa risorsa è trattata localmente e poi trasferita tramite oleodotti adibiti è trasportata presso le raffinerie, dove viene trasformata nei suoi innumerevoli derivati. Il gas naturale, composto per la maggior parte da metano, deriva dalla decomposizione chimica di elementi organici nel tempo, i bacini naturali di gas sono solitamente localizzati in corrispondenza di giacimenti di petrolio o carbone. Questo risulta meno inquinante delle altre due fonti fossili così negli ultimi anni il suo utilizzo è aumentato molto, in particolare questi ricoprono circa l'85% del fabbisogno energetico mondiale, rispettivamente il 40% per il petrolio, il 26% per il carbone e 23% per il gas [8]. Oltre ad essere il meno inquinante della triade il gas è quello più economico e semplicemente trasportabile [8,9]. L'utilizzo di fonti fossili è ritenuta la maggior causa dell'inquinamento ambientale e del riscaldamento globale, inoltre con l'utilizzo intensivo i giacimenti millenari di queste risorse progressivamente si stanno esaurendo con conseguente impennata dei prezzi di commercio, motivazione valida per approfondire fonti energetiche rinnovabili [10]. Per ciò che riguarda Uranio e Plutonio questi sono considerati fonti non rinnovabili data la difficile reperibilità dei minerali stessi. Nonostante i processi di fissione non generino anidride carbonica né altre sostanze inquinanti è necessario sottolineare la pericolosità delle scorie radioattive che richiedono particolare cura nel loro smaltimento, infatti queste vanno isolate immediatamente dato il loro lungo e gravoso periodo di decadimento [7,11].

## 1.1.2 Fonti di energia rinnovabili

Le fonti di energia rinnovabili sono così denominate in quanto queste sono rigenerate periodicamente e naturalmente in tempi relativamente umani; in particolare una fonte rinnovabile è detta anche sostenibile se si fa riferimento al tempo con il quale questa si rigenera, necessariamente pari o superiore al tempo di utilizzo. Ciò comporta un utilizzo intelligente di tutte quelle risorse apparentemente rinnovabili, come ad esempio le foreste, ma che rischiano di essere depauperate ed erose da uno sfruttamento eccessivo. Una fonte rinnovabile non genera dunque inquinamento e se utilizzata diligentemente sarà sempre disponibile nel futuro [12]. Le fonti di energia rinnovabili si dividono in:

- **Idroelettrica**
- **Geotermica**
- **Solare**
- **Eolica**
- **Biomasse**
- **Marina**

L'energia idroelettrica e quella geotermica sono quelle maggiormente note e sfruttate sin dall'inizio dell'età industriale. L'energia idroelettrica rappresenta sicuramente, tra le rinnovabili, la fonte più sfruttata, fino a soddisfare da sola quasi il 16,5% della richiesta energetica nel 2018 [8]. Le rimanenti non elencate sono le così dette nuove fonti rinnovabili, sviluppate negli ultimi anni grazie all'evoluzione della ricerca e alla sempre maggiore richiesta energetica. Nella figura 1 è descritta l'evoluzione della domanda di energia elettrica; nella figura 2 per ogni fonte è rappresentata l'energia prodotta con cadenza annuale.

Electricity consumption, World 1990-2018

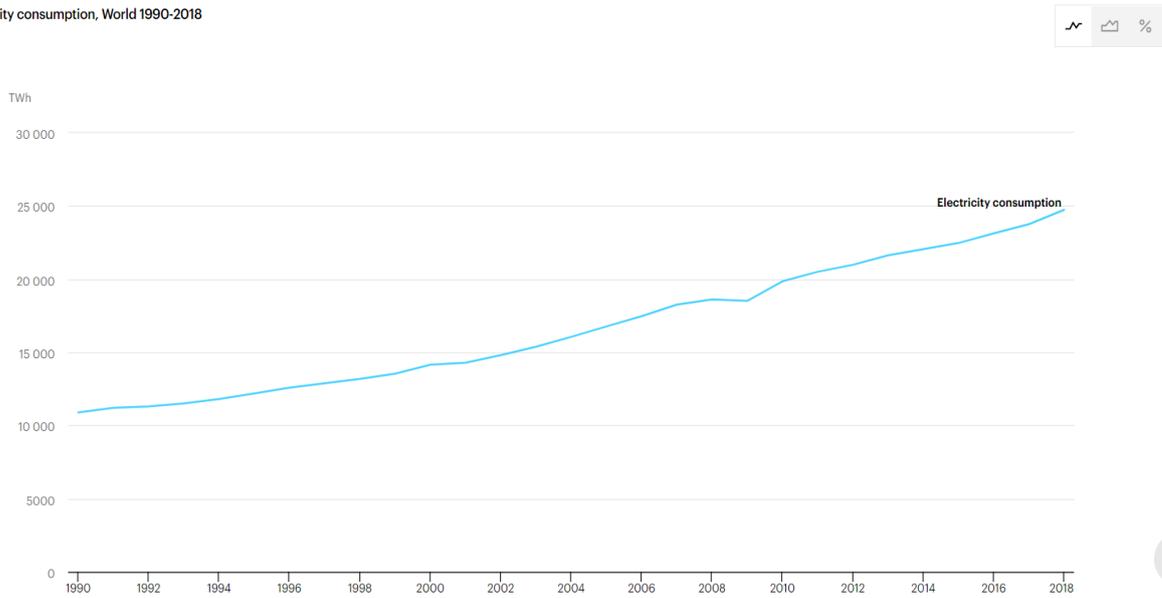


Figura 1: Consumo elettrico mondiale [8]

Total energy supply (TES) by source, World 1990-2018

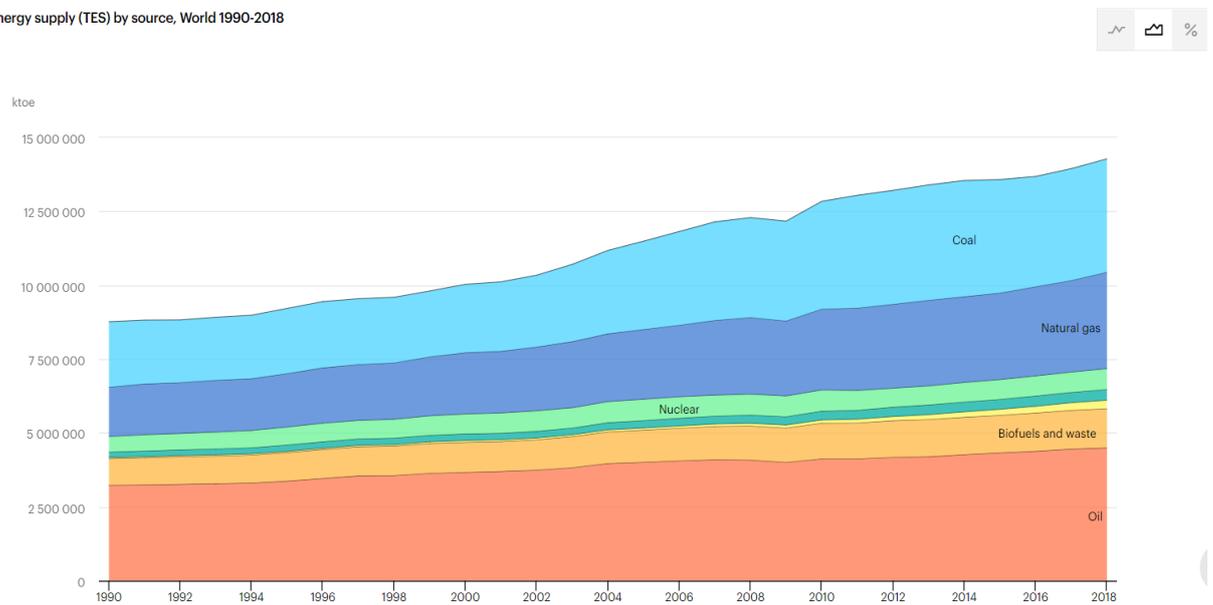


Figura 2: Utilizzo fonti [8]

## 1.2 Idroelettrico in Italia

L'energia idroelettrica è considerata una fonte di energia alternativa e rinnovabile, che sfrutta la trasformazione dell'energia potenziale gravitazionale, posseduta da una certa massa d'acqua ad una certa quota altimetrica, in energia cinetica, al superamento di un certo dislivello; tale energia cinetica viene infine trasformata in energia elettrica in una centrale idroelettrica. Il settore idroelettrico svolge un ruolo centrale per raggiungere questo obiettivo, infatti questo offre una risorsa decisamente più consistente rispetto alle altre fonti rinnovabili [13,14]. L'Unione Europea incentiva e spinge i paesi che la compongono a sviluppare l'utilizzo e lo sfruttamento di fonti rinnovabili, a riguardo, il parlamento di Bruxelles ha fissato al 2030 un target vincolante del 32% di energie rinnovabili prodotta a paese [15]. In tale contesto l'Italia si colloca tra i paesi più emergenti: le fonti rinnovabili hanno infatti raggiunto a giugno 2013 la critica soglia del 50% rispetto produzione nazionale, passando dal 38,2% nel 2012 al 50,2% sempre nel 2013 [7]. Il territorio italiano morfologicamente offre innumerevoli corsi d'acqua e bacini idrici naturali, morfologicamente il suolo italiano mette a disposizione anche quote rilevanti dovute alle catene montuose maggiori, Alpi ed Appennini; queste due caratteristiche sono perfette per essere impiegate nell'ambito idroelettrico. Il settore idroelettrico nazionale oggi copre il 42% di tutte le fonti rinnovabili dello stato, questo è formato da circa 3.700 impianti naturalmente non sufficienti a soddisfare da solo le legislazioni europee, eppure questa certamente è la fonte rinnovabile con maggior potenziale non adeguatamente sfruttato. Il parco idroelettrico italiano ha bisogno oggi di un consistente rinnovo, gli interventi applicabili possono interessare turbine, parti elettromeccaniche, la messa in pressione di canali e gallerie, la manutenzione di condotte forzate o la loro sostituzione con diametri maggiori. L'opera di manutenzione in questione potrebbe comportare un aumento di circa un terzo dell'apporto energetico attualmente censito [7]. La maggior parte del parco idroelettrico installato in Italia è situato al Nord, prevalentemente in Piemonte (634 impianti), Trentino-Alto Adige (588 impianti) e Lombardia (427 impianti) raggiungendo in queste tre regioni quasi il 60% della potenza totale lorda installata su tutto il territorio nazionale. La produzione lorda degli impianti installati risulta molto variabile a causa della forte dipendenza con i fattori climatologici, nel 2010 si è raggiunto il picco massimo, anno eccezionale dal punto di vista dell'idraulicità, pari a 51.116 GWh, per poi decrescere nuovamente nei due anni successivi [7].

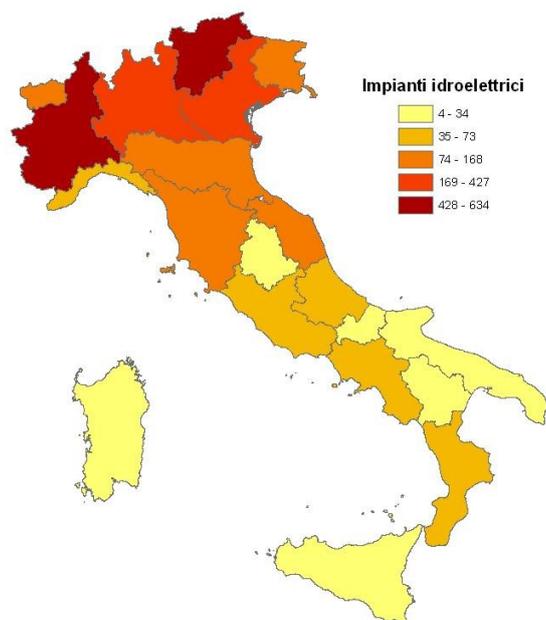


Figura 3: Distribuzione regionale del numero di impianti installati [7]

Tabella 1: Distribuzione regionale del numero di impianti installati [7]

Regioni	Percentuale impianti (%)
Piemonte	21,3
Liguria	2,0
Trentino Alto Adige	19,8
Abruzzo	1,9
Lombardia	14,4
Calabria	1,6
Veneto	9,5
Campania	1,4
Friuli Venezia Giulia	5,7
Umbria	1,1
Toscana	4,6
Molise	1,0
Marche	4,5
Sardegna	0,6
Emilia Romagna	3,8
Sicilia	0,6
Valle d'Aosta	3,3
Basilicata	0,3
Lazio	2,5
Puglia	0,1

### 1.3 L'impianto idroelettrico

Un impianto idroelettrico si può distinguere in vari tipi, a seconda che lo si voglia differenziare per potenza, caduta o sfruttamento della risorsa idrica, le diverse tipologie sono classificate come:

Tabella 2: Nomenclatura in funzione della potenza installata [16]

<b>Nomenclatura</b>	<b>Potenza installata (kW)</b>
Micro	$P < 100$
Mini	$100 \text{ kW} < P < 1000$
Piccoli	$1000 \text{ kW} < P < 10000$
Grandi	$P > 10000$

Tabella 3: Nomenclatura in funzione del salto disponibile [16]

<b>Nomenclatura</b>	<b>Salto disponibile (m)</b>
impianti ad alta caduta	$H > 100$
impianti a media caduta	$H = 30 \div 100$
impianti a bassa caduta	$H = 2 \div 30$

Infine, gli impianti si differenziano per il sistema di sfruttamento dell'acqua, e si distinguono in:

- “Impianti ad acqua fluente”, i quali possono avere degli sbarramenti per innalzare il salto idrico e una condotta forzata, oppure semplicemente a pelo libero
- “Impianti con centrale a piede di diga”, i quali sfruttano la presenza di serbatoi o piccole dighe
- “Impianti inseriti in canali irrigui” [16].

## 1.4 Classificazione turbine

Per ogni tipo di impianto ci possono essere differenti tipi di turbine, che sfruttano l'energia cinetica dell'acqua come le turbine ad azione o anche l'energia statica dell'acqua, come le turbine a reazione [17]. Nella figura 4 sono evidenziati i campi di utilizzo delle diverse tipologie di turbine, le Pelton sono più adatte a piccole portate e grandi salti geodetici, le Francis si adattano a portate medie e salti modesti, invece le Kaplan lavorano ottimamente con grandi flussi in ingresso e piccoli salti.

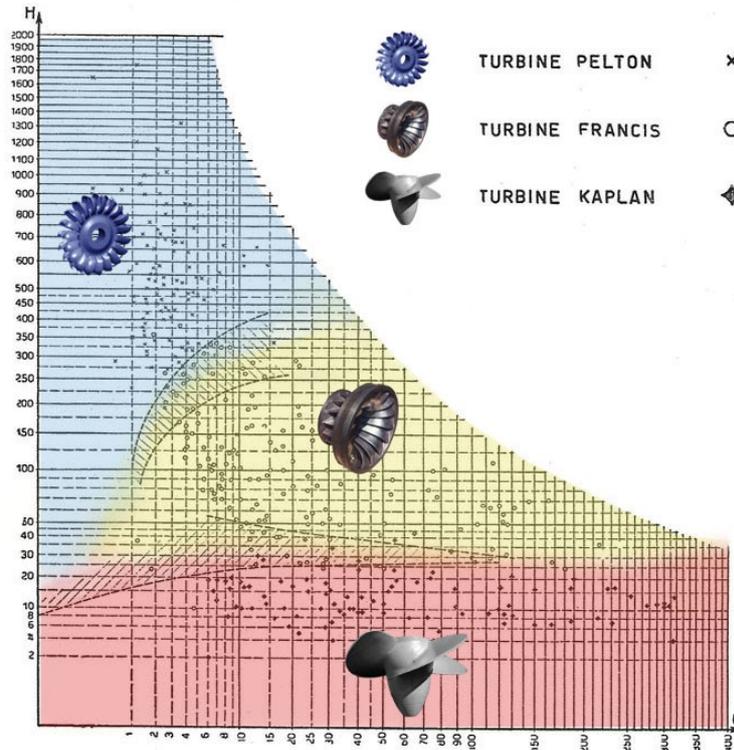


Figura 4: Campo di utilizzo in funzione della portata e dell'altezza [18]

## 1.4.1 Turbina Pelton

La turbina Pelton, essendo una turbina ad azione, sfrutta dei particolari ugelli che trasformano totalmente la pressione dell'acqua in energia cinetica. Quindi un forte getto d'acqua investe una pala alla volta, facendo girare la turbina, ed infine, quest'acqua se ne esce dalla pala a velocità quasi nulla. I rendimenti sono molto elevati, attorno al 93%. Viene usata per sia per grandi che per mini-impianti idroelettrici, sfruttando salti compresi tra i 50 e 1300 metri e portate che variano tra i 0.5 e i 100 litri al secondo [18,19].



Figura 5: Turbina Pelton [18]

## 1.4.2 Turbina Turgo

La turbina Turgo è una turbina ad azione, la quale di solito viene impiegata per salti compresi tra i 15 e i 300 metri. È molto simile alla Pelton, però a differenza di quest'ultima il getto colpisce simultaneamente più pale, e inoltre può essere utilizzata con acque torbide [20].



Figura 6: Turbina Turgo [18, 20]

### 1.4.3 Turbina Francis

La turbina Francis è una turbina a reazione, con distributore a pale a calettamento regolabile. Vengono utilizzate per medi salti ( $10 \div 350$  m), e sono caratterizzate da rendimenti molto alti. Esse sono caratterizzate da un flusso radiale all'alimentazione, e da un flusso assiale allo scarico. Hanno alcuni svantaggi legati alla complessità della costruzione, problemi di cavitazione, attrito ed usura a causa dell'alta velocità dell'acqua contro le pale. Questa può essere classificata in funzione del grado di reazione, la turbina lenta è fortemente centripeta con un'espansione nel rotore contenuta. Al contrario, la Francis veloce ha un grado di reazione tendente all'unità e quindi una relativa espansione rotorica maggiore, questa turbina è morfologicamente molto più assiale con sezione di ingresso molto più ampia [18].



Figura 7: Turbina Francis [18]

## 1.4.4 Turbina Kaplan

La turbina Kaplan fu inventata nel 1913 dal professore austriaco Viktor Kaplan. È una turbina idraulica a reazione che sfrutta piccoli dislivelli, fino a qualche decina di metri, ma con grandi portate, da 200/300 m<sup>3</sup>/s in su. Costruttivamente è un'elica, dove le pale si possono orientare, al variare della portata d'acqua permettendo di mantenere alto il rendimento fino a portate del 20-30% della portata nominale. Solitamente è dotata di deflettori statorici fissi che orientano il flusso. Si può ottimizzare il rendimento della macchina per un range maggiormente ampio rispetto alla portata ideale tramite un sistema di orientamento dei deflettori statorici al variare della portata. Il liquido giunge sulla turbina grazie ad un condotto a forma di chiocciola che alimenta tutta la circonferenza, poi attraversa un distributore che dà al fluido una rotazione vorticoso, essenziale per imprimere il moto alla girante, dove il flusso deviato di 90° la investe assialmente. Con una turbina ad elica la regolazione è praticamente nulla, quindi può funzionare solo per una certa portata, ragion per cui il distributore non è nemmeno regolabile [18, 21].

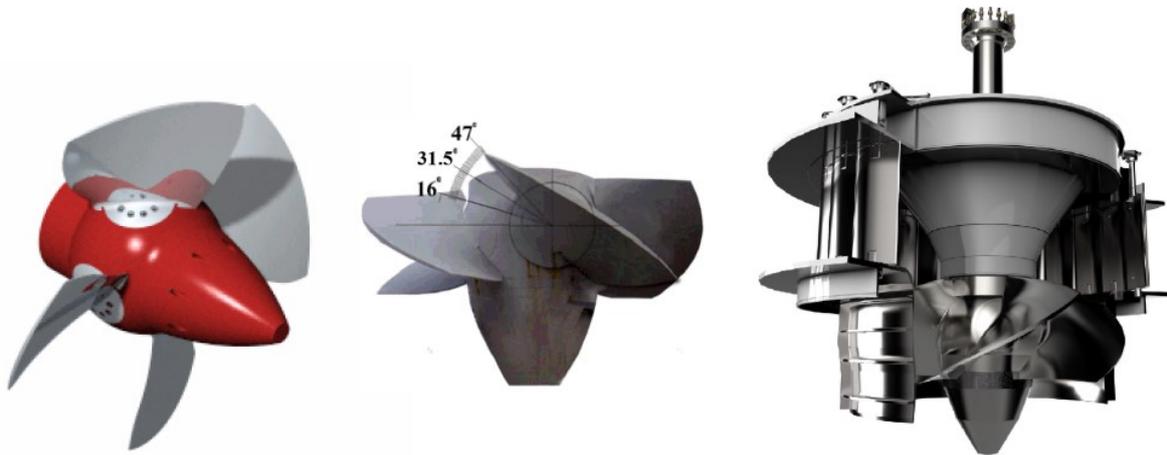


Figura 8: Turbina Kaplan [18]

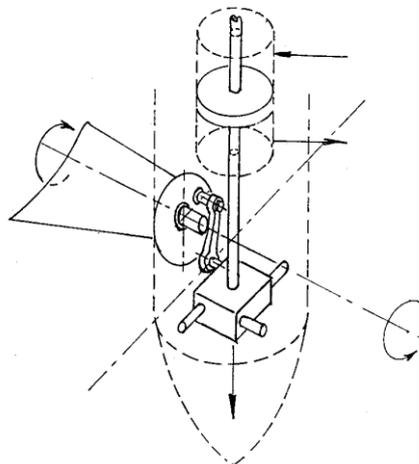


Figura 9: Schema turbina Kaplan [18]

Con la turbina Kaplan grazie all'orientazione delle pale della girante, è invece possibile l'adattamento alla portata presente. Questo perché ad ogni regolazione del distributore corrisponde un'orientazione delle pale e ciò permette di farla lavorare con rendimenti molto alti, fino al 90%, in un grande intervallo di portate [18]. La portata,  $Q$ , definita come la massa d'acqua che fluisce attraverso l'impianto nel tempo, in genere non ha significato come unico valore ma è necessario conoscere l'intero regime di portate. Dunque, per la portata si va ad ottenere una curva di durata da dati di tipo idrometrici, per verificare le portate minima e massima e quindi la portata di progetto della turbina. Per la portata di progetto, di solito si va prendere la portata che sia garantita in almeno 90 giorni all'anno, e corrisponde all'incirca all'80% della portata massima. Infine, la portata di progetto ed il salto idrico individuano un campo di funzionamento per ogni tipo di turbina.

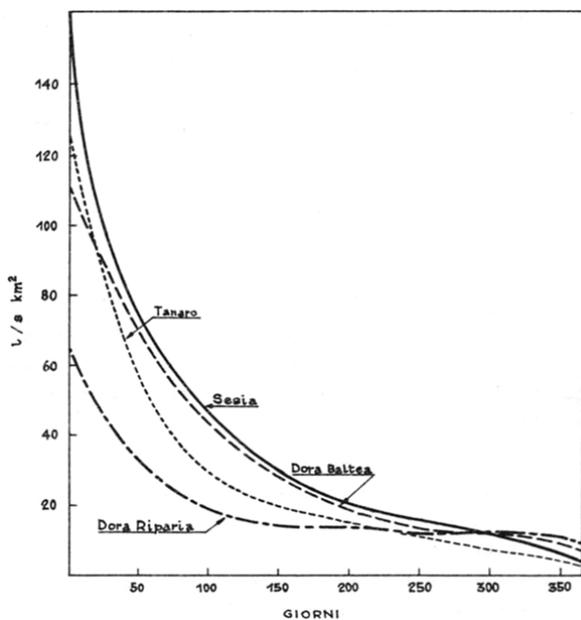


Figura 10: Curve di durata [18]

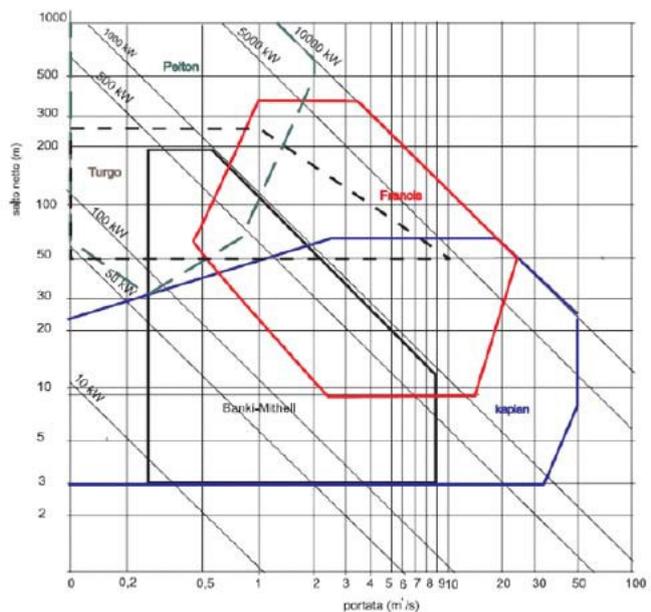


Figura 11: Salto idrico su Portata [18]

Il rendimento idraulico è definito come il rapporto tra la potenza meccanica trasmessa all'albero della turbina, e la potenza idraulica nelle condizioni di salto e portata nominali. Il rendimento massimo deve essere ottenuto nell'intorno della portata di progetto. Di seguito sono riportati due diagrammi che mostrano il rendimento delle diverse tipologie di turbina. Il primo in figura 12 mostra la relazione tra rendimento e portata delle diverse soluzioni, il secondo in figura 13, chiamato diagramma di Balje, illustra le curve di isorendimento idraulico per lo stadio singolo di turbine idrauliche.

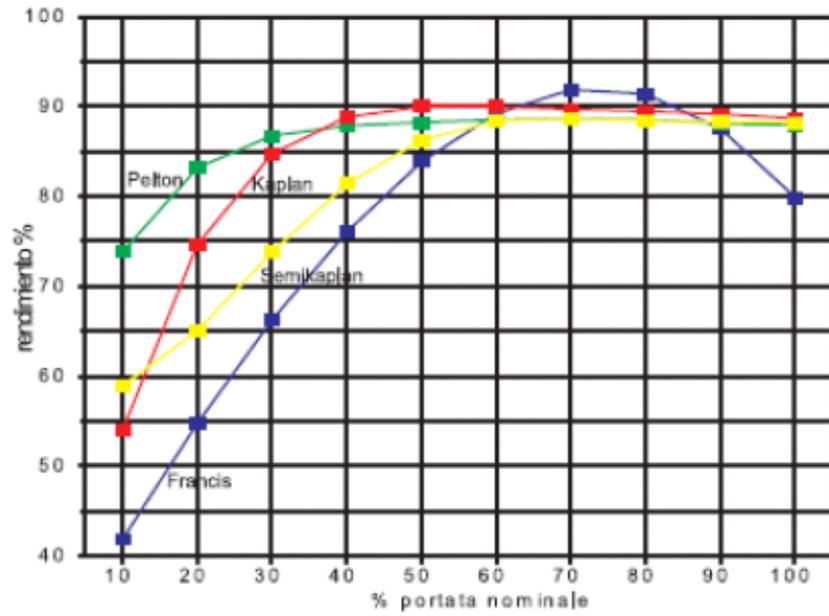


Figura 12: Rendimento in funzione della portata [18]

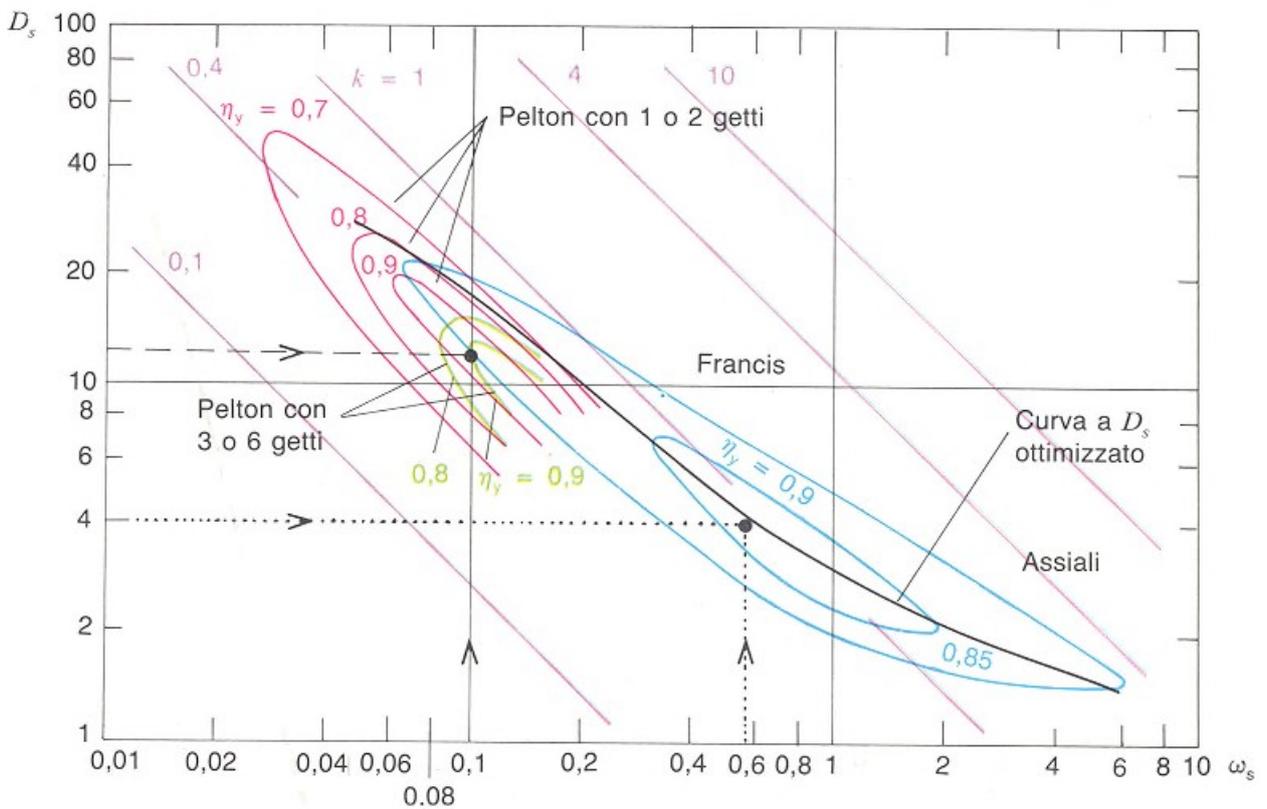


Figura 13: Diagramma di Balje [18]

La regolazione basata sulla opportuna e contemporanea variazione degli angoli di calettamento sia delle pale del distributore che della girante consente di stabilire condizioni di flusso corrette in girante e nel tubo diffusore con conseguente rendimento macchina al massimo possibile.

Per evidenziare i vantaggi che offre la Kaplan è necessario definire alcuni parametri spesso utilizzati in campo costruttivo, quali la portata ridotta  $q$  e il numero di giri ridotto  $v$ , ottenuti in funzione della portata  $Q$ , il salto disponibile  $H$ , il diametro della girante  $D$  e il numero di giri  $n$ . [18]

$$v = \frac{nD}{\sqrt{H}} \quad (1)$$

$$q = \frac{Q}{D^2\sqrt{H}} \quad (2)$$

L'involuppo nel piano  $n$  e  $q$  delle curve allo stesso rendimento, frutto dell'esplorazione dei punti di funzionamento ottenibili per le diverse angolazioni dell'apertura del distributore  $a$ , ad ogni angolo della girante  $b$ , permette di tracciare il diagramma di rendimento con la migliore combinazione delle curve  $a$  e  $b$ .

Dai grafici di portata ridotta è chiaro come una semplice elica assiale sia molto più sensibile alle variazioni di portata rispetto alla Kaplan.

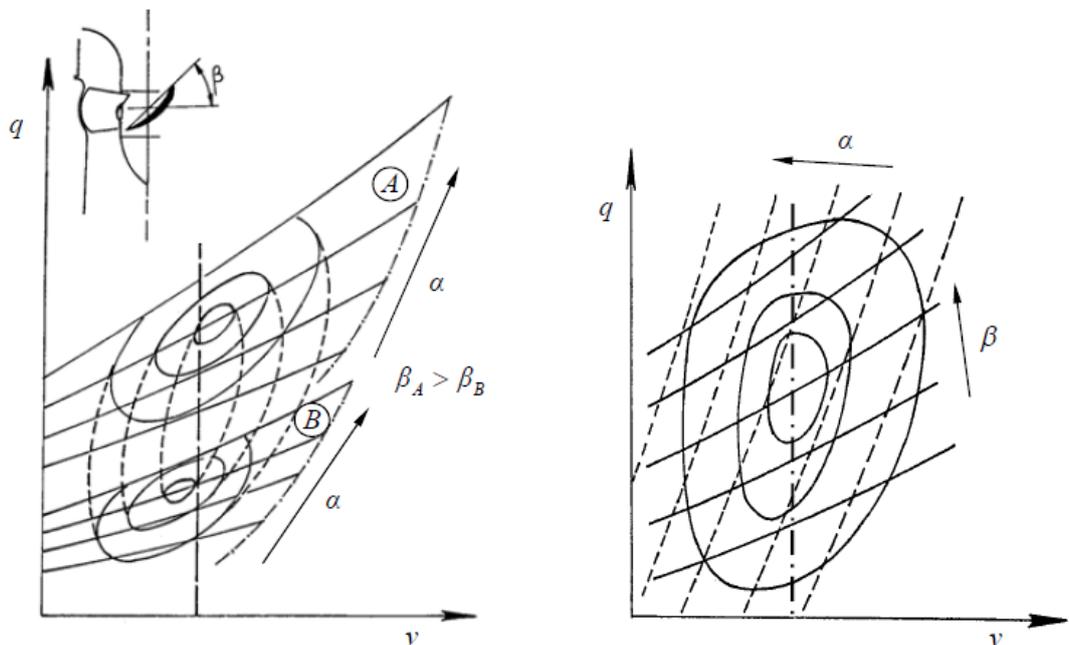


Figura 14: Confronto con semplice elica [18]

Nella pratica di impianto idroelettrico, dove la turbina funziona ad  $n$  costante e a un determinato salto  $H$  medio, l'involuppo di interesse pratico è quello ottenibile, per il corrispondente  $n$ , al variare di  $q$  (e quindi di  $Q$ ) per le diverse combinazioni di  $\alpha$  e  $\beta$ .

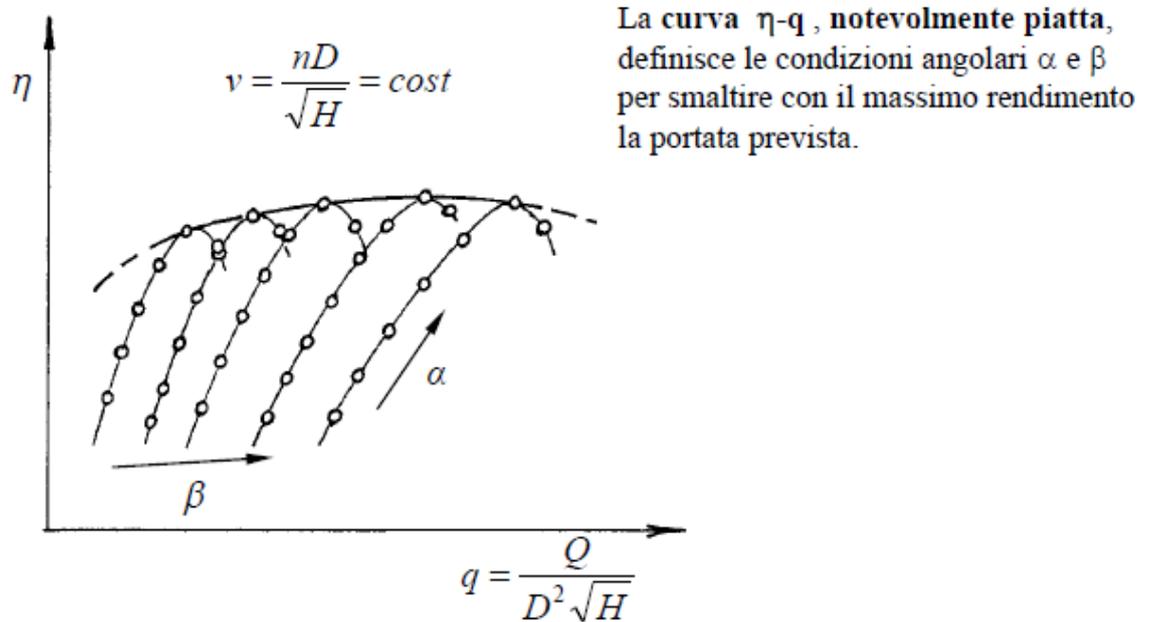


Figura 15: Curva rendimento portata ridotta [18]



# Capitolo

## 2 Impianto di studio

Progettare e realizzare un piccolo impianto idroelettrico non è un compito facile. Ci sono molti aspetti differenti e riguardanti diverse discipline che devono essere tenuti in considerazione: dalle questioni economiche a quelle ingegneristiche, dalle problematiche di tipo legale alla gestione amministrativa. Tutti questi elementi rivestono un ruolo nelle diverse fasi di sviluppo di un progetto, dal momento della scelta del sito fino all'entrata in esercizio dell'impianto [22].

### 2.1 Caratteristiche del sito

Come per la maggior parte dei piccoli fiumi e torrenti dell'entroterra italiano anche la sorgente idrica in questione è fortemente influenzata dalla stagionalità, la portata varia sensibilmente durante l'anno e di conseguenza l'impianto è stato configurato e progettato per essere adattabile ad un intervallo di potenza consistentemente ampio [23]. Per rendere l'impianto produttivo per il periodo più lungo possibile sono stati costruiti due differenti generatori, il primo, quello principale, ha potenza nominale di 315 kW; il secondario, più piccolo, di potenza nominale 75 kW. Le prove sono state eseguite in periodo di abbondanza, dunque sul generatore principale, l'unico dei due con turbina Kaplan, il secondario è stato dotato di un'elica assiale meno flessibile ma ottima per piccoli flussi di acqua. In Tabella 4 vengono riportate in maniera qualitativa le grandezze di maggior interesse:

Tabella 4: Rilevazioni impianto

• <b>Periodo di rilievo</b>	365	gg/Anno
• <b>Portata massima</b>	2000	m <sup>3</sup> /s
• <b>Deflusso minimo vitale</b>	310	m <sup>3</sup> /s
• <b>Salto utile</b>	8,4	m
• <b>Potenza nominale media</b>	165,5	kW

## 2.2 Concetti base di idraulica

L'ingegneria idraulica è basata sui principi della meccanica dei fluidi, sebbene siano applicate molte relazioni empiriche per affrontare e risolvere problemi pratici. Ad oggi non esiste, e probabilmente non esisterà mai, una metodologia generale di analisi matematica del movimento dei fluidi. Indubbiamente esistono soluzioni particolari a problemi specifici, basate sulla grande quantità di esperienza accumulata in molti anni di studi e sperimentazioni. Esperienza che risale a 2500 anni fa, quando un imponente sistema irriguo, tuttora funzionante, fu realizzato vicino al Siechuan in Cina e i primi matematici dell'Impero Romano progettano i primi acquedotti [24].

Nell'idroelettrico l'ingegneria idraulica è applicata per:

- ottimizzare le prestazioni delle vie d'acqua per ridurre le perdite di energia
- progettare le traverse di derivazione e gli scaricatori per la prevenzione delle alluvioni
- progettare adeguate opere di dissipazione a valle degli sfioratori e degli scarichi
- controllare l'erosione e gestire il trasporto di limo

Controllare fenomeni come:

- instabilità dei corsi d'acqua dovuta a fenomeni transitori di moto non permanente
- ingresso di aria nelle condotte forzate
- onde nei canali lunghi
- colpi d'ariete nelle condotte forzate
- cavitazione in strutture e macchinari
- sedimentazione nei bacini, ostruzione delle prese e danni ai circuiti idraulici e ai macchinari causati dai sedimenti

## 2.3 L'impianto

Le prove di coniugazione sono state eseguite nell'impianto situato in provincia di Fermo. Questo ricade nella famiglia degli impianti mini-idro-elettrici, essendo le potenze in gioco non superiori ai 200 kW.



Figura 16: Panoramica esterni\_1



Figura 17: Panoramica esterni\_2

L'impianto può essere distinto nei seguenti aree/elementi:

1. Inizio canale di derivazione
2. Briglia
3. Opera di presa c/o briglia
  - Paratoia
  - Quadro elettrico
  - Centrale oleodinamica
4. Canale a pelo libero
  - Paratoia canale a pelo libero\_01
  - Paratoia canale a pelo libero\_02
5. Sgrigliatore
  - Sgrigliatore
  - Quadro elettrico
  - Centrale oleodinamica
6. Vasca di carico
7. PT\_Locale misure + Locale e-distribuzione
8. PI\_Locale principale Gen01+Sala quadri
9. Locale Gen02
10. Fine canale di scarico
11. Quadri MT
12. Trasformatore
13. Quadri BT



Figura 18: Sgrigliatore

Il fabbricato della centrale è dislocato su due piani: il piano terra dove vi sono i locali di servizio e il piano seminterrato dove si trova il locale tecnico con tutti i componenti elettromeccanici per la distribuzione dell'energia e la connessione alla rete MT (media tensione) del distributore. All'esterno del piano seminterrato è posto un piccolo locale interrato contenente il Generatore 2. I generatori, collegati elettricamente in parallelo, operano alternativamente tra di loro: il Generatore 1, da 315 kW, posto fisicamente nel locale tecnico del seminterrato e il Generatore 2, da 75 kW, installato nel piccolo locale interrato esterno.

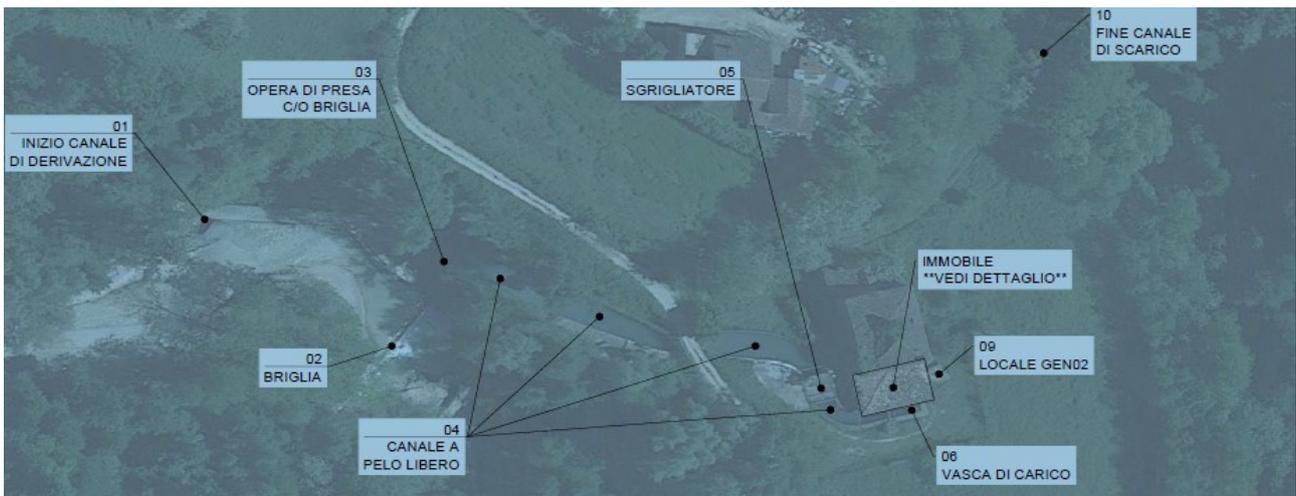


Figura 19: Disposizione planimetrica\_1

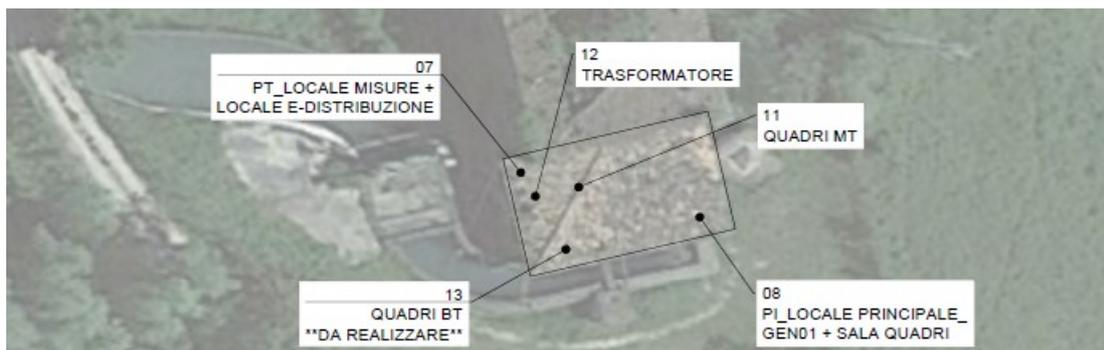


Figura 20: Disposizione planimetrica\_2

Il generatore 1 è fondamentalmente il cuore dell'intero impianto, questo sfrutta l'ampia flessibilità della turbina Kaplan per mantenere il rendimento tendenzialmente alto anche con diverse portate. Le palette dello statore e quelle del rotore sono controllate da due sistemi oleodinamici indipendenti, tali da poter essere coordinati per sfruttare al meglio la portata disponibile.



Figura 21: Visone palette statore e rotore [18]

Il fluido in pressione per ognuno dei due sistemi oleodinamici indipendenti è dotato di relativi termometri e manometri che controllano lo stato dell'olio, inoltre sono presenti dei pressostati di sicurezza che consentono di segnalare se la pressione supera un valore designato come critico, cioè vicino ad una condizione pericolosa di lavoro.



Figura 22: Esempio pressostato [25]

I pressostati sono componenti elettromeccanici grazie a cui è possibile registrare variazioni della pressione applicata al di là di un certo valore predefinito. La cosiddetta pressione di azionamento, che corrisponde alla soglia di intervento, può essere regolata attraverso una vite di regolazione con la quale si può modificare la lunghezza della molla di contrasto. Quest'ultima è, nei pressostati normali, una delle forze che intervengono sulle due facce, insieme con la pressione che deve essere monitorata. Quasi tutti i pressostati si basano su un diaframma che si muove nel momento in cui questo è sottoposto alla pressione che si intende misurare, in modo che il contatto meccanico in uscita possa essere attivato. Lo spostamento del diaframma è tanto più rilevante quanto più significativa è la differenza tra le forze che agiscono sulle facce. I pressostati possono essere impiegati per acqua e aria, ma anche per gas o per liquidi di altro genere, come gli idrocarburi e gli oli, in base alle peculiarità del contenitore e al modo in cui le membrane sono costruite [27].

L'acqua, una volta oltrepassati i dovuti filtri tende a stabilizzarsi a monte del canale principale dove le turbolenze e vorticosità scemano, il salto disponibile viene misurato in questo particolare punto dove l'altezza dell'acqua durante l'attività rimane più costante possibile; la portata che investe la turbina è gestita proprio per mantenere il livello a monte stabile. Il calore prodotto dal generatore calettato all'albero della turbina è smaltito da una ventola posta all'interno del case-box azzurro presente nella figura 24.



Figura 23: Canale a pelo libero



Figura 24: Generatore 1

Nella seguente figura 25, è riportato nel dettaglio lo schema d'impianto del G1, a solo scopo esplicativo, contenente i vari trasformatori, collegamenti elettrici, elementi di controllo e di sicurezza, la quale funzione esula dall'analisi del lavoro svolto.

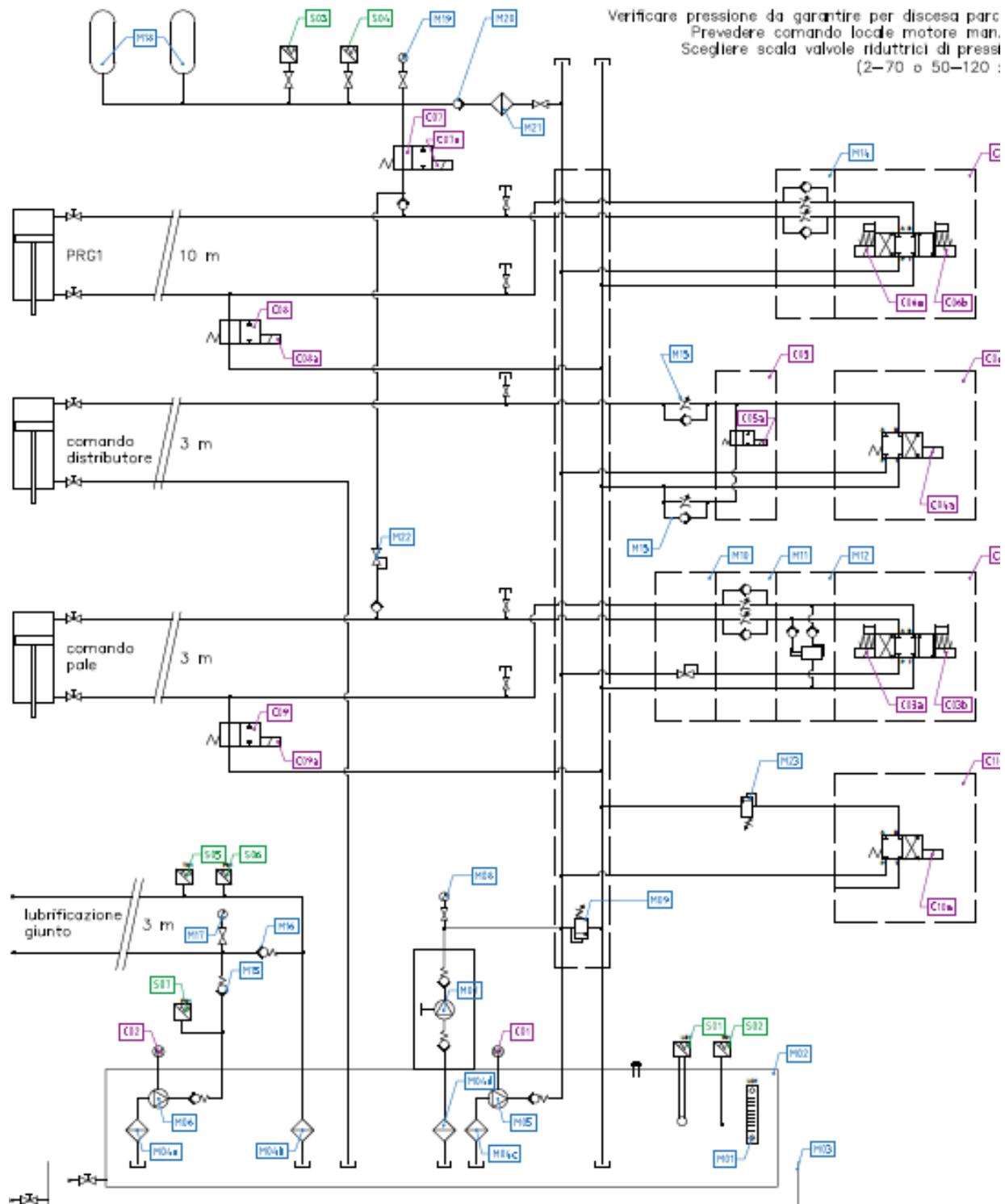


Figura 25: Schema d'impianto generatore 1



# Capitolo

## 3 Raccolta dei dati

I dati analizzati nel seguito sono stati ottenuti sperimentalmente regolando manualmente la turbina, variando rispettivamente l'inclinazione delle palette statoriche e di quelle rotoriche. La turbina in condizioni di lavoro standard cambia la sua configurazione in funzione del livello dell'acqua a monte, cercando di mantenerlo più stabile possibile, l'impianto è stato programmato per impostare automaticamente il valore dell'angolo di apertura del distributore e poi di conseguenza quello delle pale della turbina. L'operatore può anche impostare manualmente le coppie di valori coniugati ° distributore - ° pale. Il fine ultimo dell'attività è perfezionare queste coppie di valori in modo di massimizzare l'efficienza e la stabilità della macchina.

### 3.1 Rendimento e caratteristiche d'impianto

Il rendimento di un generico impianto è influenzato da diversi parametri di progetto. Dato un salto utile  $H_u$ , portata di progetto  $Q$  e la densità del fluido in esame è possibile definire la potenza utile  $P_u$ . La potenza idraulica  $P_i$  è calcolata in funzione del lavoro di turbina  $L$  e la portata effettivamente in entrata in girante  $Q_t$ . La potenza effettiva  $P_e$  prodotta tiene conto delle dissipazioni organiche di attrito meccanico tra gli organi della macchina e dell'energia necessaria per alimentare gli organi ausiliari dell'impianto [18,28].

$$P_u = \rho Q g H_u \quad (3)$$

$$P_i = \rho Q_t L \quad (4)$$

Il rendimento idraulico  $\eta_i$  è definito in funzione della potenza utile e di quella idraulica. Se si conosce la portata persa che non entra in girante si può ricavare un rendimento volumetrico  $\eta_v$ . Note le perdite meccaniche e le necessità energetiche ausiliari si ottiene il rendimento organico  $\eta_o$ . Il rendimento di macchina  $\eta_t$  tiene in considerazione tutti gli effetti illustrati in concomitanza [18,28].

$$\eta_i = \frac{P_i}{P_u} \quad (5)$$

$$\eta_v = \frac{Q_t}{Q} = \frac{Q - \Delta Q}{Q} \quad (6)$$

$$\eta_o = \frac{P_t}{P_i} \quad (7)$$

$$\eta_t = \frac{P_t}{P_u} = \eta_i \eta_v \eta_o \quad (8)$$

### 3.2 Problematiche d'impianto

A monte della turbina non è presente alcun deprimogeno né alcun altro strumento di misura della portata, perciò quest'ultima può essere solamente stimata data la velocità angolare dell'albero o dell'altezza dell'acqua a valle, infatti non è possibile valutare in maniera precisa il rendimento di macchina. Di conseguenza, per valutare quantitativamente l'efficienza della turbina sono necessarie alcune ipotesi preliminari quali: dissipazioni di tipo idraulico proporzionali alla portata in ingresso, volume d'acqua circolante in girante costante e dissipazioni meccaniche proporzionali alla velocità angolare dell'albero, da queste assunzioni è possibile ricavare un rendimento stimato attorno al 90%. Pertanto, in condizioni normali di utilizzo le perdite saranno di ordine ridotto rispetto alla potenza generata e pressoché sempre proporzionali a quest'ultima [18,26].

Inoltre, l'utilizzo dell'intero impianto è fortemente influenzato da problematiche in scarico, questo perché il diffusore della Kaplan è di modeste dimensioni, così come il canale di valle stesso, quando le portate elaborate sono relativamente consistenti si verificano fenomeni ondulatori del flusso pericolosi in quanto generano onde di pressione comunemente legate a colpi d'ariete e cavitazione [18,26,28]. Il parametro più utilizzato per controllare la cavitazione è l'NPSH (Net Positive Suction Head), questo parametro è largamente utilizzato

nel campo nelle pompe idrauliche ma considerazioni analoghe possono essere fatte per una macchina motrice. L'NPHS permette di verificare che la pressione in uscita della girante sia sufficientemente alta affinché non si verifichi cavitazione. In particolare, la pressione minima necessaria in uscita di macchina è pari alla pressione di vapore dell'acqua sommata alla pressione dei gas disciolti nel liquido.

$$p_{out} \geq p_{vap} + p_g \quad (9)$$

È chiamato  $NPSH_d$  (disponibile) la quota energetica del fluido in ingresso di girante e  $NPSH_r$  (richiesto) la quota energetica minima in uscita dalla turbina per evitare la cavitazione, solitamente questo parametro è fornito dal catalogo della ditta costruttrice della turbina una volta studiata la relazione che lega velocità in uscita e perdite interne alla macchina.

$$NPSH_d = \frac{p_{in} - (p_{vap} + p_g)}{g\rho} + \frac{c_{in}^2}{2g} \quad (10)$$

$$NPSH_r = \frac{c_{out}^2}{2g} + \frac{R_{dis}}{g} + \frac{R_{con}}{g} \quad (11)$$

I fenomeni descritti, deleteri per la salute dell'impianto, sono evitabili se si controlla la pressione in uscita della turbina. La prima volta che gli operatori si sono resi conto del verificarsi di questi eventi l'impianto era già in uso da tempo, successivamente non si è mai approfondito il meccanismo per il quale le onde di pressione si generino. Di conseguenza, è necessario trovare una variabile, empiricamente controllabile, correlata al verificarsi di quest'ultimi. A riguardo è indispensabile puntualizzare che la potenza generata da questi impianti, a parità delle altre variabili, non è costante nel tempo ma tende ad oscillare attorno ad un valore medio.

### 3.3 Metodologia di raccolta dati

Con l'esperienza si è notato il verificarsi di questi casi di cavitazione quando si registra una frequenza di oscillazione troppo alta, perciò lo studio dei dati verterà anche sull'analisi della variazione dell'output energetico nel periodo preso a riferimento.

Ad ogni grado di apertura delle palette statoriche sono state associate nove diverse prove con differenti gradi di apertura dell'elica, con valori variabili nell'intorno di  $\pm 10^\circ$ , con salti discreti di  $2,5^\circ$ . Così facendo è possibile individuare i valori, adattabili ad ogni portata, che meglio ottimizzano il rendimento di macchina o che minimizzano la dispersione dei dati registrati. Tutte le misurazioni sono state compiute nel periodo invernale, nel periodo di massima abbondanza di acqua nei quali la turbina ha potuto lavorare nell'estremo superiore di apertura, usualmente mai sfruttato a pieno. Pertanto, per studiare una curva più ampia possibile sono state eseguite 54 misurazioni, 9 prove per ognuna delle 6 configurazioni del distributore. In particolare, il distributore ha assunto le seguenti posizioni:  $60^\circ$ ,  $65^\circ$ ,  $70^\circ$ ,  $75^\circ$ ,  $80^\circ$ ,  $85^\circ$ ,  $90^\circ$ . Nella tabella 5 sono riportate le configurazioni relative alle diverse prove eseguite.

Tabella 5: Accoppiamenti distributore – pale

Apertura distributore ( $^\circ$ )	60	65	70	75	80	85	90
	50	55	60	65	70	75	80
	52,5	57,5	62,5	67,5	72,5	77,5	82,5
	55	60	65	70	75	80	85
	57,5	62,5	67,5	72,5	77,5	82,5	87,5
Apertura pale ( $^\circ$ )	60	65	70	75	80	85	90
	62,5	67,5	72,5	77,5	82,5	87,5	92,5
	65	70	75	80	85	90	95
	67,5	72,5	77,5	82,5	87,5	92,5	97,5
	70	75	80	85	90	95	100

### 3.4 Sistema di controllo remoto

Lo studio è partito da una giornata dedicata alla visita materiale dell'impianto e la comprensione delle dinamiche di lavoro e delle problematiche che si riscontrano giornalmente, come ad esempio la pulizia del canale principale o la presenza di grandi tronchi che impediscono il normale flusso dell'acqua e la conseguente metodologia di rimozione manuale compiuta da un operatore addetto. Successivamente per l'intero periodo dedicato alla raccolta dati è stato adottato un sistema di controllo remoto che ha permesso di controllare il computer principale che regola le variabili d'impianto. Nella pratica gli unici parametri modificati durante le prove di coniugazione sono stati l'apertura del distributore e i valori correlati dell'inclinazione delle pale della turbina.



Figura 26: Interfaccia grafica di controllo

Ogni volta che una o più prove venivano eseguita venivano registrate le condizioni ambientali e veniva eseguito un particolare algoritmo atto alla rimozione di eventuali residui di terra o impurità nel canale di scarico della turbina o sulle pale della stessa.



Figura 27: Canale di scarico

### 3.5 Variabili di maggior rilievo

Durante le prove è stato fondamentale monitorare costantemente alcuni valori indicativi di un buon funzionamento d'impianto, automaticamente graficati dal sistema di controllo remoto, il quale ha risoluzione massima di campionamento pari a 1 Hz. Perciò, durante lo svolgimento della singola prova è stato possibile verificare istantaneamente che i valori registrati non si discostassero troppo dal valore previsto nel medio lungo periodo. Il primo valore da accertare è il livello di acqua a monte, questo come detto in precedenza va mantenuto più costante possibile. In secondo luogo, la curva che descrive la potenza istantanea, questa oscilla attorno ad un valore medio deve mantenere un'ampiezza contenuta, così come la posizione istantanea delle pale. Gli altri parametri evidenziati dal sistema sono fortemente correlati ai precedentemente menzionati. Ogni singola prova raccoglie un bacino di dati consistentemente ampio, in modo da aver la possibilità di eliminare dati anomali, filtrare e valutare l'andamento generale della particolare configurazione e pesare oculatamente vantaggi e svantaggi derivanti da questa. Un database considerato sufficientemente ampio e consistente è determinato da un minimo di 500-600 dati per ogni coppia, che con 9 coppie studiate per prova, con frequenza di campionamento pari ad 1 Hz, consistono in circa 5000 dati ritenuti validi già filtrati da valori anomali. Ciò comporta un tempo di campionamento medio per singola configurazione pari a circa 10-12 minuti, per un totale di circa due ore, considerando le operazioni preliminari di pulizia e quelle conclusive che riportano l'impianto in condizioni standard di lavoro. A seconda della posizione del distributore il sistema imposta l'apertura delle pale, la curva di coniugazione si configura come una spezzata ad intervalli discreti che si differenziano di 10° una dall'altra. Questa struttura viene modificata durante lo studio, ricercando le coppie di valori che migliorano le condizioni di lavoro. Di seguito è riportata la configurazione standard:

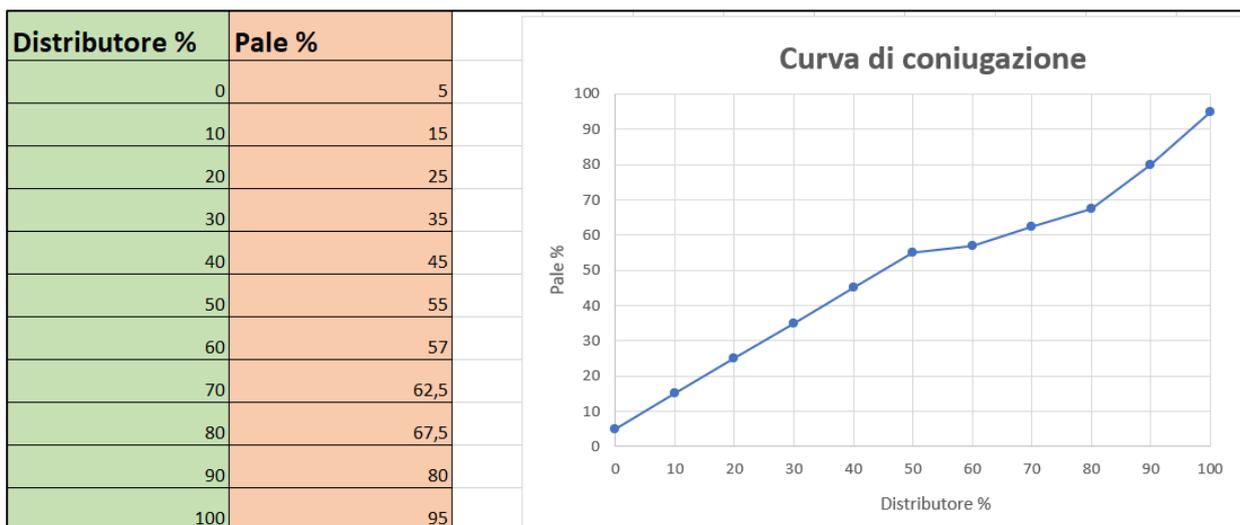


Figura 28: Configurazione standard



# Capitolo

## 4 Analisi dei dati

Una volta consolidato il database i dati sono stati processati, rielaborati e tramite le opportune tabelle è stato possibile analizzare le diverse configurazioni. Per ogni prova effettuata si procedeva con un'analisi qualitativa, e successivamente quantitativa, riferendosi all'orientazione del distributore, fissa, rispetto alle pale variabili nelle nove configurazioni associate. Veniva poi valutata la dispersione generale dei dati raccolti ed in particolare della potenza in output essendo la variabile di maggior interesse. Ogni prova è stata suddivisa in nove intervalli per i quali le pale hanno mantenuto una posizione costante nel tempo, per ogni singolo sottogruppo i dati non conformi sono eliminati. La suddetta operazione è giustificata dal fatto che quando la posizione delle palette viene variata queste impiegano un intervallo temporale determinato per stabilizzarsi, di conseguenza questo fenomeno dà vita ad una quantità di dati incoerenti non trascurabile che va eliminata manualmente. Terminata questa filtratura indispensabile si procede all'analisi di maggior rilievo, cioè lo studio della potenza in output e della sua variazione nel tempo.

### 4.1 Obiettivo dello studio

Per quantificare gli obiettivi del lavoro sono state utilizzate le seguenti variabili:

- Potenza media
- Deviazione standard della potenza
- Ampiezza massima di oscillazione della potenza
- Rapporto tra la deviazione standard e potenza media
- Curtosi della potenza

La potenza media è calcolata sulla base del database scremato dei dati inaffidabili, questa rappresenta un punto di riferimento per ogni singolo caso analizzato.

$$\bar{P} = \frac{\sum_{i=1}^n P_i}{n} \quad (12)$$

La deviazione standard della potenza analizza un campione finito di dati e ne quantifica la sua dispersione attorno al valor medio.

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (P_i - \bar{P})^2}{n - 1}} \quad (13)$$

L'ampiezza massima di oscillazione della potenza è un parametro ricavato dalla differenza tra i valori di potenza massima e minima registrati, questo fornisce un'indicazione qualitativa, infatti, se questo valore supera un valore target, la prova rischia di non essere nel range di sicurezza per l'impianto.

$$\Delta P = \frac{P_{max} - P_{min}}{2} \quad (14)$$

Sperimentalmente è stato notato se questo valore supera sensibilmente il valore di 10 kW, l'impianto lavora in condizioni discostanti da quelle ottimali. Questo parametro risulta il meno affidabile tra quelli ricavati in quanto si basa su osservazioni prettamente empiriche del comportamento del sistema, senza fornire una legge o una correlazione imputabile ad una vera e propria dipendenza fisica.

Per confrontare le diverse distribuzioni ottenute nelle diverse prove è stato definito un indice che include il rapporto tra deviazione standard della potenza e il valor medio della potenza stessa.

$$\tau = \frac{\sigma}{\bar{P}} \quad (15)$$

Infine, la curtosi, anch'essa derivata dalla deviazione standard, quantifica l'ampiezza della curva gaussiana, o meglio indica quanto la popolazione di dati si allontana dal suo valor medio. Tutti questi parametri ci permettono di valutare ogni singola prova ed evidenziare in ogni condizione la configurazione migliore di macchina.

## 4.2 Esempio di una configurazione

Di seguito è riportato un esempio che illustra parte dei risultati ottenuti, in particolare sarà analizzata la coppia di configurazione: apertura distributore 80%, apertura pale 75%. L'analisi inizia da uno sguardo generale ai valori registrati valutandone la potenza media relativa alla durata dell'intera prova, poi viene graficata la distribuzione statica della potenza attorno al suo valor medio.

Tabella 6: Estratto da analisi in Excel

$\bar{P}$ (kW)	127,5
$P_{\max}$ (kW)	136,3
$P_{\min}$ (kW)	119,8
$\Delta P$ (kW)	16,5
$\sigma$ (kW)	2,75

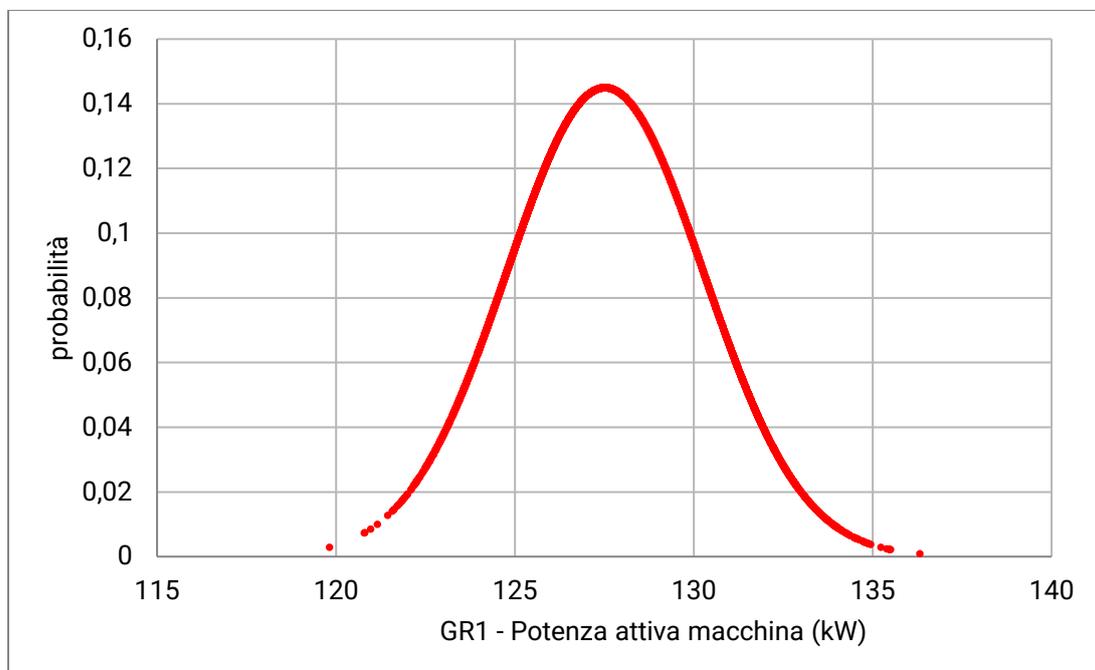


Figura 29: Curva Gaussiana

Quando viene cambiata la posizione delle palette rotoriche queste tendono a stabilizzarsi attorno alla posizione stabilita solamente dopo un intervallo di tempo di una ventina di secondi circa, ciò comporta una quantità non trascurabile di dati non coerenti con la prova eseguita. Per ovviare questa problematica tutti gli archivi relativi alle diverse prove sono stati esaminati e i dati non conformi sono stati eliminati manualmente. Successivamente, l'archivio viene diviso nelle nove prove eseguite, nelle quali sia il distributore che il rotore mantengono invariata la posizione, qui è riportato un approfondimento inerente alla posizione delle palette rotoriche di apertura 75%. In questo caso è stata sfruttata la potenza di calcolo di Excel che permette di ottenere uno studio di tipo statistico dal quale sono stati estrapolati i valori di maggior interesse.

Tabella 7: Rielaborazione dati di potenza registrati

<b>Potenza (kW)</b>	
Media	127,53
Deviazione standard	2,64
Curtosi	-0,95
Intervallo	13,93
Minimo	119,81
Massimo	133,75

A questo punto per rendere più comprensibile il risultato ottenuto e per valutare al meglio quest'ultimo, l'intervallo relativo alla differenza tra potenza massima e potenza minima è stato suddiviso in un numero discreto di classi, in modo da poter apprezzare qualitativamente la distribuzione risultante e di conseguenza la frequenza con la quale un dato è registrato nella specifica classe. La percentuale cumulativa indica il rapporto tra i dati minori del limite superiore della classe e il totale dei dati registrati.

Tabella 8: Divisione in classi e Frequenza registrata

<b>Classe (kW)</b>	<b>Frequenza</b>	<b>% cumulativa</b>
119	0	-
120	1	0,00
121	1	0,00
122	1	0,00
123	7	0,01
124	34	0,06
125	85	0,19
126	114	0,35
127	94	0,49
128	69	0,59
129	61	0,67
130	67	0,77
131	63	0,86
132	72	0,97
133	22	1,00
Altro	2	1,00

Come è evidente le frequenze maggiori si catalogano nelle classi distribuite nell'intorno del valor medio. Osservando la spezzata che descrive la percentuale cumulativa, si nota che la pendenza decresce se ci si allontana dal valor medio della potenza, ciò significa che la maggior parte della distribuzione si trova in prossimità del suddetto.

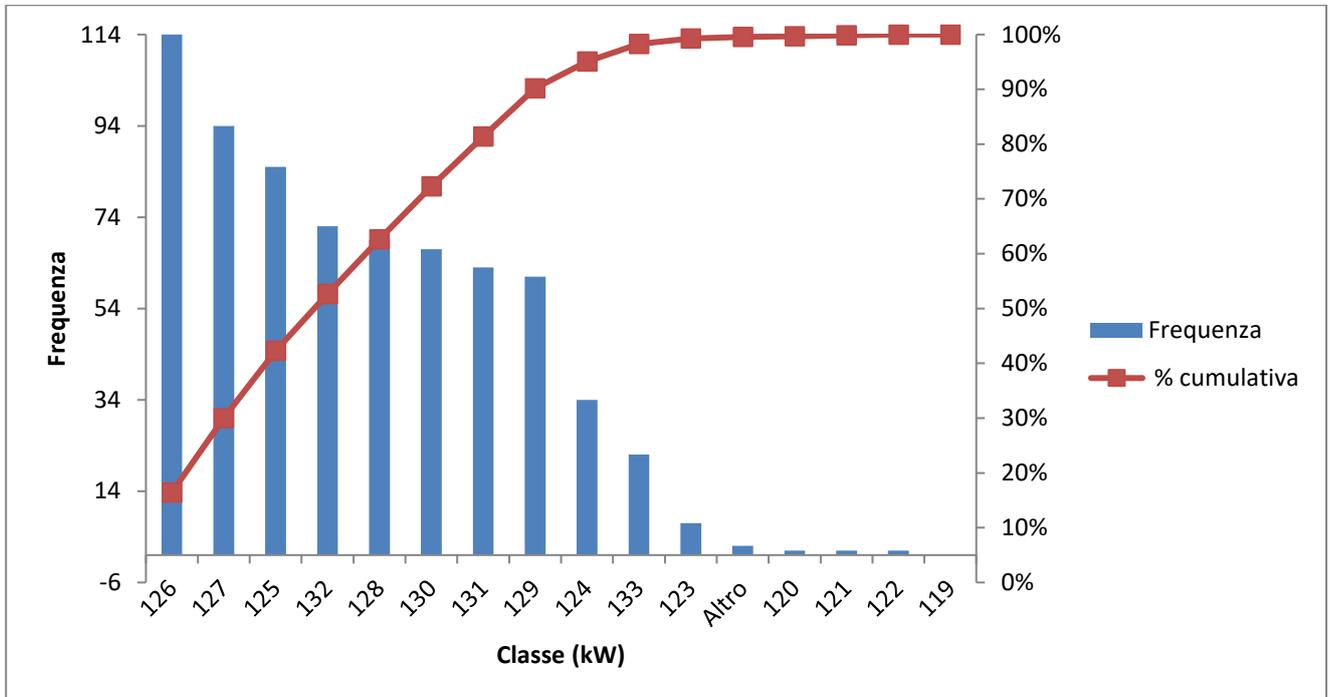


Figura 30: Istogramma di frequenza

### 4.3 Tabelle di sintesi

Per confrontare i risultati delle diverse prove sono state realizzate delle tabelle comparative per valutare le configurazioni più performanti. Solamente una prova non è stata realizzata e due di queste non sono state ultimate al 100%, per motivi legati alla disponibilità giornaliera di acqua e manutenzione dell'impianto. Nonostante ciò, i dati analizzati sono stati ritenuti sufficienti ai fini della valutazione delle condizioni di più frequente utilizzo.

Tabella 9: Distributore al 60%

Distributore (°)	Pale (°)	$\bar{P}$ (kW)	$\Delta P$ (kW)	$\sigma$ (kW)	Curtosi (kW)	$\tau$
60,0	50,0	74,0	8,5	1,06	1,93	0,0143
60,0	52,5	78,0	5,5	1,12	-0,35	0,0144
60,0	55,0	82,0	6,6	1,14	0,57	0,0139
60,0	57,5	85,2	5,7	1,00	0,78	0,0118
60,0	60,0	88,0	6,9	1,00	0,67	0,0113
60,0	62,5	89,9	5,2	0,89	-0,12	0,0099
60,0	65,0	90,7	10,0	1,54	0,94	0,0170
60,0	67,5	91,7	8,9	1,85	-0,68	0,0202
60,0	70,0	92,7	9,3	1,99	-0,62	0,0215

Tabella 10: Distributore al 70%

Distributore (°)	Pale (°)	$\bar{P}$ (kW)	$\Delta P$ (kW)	$\sigma$ (kW)	Curtosi (kW)	$\tau$
70,0	60,0	113,2	5,8	1,75	-1,46	0,0154
70,0	62,5	113,7	7,9	1,24	-0,03	0,0109
70,0	65,0	114,8	7,3	1,19	-0,07	0,0103
70,0	67,5	116,2	8,3	1,26	0,08	0,0108
70,0	70,0	117,0	8,3	1,34	0,01	0,0115
70,0	72,5	117,1	9,8	1,76	0,14	0,0150
70,0	75,0	116,0	12,8	1,85	0,53	0,0160
70,0	77,5	114,0	14,5	2,54	-0,53	0,0223
70,0	80,0	109,9	17,5	3,65	-0,74	0,0332

Tabella 11: Distributore al 75%

Distributore (°)	Pale (°)	$\bar{P}$ (kW)	$\Delta P$ (kW)	$\sigma$ (kW)	Curtosi (kW)	$\tau$
75,0	60,0	111,7	4,5	0,71	-0,10	0,0063
75,0	62,5	113,6	6,8	1,11	0,01	0,0098
75,0	65,0	116,6	8,0	1,66	-0,81	0,0142
75,0	67,5	118,6	9,8	2,30	-1,03	0,0194
75,0	70,0	118,5	13,3	2,84	-0,75	0,0240
75,0	72,5	118,6	13,3	2,57	-0,40	0,0217
75,0	75,0	117,5	14,6	2,72	-0,38	0,0231
75,0	77,5	114,8	14,9	3,09	-0,41	0,0269
75,0	80,0	109,9	18,3	3,45	-0,47	0,0314

Tabella 12: Distributore all'80%

Distributore (°)	Pale (°)	$\bar{P}$ (kW)	$\Delta P$ (kW)	$\sigma$ (kW)	Curtosi (kW)	$\tau$
80,0	70,0	125,9	7,5	1,49	-0,46	0,0118
80,0	72,5	126,5	10,3	2,17	-1,01	0,0171
80,0	75,0	127,5	13,9	2,64	-0,95	0,0207
80,0	77,5	127,5	13,7	2,84	-0,76	0,0222
80,0	80,0	128,1	14,5	2,97	-0,75	0,0232
80,0	82,5	128,4	13,3	2,91	-0,82	0,0227
80,0	85,0	128,6	13,6	2,77	-0,68	0,0216
80,0	87,5					
80,0	90,0					

Tabella 13: Distributore all'85%

Distributore (°)	Pale (°)	$\bar{P}$ (kW)	$\Delta P$ (kW)	$\sigma$ (kW)	Curtosi (kW)	$\tau$
85,0	75,0	141,8	5,9	0,69	1,51	0,0049
85,0	77,5	144,6	7,0	0,76	1,39	0,0052
85,0	80,0	144,9	15,4	2,52	4,20	0,0174
85,0	82,5	140,7	21,7	4,55	-0,99	0,0323
85,0	85,0	141,5	21,5	4,47	-0,93	0,0316
85,0	87,5	141,7	22,2	4,94	-0,79	0,0349
85,0	90,0	149,6	16,7	3,49	-0,96	0,0233
85,0	92,5	148,8	17,0	3,64	-0,95	0,0244
85,0	95,0	150,6	19,4	3,78	-0,77	0,0251

Tabella 14: Distributore al 90%

Distributore (°)	Pale (°)	$\bar{P}$ (kW)	$\Delta P$ (kW)	$\sigma$ (kW)	Curtosi (kW)	$\tau$
90,0	80,0					
90,0	82,5					
90,0	85,0					
90,0	87,5	146,1	11,0	1,48	4,80	0,0101
90,0	90,0	145,8	12,6	2,55	0,21	0,01748
90,0	92,5	144,2	15,1	3,32	-1,01	0,02299
90,0	95,0	142,1	16,0	3,45	-0,96	0,02426
90,0	97,5	140,8	17,1	3,39	-0,70	0,0241
90,0	100,0	140,7	18,6	3,43	-0,46	0,0244

## 4.4 Discussione dei dati

Lo scopo dello studio verge sulla valutazione dei parametri raccolti nelle tabelle di sintesi precedentemente riportate. Durante l'anno solare l'impianto è sottoposto a portate in ingresso molto differenti tra loro, perciò è necessario realizzare una curva di coniugazione che si adatti ottimamente a condizioni fortemente variabili. Per ogni posizione assunta dal distributore le pale devono adattarsi in modo ottimale, così da rendere l'impianto più prestante possibile. Lo studio dati eseguito permette di evidenziare diverse configurazioni possibili in funzione della condizione di lavoro ricercata, a seconda se si voglia massimizzare l'efficienza o stabilizzare il flusso in uscita. La configurazione di massima stabilità, ideale per minimizzare il pericolo di cavitazione è quella con minimo valore di deviazione standard della potenza, successivamente riportata in tabella 15.

Tabella 15: Configurazione di massima stabilità

Distributore (°)	Pale (°)	$\sigma$ (kW)	$\bar{P}$ (kW)
60,0	62,5	0,89	89,9
70,0	65,0	1,19	114,8
75,0	60,0	0,71	111,7
80,0	70,0	1,49	125,9
85,0	75,0	0,69	141,8
90,0	87,5	1,48	146,1

Se la configurazione scelta è atta a massimizzare il rendimento, ipotizzando la portata costante a parità di apertura del distributore, si fa riferimento alla massima potenza media registrata. In questo caso è necessario limitare le alternative a disposizione tenendo conto del parametro empirico illustrato nel paragrafo introduttivo ( $\Delta P_{\max} < 10 \text{ kW}$ ). Ciò comporta eliminare le configurazioni con una differenza tra potenza massima e minima registrate maggiore di 10 kW e scegliere tra le configurazioni rimanenti quella con potenza media in output maggiore.

Tabella 16: Configurazione di massimo rendimento

Distributore (°)	Pale (°)	$\Delta P_{\max}$ (kW)	$\bar{P}$ (kW)
60,0	70,0	9,3	92,7
70,0	72,5	9,8	117,1
75,0	67,5	9,8	118,6
80,0	70,0	7,5	125,9
85,0	77,5	7,0	144,6
90,0	87,5	11,0	146,1

## 4.5 Considerazioni finali

Dallo studio eseguito si evince che, a parità di apertura del distributore, l'output di potenza media generata si mantiene abbastanza uniforme, subisce una variazione massima non superiore ai 10 kW. Per differenze così contenute il pericolo di un funzionamento non adeguato supera il beneficio della potenza extra generata. In impianti molto flessibili come quello in esame è molto importante garantire sicurezza, in quanto è possibile lavorare in condizioni notevolmente diverse, la turbina stessa è soggetta a flussi d'acqua molto differenti derivanti dall'affluenza giornaliera. Dunque, il parametro di riferimento per il funzionamento ottimale della turbina è il rapporto tra deviazione standard della potenza e potenza media. Dato che la potenza media è pressoché costante, a parità di apertura del distributore si può fare riferimento al valor minimo di deviazione standard. Se la popolazione di dati in output è molto dispersa attorno al valor medio l'intero impianto è sottoposto a forte stress, con il rischio di cavitazione a valle della turbina. Come immediata conseguenza la condizione da ricercare è quella che mantiene un'ampiezza di oscillazione dell'output ridotta.



## 5 Conclusioni

L'impianto mini-idroelettrico in esame utilizza una turbina Kaplan, questa è composta da un distributore e un rotore, la posizione delle pale di entrambi i componenti è modificabile. Il fine del lavoro eseguito consiste nell'identificare la curva di coniugazione della turbina, o meglio le reciproche posizioni dei due organi orientabili, al variare della portata in ingresso. L'analisi porta a differenti soluzioni a seconda dell'esigenza dell'utenza, principalmente sono evidenziate due possibili soluzioni, la prima massimizza la stabilità dell'impianto, invece la seconda mira ad ottimizzare il rendimento di macchina.

In particolare, dallo studio eseguito è possibile evincere condizione di forte instabilità correlata a valori alti di apertura del distributore imputabili ad un'alta portata in ingresso, in queste particolari configurazioni il pericolo di cavitazione aumenta molto. Se si cerca di massimare l'efficienza dell'impianto si rischia di lavorare in condizioni limite, molto vicino all'instabilità e di conseguenza il rischio di cavitazione aumenta. Data la modesta differenza di potenza generata, a parità di posizione del distributore, il rendimento dell'impianto non subisce forti variazioni modificando la sola configurazione del rotore. Perciò è preferibile sacrificare la potenza extra generata per garantire una pressione sufficientemente alta nel canale di scarico. In conclusione, è di gran lunga preferibile configurare la curva di coniugazione cercando di minimizzare l'ampiezza di oscillazione della potenza in output, cioè configurare l'impianto con il minimo valore di deviazione standard calcolato per ogni posizione del distributore.

L'esperienza è stata circoscritta ad un periodo limitato di tempo nel quale le varie prove sono state eseguite. Durante il suddetto periodo le precipitazioni sono state incostanti e le prove sono state adattate alla portata disponibile. Per motivi prettamente logistici delle tempistiche delle prove, l'acqua non sempre è stata sufficiente ad ultimare le simulazioni, invero alcune configurazioni risultano non testate. Sarebbe stato ideale testare tutte le possibili posizioni reciproche delle pale in un momento di relativa abbondanza di acqua, condizione nella pratica impossibile.

Un ulteriore limite sta nel database di dati finito, per evitare la filtratura manuale dei dati sarebbe stato necessario aumentare molto il tempo di ogni singolo test. I 10 - 12 minuti che intercorrono tra due posizioni consecutive delle palette rotoriche, è stato considerato il tempo minimo per il quale il risultato dell'esperienza possa essere considerato apprezzabile e valido.

Un altro notevole miglioramento del lavoro potrebbe essere ottenuto tramite l'installazione di un semplice boccaglio, venturimetro, o qualsiasi altro strumento che misuri la portata effettiva in input. Dal punto di vista teorico l'analisi risulterebbe molto più precisa se l'impianto fosse provvisto di un qualsiasi deprimogeno, in modo da poter valutare in maniera puntuale il rendimento di macchina (8), evitando approssimazioni basate sul livello dell'acqua a valle o la potenza netta generata.

Per di più, durante il periodo di raccolta dati l'impianto è stato sottoposto a manutenzione, questa operazione potrebbe aver parzialmente compromesso la coerenza dei dati ottenuti. Questa possibilità non è poi così remota, in quanto si è notato, a parità di portata in ingresso, una turbolenza nel condotto di scarico inferiore in seguito a questa operazione. Per essere certi che i lavori di manutenzione non abbiano per nulla influenzato l'analisi bisognerebbe intraprendere una nuova opera di raccolta dati e procedere al confronto tra i due archivi.

Lo studio di impianti di questo tipo è un argomento ampiamente trattato nel campo della ricerca ingegneristica, pertanto il principio di funzionamento della turbina Kaplan e dei rispettivi impianti idroelettrici è noto da molti anni. Nel particolare impianto però il funzionamento è influenzato e modificato dalle caratteristiche morfologiche del territorio e della zona. Il lavoro eseguito si erige su assunzioni fortemente applicative, note solo in seguito a numerose prove ed esperienza pratica sul campo, ciò comporta che le motivazioni alla base della formazione delle onde di pressione nel canale di scarico non sono del tutto note ed appurate, ma si basano su supposizioni ed osservazioni. Il progresso dell'esperienza compiuta potrebbe consistere in un approfondimento di questi particolari fenomeni, cercando di motivarli da un punto di vista fisico così da poter evitare qualsiasi pericolo di cavitazione e di colpi d'ariete.





# A Raccolta completa delle elaborazioni

Di seguito sono riportati tutti i grafici e le tabelle elaborate e basate sul lavoro di raccolta dati eseguito in tutte le configurazioni delle palette statoriche e rotoriche.

## A.1 Distributore 60.0%

### A.1.1 Rotore 50.0%

Tabella A.1: Potenza D\_60.0%; R\_50.0%

<b>Potenza (kW)</b>	
Media	74,04
Deviazione standard	1,06
Curtosi	1,93
Intervallo	8,48

Tabella A.2: Rielaborazione dati D\_60.0%; R\_50.0%

<b>Classe (kW)</b>	<b>Frequenza</b>	<b>% cumulativa</b>
70	0	0,00
71	2	0,00
72	4	0,01
73	85	0,15
74	238	0,52
75	188	0,82
76	90	0,97
77	13	0,99
78	2	0,99
79	4	1,00
Altro	1	1,00

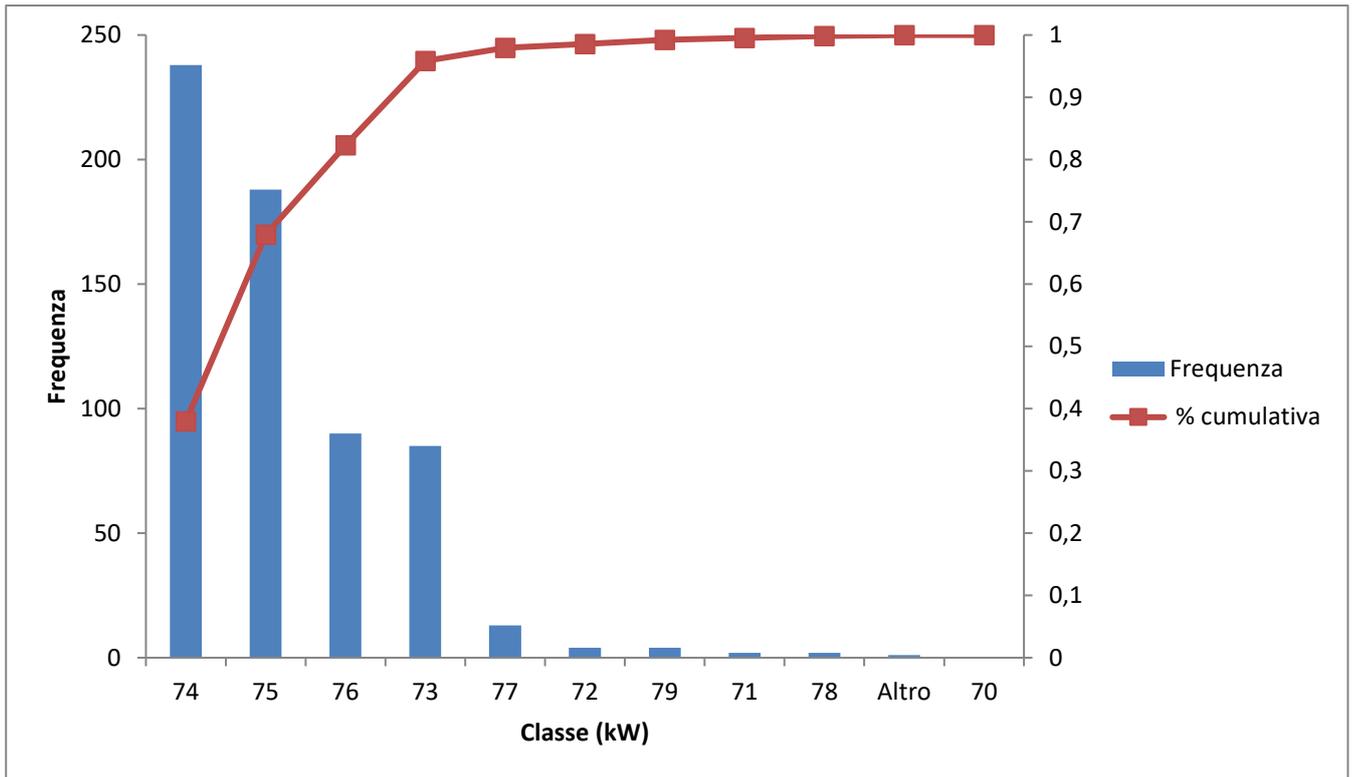


Figura A.1: Grafico D\_60.0%; R\_50.0%

## A.1.2 Rotore 52.5%

Tabella A.3: Potenza D\_60.0%; R\_52,5%

<b>Potenza (kW)</b>	
Media	78,00
Deviazione standard	1,12
Curtosi	-0,35
Intervallo	5,53

Tabella A.4: Rielaborazione dati D\_60.0%; R\_52,5%

<b>Classe (kW)</b>	<b>Frequenza</b>	<b>% cumulativa</b>
75	0	0,00
76	24	0,07
77	33	0,16
78	124	0,51
79	95	0,78
80	72	0,99
Altro	5	1,00

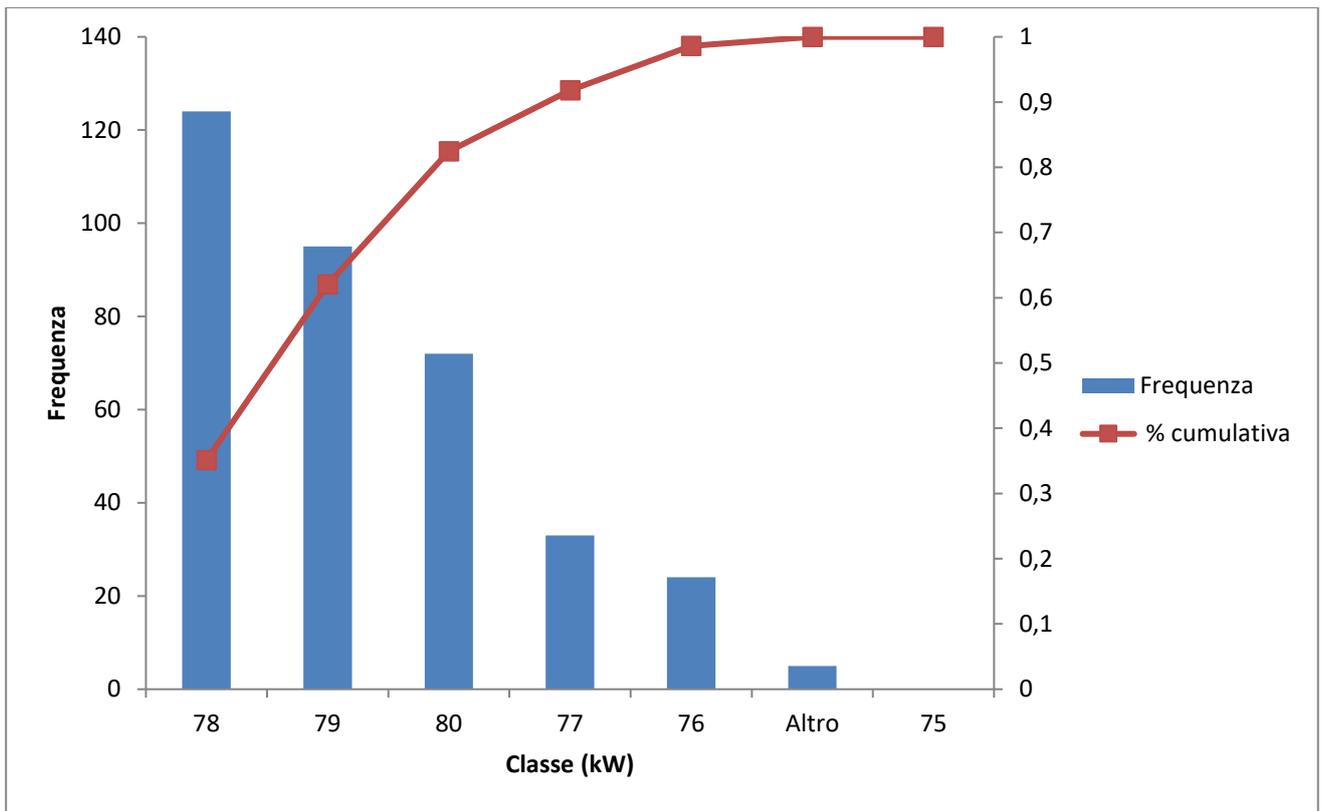


Figura A.2: Grafico D\_60.0%; R\_52,5%

### A.1.3 Rotore 55.0%

Tabella A.5: Potenza D\_60.0%; R\_55,0%

<b>Potenza (kW)</b>	
Media	81,97
Deviazione standard	1,14
Curtosi	0,57
Intervallo	6,64

Tabella A.6: Rielaborazione dati D\_60.0%; R\_55,0%

<b>Classe (kW)</b>	<b>Frequenza</b>	<b>% cumulativa</b>
78	0	0,00
79	14	0,02
80	23	0,06
81	58	0,16
82	200	0,48
83	197	0,81
84	110	0,99
85	6	1,00
Altro	1	1,00

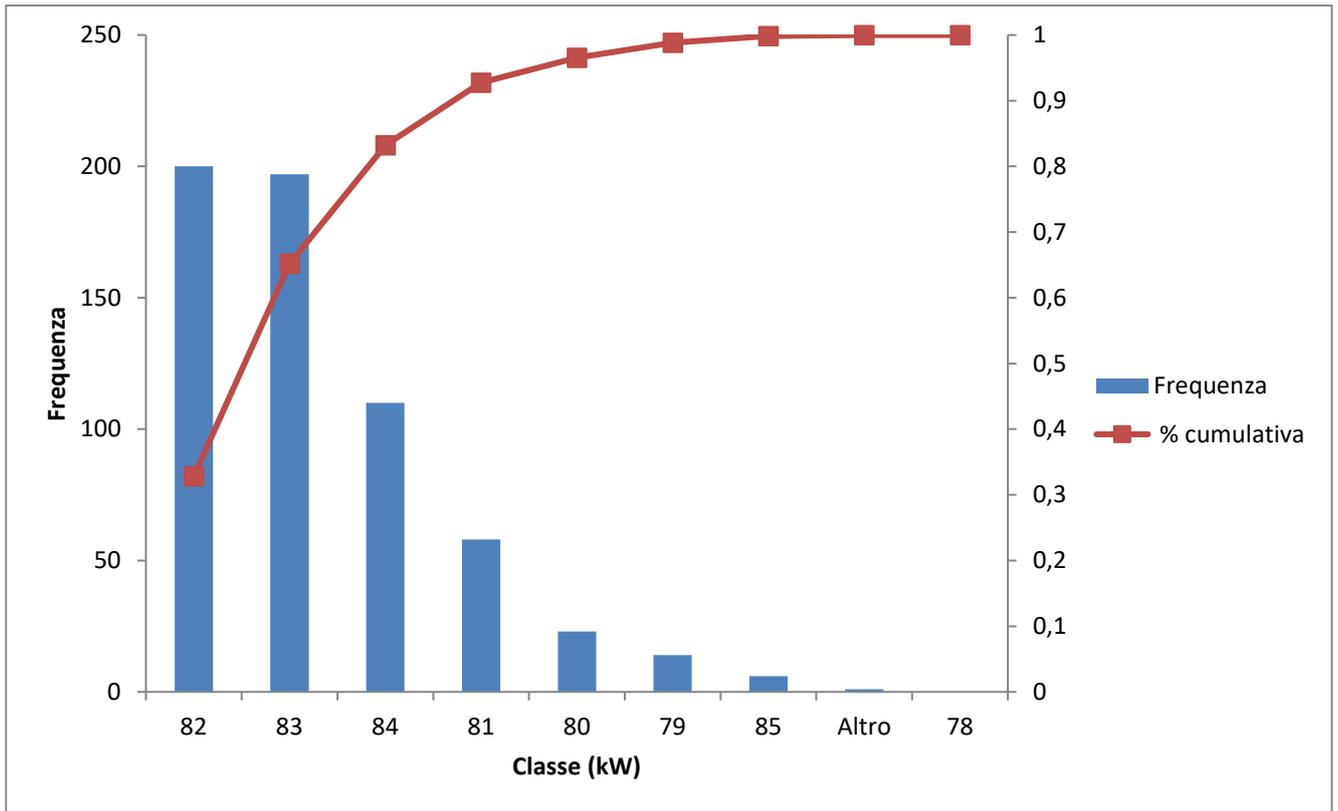


Figura A.3: Grafico D\_60.0%; R\_55,0%

## A.1.4 Rotore 57.2%

Tabella A.7: Potenza D\_60.0%; R\_57.5%

<b>Potenza (kW)</b>	
Media	85,20
Deviazione standard	1,00
Curtosi	0,78
Intervallo	5,75

Tabella A.8: Rielaborazione dati D\_60.0%; R\_57.5%

<b>Classe (kW)</b>	<b>Frequenza</b>	<b>% cumulativa</b>
83	0	0,00
84	34	0,08
85	164	0,49
86	126	0,80
87	63	0,95
88	13	0,99
Altro	6	1,00

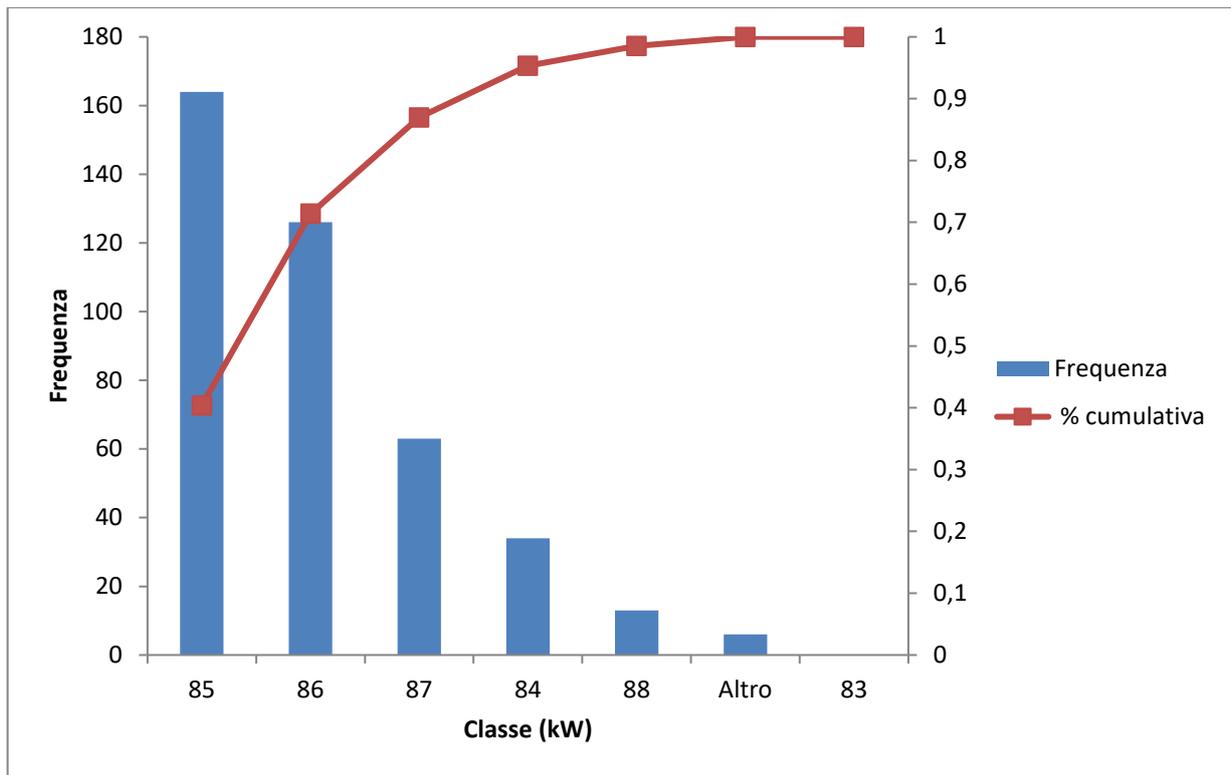


Figura A.4: Grafico D\_60.0%; R\_57,5%

## A.1.5 Rotore 60.0%

Tabella A.9: Potenza D\_60.0%; R\_60.0%

<b>Potenza (kW)</b>	
Media	87,96
Deviazione standard	1,00
Curtosi	0,67
Intervallo	6,87

Tabella A.10: Rielaborazione dati D\_60.0%; R\_60.0%

<b>Classe (kW)</b>	<b>Frequenza</b>	<b>% cumulativa</b>
84	0	0,00
85	5	0,01
86	21	0,04
87	83	0,15
88	258	0,51
89	257	0,86
90	92	0,99
91	7	1,00
Altro	3	1,00

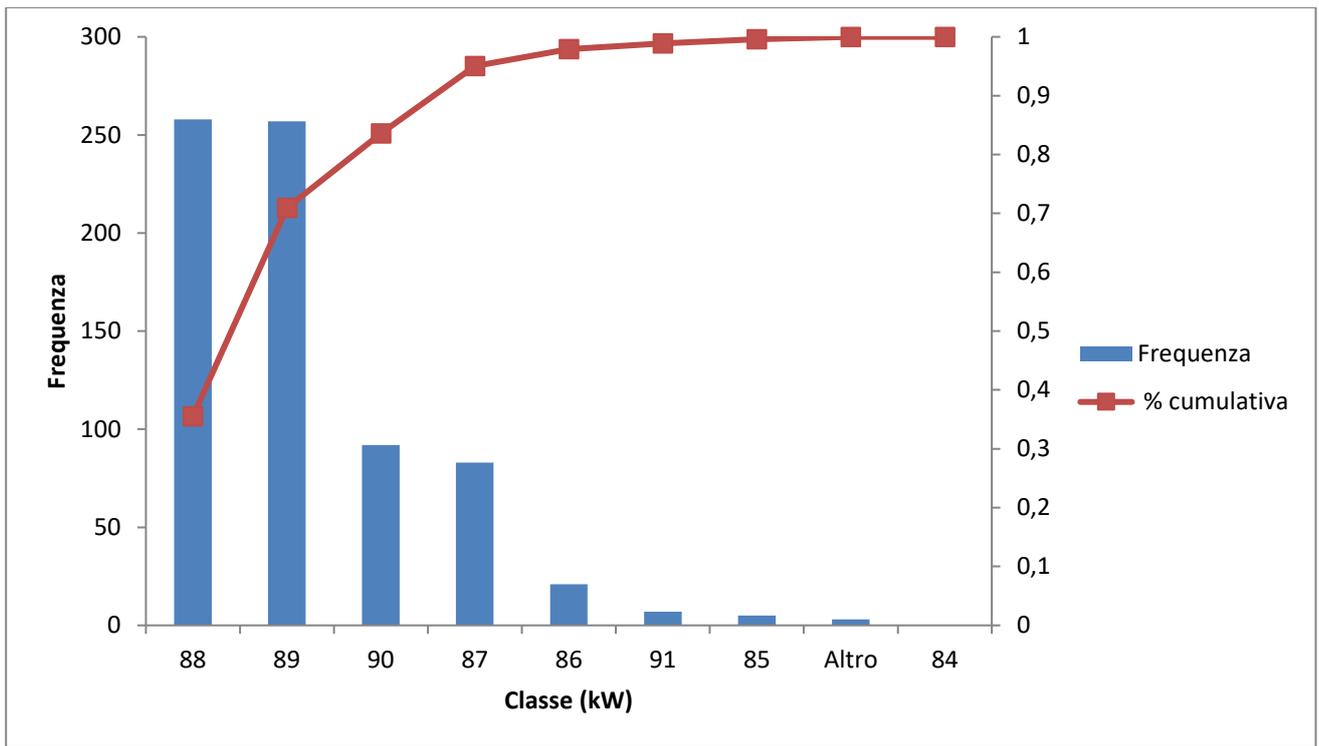


Figura A.5: Grafico D\_60.0%; R\_60.0%

## A.1.6 Rotore 62.5%

Tabella A.11: Potenza D\_60%; R\_62.5%

<b>Potenza (kW)</b>	
Media	89,92
Deviazione standard	0,89
Curtosi	-0,12
Intervallo	5,19

Tabella A.12: Rielaborazione dati D\_60.0%; R\_62.5%

<b>Classe (kW)</b>	<b>Frequenza</b>	<b>% cumulativa</b>
87	0	0,00
88	9	0,01
89	84	0,15
90	242	0,53
91	221	0,89
92	66	0,99
Altro	6	1,00

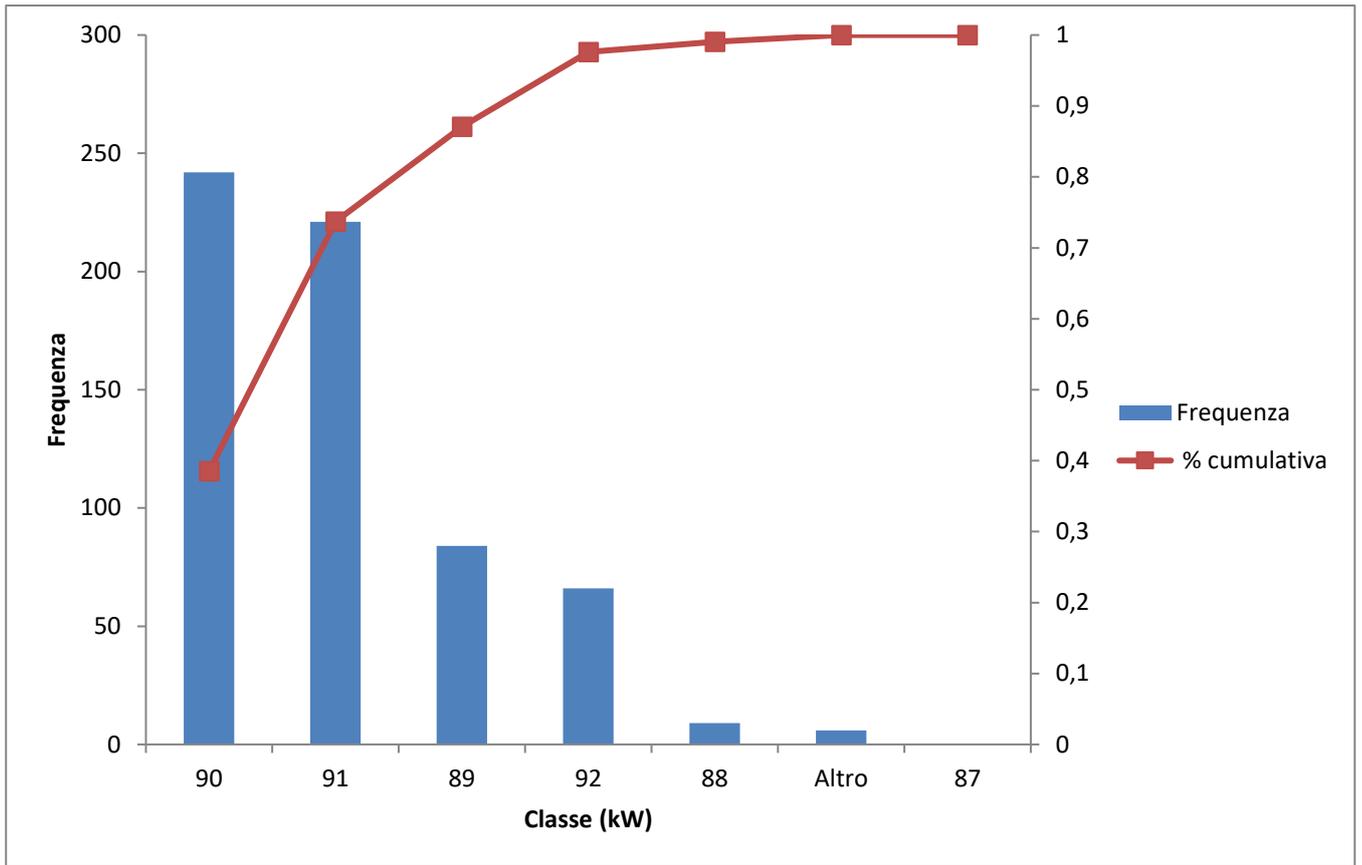


Figura A.6: Grafico D\_60.0%; R\_62.5%

## A.1.7 Rotore 65.0%

Tabella A.13: Potenza D\_60.0%; R\_65.0%

<b>Potenza (kW)</b>	
Media	90,73
Deviazione standard	1,54
Curtosi	0,94
Intervallo	10,01

Tabella A.14: Rielaborazione dati D\_60.0%; R\_65.0%

<b>Classe (kW)</b>	<b>Frequenza</b>	<b>% cumulativa</b>
85	0	0,00
86	4	0,01
87	5	0,02
88	18	0,07
89	30	0,14
90	39	0,24
91	110	0,52
92	114	0,81
93	63	0,96
94	13	1,00
95	0	1,00
Altro	1	1,00

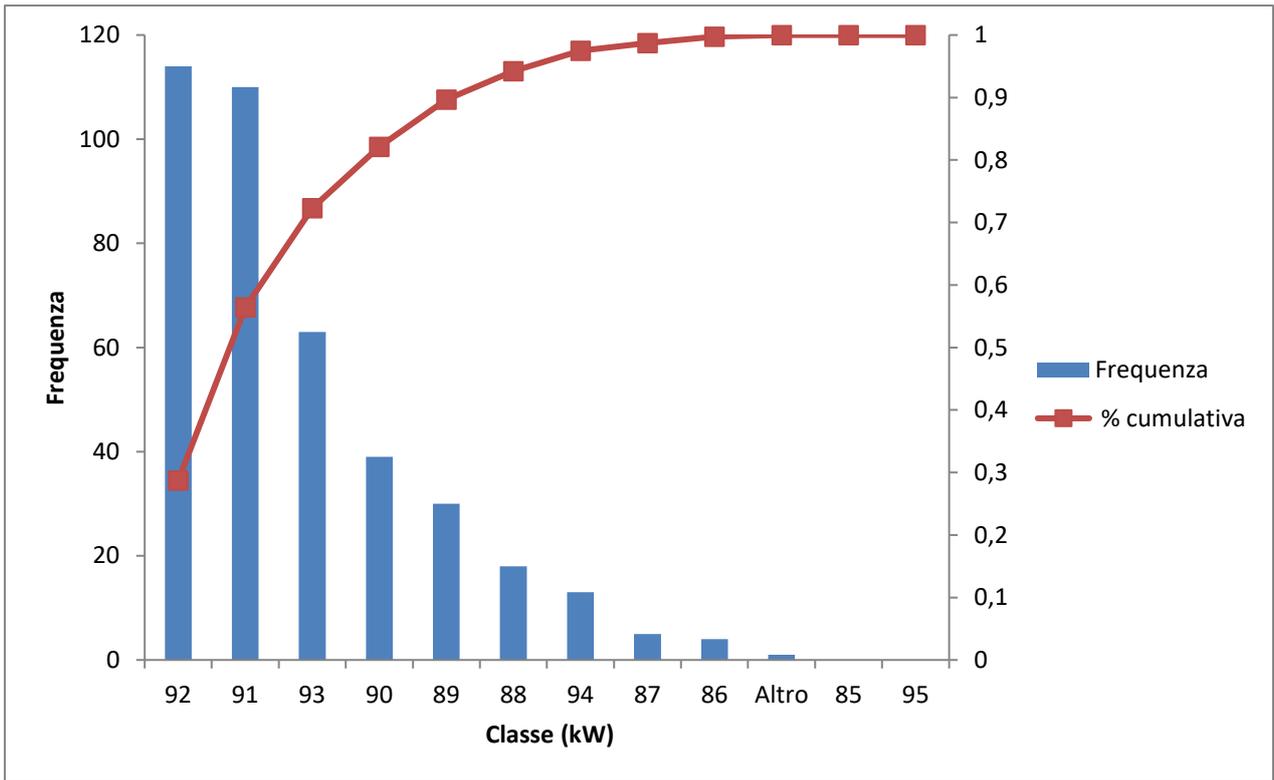


Figura A.7: Grafico D\_60.0%; R\_65.0%

## A.1.8 Rotore 67.5%

Tabella A.15: Potenza D\_60.0%; R\_67.5%

<b>Potenza (kW)</b>	
Media	90,73
Deviazione standard	1,54
Curtosi	0,94
Intervallo	10,01

Tabella A.16: Rielaborazione dati D\_60.0%; R\_67.5%

<b>Classe (kW)</b>	<b>Frequenza</b>	<b>% cumulativa</b>
86	0	0,00
87	2	0,01
88	4	0,02
89	22	0,09
90	35	0,21
91	44	0,36
92	52	0,54
93	57	0,73
94	49	0,89
95	29	0,99
Altro	3	1,00

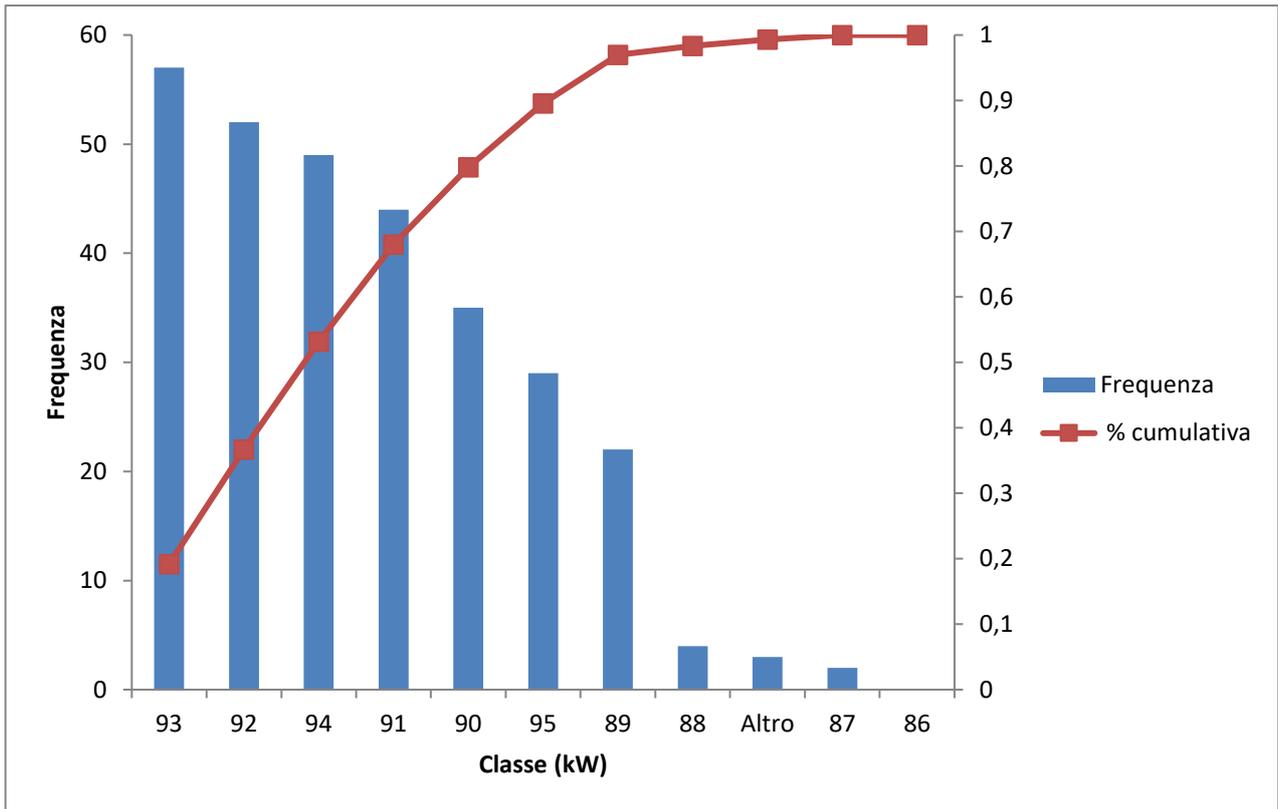


Figura A.8: Grafico D\_60.0%; R\_67.5%

## A.1.9 Rotore 70.0%

Tabella A.17: Potenza D\_60.0%; R\_70.0%

<b>Potenza (kW)</b>	
Media	92,72
Deviazione standard	1,99
Curtosi	-0,62
Intervallo	9,30

Tabella A.18: Rielaborazione dati D\_60.0%; R\_70.0%

<b>Classe (kW)</b>	<b>Frequenza</b>	<b>% cumulativa</b>
86	0	0,00
87	1	0,00
88	1	0,01
89	9	0,03
90	30	0,13
91	33	0,23
92	27	0,32
93	52	0,48
94	65	0,69
95	68	0,90
96	26	0,98
Altro	5	1,00

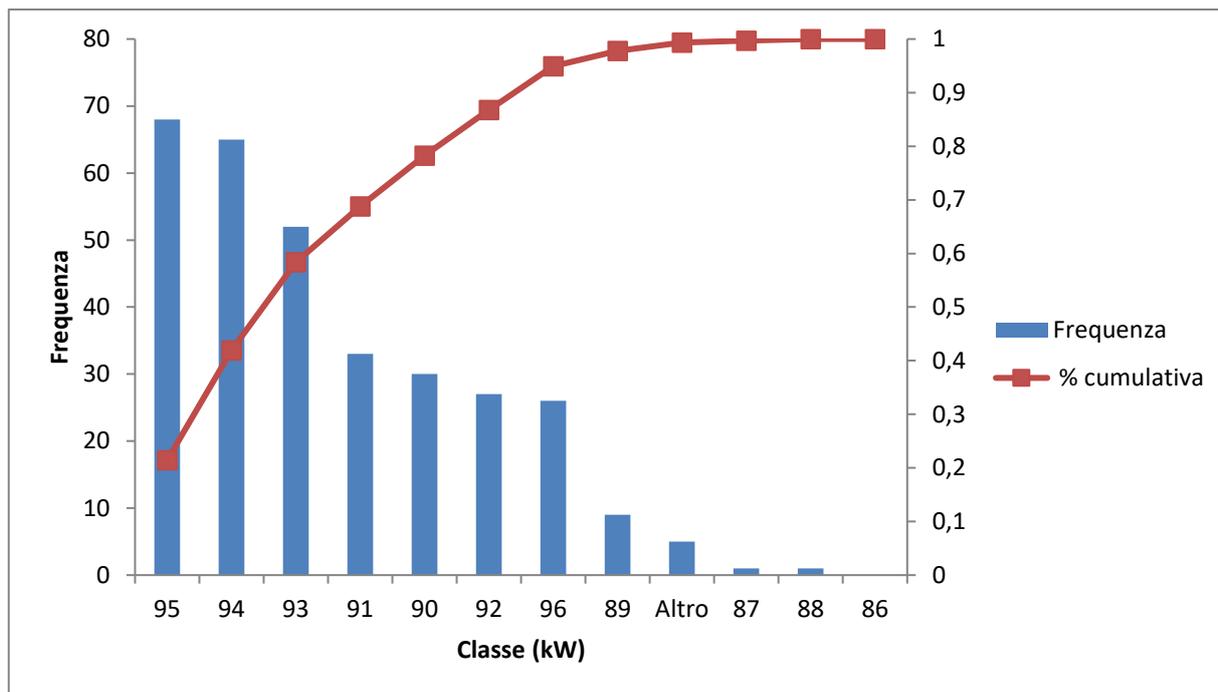


Figura A.9: Grafico D\_60.0%; R\_70.0%

## A.2 Distributore 70.0%

### A.2.1 Rotore 60.0%

Tabella A.19: Potenza D\_70.0%; R\_60.0%

<b>Potenza (kW)</b>	
Media	113,18
Deviazione standard	1,75
Curtosi	-1,46
Intervallo	5,82

Tabella A.20: Rielaborazione dati D\_70.0%; R\_60.0%

<b>Classe (kW)</b>	<b>Frequenza</b>	<b>% cumulativa</b>
108	0	-
109	1	0,00
110	7	0,01
111	73	0,14
112	116	0,35
113	65	0,46
114	16	0,49
115	289	1,00
Altro	0	1,00

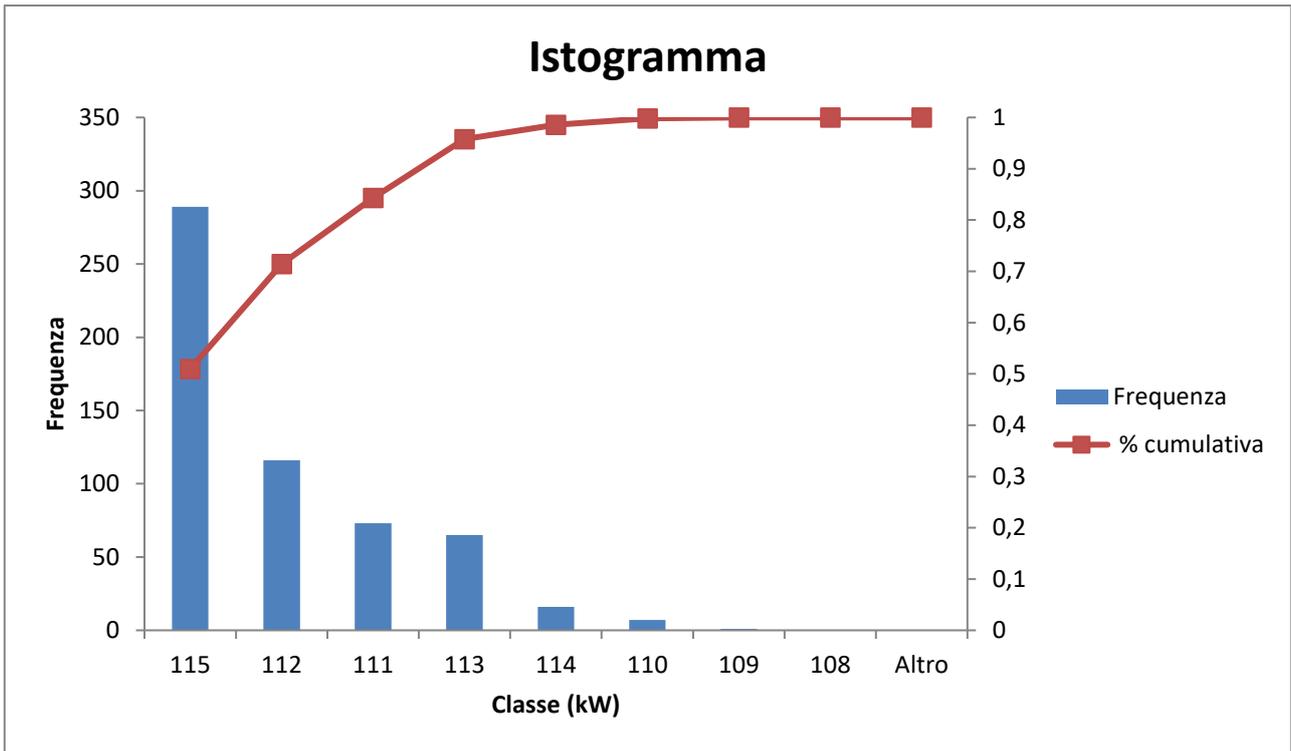


Figura A.10: Grafico D\_70.0%; R\_60.0%

## A.2.2 Rotore 62.5%

Tabella A.21: Potenza D\_70.0%; R\_62.5%

<b>Potenza (kW)</b>	
Media	113,69
Deviazione standard	1,24
Curtosi	-0,03
Intervallo	7,86

Tabella A.22: Rielaborazione dati D\_70.0%; R\_65.0%

<b>Classe (kW)</b>	<b>Frequenza</b>	<b>% cumulativa</b>
109	0	0,00
110	1	0,00
111	9	0,02
112	39	0,08
113	131	0,30
114	175	0,58
115	174	0,87
116	61	0,97
117	15	1,00
Altro	3	1,00

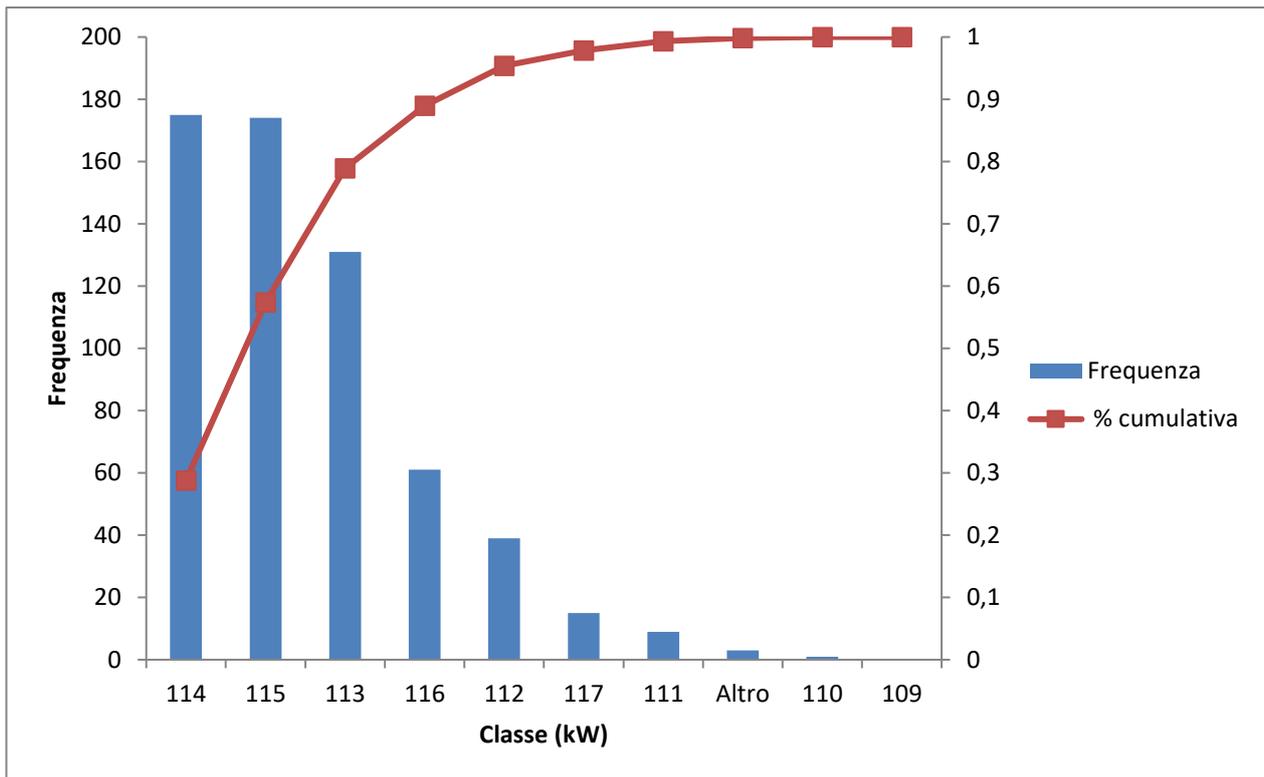


Figura A.11: Grafico D\_70.0%; R\_65.0%

### A.2.3 Rotore 65.0%

Tabella A.23: Potenza D\_70.0%; R\_65.0%

<b>Potenza (kW)</b>	
Media	114,78
Deviazione standard	1,19
Curtosi	-0,07
Intervallo	7,35

Tabella A.24: Rielaborazione dati D\_70.0%; R\_65.0%

<b>Classe (kW)</b>	<b>Frequenza</b>	<b>% cumulativa</b>
109	0	0,00
110	1	0,00
111	9	0,02
112	39	0,08
113	131	0,30
114	175	0,58
115	174	0,87
116	61	0,97
117	15	1,00
Altro	3	1,00

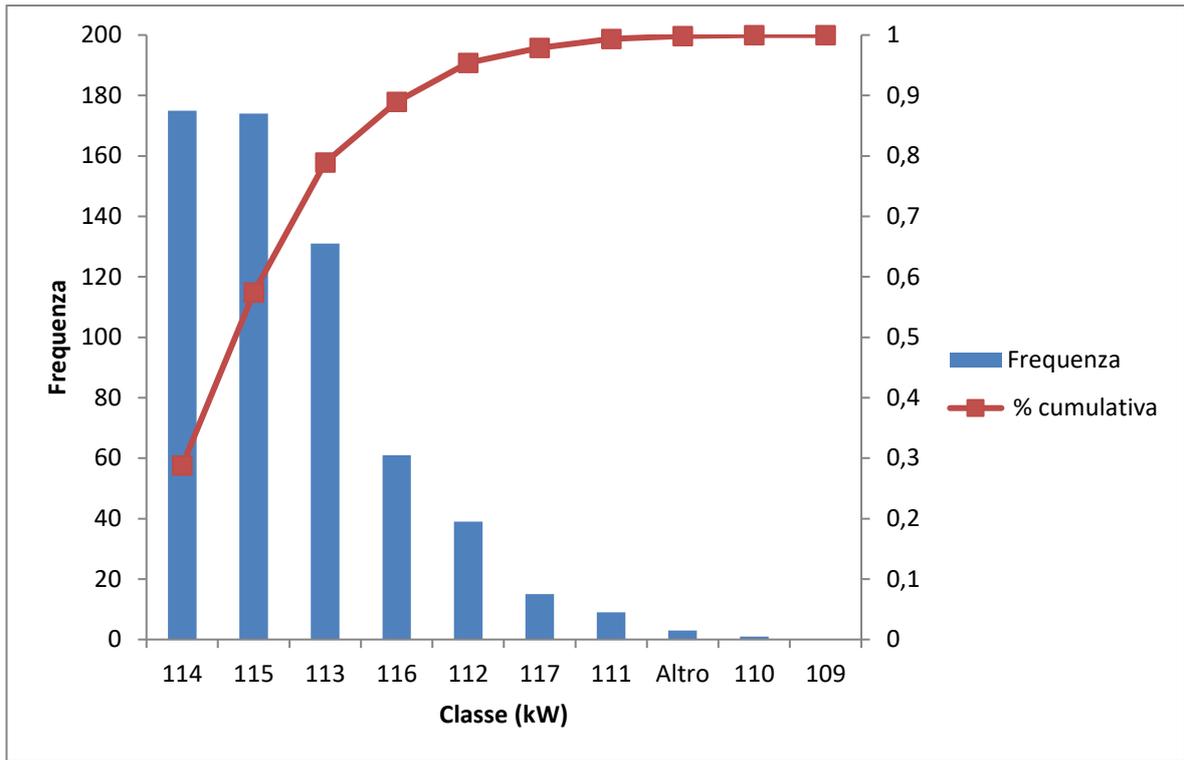


Figura A.12: Grafico D\_70.0%; R\_65.0%

## A.2.4 Rotore 67.5%

Tabella A.25: Potenza D\_70.0%; R\_67.5%

<b>Potenza (kW)</b>	
Media	116,18
Deviazione standard	1,26
Curtosi	0,08
Intervallo	8,29

Tabella A.26: Rielaborazione dati D\_70.0%; R\_67.5%

<b>Classe (kW)</b>	<b>Frequenza</b>	<b>% cumulativa</b>
111	0	0,00
112	9	0,01
113	37	0,07
114	110	0,24
115	210	0,57
116	180	0,85
117	79	0,97
118	18	1,00
Altro	1	1,00

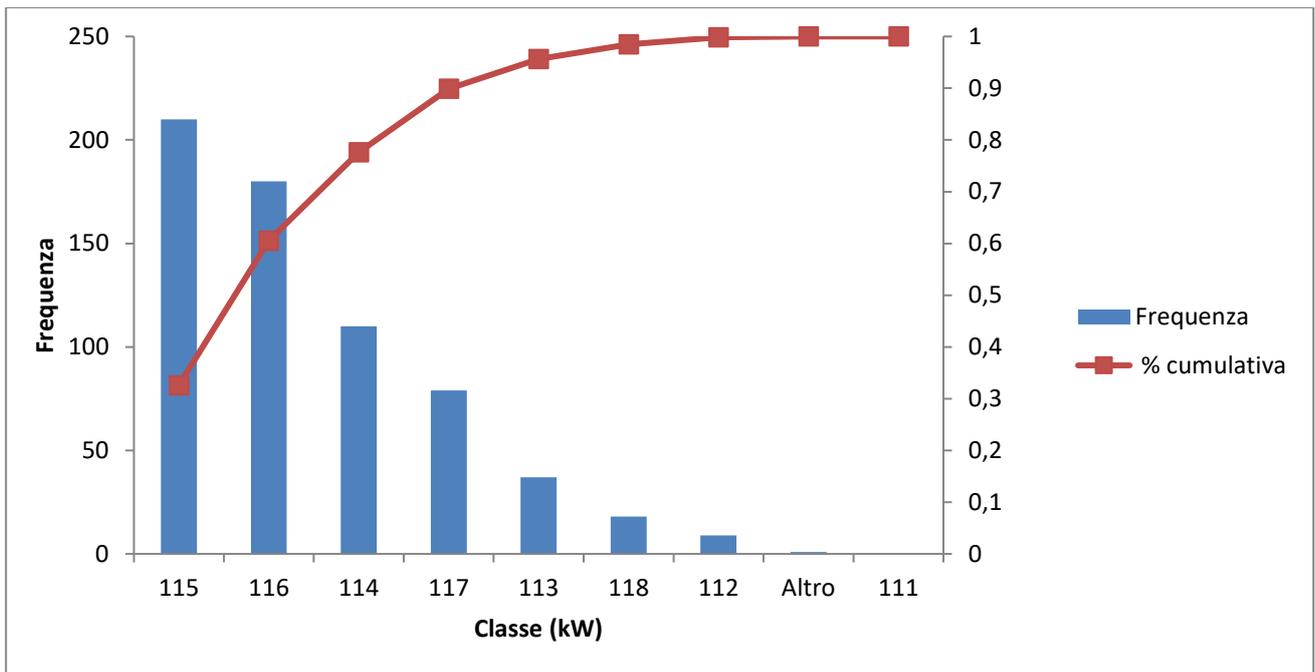


Figura A.13: Grafico D\_70.0%; R\_67.5%

## A.2.5 Rotore 70.0%

Tabella A.27: Potenza D\_70.0%; R\_70.0%

<b>Potenza (kW)</b>	
Media	116,95
Deviazione standard	1,34
Curtosi	0,01
Intervallo	8,33

Tabella A.28: Rielaborazione dati D\_70.0%; R\_70.0%

<b>Classe (kW)</b>	<b>Frequenza</b>	<b>% cumulativa</b>
112	0	0,00
113	2	0,00
114	14	0,03
115	42	0,09
116	86	0,23
117	162	0,48
118	189	0,78
119	113	0,96
120	25	1,00
121	1	1,00
Altro	1	1,00

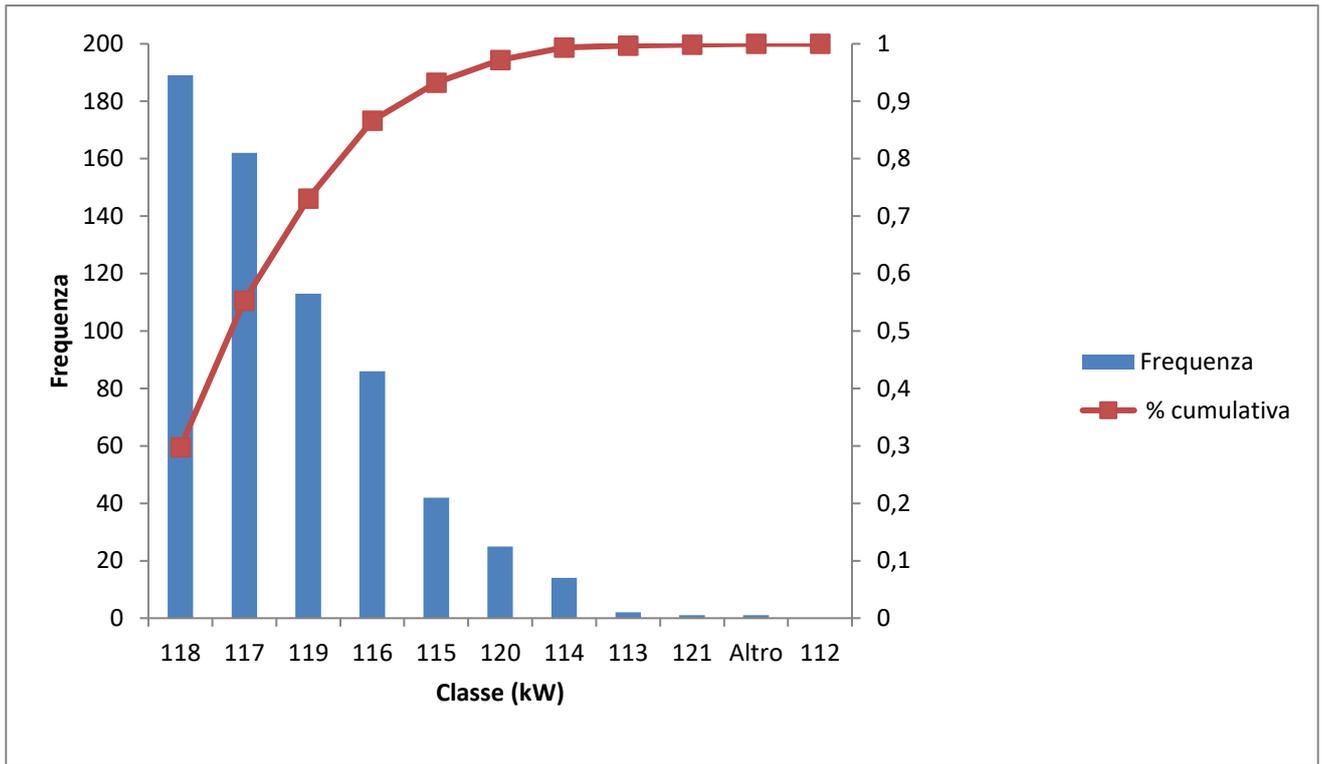


Figura A.14: Grafico D\_70.0%; R\_70.0%

## A.2.6 Rotore 72.5%

Tabella A.29: Potenza D\_70.0%; R\_72.5%

<b>Potenza (kW)</b>	
Media	117,08
Deviazione standard	1,76
Curtosi	0,14
Intervallo	9,79

Tabella A.30: Rielaborazione dati D\_70.0%; R\_72.5%

<b>Classe (kW)</b>	<b>Frequenza</b>	<b>% cumulativa</b>
111	0	0,00
112	4	0,01
116	79	0,24
118	162	0,68
120	61	0,97
121	16	1,00
Altro	1	1,00

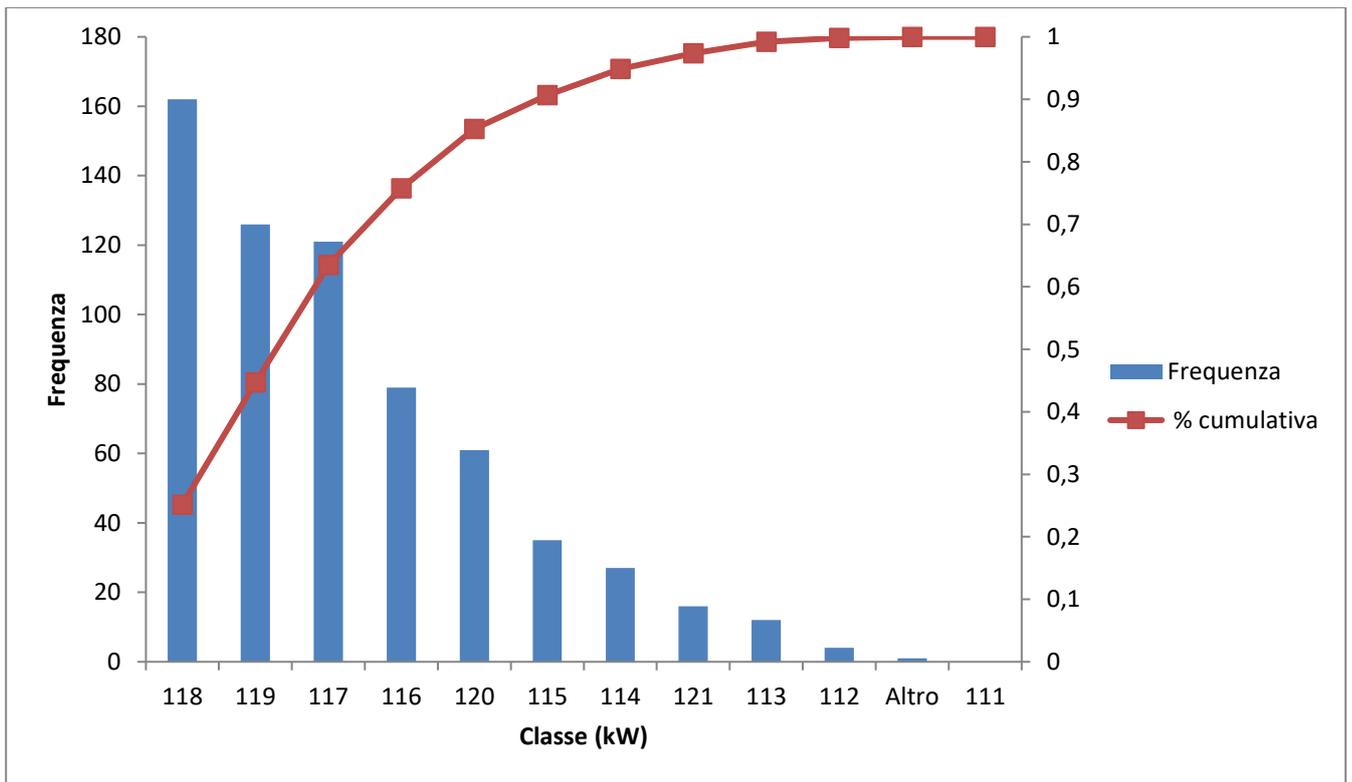


Figura A.15: Grafico D\_70.0%; R\_72.5%

## A.2.7 Rotore 75.0%

Tabella A.31: Potenza D\_70.0%; R\_75.0%

<b>Potenza (kW)</b>	
Media	116,04
Deviazione standard	1,85
Curtosi	0,53
Intervallo	12,78

Tabella A.32: Rielaborazione dati D\_70.0%; R\_75.0%

<b>Classe (kW)</b>	<b>Frequenza</b>	<b>% cumulativa</b>
108	0	0,00
109	1	0,00
110	2	0,00
111	2	0,01
112	11	0,02
113	27	0,07
114	45	0,13
115	91	0,27
116	110	0,44
117	141	0,65
118	136	0,86
119	76	0,98
120	13	1,00
121	1	1,00
Altro	1	1,00

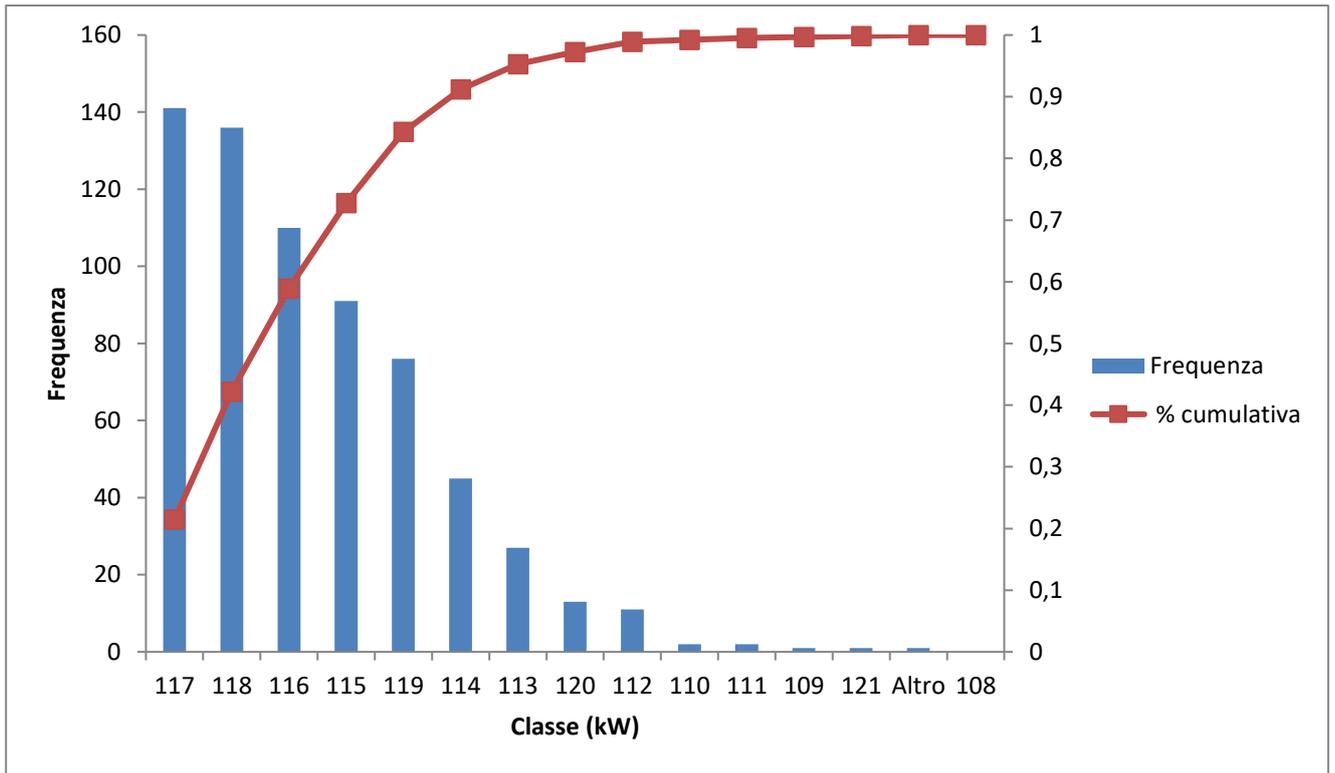


Figura A.16: Grafico D\_70.0%; R\_75.0%

## A.2.8 Rotore 77.5%

Tabella A.33: Potenza D\_70.0%; R\_77.5%

<b>Potenza (kW)</b>	
Media	114,02
Deviazione standard	2,54
Curtosi	0,01
Intervallo	14,47

Tabella A.34: Rielaborazione dati D\_70.0%; R\_77.5%

<b>Classe (kW)</b>	<b>Frequenza</b>	<b>% cumulativa</b>
105	0	0,00
106	1	0,00
107	2	0,00
108	10	0,02
109	17	0,05
110	27	0,09
111	26	0,13
112	55	0,21
113	56	0,30
114	86	0,43
115	114	0,61
116	113	0,78
117	75	0,90
118	43	0,97
119	16	0,99
120	3	1,00
Altro	2	1,00

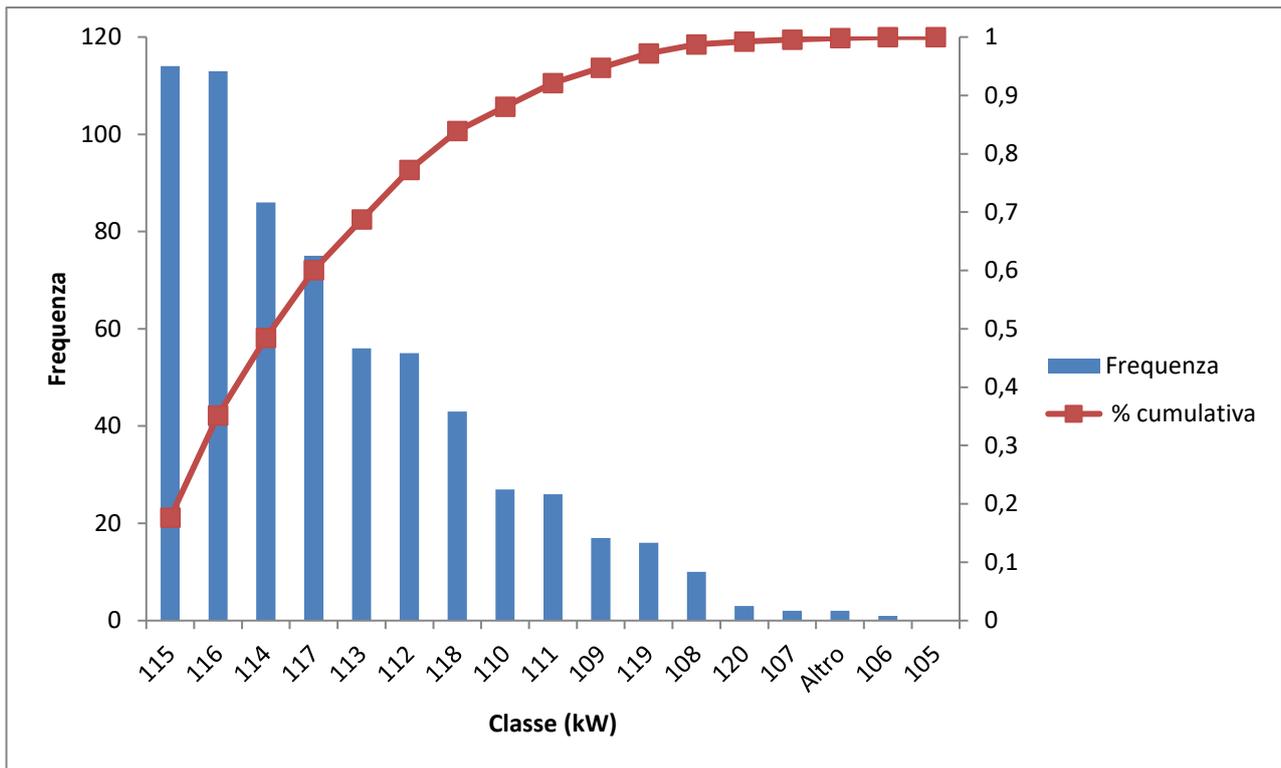


Figura A.17: Grafico D\_70.0%; R\_77.5%

## A.2.9 Rotore 80.0%

Tabella A.35: Potenza D\_70.0%; R\_80.0%

<b>Potenza (kW)</b>	
Media	109,92
Deviazione standard	3,65
Curtosi	-0,74
Intervallo	17,54

Tabella A.36: Rielaborazione dati D\_70.0%; R\_80.0%

<b>Classe (kW)</b>	<b>Frequenza</b>	<b>% cumulativa</b>
100	0	0,00
101	2	0,00
102	6	0,01
103	14	0,03
104	25	0,07
105	32	0,11
106	42	0,17
107	47	0,24
108	52	0,31
109	51	0,38
110	67	0,48
111	69	0,57
112	66	0,67
113	70	0,77
114	71	0,87
115	47	0,93
116	26	0,97
117	16	0,99
118	4	1,00
Altro	1	1,00

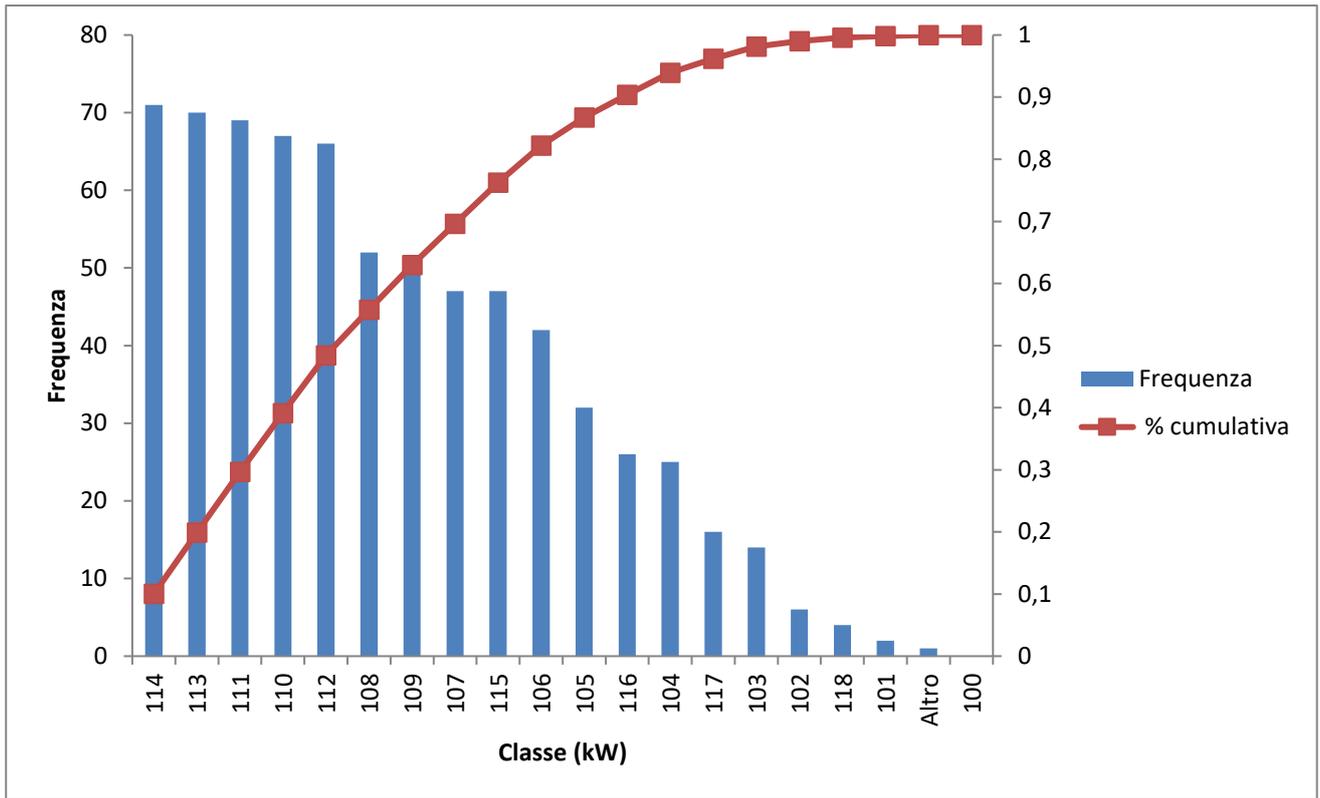


Figura A.18: Grafico D\_70.0%; R\_80.0%

## A.3 Distributore 75.0%

### A.3.1 Rotore 60.0%

Tabella A.37: Potenza D\_75.0%; R\_60.0%

<b>Potenza (kW)</b>	
Media	111,67
Deviazione standard	0,71
Curtosi	-0,10
Intervallo	4,51

Tabella A.38: Rielaborazione dati D\_75.0%; R\_60.0%

<b>Classe (kW)</b>	<b>Frequenza</b>	<b>% cumulativa</b>
109	0	-
110	13	0,01
111	132	0,16
112	444	0,66
113	290	0,98
Altro	16	1,00

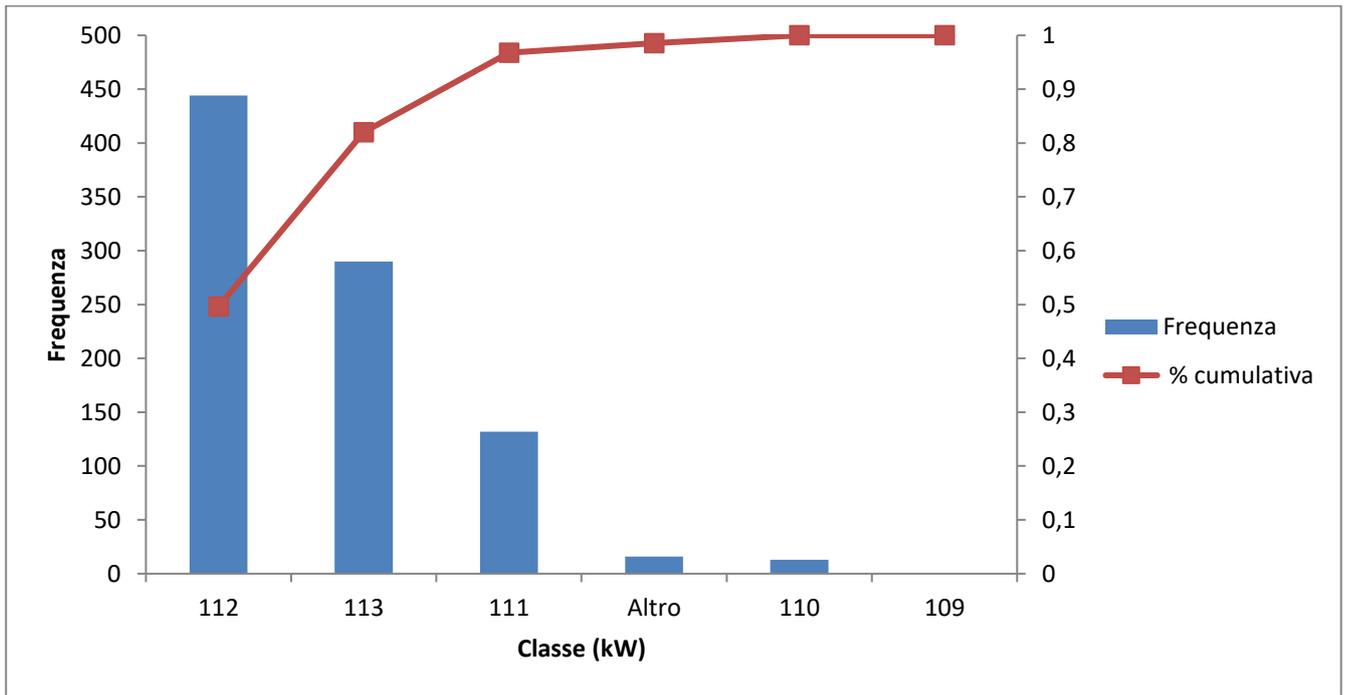


Figura A.19: Grafico D\_75.0%; R\_60.0%

### A.3.2 Rotore 62.5%

Tabella A.39: Potenza D\_75.0%; R\_62.5%

<b>Potenza (kW)</b>	
Media	113,57
Deviazione standard	1,11
Curtosi	0,01
Intervallo	6,77

Tabella A.40: Rielaborazione dati D\_75.0%; R\_62.5%

<b>Classe (kW)</b>	<b>Frequenza</b>	<b>% cumulativa</b>
110	0	0,00
111	6	0,01
112	50	0,09
113	132	0,29
114	241	0,66
115	158	0,90
116	57	0,99
117	7	1,00
Altro	1	1,00

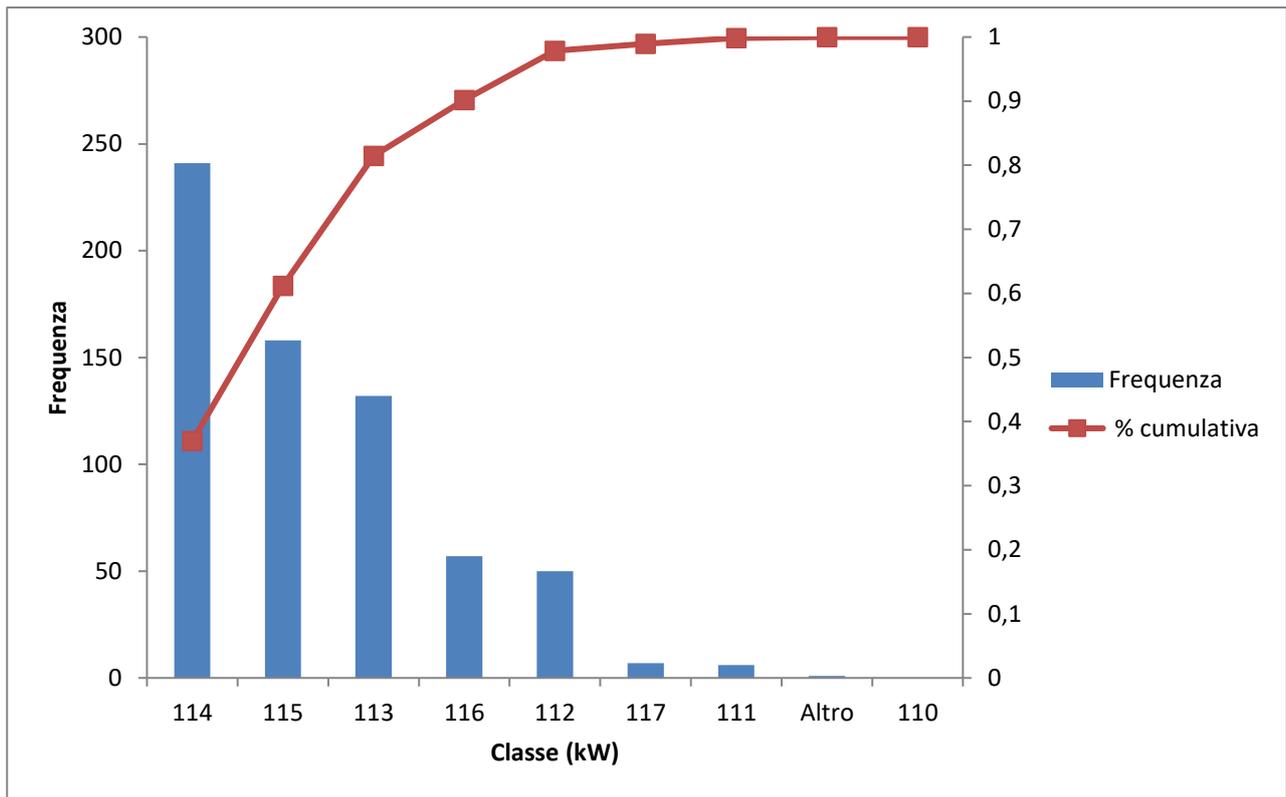


Figura A.20: Grafico D\_75.0%; R\_62.5%

### A.3.3 Rotore 65.0%

Tabella A.41: Potenza D\_75.0%; R\_65.0%

<b>Potenza (kW)</b>	
Media	116,64
Deviazione standard	1,66
Curiosi	-0,81
Intervallo	8,04

Tabella A.42: Rielaborazione dati D\_75.0%; R\_65.0%

<b>Classe (kW)</b>	<b>Frequenza</b>	<b>% cumulativa</b>
112	0	0,00
113	1	0,00
114	29	0,05
115	84	0,17
116	136	0,38
117	138	0,60
118	103	0,75
119	103	0,91
120	52	0,99

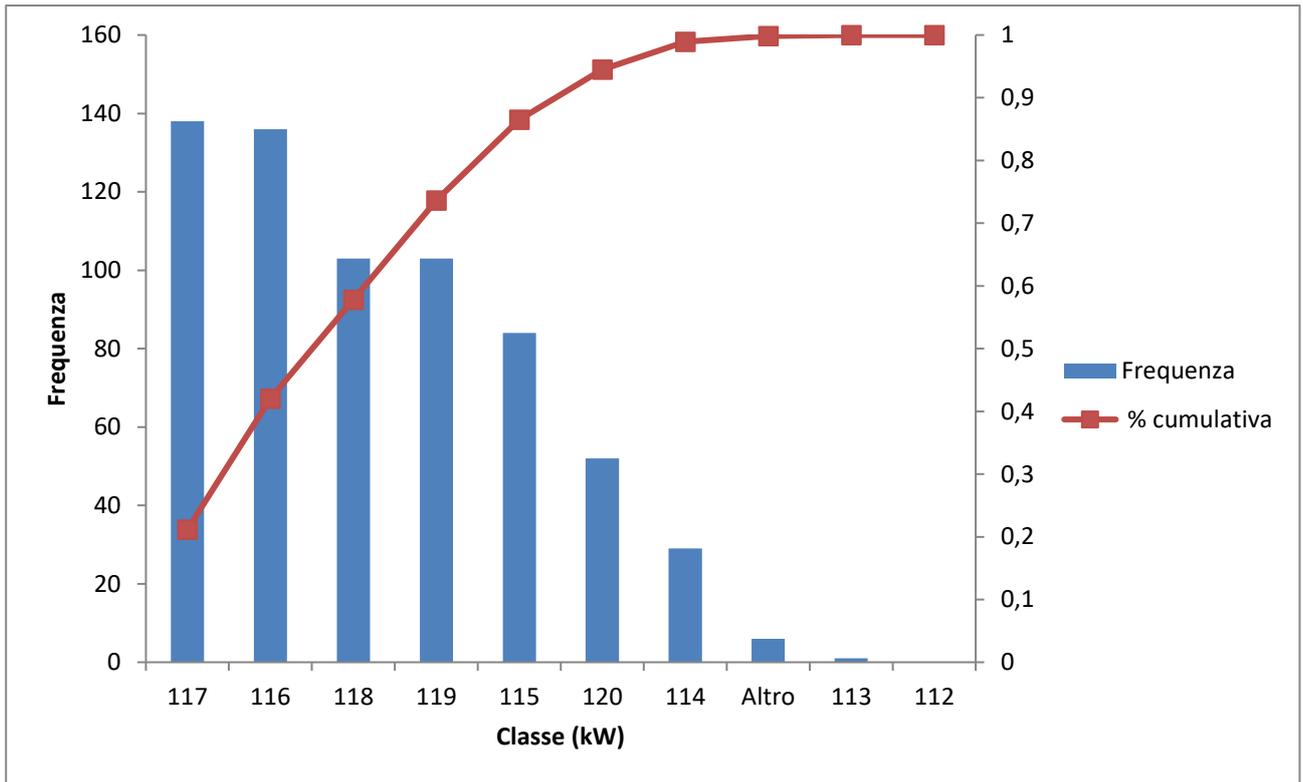


Figura A.21: Grafico D\_75.0%; R\_65.0%

### A.3.4 Rotore 67.5%

Tabella A.43: Potenza D\_75.0%; R\_67.5%

<b>Potenza (kW)</b>	
Media	118,61
Deviazione standard	2,30
Curiosi	-1,03
Intervallo	9,85

Tabella A.44: Rielaborazione dati D\_75.0%; R\_67.5%

<b>Classe (kW)</b>	<b>Frequenza</b>	<b>% cumulativa</b>
113	0	0,00
114	2	0,00
115	26	0,04
116	54	0,13
117	109	0,30
118	101	0,45
119	77	0,57
120	73	0,69
121	74	0,80
122	70	0,91
123	53	0,99
Altro	6	1,00

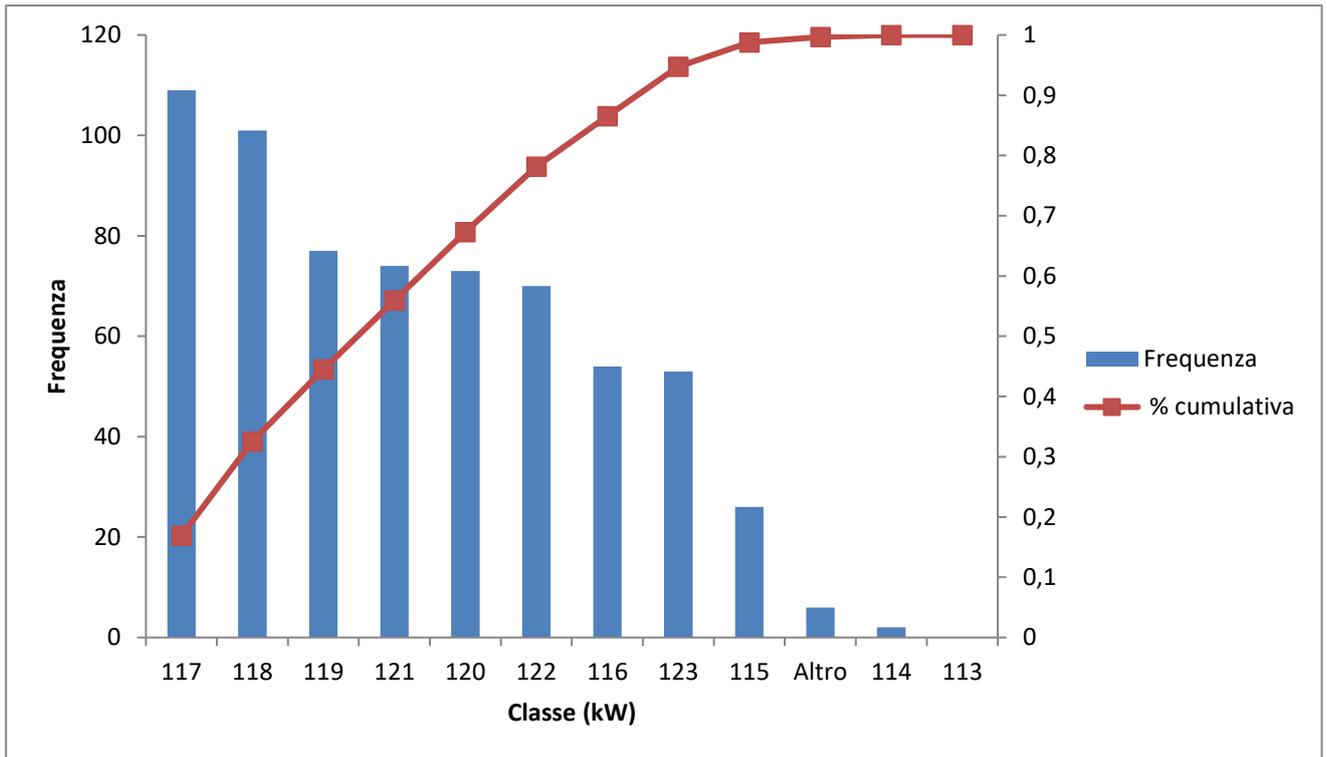


Figura A.22: Grafico D\_75.0%; R\_67.5%

### A.3.5 Rotore 70.0%

Tabella A.45: Potenza D\_75.0%; R\_70.0%

<b>Potenza (kW)</b>	
Media	118,50
Deviazione standard	2,84
Curtosi	-0,75
Intervallo	13,25

Tabella A.46: Rielaborazione dati D\_75.0%; R\_70.0%

<b>Classe (kW)</b>	<b>Frequenza</b>	<b>% cumulativa</b>
111	0	0,00
112	1	0,00
113	4	0,01
114	20	0,04
115	44	0,11
116	65	0,20
117	95	0,35
118	77	0,47
119	81	0,59
120	64	0,69
121	73	0,80
122	40	0,86
123	40	0,92
124	36	0,97
Altro	17	1,00

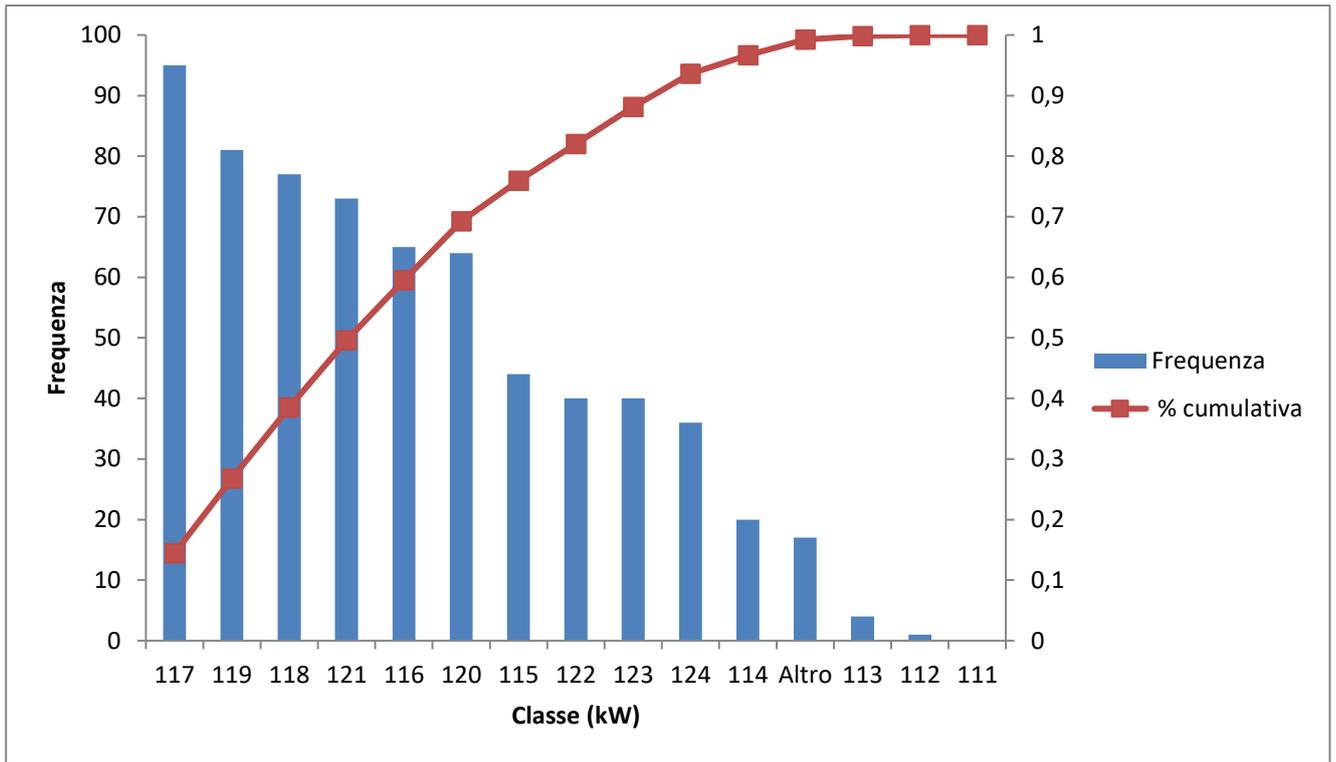


Figura A.23: Grafico D\_75.0%; R\_70.0%

### A.3.6 Rotore 72.5%

Tabella A.47: Potenza D\_75.0%; R\_72.5%

<b>Potenza (kW)</b>	
Media	118,62
Deviazione standard	2,57
Curtosi	-0,40
Intervallo	13,33

Tabella A.48: Rielaborazione dati D\_75.0%; R\_72.5%

<b>Classe (kW)</b>	<b>Frequenza</b>	<b>% cumulativa</b>
111	0	0,00
112	1	0,00
113	3	0,01
114	16	0,03
115	28	0,07
116	55	0,16
117	79	0,28
118	85	0,42
119	105	0,58
120	80	0,71
121	73	0,82
122	48	0,89
123	33	0,95
124	23	0,98
125	10	1,00
Altro	2	1,00

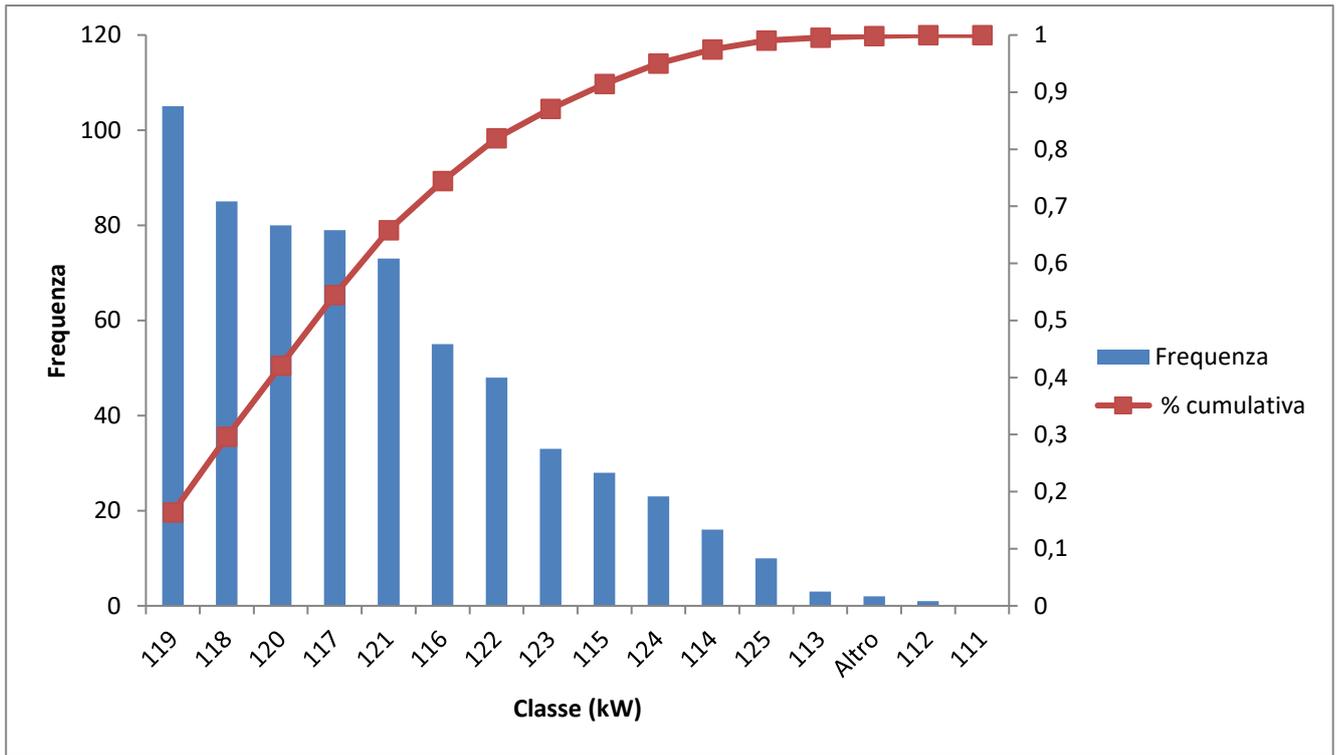


Figura A.24: Grafico D\_75.0%; R\_72.5%

### A.3.7 Rotore 75.0%

Tabella A.49: Potenza D\_75.0%; R\_75.0%

<b>Potenza (kW)</b>	
Media	117,52
Deviazione standard	2,72
Curtosi	-0,38
Intervallo	14,64

Tabella A.50: Rielaborazione dati D\_75.0%; R\_75.0%

<b>Classe (kW)</b>	<b>Frequenza</b>	<b>% cumulativa</b>
110	0	0,00
111	2	0,00
112	6	0,01
113	26	0,05
114	37	0,11
115	56	0,20
116	61	0,29
117	79	0,41
118	104	0,57
119	86	0,70
120	79	0,82
121	46	0,90
122	33	0,95
123	18	0,97
124	14	1,00
Altro	3	1

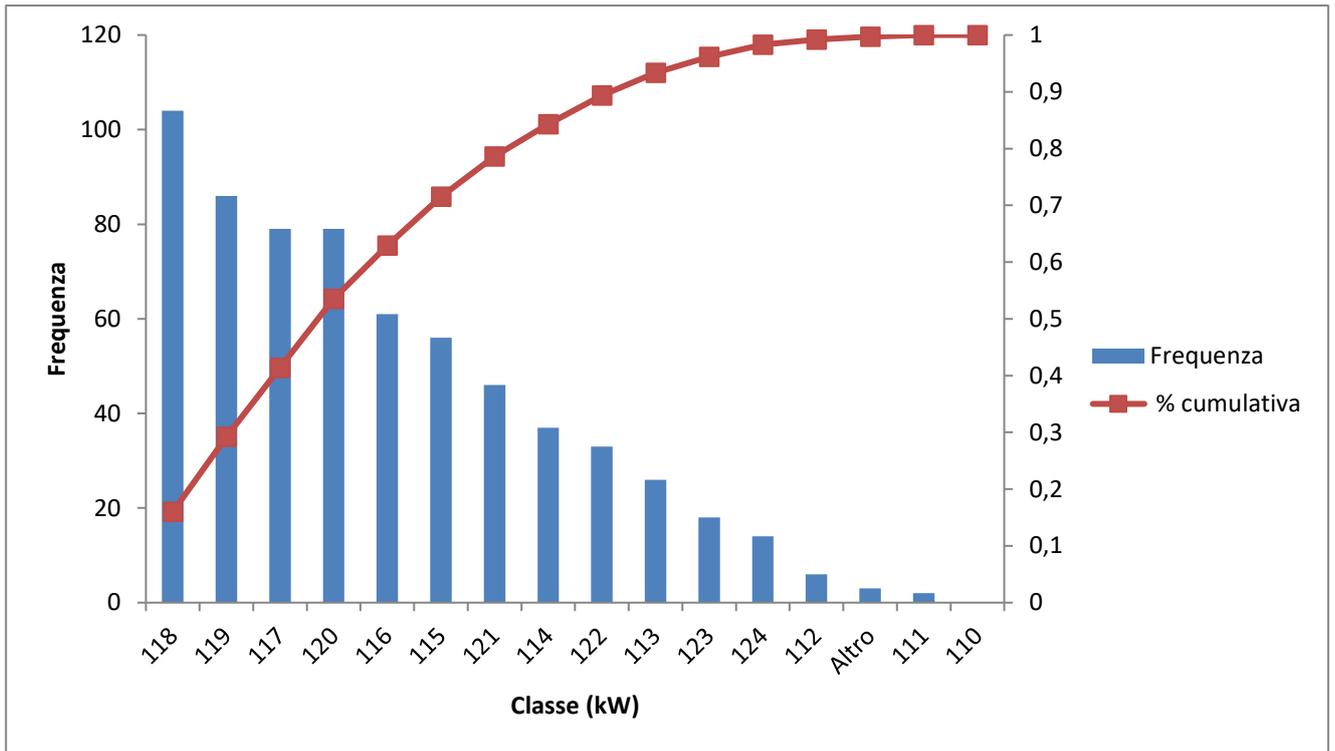


Figura A.25: Grafico D\_75.0%; R\_75.0%

### A.3.8 Rotore 77.5%

Tabella A.51: Potenza D\_75.0%; R\_77.5%

<b>Potenza (kW)</b>	
Media	114,85
Deviazione standard	3,09
Curtosi	-0,41
Intervallo	14,93

Tabella A.52: Rielaborazione dati D\_75.0%; R\_77.5%

<b>Classe (kW)</b>	<b>Frequenza</b>	<b>% cumulativa</b>
107	0	0,00
108	10	0,02
109	13	0,04
110	21	0,07
111	28	0,11
112	54	0,19
113	58	0,28
114	79	0,40
115	69	0,51
116	83	0,63
117	72	0,74
118	65	0,84
119	46	0,91
120	25	0,95
121	19	0,98
122	12	1,00
Altro	2	1,00

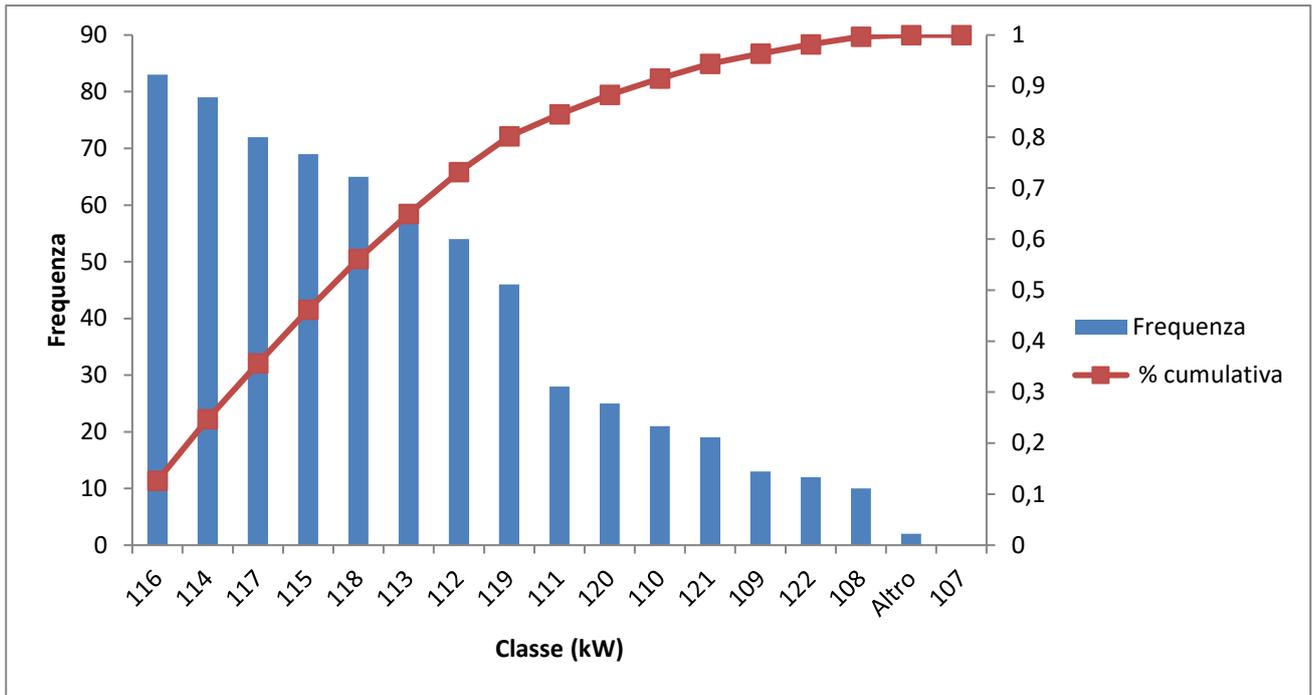


Figura A.26: Grafico D\_75.0%; R\_77.5%

### A.3.9 Rotore 80.0%

Tabella A.53: Potenza D\_75.0%; R\_80.0%

<b>Potenza (kW)</b>	
Media	109,90
Deviazione standard	3,45
Curtosi	-0,21
Intervallo	18,31

Tabella A.54: Rielaborazione dati D\_75.0%; R\_80.0%

<b>Classe</b>	<b>Frequenza</b>	<b>% cumulativa</b>
99	0	0,00
100	1	0,00
101	3	0,00
102	5	0,01
103	12	0,02
104	27	0,06
105	27	0,09
106	47	0,14
107	60	0,21
108	79	0,30
109	74	0,39
110	78	0,48
111	99	0,60
112	91	0,70
113	92	0,81
114	57	0,88
115	52	0,94
116	26	0,97
117	22	0,99
118	4	1,00
Altro	1	1

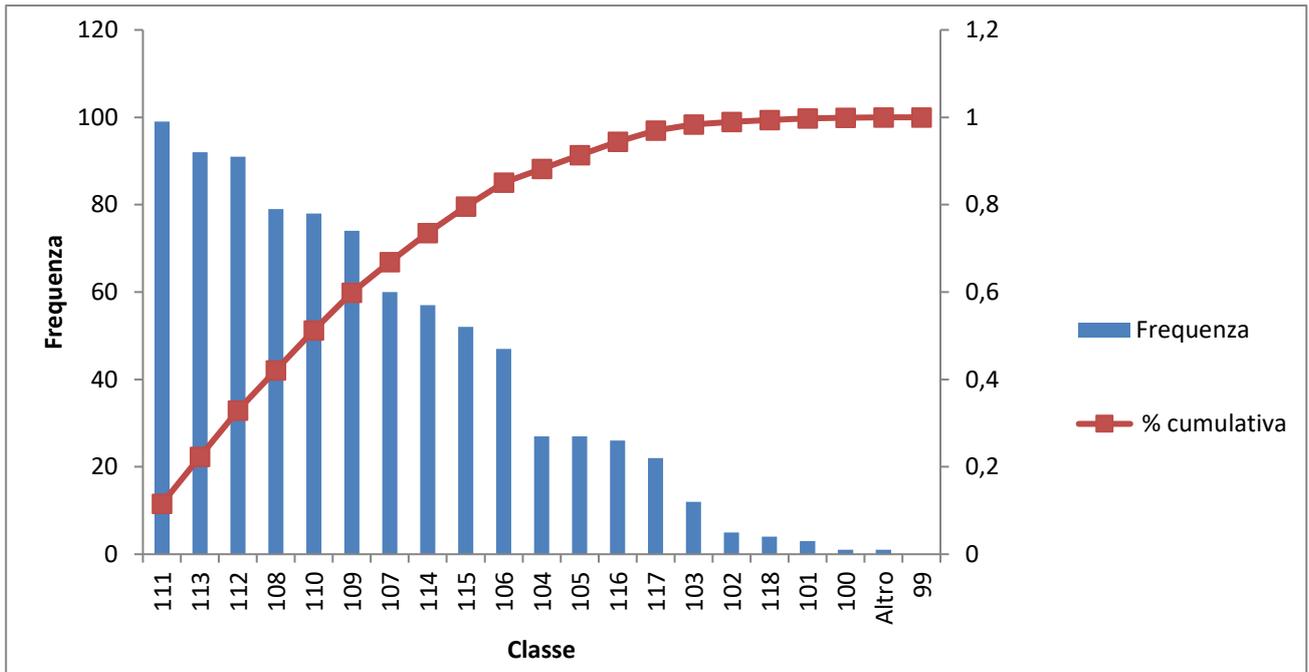


Figura A.27: Grafico D\_75.0%; R\_80.0%

## A.4 Distributore 80%

### A.4.1 Rotore 70.0%

Tabella A.55: Potenza D\_80.0%; R\_70.0%

<b>Potenza (kW)</b>	
Media	125,88
Deviazione standard	1,49
Curtosi	-0,46
Intervallo	7,45

Tabella A.56: Rielaborazione dati D\_80.0%; R\_70.0%

<b>Classe (kW)</b>	<b>Frequenza</b>	<b>% cumulativa</b>
121	0	-
122	5	0,01
123	21	0,04
124	64	0,14
125	93	0,28
126	109	0,45
127	185	0,74
128	144	0,96
129	22	1,00
Altro	1	1,00

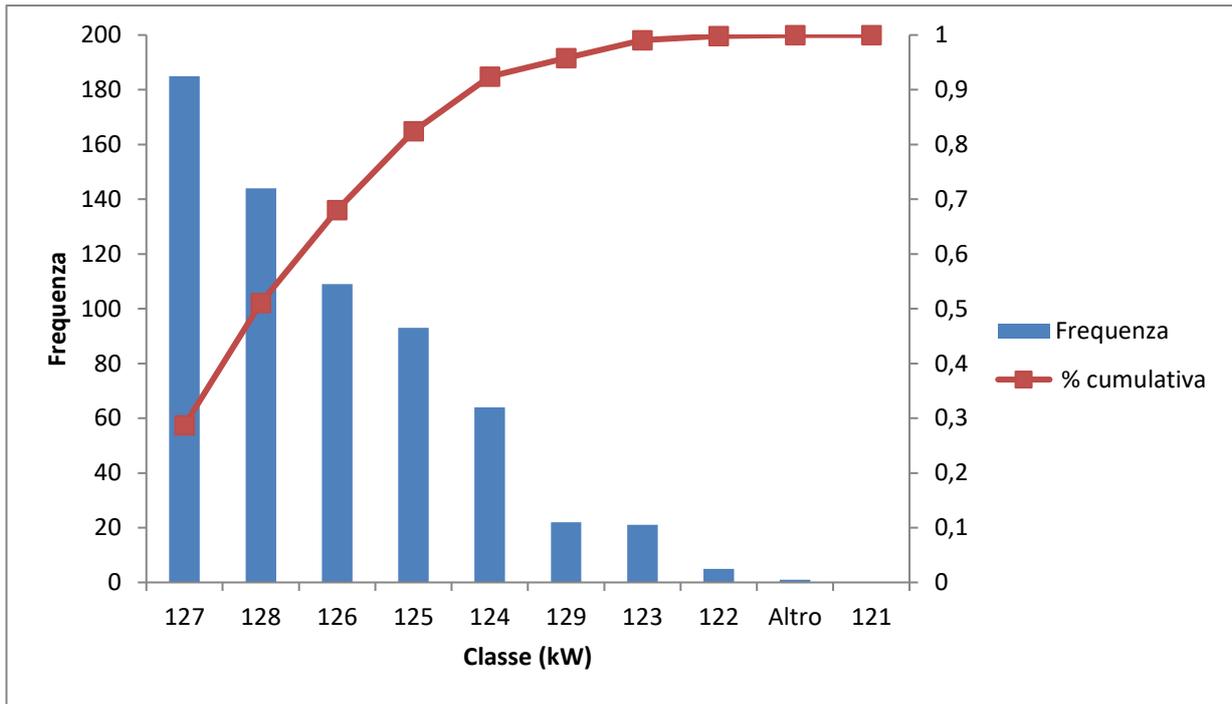


Figura A.28: Grafico D\_80.0%; R\_70.0%

## A.4.2 Rotore 72.5%

Tabella A.57: Potenza D\_80.0%; R\_72.5%

<b>Potenza (kW)</b>	
Media	125,88
Deviazione standard	1,49
Curtosi	-0,46
Intervallo	7,45

Tabella A.58: Rielaborazione dati D\_80.0%; R\_72.5%

<b>Classe (kW)</b>	<b>Frequenza</b>	<b>% cumulativa</b>
120	0	0,00
121	1	0,00
122	5	0,01
123	17	0,03
124	64	0,13
125	107	0,29
126	102	0,45
127	79	0,56
128	77	0,68
129	109	0,84
130	75	0,96
131	28	1,00
Altro	1	1,00

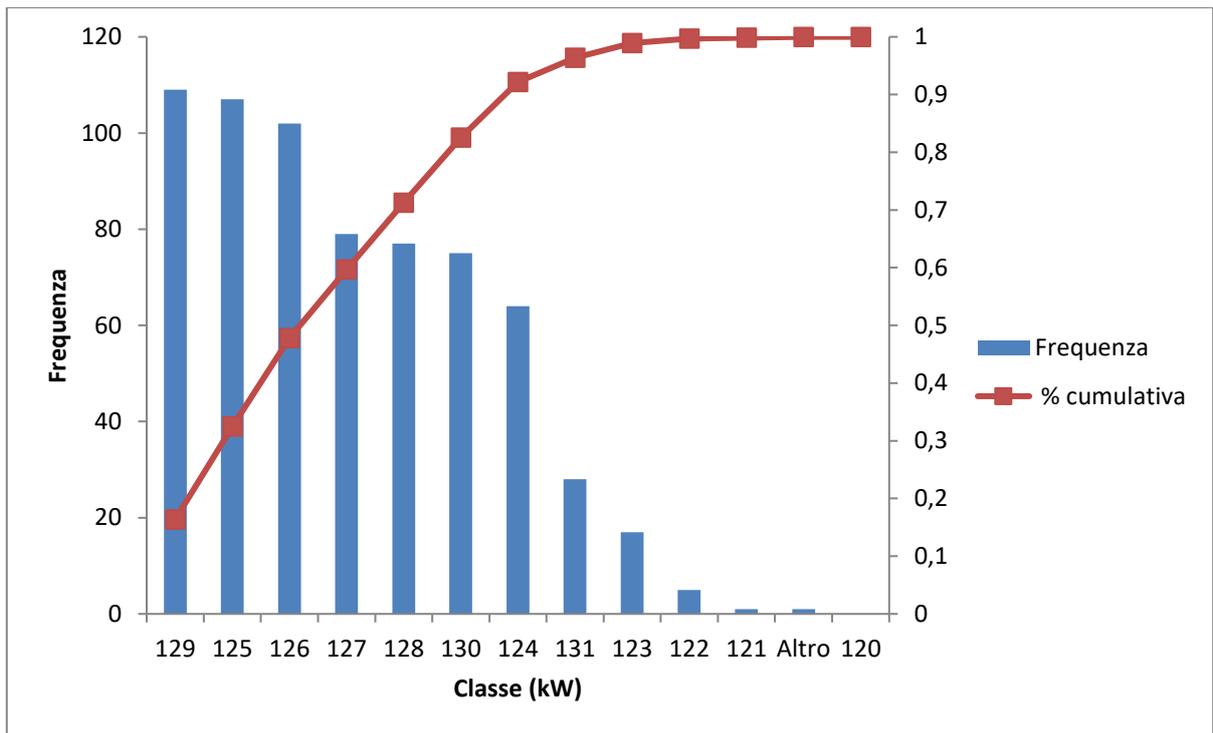


Figura A.29: Grafico D\_80.0%; R\_72.5%

### A.4.3 Rotore 75.0%

Tabella A.59: Potenza D\_80.0%; R\_75.0%

<b>Potenza (kW)</b>	
Media	127,53
Deviazione standard	2,64
Curtosi	-0,95
Intervallo	13,93

Tabella A.60: Rielaborazione dati D\_80.0%; R\_75.0%

<b>Classe (kW)</b>	<b>Frequenza</b>	<b>% cumulativa</b>
119	0	0,00
120	1	0,00
121	1	0,00
122	1	0,00
123	7	0,01
124	34	0,06
125	85	0,19
126	114	0,35
127	94	0,49
128	69	0,59
129	61	0,67
130	67	0,77
131	63	0,86
132	72	0,97
133	22	1,00
Altro	2	1,00

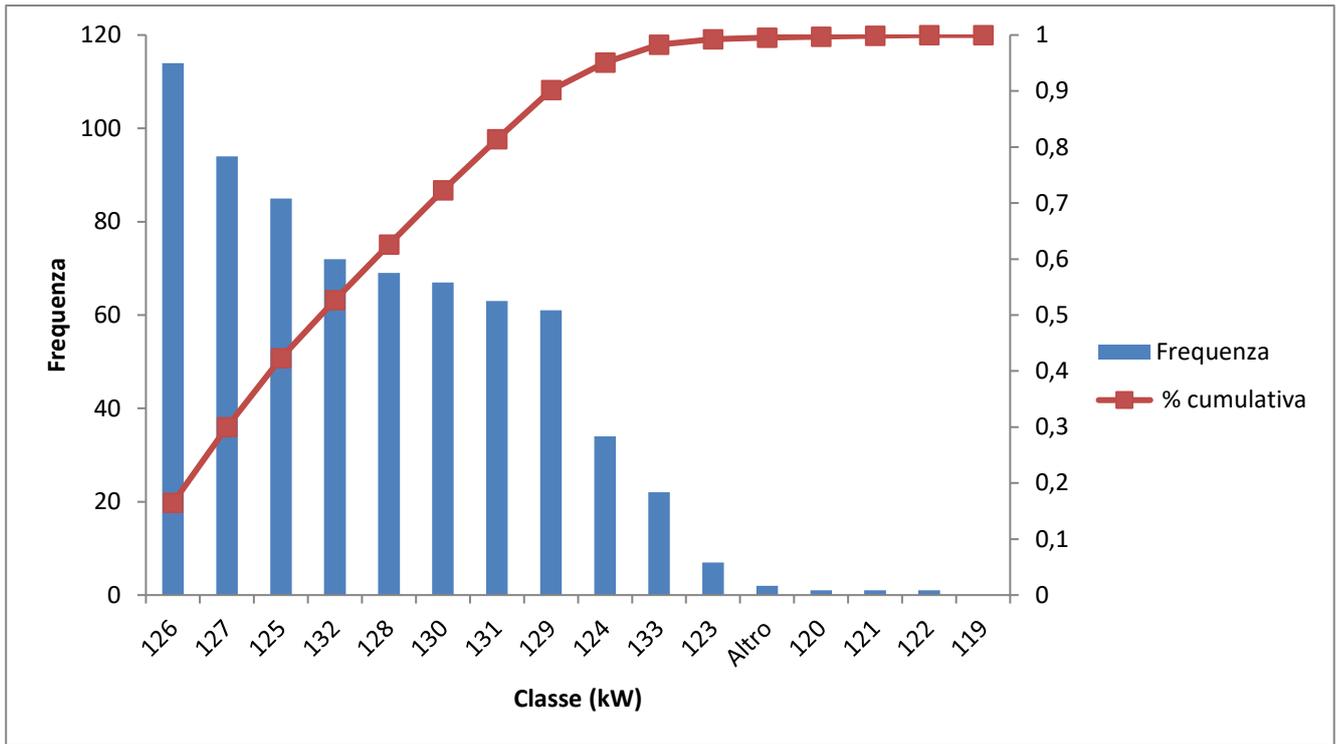


Figura A.30: Grafico D\_80.0%; R\_75.0%

#### A.4.4 Rotore 77.5%

Tabella A.61: Potenza D\_80.0%; R\_77.5%

<b>Potenza (kW)</b>	
Media	127,54
Deviazione standard	2,84
Curtosi	-0,76
Intervallo	13,70

Tabella A.62: Rielaborazione dati D\_80.0%; R\_77.5%

<b>Classe (kW)</b>	<b>Frequenza</b>	<b>% cumulativa</b>
120	0	0,00
121	1	0,00
122	1	0,00
123	12	0,02
124	36	0,08
125	76	0,20
126	91	0,35
127	85	0,48
128	87	0,62
129	50	0,70
130	48	0,78
131	29	0,83
132	50	0,91
133	43	0,98
134	12	1,00
Altro	3	1,00

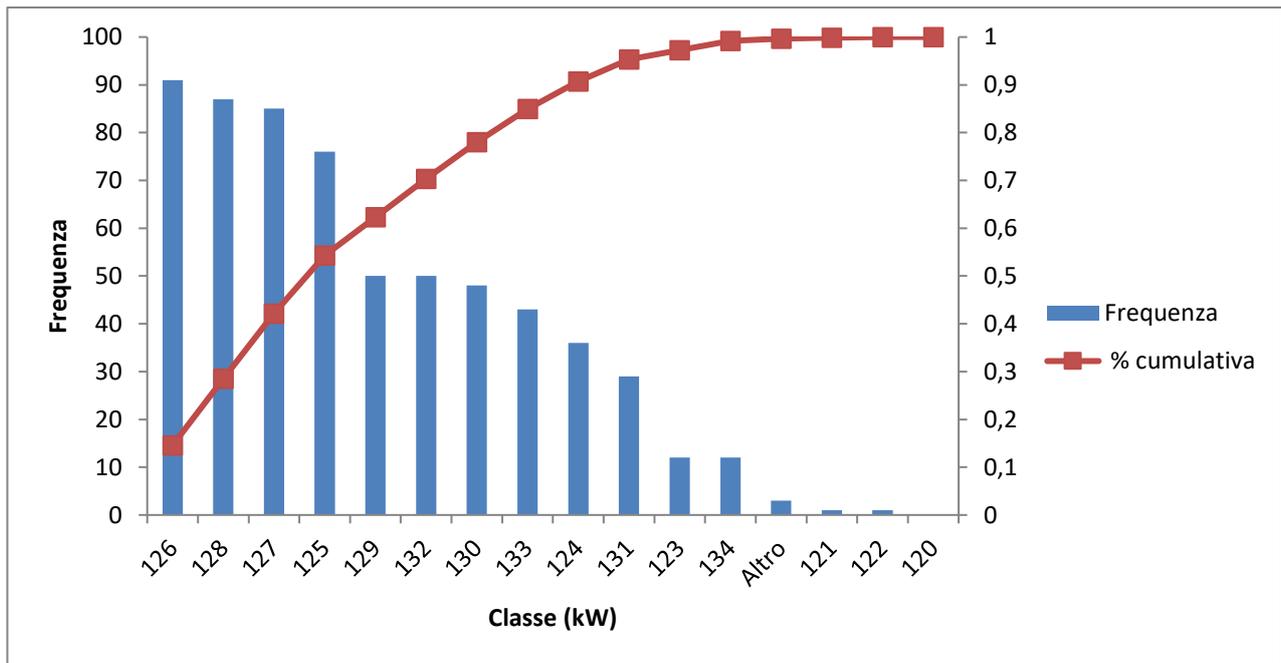


Figura A.31: Grafico D\_80.0%; R\_77.5%

## A.4.5 Rotore 80.0%

Tabella A.63: Potenza D\_80.0%; R\_80.0%

<b>Potenza (kW)</b>	
Media	128,07
Deviazione standard	2,97
Curtosi	-0,75
Intervallo	14,48

Tabella A.64: Rielaborazione dati D\_80.0%; R\_80.0%

<b>Classe (kW)</b>	<b>Frequenza</b>	<b>% cumulativa</b>
121	0	0,00
122	1	0,00
123	13	0,02
124	27	0,06
125	56	0,15
126	101	0,30
127	76	0,42
128	83	0,54
129	66	0,64
130	53	0,72
131	43	0,79
132	52	0,87
133	48	0,94
134	26	0,98
135	9	1,00
136	2	1,00
Altro	1	1,00

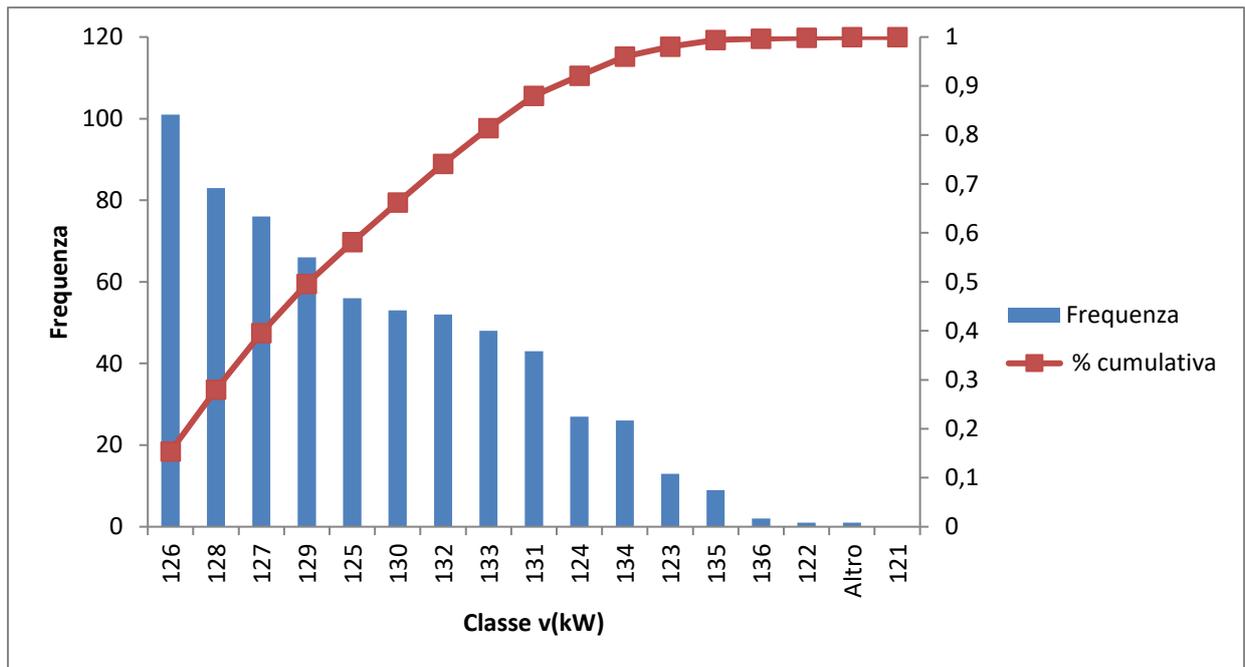


Figura A.32: Grafico D\_80.0%; R\_80.0%

## A.4.6 Rotore 82.5%

Tabella A.65: Potenza D\_80.0%; R\_82.5%

<b>Potenza (kW)</b>	
Media	128,43
Deviazione standard	2,91
Curtosi	-0,82
Intervallo	13,29

Tabella A.66: Rielaborazione dati D\_80.0%; R\_82.5%

<b>Classe (kW)</b>	<b>Frequenza</b>	<b>% cumulativa</b>
122	0	0,00
123	11	0,02
124	21	0,05
125	36	0,11
126	78	0,23
127	81	0,36
128	78	0,49
129	72	0,60
130	47	0,68
131	55	0,76
132	64	0,86
133	45	0,94
134	27	0,98
135	11	1,00
Altro	2	1,00

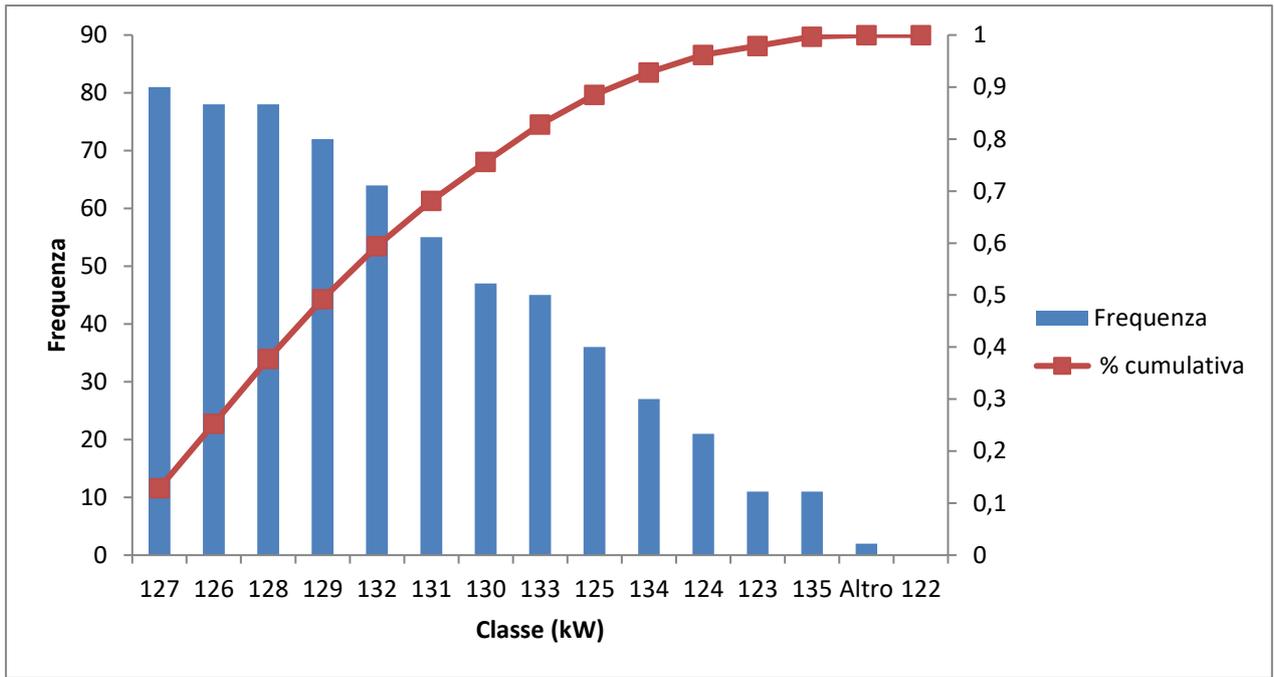


Figura A.33: Grafico D\_80.0%; R\_82.5%

## A.4.5 Rotore 80.0%

Tabella A.67: Potenza D\_80.0%; R\_85.0%

<b>Potenza (kW)</b>	
Media	128,57
Deviazione standard	2,77
Curtosi	-0,68
Intervallo	13,59

Tabella A.68: Rielaborazione dati D\_80.0%; R\_85.0%

<b>Classe (kW)</b>	<b>Frequenza</b>	<b>% cumulativa</b>
121	0	0,00
122	3	0,00
123	7	0,01
124	20	0,04
125	44	0,10
126	79	0,21
127	72	0,31
128	99	0,44
129	85	0,56
130	84	0,68
131	82	0,79
132	62	0,87
133	49	0,94
134	32	0,98
135	11	1,00
Altro	1	1

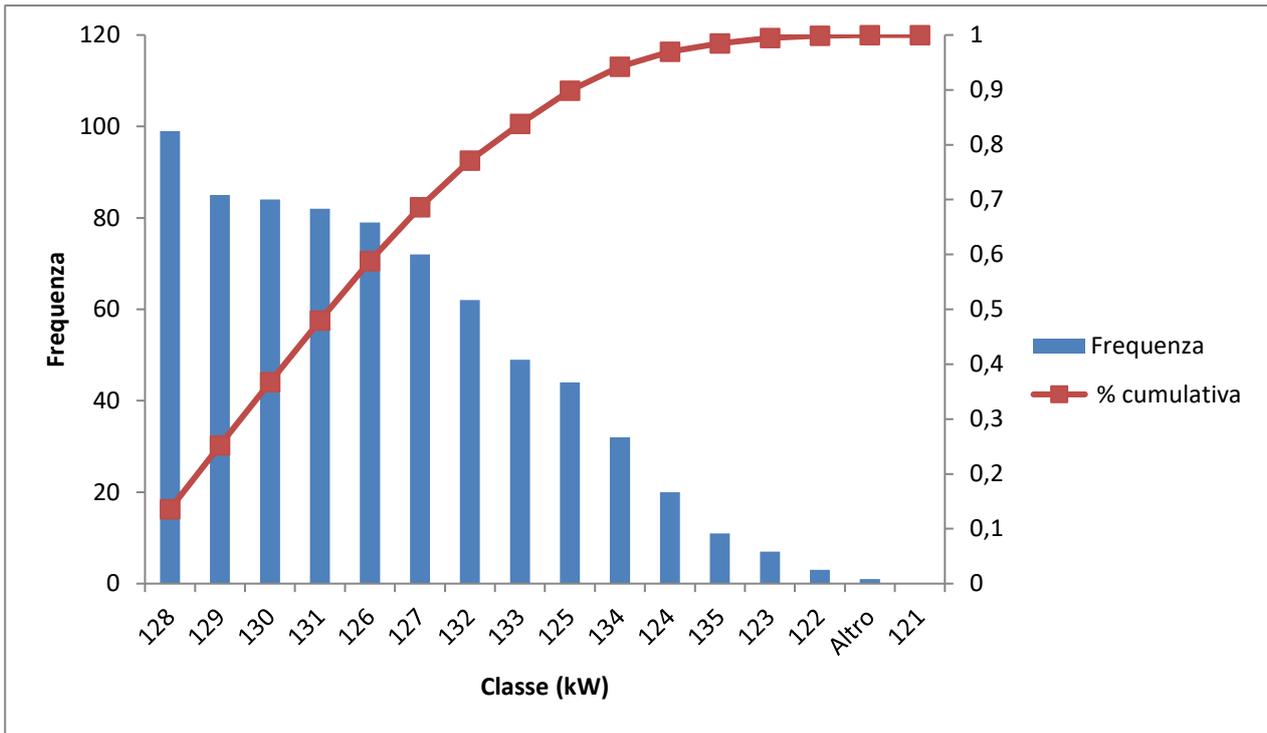


Figura A.34: Grafico D\_80.0%; R\_85.0%

## A.4 Distributore 85.0%

### A.4.1 Rotore 75.0%

Tabella A.69: Potenza D\_85.0%; R\_75.0%

<b>Potenza (kW)</b>	
Media	141,77
Deviazione standard	0,69
Curtosi	1,51
Intervallo	5,88

Tabella A.70: Rielaborazione dati D\_85.0%; R\_75.0%

<b>Classe (kW)</b>	<b>Frequenza</b>	<b>% cumulativa</b>
138	0	0,00
139	2	0,00
140	6	0,01
141	69	0,12
142	333	0,63
143	219	0,97
144	17	1,00
Altro	1	1,00

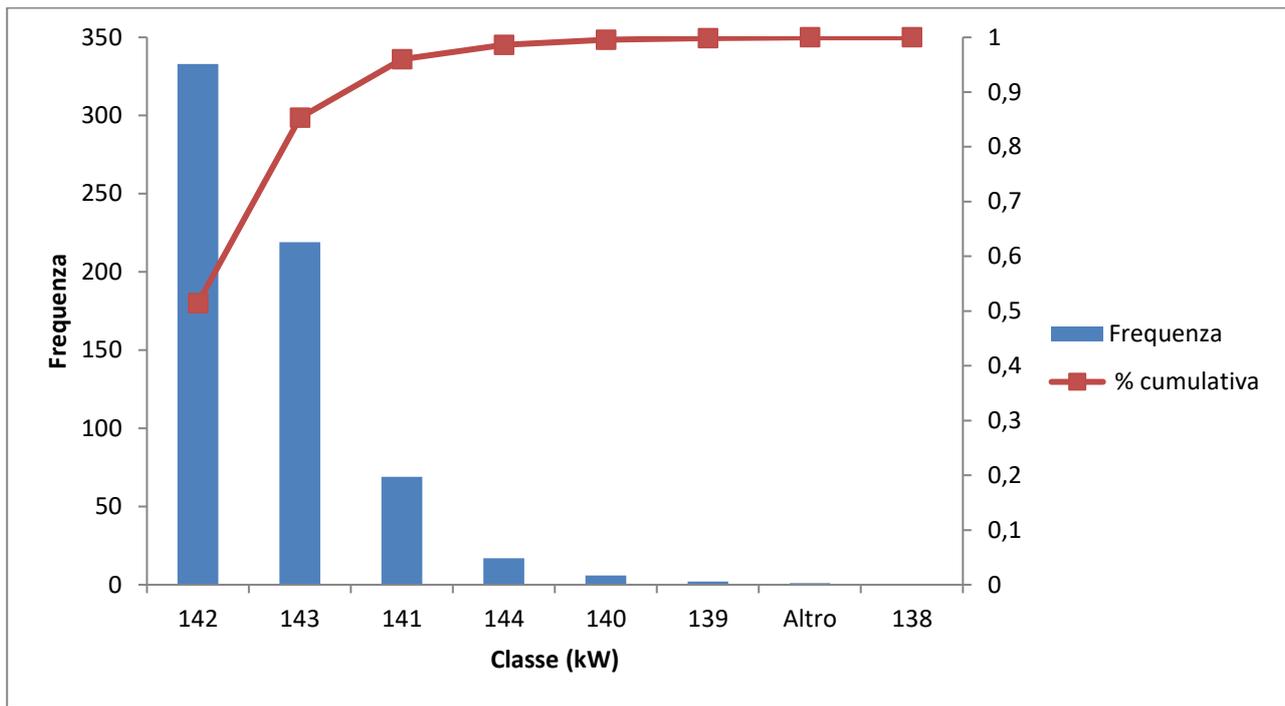


Figura A.35: Grafico D\_85.0%; R\_75.0%

## A.4.2 Rotore 77.5%

Tabella A.71: Potenza D\_85.0%; R\_77.5%

<b>Potenza (kW)</b>	
Media	144,56
Deviazione standard	0,76
Curtosi	1,39
Intervallo	7,00

Tabella A.72: Rielaborazione dati D\_85.0%; R\_77.5%

<b>Classe (kW)</b>	<b>Frequenza</b>	<b>% cumulativa</b>
141	0	0,00
142	1	0,00
143	13	0,02
144	128	0,22
145	320	0,71
146	177	0,98
147	11	1,00
148	0	1,00
Altro	1	1,00

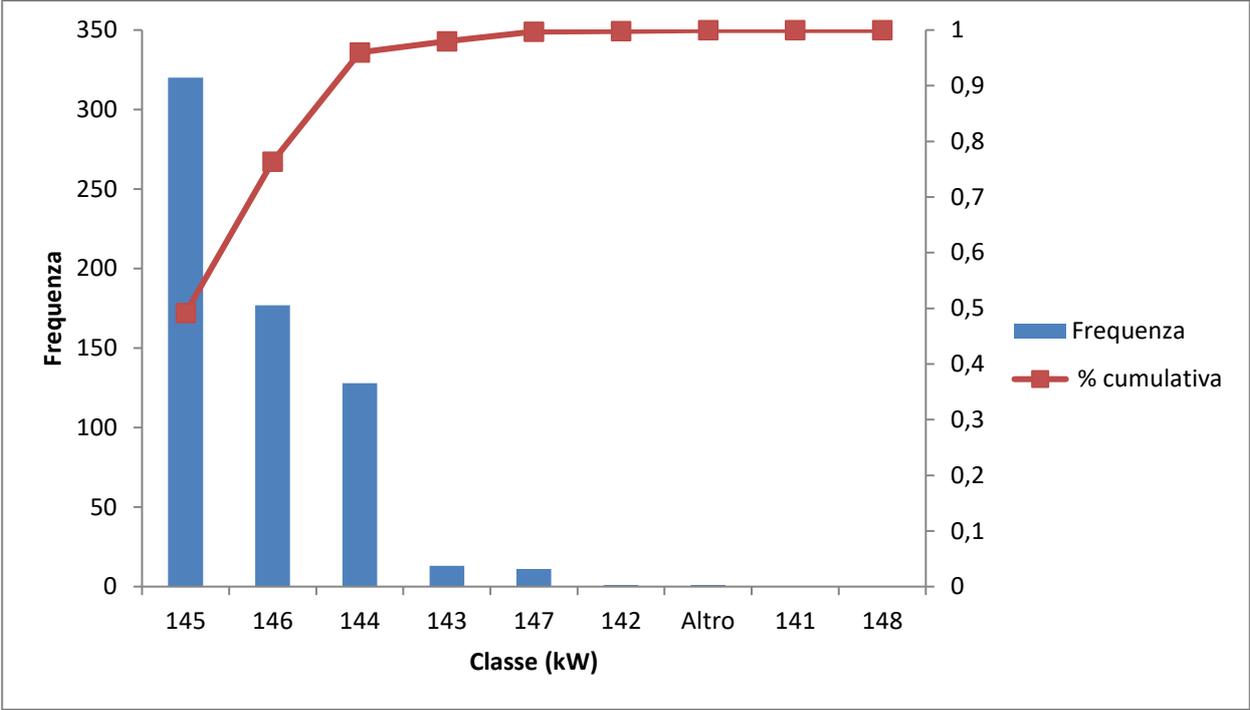


Figura A.36: Grafico D\_85.0%; R\_77.5%

### A.4.3 Rotore 80.0%

Tabella A.73: Potenza D\_85.0%; R\_80.0%

<b>Potenza (kW)</b>	
Media	144,94
Deviazione standard	2,52
Curtosi	4,20
Intervallo	15,41

Tabella A.74: Rielaborazione dati D\_85.0%; R\_80.0%

<b>Classe (kW)</b>	<b>Frequenza</b>	<b>% cumulativa</b>
132	0	0,00
133	1	0,00
134	0	0,00
135	4	0,01
136	4	0,01
137	7	0,02
138	3	0,03
139	9	0,04
140	15	0,07
141	13	0,09
142	13	0,11
143	16	0,13
144	67	0,23
145	86	0,37
146	151	0,60
147	163	0,85
148	92	0,99
Altro	4	1,00

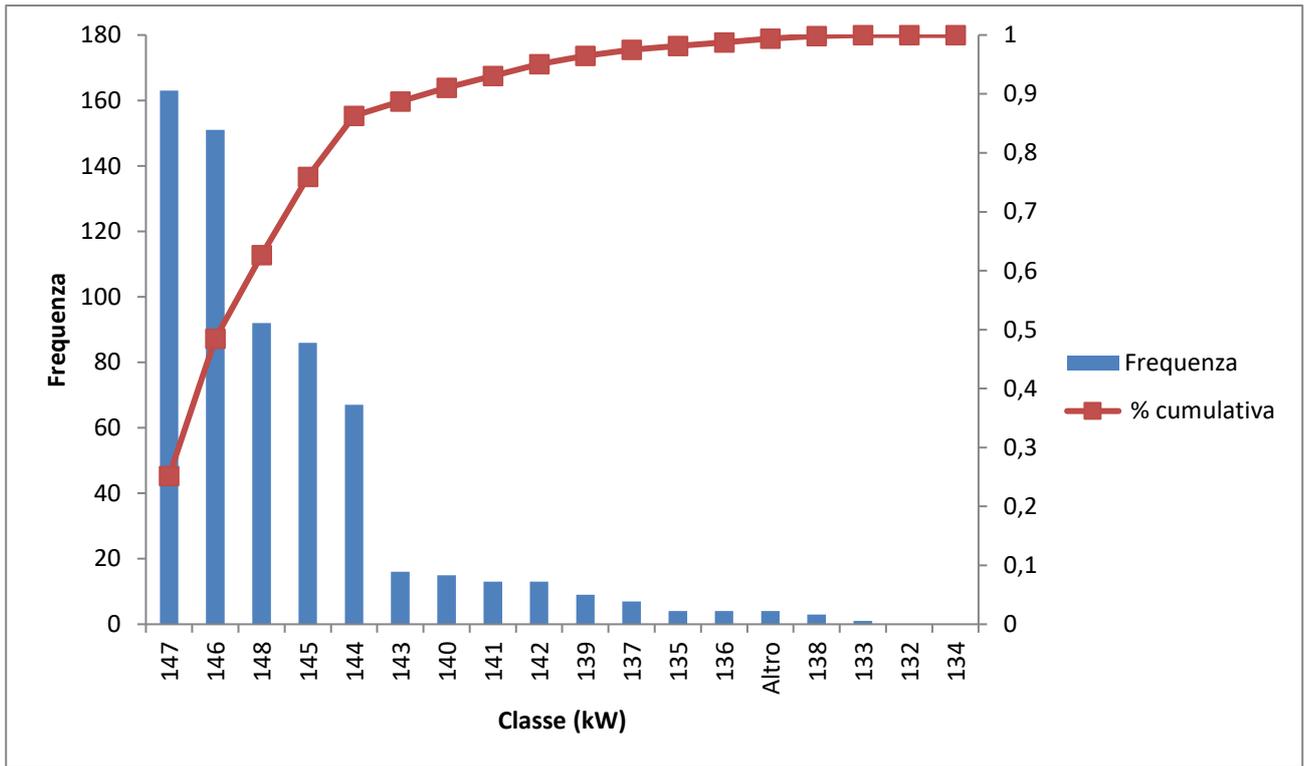


Figura A.37: Grafico D\_85.0%; R\_80.0%

#### A.4.4 Rotore 82.5%

Tabella A.75: Potenza D\_85.0%; R\_82.5%

<b>Potenza (kW)</b>	
Media	140,69
Deviazione standard	4,55
Curtosi	-0,99
Intervallo	21,74

Tabella A.76: Rielaborazione dati D\_85.0%; R\_82.5%

<b>Classe (kW)</b>	<b>Frequenza</b>	<b>% cumulativa</b>
129	0	0,00
130	2	0,00
131	0	0,00
132	11	0,02
133	14	0,04
134	25	0,08
135	29	0,12
136	35	0,18
137	49	0,25
138	49	0,33
139	52	0,41
140	33	0,46
141	33	0,51
142	35	0,56
143	37	0,62
144	61	0,71
145	50	0,79
146	54	0,87
147	43	0,93
148	25	0,97
149	10	0,99
150	6	1,00
151	1	1,00
Altro	1	1,00

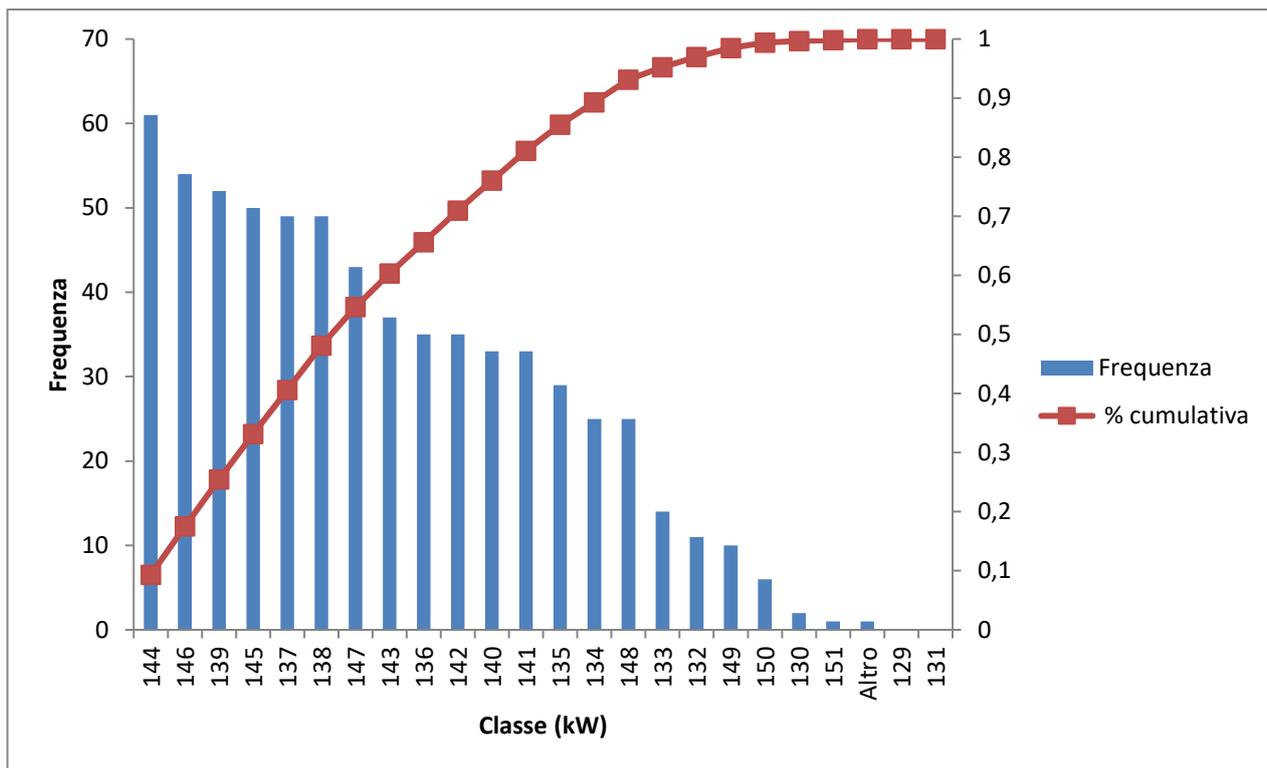


Figura A.38: Grafico D\_85.0%; R\_82.5%

## A.4.5 Rotore 85.0%

Tabella A.77: Potenza D\_85.0%; R\_85.0%

<b>Potenza (kW)</b>	
Media	141,53
Deviazione standard	4,47
Curtosi	-0,93
Intervallo	21,53

Tabella A.78: Rielaborazione dati D\_85.0%; R\_85.0%

<b>Classe (kW)</b>	<b>Frequenza</b>	<b>% cumulativa</b>
130	0	0,00
131	1	0,00
132	0	0,00
133	3	0,01
134	14	0,03
135	12	0,04
136	28	0,09
137	46	0,16
138	78	0,27
139	60	0,36
140	49	0,43
141	51	0,51
142	40	0,57
143	43	0,64
144	31	0,68
145	40	0,74
146	33	0,79
147	38	0,85
148	37	0,90
149	31	0,95
150	17	0,97
151	12	0,99
152	4	1,00
Altro	1	1,00

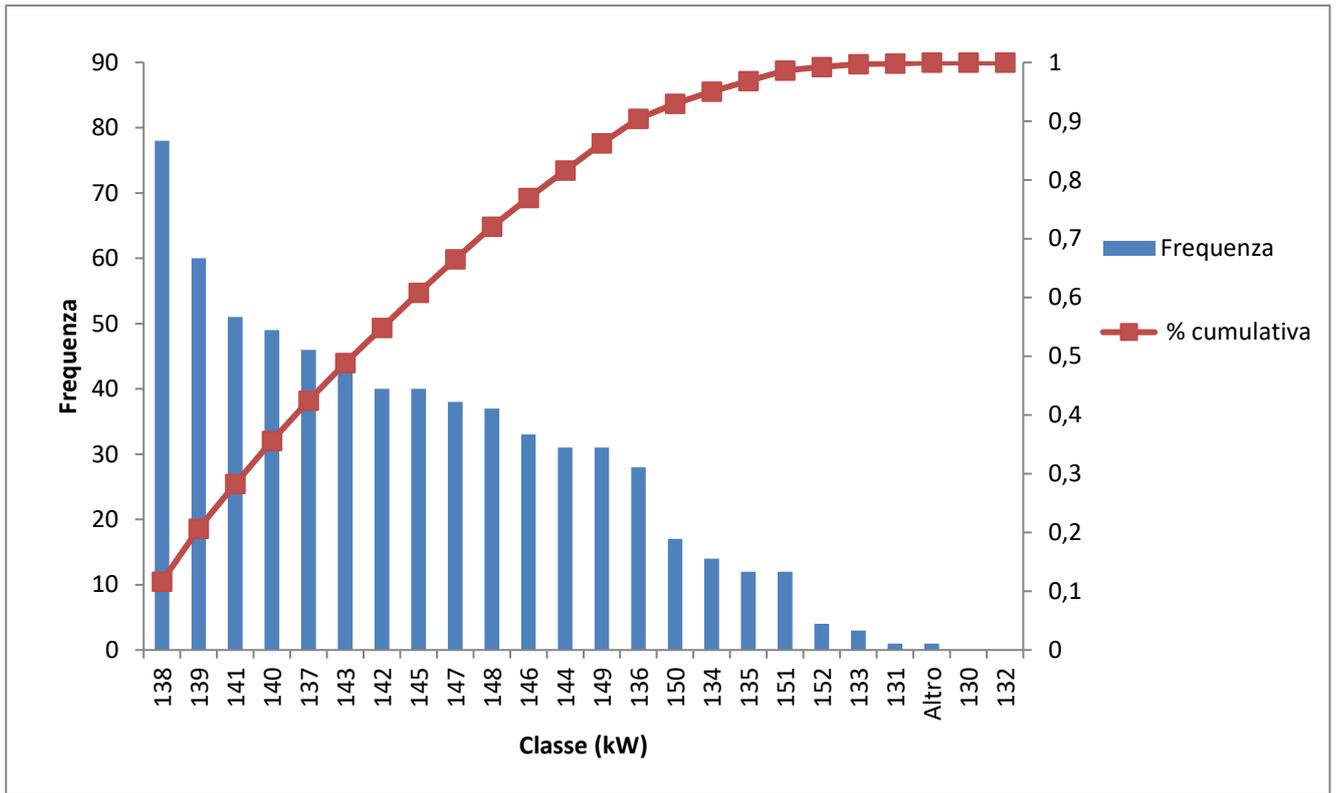


Figura A.39: Grafico D\_85.0%; R\_85.0%

## A.4.6 Rotore 87.5%

Tabella A.79: Potenza D\_85.0%; R\_87.5%

<b>Potenza (kW)</b>	
Media	141,69
Deviazione standard	4,94
Curtosi	-0,79
Intervallo	22,24

Tabella A.80: Rielaborazione dati D\_85.0%; R\_87.5%

<b>Classe (kW)</b>	<b>Frequenza</b>	<b>% cumulativa</b>
132	0	0,00
133	2	0,00
134	13	0,02
135	24	0,06
136	37	0,12
137	43	0,18
138	55	0,27
139	59	0,36
140	59	0,45
141	37	0,51
142	37	0,56
143	43	0,63
144	39	0,69
145	28	0,73
146	23	0,77
147	25	0,81
148	32	0,86
149	25	0,90
150	28	0,94
151	16	0,96
152	12	0,98
153	8	1,00
154	2	1,00
Altro	1	1,00

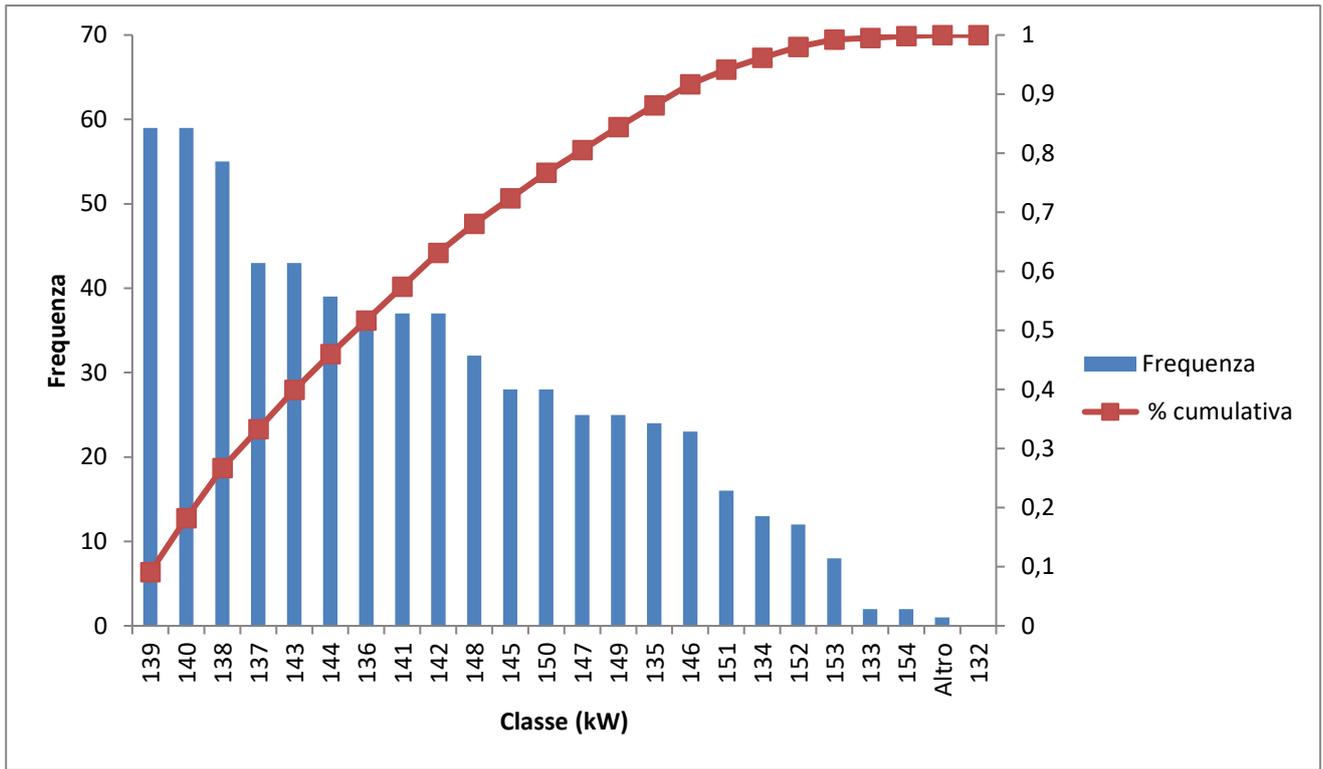


Figura A.40: Grafico D\_85.0%; R\_87.5%

## A.4.7 Rotore 90%

Tabella A.81: Potenza D\_85.0%; R\_90.0%

<b>Potenza (kW)</b>	
Media	149,57
Deviazione standard	3,49
Curtosi	-0,96
Intervallo	16,66

Tabella A.82: Rielaborazione dati D\_85.0%; R\_90.0%

<b>Classe (kW)</b>	<b>Frequenza</b>	<b>% cumulativa</b>
141	0	0,00
142	3	0,00
143	4	0,01
144	13	0,03
145	44	0,10
146	49	0,18
147	43	0,25
148	82	0,38
149	64	0,48
150	57	0,57
151	46	0,65
152	38	0,71
153	39	0,77
154	54	0,86
155	58	0,95
156	24	0,99
157	6	1,00
Altro	2	1,00

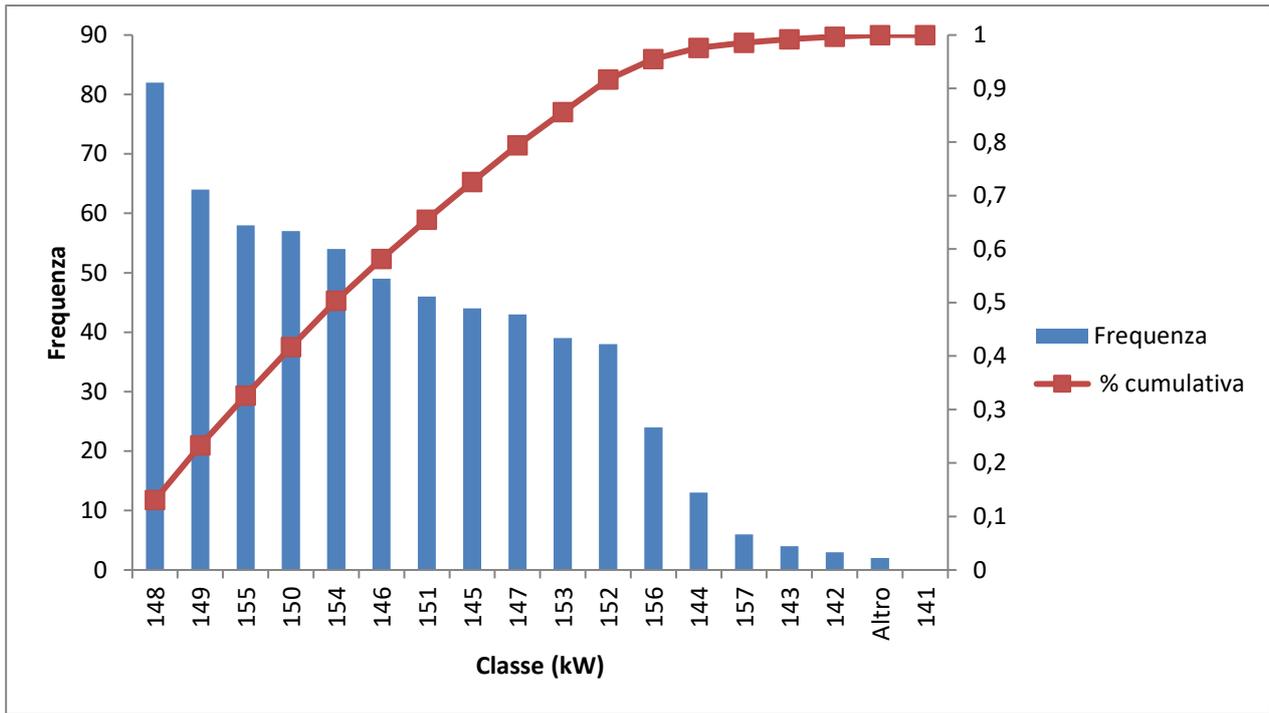


Figura A.42: Grafico D\_85.0%; R\_90.0%

## A.4.8 Rotore 92.5%

Tabella A.83: Potenza D\_85.0%; R\_92.5%

<b>Potenza (kW)</b>	
Media	148,84
Deviazione standard	3,64
Curtosi	-0,95
Intervallo	17,00

Tabella A.84: Rielaborazione dati D\_85.0%; R\_92.5%

<b>Classe (kW)</b>	<b>Frequenza</b>	<b>% cumulativa</b>
139	0	-
140	1	0,00
141	4	0,01
142	3	0,01
143	21	0,05
144	32	0,10
145	43	0,17
146	53	0,25
147	65	0,35
148	57	0,44
149	55	0,53
150	49	0,61
151	46	0,68
152	37	0,74
153	61	0,84
154	45	0,91
155	39	0,97
156	12	0,99
Altro	4	1,00

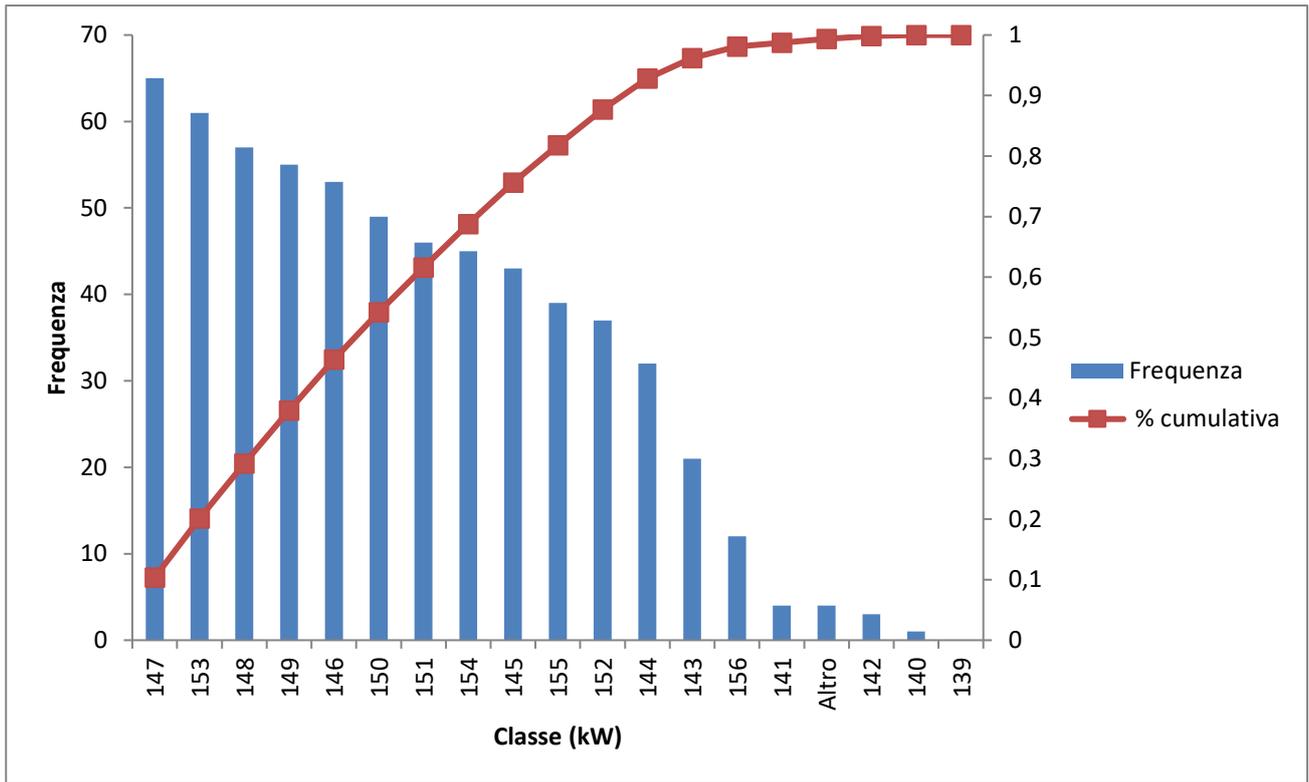


Figura A.43: Grafico D\_85.0%; R\_92.5%

## A.4.9 Rotore 95.0%

Tabella A.85: Potenza D\_85.0%; R\_95.0%

<b>Potenza (kW)</b>	
Media	150,61
Deviazione standard	3,78
Curtosi	-0,77
Intervallo	19,38

Tabella A.86: Rielaborazione dati D\_85.0%; R\_95.0%

<b>Classe (kW)</b>	<b>Frequenza</b>	<b>% cumulativa</b>
140	0	0,00
141	1	0,00
142	1	0,00
143	7	0,01
144	10	0,03
145	24	0,07
146	36	0,13
147	41	0,19
148	50	0,28
149	56	0,37
150	55	0,45
151	54	0,54
152	50	0,62
153	50	0,70
154	43	0,77
155	48	0,85
156	38	0,91
157	36	0,97
158	12	0,99
159	3	1,00
160	2	1,00
Altro	1	1,00

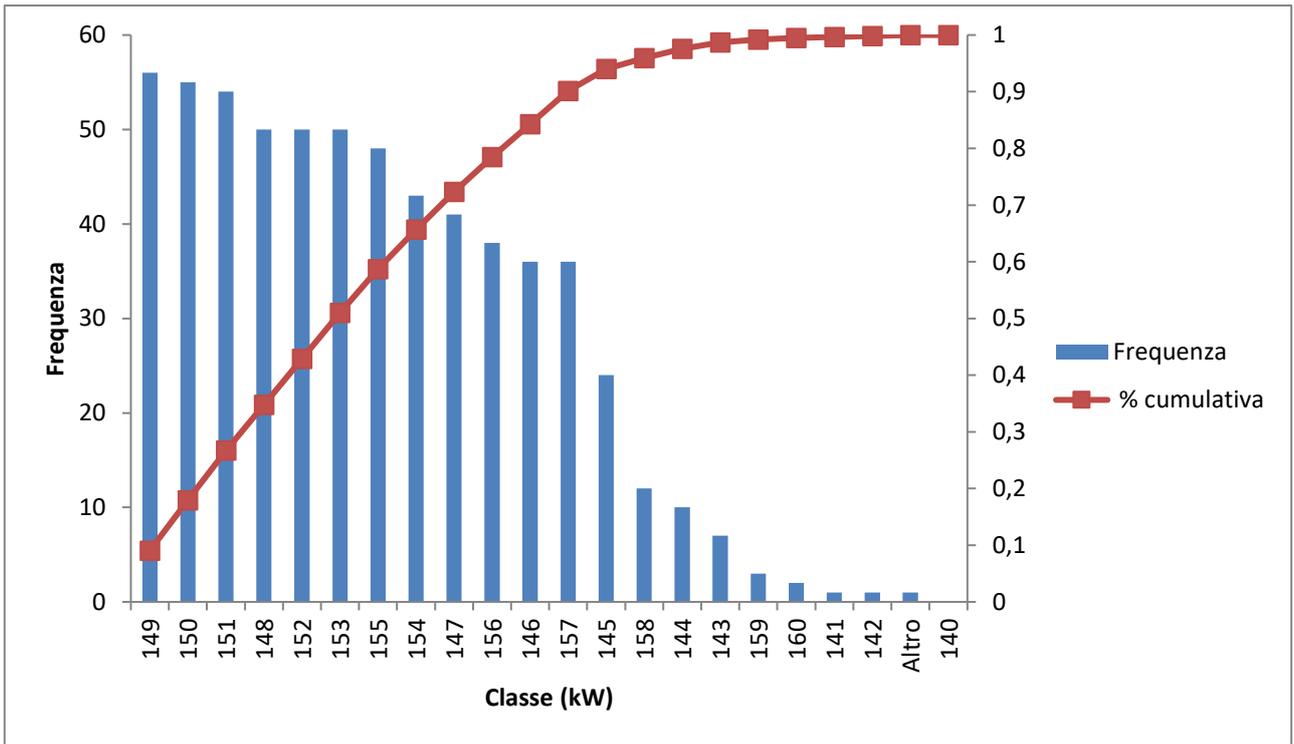


Figura A.44: Grafico D\_85.0%; R\_95.0%

## A.5 Statore 90%

### A.5.1 Rotore 87.5%

Tabella A.87: Potenza D\_90.0%; R\_87.5%

<b>Potenza (kW)</b>	
Media	146,13
Deviazione standard	1,48
Curtosi	4,80
Intervallo	10,99

Tabella A.88: Rielaborazione dati D\_90.0%; R\_87.5%

<b>Classe (kW)</b>	<b>Frequenza</b>	<b>% cumulativa</b>
138	0	0,00
139	2	0,00
140	2	0,01
141	5	0,01
142	9	0,03
143	7	0,04
144	13	0,06
145	62	0,15
146	160	0,40
147	215	0,73
148	138	0,94
149	37	1,00

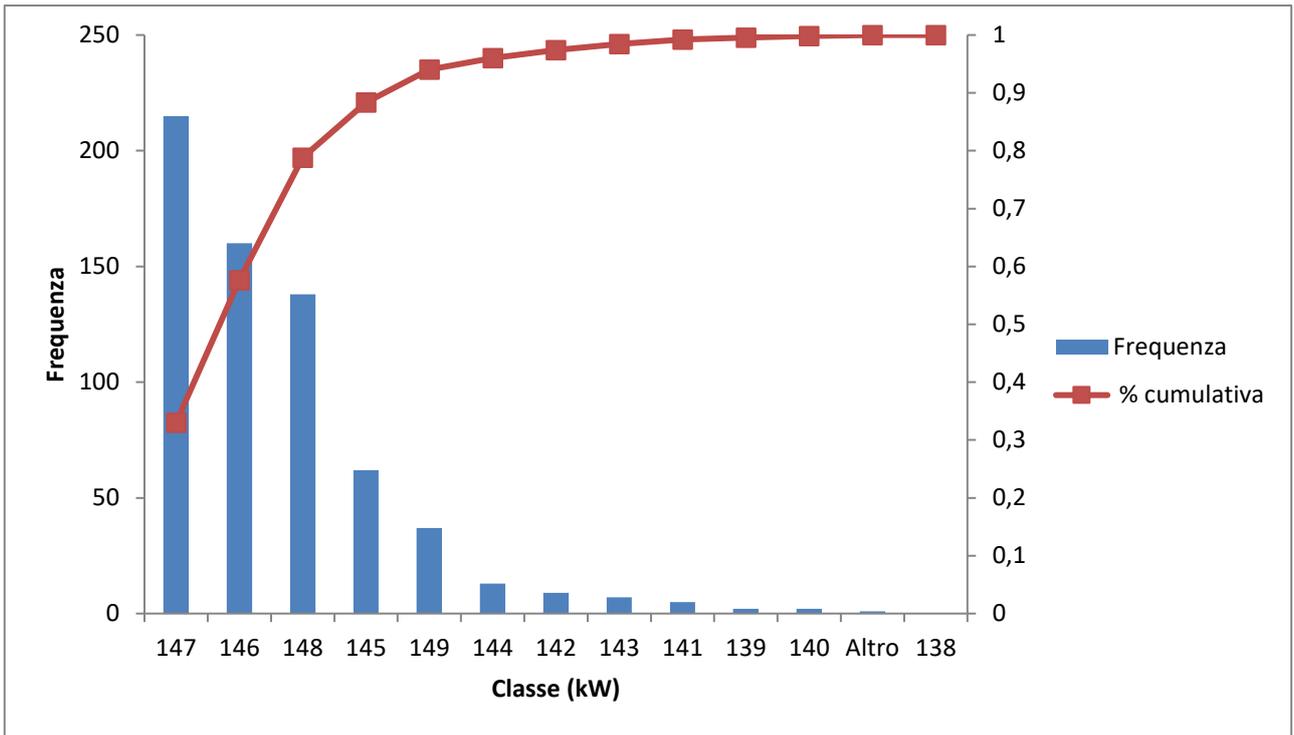


Figura A.45: Grafico D\_90.0%; R\_87.5%

## A.5.2 Rotore 90.0%

Tabella A.89: Potenza D\_90.0%; R\_90.0%

<b>Potenza (kW)</b>	
Media	145,85
Deviazione standard	2,55
Curtosi	0,21
Intervallo	12,56

Tabella A.90: Rielaborazione dati D\_90.0%; R\_90.0%

<b>Classe (kW)</b>	<b>Frequenza</b>	<b>% cumulativa</b>
138	0	0,00
139	5	0,01
140	15	0,03
141	20	0,06
142	32	0,11
143	27	0,16
144	29	0,20
145	54	0,29
146	81	0,42
147	114	0,60
148	128	0,80
149	95	0,95
150	26	0,99
Altro	5	1,00

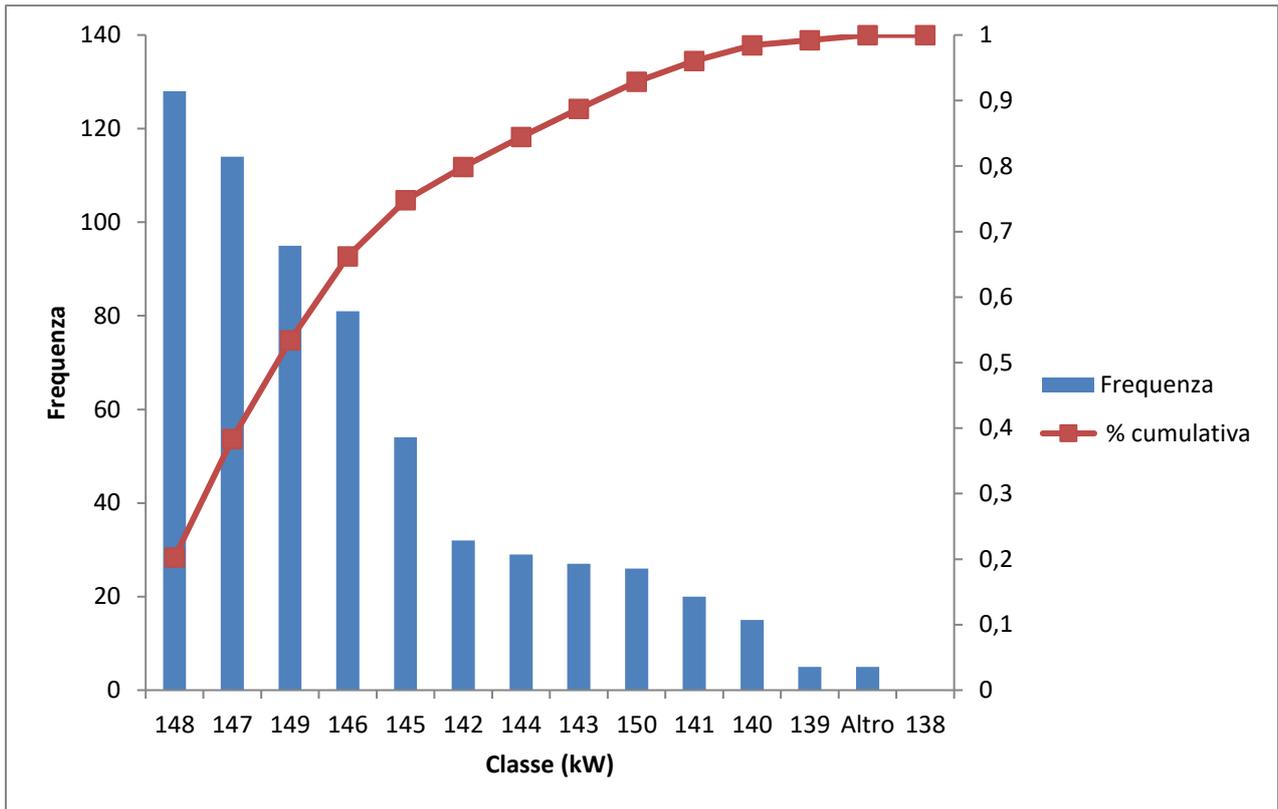


Figura A.46: Grafico D\_90.0%; R\_90.0%

### A.5.3 Rotore 92.5%

Tabella A.91: Potenza D\_90.0%; R\_92.5%

<b>Potenza (kW)</b>	
Media	144,24
Deviazione standard	3,32
Curtosi	-1,01
Intervallo	15,13

Tabella A.92: Rielaborazione dati D\_90.0%; R\_92.5%

<b>Classe (kW)</b>	<b>Frequenza</b>	<b>% cumulativa</b>
135	0	0,00
136	1	0,00
137	1	0,00
138	8	0,02
139	36	0,07
140	46	0,14
141	53	0,23
142	47	0,30
143	39	0,36
144	44	0,43
145	49	0,51
146	79	0,63
147	85	0,76
148	75	0,88
149	50	0,96
150	21	0,99
151	6	1,00
Altro	1	1,00

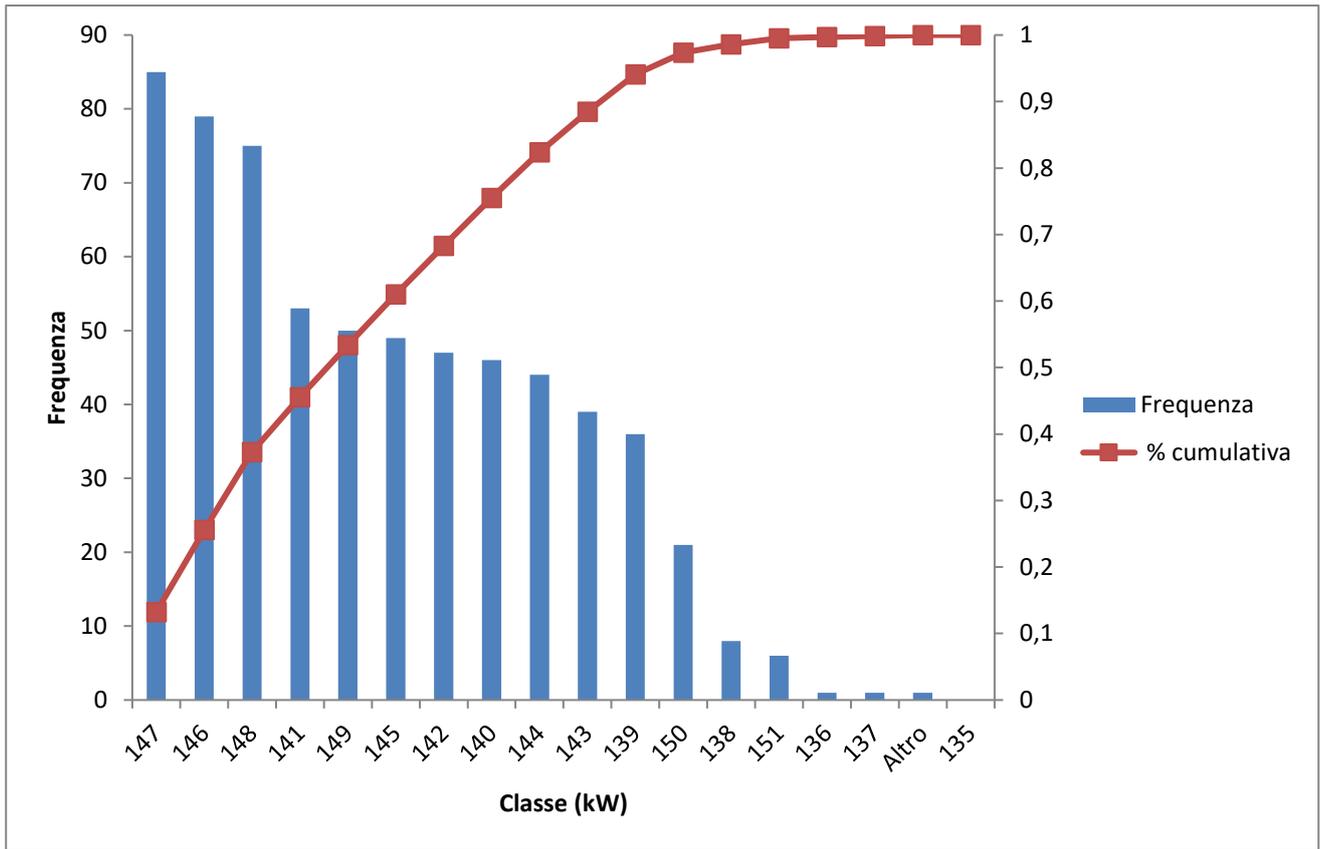


Figura A.46: Grafico D\_90.0%; R\_92.5%

## A.5.4 Rotore 95.0%

Tabella A.93: Potenza D\_90.0%; R\_95.0%

<b>Potenza (kW)</b>	
Media	142,09
Deviazione standard	3,45
Curiosi	-0,96
Intervallo	15,98

Tabella A.94: Rielaborazione dati D\_90.0%; R\_95.0%

<b>Classe (kW)</b>	<b>Frequenza</b>	<b>% cumulativa</b>
134	0	0,00
135	3	0,00
136	15	0,02
137	34	0,07
138	51	0,14
139	56	0,21
140	90	0,33
141	69	0,42
142	51	0,49
143	68	0,58
144	58	0,66
145	75	0,76
146	64	0,84
147	60	0,92
148	39	0,97
149	16	0,99
150	4	1,00
Altro	1	1,00

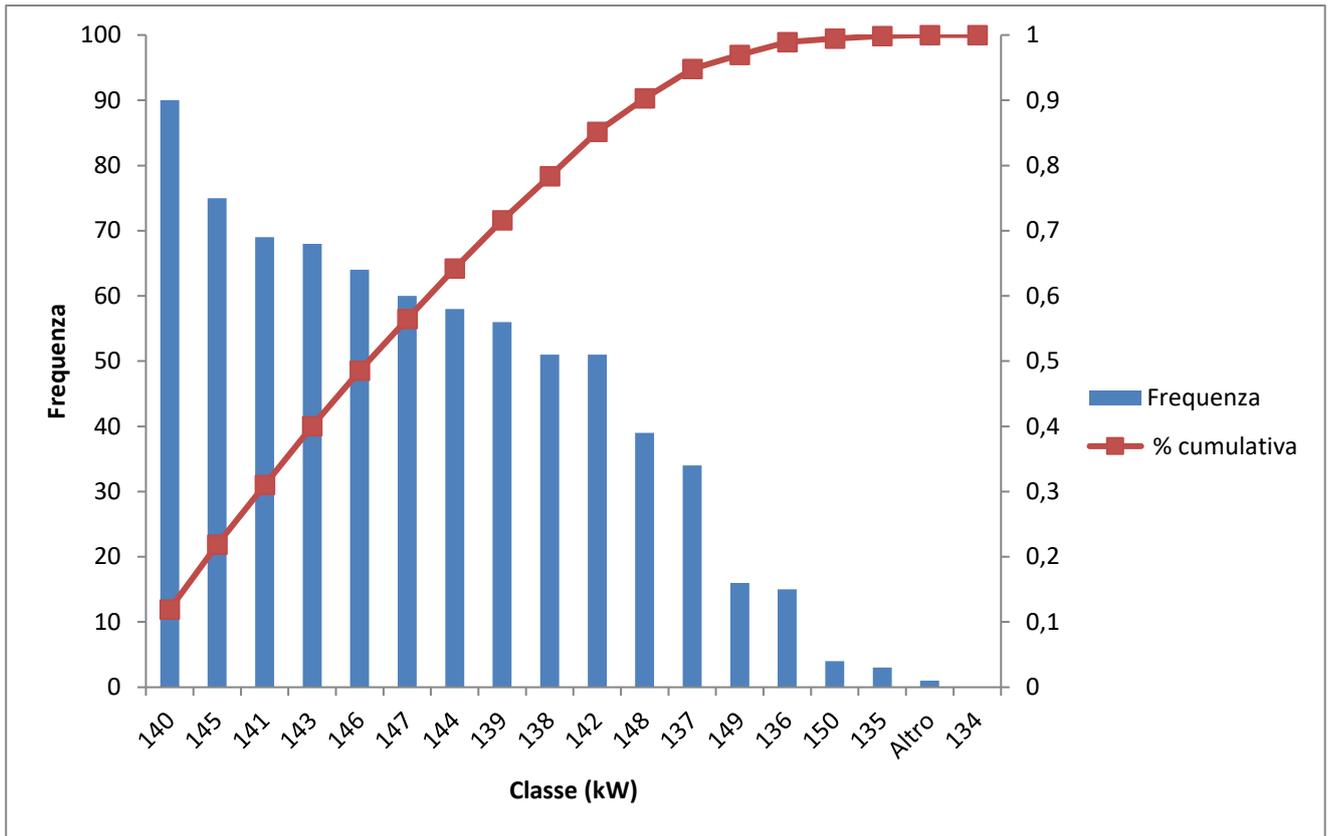


Figura A.47: Grafico D\_90.0%; R\_95.0%

## A.5.5 Rotore 97.5%

Tabella A.95: Potenza D\_90.0%; R\_97.5%

<b>Potenza (kW)</b>	
Media	140,81
Deviazione standard	3,39
Curtosi	-0,70
Intervallo	17,15

Tabella A.96: Rielaborazione dati D\_90.0%; R\_97.5%

<b>Classe (kW)</b>	<b>Frequenza</b>	<b>% cumulativa</b>
132	0	-
133	4	0,01
134	8	0,02
135	18	0,05
136	20	0,08
137	35	0,14
138	53	0,22
139	61	0,32
140	72	0,44
141	47	0,52
142	55	0,61
143	55	0,70
144	56	0,79
145	56	0,88
146	40	0,94
147	20	0,98
148	10	0,99
149	3	1,00
Altro	1	1,00

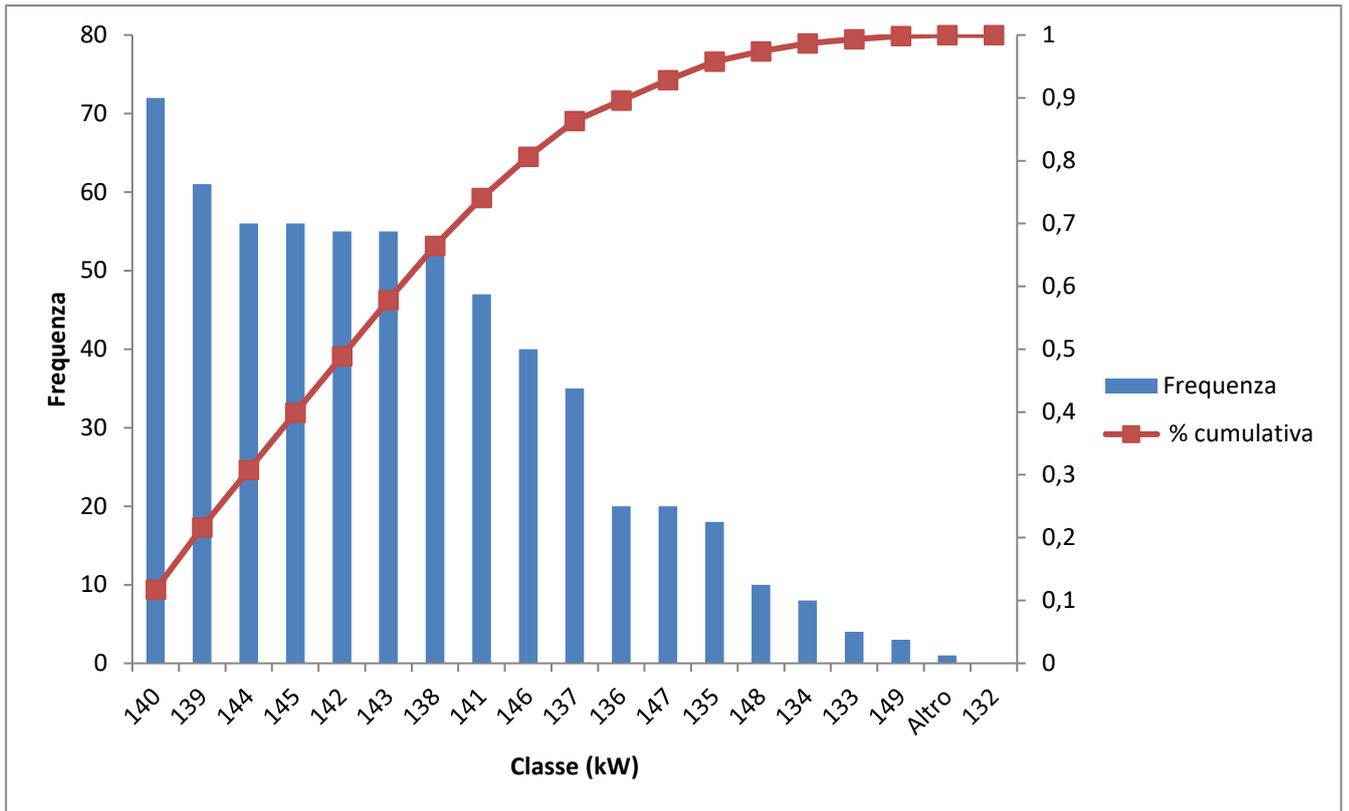


Figura A.48: Grafico D\_90.0%; R\_97.5%

## A.5.6 Rotore 100.0%

Tabella A.97: Potenza D\_90.0%; R\_100.0%

<b>Potenza (kW)</b>	
Media	140,65
Deviazione standard	3,43
Curtosi	-0,46
Intervallo	18,63

Tabella A.98: Rielaborazione dati D\_90.0%; R\_100.0%

<b>Classe (kW)</b>	<b>Frequenza</b>	<b>% cumulativa</b>
130	0	0,00
131	1	0,00
132	0	0,00
133	8	0,01
134	10	0,03
135	12	0,05
136	27	0,09
137	42	0,15
138	57	0,24
139	55	0,32
140	82	0,44
141	63	0,54
142	66	0,64
143	61	0,73
144	64	0,83
145	34	0,88
146	43	0,94
147	21	0,98
148	12	0,99
149	1	1,00
Altro	3	1

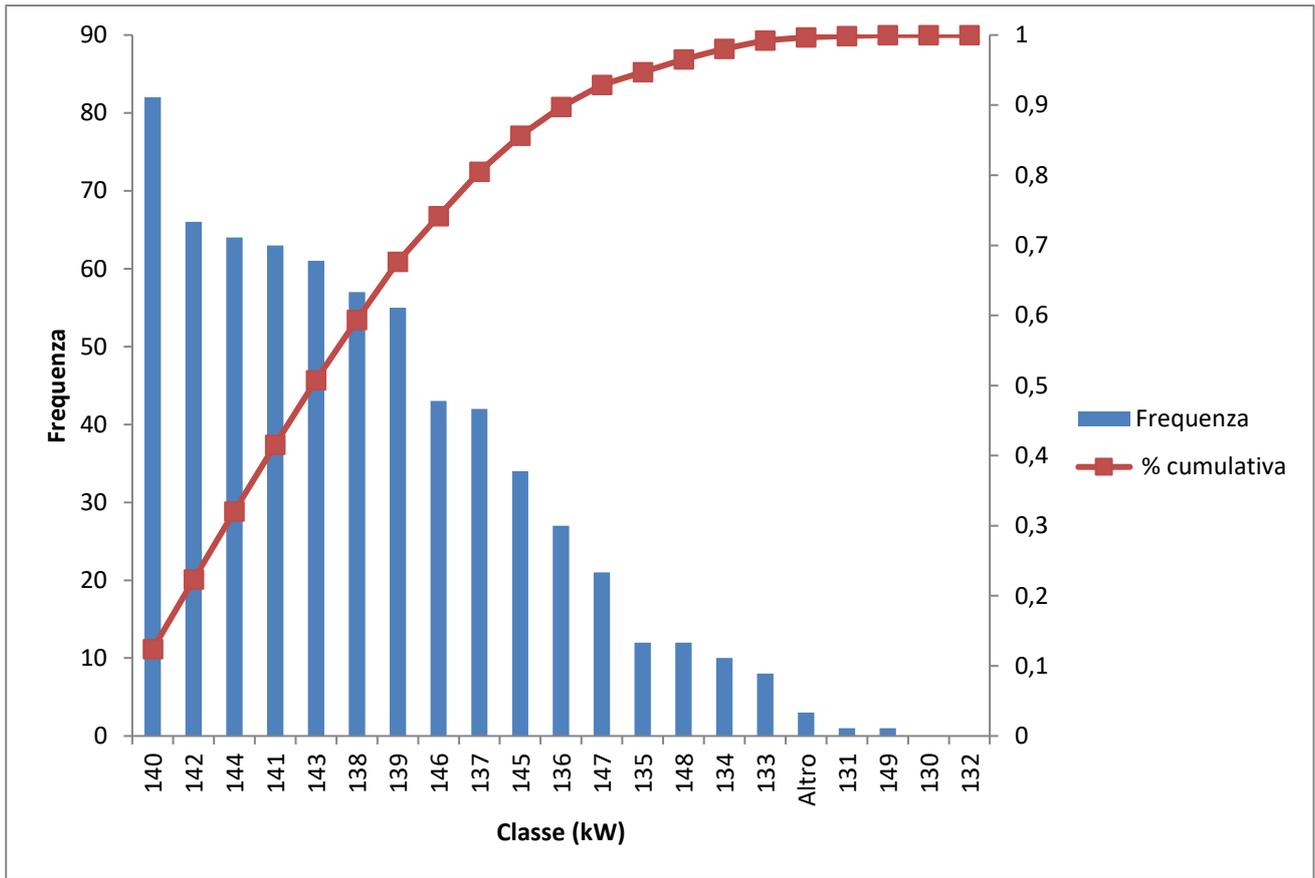


Figura A.49: Grafico D\_90.0%; R\_100.0%





# Bibliografia

- [1] Ballarin, A., Tempesta, T., & Thiene, M. (2008). I biocarburanti possono essere una risposta alla crisi energetica?. F. Angeli.
- [2] Lucchi, E., & Pracchi, V. (2013). Efficienza energetica e patrimonio costruito. *La sfida del miglioramento delle prefazioni nell'edilizia storica*, Milano, Maggioli Editore.
- [3] Castagna, L. (2008). Il pianeta in riserva: analisi e prospettive della prossima crisi energetica (Vol. 2). Edizioni Pendragon.
- [4] [https://www.enea.it/it/Ricerca\\_sviluppo/documenti/ricerca-di-sistema-elettrico/adp-mise-enea-2015-2017/progetto-polo/report-2018/rds\\_par2018\\_050.pdf](https://www.enea.it/it/Ricerca_sviluppo/documenti/ricerca-di-sistema-elettrico/adp-mise-enea-2015-2017/progetto-polo/report-2018/rds_par2018_050.pdf) .04/2021
- [5] [https://www.enea.it/it/Ricerca\\_sviluppo/documenti/ricerca-di-sistema-elettrico/adp-mise-enea-2015-2017/progetto-polo/report-2018/rds\\_par2018\\_051.pdf](https://www.enea.it/it/Ricerca_sviluppo/documenti/ricerca-di-sistema-elettrico/adp-mise-enea-2015-2017/progetto-polo/report-2018/rds_par2018_051.pdf) .04/2021
- [6] Franco, A., Garzia, A., & Magi, S. (2005, September). Analisi termodinamica dell'uso di idrogeno per la conversione energetica di combustibili fossili in impianti di potenza. In *Congresso Nazionale ATI* (Vol. 13, p. 15).
- [7] <https://www.terna.it/it/sistema-elettrico/statistiche/evoluzione-mercato-elettrico> .04/2021
- [8] <https://www.iea.org/data-and-statistics/?country=WORLD&fuel=Energy%20consumption&indicator=TotElecCons> .04/2021
- [9] <https://www.rinnovabili.it/energia/eolico/costi-di-produzione-elettrica/> .04/2021
- [10] Bardi, U. (2003). La fine del petrolio. *Editori Riuniti*.
- [11] Khoroshavin, L. B., Medvedev, O. A., & Belyakov, V. A. (2014). Tecnologia smaltimento dei rifiuti radioattivi (RRA). *Italian science review*, 10, 175-179.
- [12] Allen, J. C., & Barnes, D. F. (1985). The causes of deforestation in developing countries. *Annals of the association of American Geographers*, 75(2), 163-184.
- [13] Negri, N. (2010). Analisi economica di un impianto idroelettrico.
- [14] Nino, P., & Fabiani, S. Le potenzialità nel settore del micro e mini idroelettrico nell'ambito degli schemi irrigui, per la produzione di energia elettrica da fonte rinnovabile.
- [15] <https://www.eera-set.eu/eera-in-the-eu.html> .04/2021
- [16] <https://www.risanenergy.it/idroelettrico/classificazione-impianti.html>, 04/2021
- [17] Lozza, G. (2020). *Turbine a gas e cicli combinati*. Società Editrice Esculapio.
- [18] Pelagalli, L. UNIVPM. Materiale didattico del corso Macchine e sistemi energetici-M/Z.2020/2021

- [19] Marchegiani, A. (2004). Turbinas Pelton. *Universidad Nacional del COMAHE, facultad de ingeniería, Departamento de mecánica aplicada, Laboratorio de maquinas hidráulicas. Buenos Aires.*
- [20] Cobb, B. R., & Sharp, K. V. (2013). Impulse (Turgo and Pelton) turbine performance characteristics and their impact on pico-hydro installations. *Renewable energy*, 50, 959-964.
- [21] Wu, Y., Liu, S., Dou, H. S., Wu, S., & Chen, T. (2012). Numerical prediction and similarity study of pressure fluctuation in a prototype Kaplan turbine and the model turbine. *Computers & Fluids*, 56, 128-142.
- [22] Evangelisti, G. (1964). *Impianti idroelettrici*. Pàtron.
- [23] Biondi, E., Vagge, I., Baldoni, M., & Taffetani, F. (2004). Biodiversità fitocenotica e paesaggistica dei fiumi dell'Italia centro-settentrionale: aspetti fitosociologici e sinfitosociologici. *Studi Trent. Sci. Nat., Acta Biol*, 80(2003), 13-21.
- [24] 2021COPELLI, F. (2011). Aque urbis Romae. Musealizzazione degli acquedotti romani.
- [25] <https://www.automation24.it/> .04/2021
- [26] Simonini, A. (2016). Calibrazione del modello CFD di una turbina Kaplan.
- [27] TESI, M. (2020). Sviluppo e messa a punto di un algoritmo per simulare la dinamica di reazioni chimiche a pressioni molto elevate.
- [28] Della Volpe, R. (1994). *Macchine*. Liguori Editore Srl.

