



REGIONE
PUGLIA



PROVINCIA DI
FOGGIA



COMUNE DI
TROIA

POTENZIAMENTO DEL PARCO EOLICO DI TROIA SAN CIREO

"REPOWERING" di un impianto di produzione di energia elettrica da fonte rinnovabile eolica da ubicarsi nel comune di Troia (FG) e delle relative opere di connessione alla Stazione Elettrica SE RTN

POTENZA NOMINALE IMPIANTO: 57.6 MW

ELABORATO

ANALISI DI PRODUCIBILITA' DELL'IMPIANTO

IDENTIFICAZIONE ELABORATO

Livello progetto	Codice Pratica AU	Documento	Codice elaborato	n° foglio	n° tot. fogli	Nome file	Data	Scala
PD		R	2.01_03	1	35	2.01_03_PRODUIZIMPIANTO	Agosto 2023	

REVISIONI

Rev. n°	Data	Descrizione	Redatto	Verificato	Approvato
00	01/08/2023	I Emissione	ERG	ADORNO	AMBRON

PROGETTAZIONE:

MATE System S.r.l.

70020 Cassano delle Murge (BA)

Via Goffredo Mameli, n.5

tel. +39 080 5746758

mail: info@matesystemsrl.it

pec: matesystem@pec.it

IL PROGETTISTA:

Dott.Ing. Francesco Ambron



DIRITTI Questo elaborato è di proprietà della ERG EOLICA SAN VINCENZO S.r.l. pertanto non può essere riprodotto né integralmente, né in parte senza l'autorizzazione scritta della stessa. Da non utilizzare per scopi diversi da quelli per cui è stato fornito.

PROPONENTE:

ERG EOLICA SAN VINCENZO S.r.l.

Via DE MARINI n° 1

16149 GENOVA

ERG Eolica San Vincenzo





TROIA SAN CIREO

STUDIO ANEMOLOGICO

Valutazione risorsa eolica e analisi di producibilità

1	17/10/2023	Prima emissione	EN	CDM	FC
REV.	DATA	ATTIVITÀ	REDATTO	VERIFICATO	APPROVATO

CODICE DOCUMENTO					NOME FILE	PAGINA
PRG	DISC.	TIPO DOC.	PROG.	REV	TSC-ENG-REL-0044-01	1 di 34
TSC	ENG	REL	0044	1		

CODICE DOCUMENTO					OGGETTO DELL' ELABORATO	PAGINA
IMP.	DISC.	TIPO DOC.	PROG.	REV.	TROIA SAN CIREO (FG) Studio Anemologico Valutazione risorsa eolica e analisi di producibilità	2 di 34
TSC	ENG	REL	0044	1		

INDICE

1	INTRODUZIONE	4
2	RAPPRESENTAZIONE DEL SITO	5
2.1	Descrizione del sito	5
2.2	Layout ripotenziato	7
2.3	Aerogeneratori adottati	8
2.4	Allacciamento alla rete elettrica	14
3	CARATTERIZZAZIONE ANEMOLOGICA	15
3.1	Strumenti utilizzati	15
3.2	Raccolta dei dati e validazione	16
3.3	Analisi anemologica e statistica dei dati	17
4	CURVA DI POTENZA	22
5	APPLICAZIONE DEL MODELLO CFD	25
5.1	Il modello digitale del terreno	25
5.2	La rugosità	27
5.3	La risorsa eolica	28
5.4	Risultati del modello	29
6	ANALISI DELLE PERDITE E DELLE INCERTEZZE	31

CODICE DOCUMENTO					OGGETTO DELL' ELABORATO	PAGINA
IMP.	DISC.	TIPO DOC.	PROG.	REV.	TROIA SAN CIREO (FG) Studio Anemologico Valutazione risorsa eolica e analisi di producibilità	3 di 34
TSC	ENG	REL	0044	1		

LISTA DELLE FIGURE

<i>Figura 1: Inquadramento del sito</i>	5
<i>Figura 2: Inquadramento del sito</i>	6
<i>Figura 3: Stazioni di misura in sito</i>	6
<i>Figura 4: Validazione anemometro</i>	16
<i>Figura 5: Profilo giornaliero di velocità TSC_Met2</i>	17
<i>Figura 6: Profilo mensile di velocità TSC_Met2</i>	17
<i>Figura 7: Profilo di velocità verticale</i>	18
<i>Figura 8: Rosa del vento TSC_Met2 80m</i>	20
<i>Figura 9: Tabella di frequenze TSC Met2 80m</i>	21
<i>Figura 10: Dati storici stazione meteorologica di Foggia</i>	22
<i>Figura 11: Aerogeneratore Enercon E175 6.0MW</i>	22
<i>Figura 12: Aerogeneratore Siemens Gamesa SG170 6.6MW</i>	22
<i>Figura 13: Aerogeneratore Vestas V172 7.2MW</i>	22
<i>Figura 14: Discretizzazione orizzontale del dominio di calcolo</i>	25
<i>Figura 15: Discretizzazione verticale del dominio di calcolo</i>	26
<i>Figura 16: Mappa di rugosità</i>	27
<i>Figura 17: Mappa di ventosità a 117m s.l.s</i>	28

CODICE DOCUMENTO					OGGETTO DELL' ELABORATO	PAGINA
IMP.	DISC.	TIPO DOC.	PROG.	REV.	TROIA SAN CIREO (FG) Studio Anemologico Valutazione risorsa eolica e analisi di producibilità	4 di 34
TSC	ENG	REL	0044	1		

1 INTRODUZIONE

La Stima della Producibilità Energetica rappresenta la previsione della produzione annuale di un progetto di impianto eolico, che potrebbe essere costruito una volta ottenute tutte le autorizzazioni del caso e verificata la remuneratività del progetto stesso.

Si tratta di uno studio volto a stimare la producibilità di un impianto esistente che viene ripotenziato grazie all'installazione di macchine innovative con potenza unitaria maggiore rispetto alle macchine attualmente installate.

La Stima della Producibilità Energetica è il frutto dell'integrazione fra la metodologia che ERG ha sviluppato riguardo al processo di analisi dei dati provenienti dalle torri anemometriche di riferimento e/o di micrositing, e una procedura di stima basata sulla modellazione del flusso di vento tramite fluidodinamica computazionale (CFD). In merito alla simulazione del flusso di vento, ci si è avvalsi dei software di modellazione del vento WindSim e Windpro, mediante i quali vengono implementate le seguenti fasi:

- Calcolo del flusso di vento
- Estrapolazione della V media a quota mozzo
- Calcolo dell'energia annua producibile
- Stima delle perdite per scia

Mentre per le fasi seguenti ci si è avvalsi della procedura di calcolo messa a punto internamente:

- Trattamento e validazione dei dati anemometrici
- Storicizzazione del dato
- Valutazione delle restanti perdite
- Analisi dell'incertezza a cui è sottoposta la stima

CODICE DOCUMENTO					OGGETTO DELL' ELABORATO	PAGINA
IMP.	DISC.	TIPO DOC.	PROG.	REV.	TROIA SAN CIREO (FG) Studio Anemologico Valutazione risorsa eolica e analisi di producibilità	5 di 34
TSC	ENG	REL	0044	1		

2 RAPPRESENTAZIONE DEL SITO

2.1 Descrizione del sito

L'impianto esistente è situato nella provincia di Foggia e comprende il comune di Troia. Il parco attuale è costituito da un'unità produttiva composta da 15 turbine eoliche Vestas V90 da 2000kW, per una potenza complessiva di 30 MW.

Il nuovo layout ripotenziato si sviluppa nell'area del parco già esistente e prevede un numero totale di 8 macchine.

La zona presenta un'orografia piuttosto semplice e pianeggiante, con altezze che arrivano fino a 380 m s.l.m.

L'impianto si trova nelle vicinanze di Troia.

Nelle vicinanze dell'impianto non sono presenti aree boschive degne di nota.

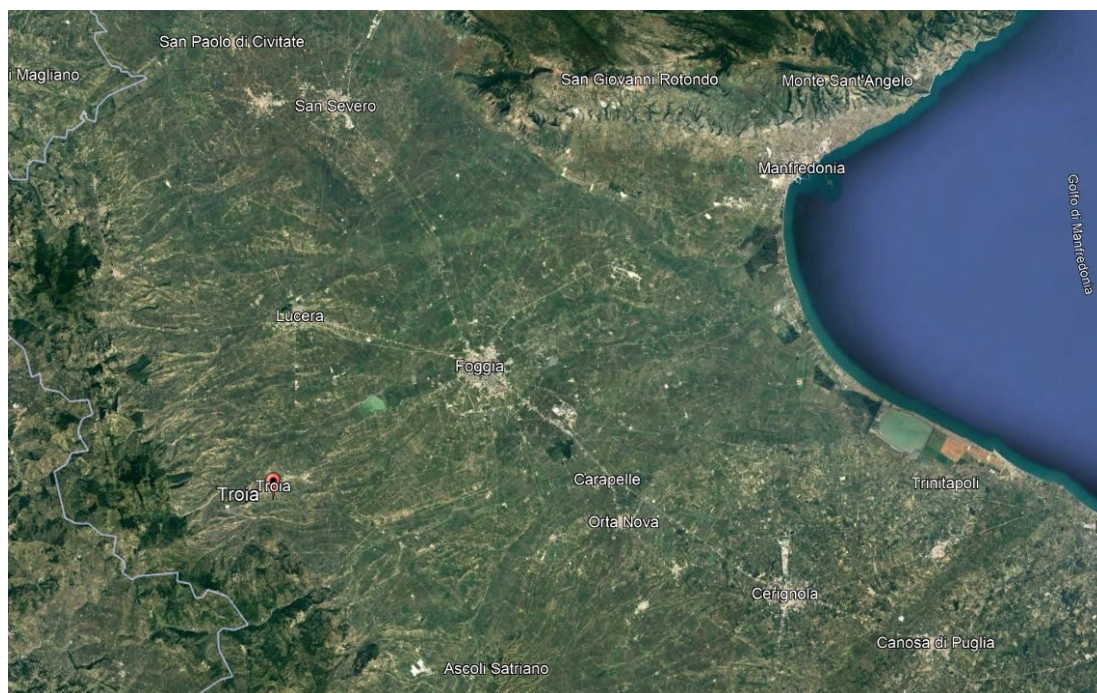


Figura 1: Inquadramento del sito

CODICE DOCUMENTO					OGGETTO DELL' ELABORATO	PAGINA
IMP.	DISC.	TIPO DOC.	PROG.	REV.	TROIA SAN CIREO (FG) Studio Anemologico Valutazione risorsa eolica e analisi di producibilità	6 di 34
TSC	ENG	REL	0044	1		



Figura 2: Inquadramento del sito

CODICE DOCUMENTO					OGGETTO DELL' ELABORATO	PAGINA
IMP.	DISC.	TIPO DOC.	PROG.	REV.	TROIA SAN CIREO (FG) Studio Anemologico Valutazione risorsa eolica e analisi di producibilità	7 di 34
TSC	ENG	REL	0044	1		

2.2 Layout ripotenziato

Il layout di impianto è composto da 8 aerogeneratori, dislocati all'interno del territorio comunale di Troia.

Le coordinate (UTM WGS84) e le quote relative ad ogni postazione di macchina sono:

Coordinate Geo [deg,min,sec] WGS84			
WTG	Est	Nord	Quota [m]
R-TSC01	15°17'21"	41°20'07"	379
R-TSC02	15° 17'42"	41°20'05"	369
R-TSC03	15° 18'01"	41°20'05"	358
R-TSC04	15°18'28"	41°20'06"	345
R-TSC05	15°18'48"	41°20'05"	336
R-TSC06	15°17'24"	41°20'23"	330
R-TSC07	15°18'05"	41°20'28"	308
R-TSC08	15°18'26"	41°20'26"	302

CODICE DOCUMENTO					OGGETTO DELL' ELABORATO	PAGINA
IMP.	DISC.	TIPO DOC.	PROG.	REV.	TROIA SAN CIREO (FG) Studio Anemologico Valutazione risorsa eolica e analisi di producibilità	8 di 34
TSC	ENG	REL	0044	1		

2.3 Aerogeneratori adottati

Per la stima di producibilità energetica di Troia San Cireo vengono prese in esame tre diverse tipologie di aerogeneratori, di cui si riportano di seguito le relative caratteristiche e curve di potenza garantite dal costruttore a densità standard ($\rho=1.225 \text{ m}^3/\text{kg}$).

Il primo modello è la Enercon E175 6.0MW ad altezza mozzo 132.5 m la cui curva di potenza fornita dal costruttore alla densità media di sito è:

Manufacturer	ENERCON
Type/Version	E-175 EP5
Rated power	6,000.0 kW
Secondary generator	kW
Rotor diameter	175.0 m
Tower	!O! Tubular
Grid connection	50 Hz
Country (origin)	
Blade type	
Generator type	Variable
Rated	rpm
Initial	rpm
Default hub height	112.4 m
Alternative hub heights (m)	132.5 162.0
	Add Remove

CODICE DOCUMENTO					OGGETTO DELL' ELABORATO	PAGINA
IMP.	DISC.	TIPO DOC.	PROG.	REV.	TROIA SAN CIREO (FG) Studio Anemologico Valutazione risorsa eolica e analisi di producibilità	9 di 34
TSC	ENG	REL	0044	1		

Name
Mode 00 - OM-0-0 (6000 kW) Auto

Source
ENERCON GmbH

Date (m/d/yyyy) Stop wind speed
6/29/2023 25.0 m/s

Air density Tip angle
1.225 kg/m³ 0.00 °

Measured on high voltage side of step up transformer

Power control
 Stall Pitch Active stall
 Standard stall Standard pitch User defined

Uncertainty
 None IEC cat A & IEC cat IEC combined

Remarks
D02772017_2_0_de_Betriebsmodus OM-0-0 - E-175 EP5 - 6000 kW.pdf

Edit/show power curve
 Edit/show CT curve
 Edit/show uncertainty

Wind speed [m/s]	Power [kW]	Cp
2.50	57.00	0.248
3.00	147.00	0.370
3.50	272.00	0.431
4.00	438.00	0.465
4.50	650.00	0.484
5.00	901.00	0.489
5.50	1,205.00	0.492
6.00	1,565.00	0.492
6.50	1,986.00	0.491
7.00	2,465.00	0.488
7.50	2,992.00	0.481
8.00	3,545.00	0.470
8.50	4,093.00	0.452
9.00	4,600.00	0.428
9.50	5,032.00	0.398
10.00	5,375.00	0.365
10.50	5,624.00	0.330
11.00	5,794.00	0.295
11.50	5,901.00	0.263
12.00	5,964.00	0.234
12.50	5,999.00	0.208
13.00	6,000.00	0.185
13.50	6,000.00	0.166
14.00	6,000.00	0.148
14.50	6,000.00	0.134
15.00	6,000.00	0.121
15.50	6,000.00	0.109
16.00	6,000.00	0.099
16.50	6,000.00	0.091
17.00	6,000.00	0.083
17.50	6,000.00	0.076
18.00	6,000.00	0.070
18.50	6,000.00	0.064
19.00	6,000.00	0.059
19.50	5,992.00	0.055
20.00	5,939.00	0.050
20.50	5,853.00	0.046
21.00	5,721.00	0.042
21.50	5,534.00	0.038
22.00	5,278.00	0.034
22.50	4,951.00	0.030
23.00	4,549.00	0.025
23.50	4,080.00	0.021
24.00	3,163.00	0.016
24.50	2,548.00	0.012
25.00	2,070.00	0.009

CODICE DOCUMENTO					OGGETTO DELL' ELABORATO	PAGINA
IMP.	DISC.	TIPO DOC.	PROG.	REV.	TROIA SAN CIREO (FG) Studio Anemologico Valutazione risorsa eolica e analisi di producibilità	10 di 34
TSC	ENG	REL	0044	1		

Il secondo aereogeneratore preso in esame è il modello Siemens Gamesa SG170 da 6.6MW, altezza mozzo 135 m:

Manufacturer	Siemens Gamesa
Type/Version	SG 6.6-170
Rated power	6,600.0 kW
Secondary generator	kW
Rotor diameter	170.0 m
Tower	!O! Tubular
Grid connection	50/60 Hz
Country (origin)	Denmark
Blade type	
Generator type	Variable
Rated	8.8 rpm
Initial	5.1 rpm
Default hub height	115.0 m
Alternative hub heights (m)	115.0 135.0 145.0
	Add Remove

CODICE DOCUMENTO					OGGETTO DELL' ELABORATO	PAGINA
IMP.	DISC.	TIPO DOC.	PROG.	REV.	TROIA SAN CIREO (FG) Studio Anemologico Valutazione risorsa eolica e analisi di producibilità	11 di 34
TSC	ENG	REL	0044	1		

Name
(AM 0, 6.6MW) - 1.225 kg/m3 Auto

Source
SGRE

Date (m/d/yyyy) Stop wind speed m/s

Air density kg/m3 Tip angle °

Measured on high voltage side of step up transformer

Power control
 Stall Pitch Active stall
 Ct curve
 Standard stall Standard pitch User defined
 Uncertainty
 None IEC cat A & IEC cat IEC combined
 Remarks
 D2850368-001 SGRE ON SG 6.6-170 Standard Ct and Power Curve
 Rev.0 Mode AM 0 - Air Density.pdf

Edit/show power curve
 Edit/show CT curve
 Edit/show uncertainty

Wind speed [m/s]	Power [kW]	Cp
3.00	89.00	0.237
3.50	178.00	0.299
4.00	328.00	0.369
4.50	522.00	0.412
5.00	758.00	0.436
5.50	1,040.00	0.450
6.00	1,376.00	0.458
6.50	1,771.00	0.464
7.00	2,230.00	0.468
7.50	2,757.00	0.470
8.00	3,346.00	0.470
8.50	3,974.00	0.465
9.00	4,600.00	0.454
9.50	5,177.00	0.434
10.00	5,660.00	0.407
10.50	6,024.00	0.374
11.00	6,272.00	0.339
11.50	6,424.00	0.304
12.00	6,510.00	0.271
12.50	6,556.00	0.241
13.00	6,579.00	0.215
13.50	6,590.00	0.193
14.00	6,596.00	0.173
14.50	6,598.00	0.156
15.00	6,599.00	0.141
15.50	6,600.00	0.127
16.00	6,600.00	0.116
16.50	6,600.00	0.106
17.00	6,600.00	0.097
17.50	6,600.00	0.089
18.00	6,600.00	0.081
18.50	6,468.00	0.073
19.00	6,336.00	0.066
19.50	6,204.00	0.060
20.00	6,072.00	0.055
20.50	5,940.00	0.050
21.00	5,808.00	0.045
21.50	5,676.00	0.041
22.00	5,544.00	0.037
22.50	5,412.00	0.034
23.00	5,280.00	0.031

CODICE DOCUMENTO					OGGETTO DELL' ELABORATO	PAGINA
IMP.	DISC.	TIPO DOC.	PROG.	REV.	TROIA SAN CIREO (FG) Studio Anemologico Valutazione risorsa eolica e analisi di producibilità	12 di 34
TSC	ENG	REL	0044	1		

Il terzo aerogeneratore preso in esame è il modello Vestas V172 7.2MW, altezza mozzo 117 m:

Manufacturer	VESTAS
Type/Version	V172-7.2
Rated power	7,200.0 kW
Secondary generator	kW
Rotor diameter	172.0 m
Tower	!O! Tubular
Grid connection	50/60 Hz
Country (origin)	Denmark
Blade type	
Generator type	Variable
Rated	rpm
Initial	rpm
Default hub height	166.0 m
Alternative hub heights (m)	117.0 114.0 150.0
	Add Remove

CODICE DOCUMENTO					OGGETTO DELL' ELABORATO	PAGINA
IMP.	DISC.	TIPO DOC.	PROG.	REV.	TROIA SAN CIREO (FG) Studio Anemologico Valutazione risorsa eolica e analisi di producibilità	13 di 34
TSC	ENG	REL	0044	1		

Name
Level 0 & 0S - Calculated - PO7200 - 07-2022 Auto

Source
Manufacturer

Date (m/d/yyyy) Stop wind speed
7/8/2022 25.0 m/s

Air density Tip angle
1.225 kg/m3 0.00 °

Measured on high voltage side of step up transformer

Power control
 Stall Pitch Active stall
Ct curve
 Standard stall Standard pitch User defined
Uncertainty
 None IEC cat A & IEC cat IEC combined

Remarks
Based Vestas Document no.: 0127-1584 V01.

Edit/show power curve
 Edit/show CT curve
 Edit/show uncertainty

Wind speed [m/s]	Power [kW]	Cp
3.00	32.00	0.083
3.50	129.00	0.211
4.00	288.00	0.316
4.50	481.00	0.371
5.00	715.00	0.402
5.50	999.00	0.422
6.00	1,340.00	0.436
6.50	1,739.00	0.445
7.00	2,203.00	0.451
7.50	2,729.00	0.455
8.00	3,324.00	0.456
8.50	3,986.00	0.456
9.00	4,685.00	0.452
9.50	5,314.00	0.436
10.00	5,904.00	0.415
10.50	6,441.00	0.391
11.00	6,854.00	0.362
11.50	7,078.00	0.327
12.00	7,160.00	0.291
12.50	7,195.00	0.259
13.00	7,200.00	0.230
13.50	7,200.00	0.206
14.00	7,200.00	0.184
14.50	7,200.00	0.166
15.00	7,200.00	0.150
15.50	7,200.00	0.136
16.00	7,200.00	0.124
16.50	7,200.00	0.113
17.00	7,200.00	0.103
17.50	7,194.00	0.094
18.00	7,124.00	0.086
18.50	6,959.00	0.077
19.00	6,789.00	0.070
19.50	6,630.00	0.063
20.00	6,472.00	0.057
20.50	6,262.00	0.051
21.00	5,946.00	0.045
21.50	5,538.00	0.039
22.00	5,069.00	0.033
22.50	4,597.00	0.028
23.00	4,121.00	0.024
23.50	3,636.00	0.020
24.00	3,169.00	0.016
24.50	2,718.00	0.013
25.00	2,328.00	0.010

Per un ulteriore approfondimento delle curve utilizzate nel software si rimanda al capitolo 4.

CODICE DOCUMENTO					OGGETTO DELL' ELABORATO	PAGINA
IMP.	DISC.	TIPO DOC.	PROG.	REV.	TROIA SAN CIREO (FG) Studio Anemologico Valutazione risorsa eolica e analisi di producibilità	14 di 34
TSC	ENG	REL	0044	1		

2.4 Allacciamento alla rete elettrica

L'impianto attuale è connesso alla rete AT tramite la sottostazione di proprietà Terna, situata a Troia (FG) a circa 14km dall'area di impianto.
Anche il parco eolico in progetto rimarrà collegato nel medesimo luogo.

CODICE DOCUMENTO					OGGETTO DELL' ELABORATO	PAGINA
IMP.	DISC.	TIPO DOC.	PROG.	REV.	TROIA SAN CIREO (FG) Studio Anemologico Valutazione risorsa eolica e analisi di producibilità	15 di 34
TSC	ENG	REL	0044	1		

3 CARATTERIZZAZIONE ANEMOLOGICA

3.1 Strumenti utilizzati

La campagna anemometrica è stata condotta in sito con una stazione di misura:



Figura 3: Stazioni di misura in sito

Stazione Anemometrica	Coord Est	Coord Nord	Quota [m]	Altezza [m]	dal	al
TSC_Met2	15°19'15"	41°20'16"	322	80	19/04/2010	18/03/2020

CODICE DOCUMENTO					OGGETTO DELL' ELABORATO	PAGINA
IMP.	DISC.	TIPO DOC.	PROG.	REV.	TROIA SAN CIREO (FG) Studio Anemologico Valutazione risorsa eolica e analisi di producibilità	16 di 34
TSC	ENG	REL	0044	1		

3.2 Raccolta dei dati e validazione

Il processo di validazione prevede un controllo manuale per via grafica dei dati grezzi di velocità, direzione e rispettive deviazioni standard tramite software dedicato.



Figura 4: Validazione anemometro

I dati validati vengono raccolti in database protetti, necessari per l'inserimento dei parametri anemometrici nel codice di calcolo CFD e per eventuali altre considerazioni avanzate.

CODICE DOCUMENTO					OGGETTO DELL' ELABORATO	PAGINA
IMP.	DISC.	TIPO DOC.	PROG.	REV.	TROIA SAN CIREO (FG) Studio Anemologico Valutazione risorsa eolica e analisi di producibilità	17 di 34
TSC	ENG	REL	0044	1		

3.3 Analisi anemologica e statistica dei dati

A seguito della validazione dei dati si possono stilare le statistiche sulle velocità medie di sito.

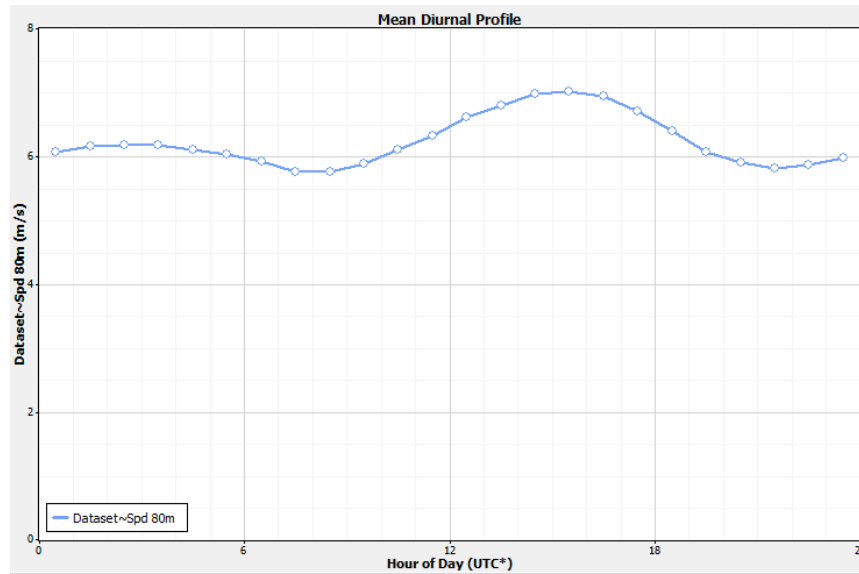


Figura 5: Profilo giornaliero di velocità TSC_Met2

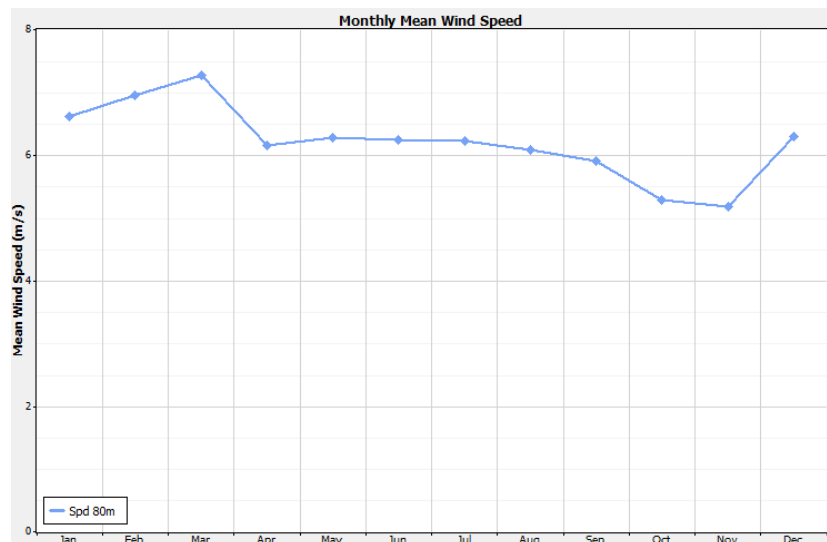


Figura 6: Profilo mensile di velocità TSC_Met2

CODICE DOCUMENTO					OGGETTO DELL' ELABORATO	PAGINA
IMP.	DISC.	TIPO DOC.	PROG.	REV.	TROIA SAN CIREO (FG) Studio Anemologico Valutazione risorsa eolica e analisi di producibilità	18 di 34
TSC	ENG	REL	0044	1		

Inoltre, si è in grado di estrapolare il profilo verticale di velocità:

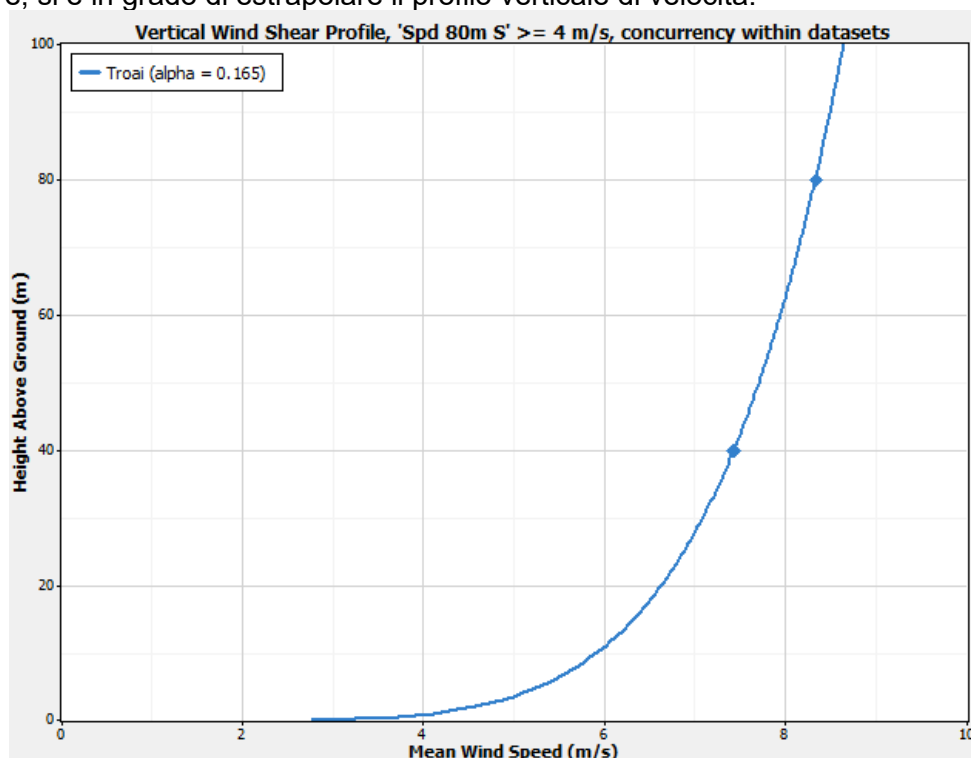


Figura 7: Profilo di velocità verticale

Definito il profilo verticale si è in grado di calcolare il gradiente al suolo della velocità (α : "wind shear exponent") utilizzando le velocità medie misurate ai diversi sensori.

$$\alpha = \frac{\ln \frac{v_{80m}}{v_{40m}}}{\ln \frac{80}{40}}$$

Il parametro alfa (α) consente poi di estrapolare la velocità del vento all'altezza mozzo delle macchine che:

$$v_{HH} = v_{80m} \left(\frac{HH}{80} \right)^\alpha$$

Le formule sono indicate a titolo esemplificativo e devono essere adattate alle specificità della misura disponibile.

CODICE DOCUMENTO					OGGETTO DELL' ELABORATO	PAGINA
IMP.	DISC.	TIPO DOC.	PROG.	REV.	TROIA SAN CIREO (FG) Studio Anemologico Valutazione risorsa eolica e analisi di producibilità	19 di 34
TSC	ENG	REL	0044	1		

Nel caso specifico di Troia San Cireo, il valore del parametro α è stato misurato da sensori di velocità a 80m e 40m.

Al fine di ridurre le incertezze di calcolo legate al processo di estrapolazione verticale della misura da quota anemometro ad altezza hub, è stato preso in considerazione anche il dato di energia da SCADA di impianto esistente.

A partire dal dato SCADA di energia estrapolato ai morsetti del generatore di turbina ad un'altezza di riferimento pari all'altezza mozzo delle Vestas V90, ovvero a 80m s.l.s., si è proceduto a determinare, sulla base dei dati storici di operation e quindi di tutti i tipi di downtime occorsi nel periodo oggetto di misura, la producibilità d'impianto, su base annuale.

In particolare, la serie storica di dati SCADA su base energia è stata rielaborata con la serie di dati di downtime (periodo: 2005-2016) per calcolare anno per anno la producibilità mensile e quindi definire il dato di producibilità annua storica.

Ci si è avvalsi di tale input in ambiente di modellazione CFD, approcciando in modo critico la precedente estrapolazione verticale della velocità, da quota misura fino all'altezza mozzo desiderata, disponendo questa volta di un riferimento noto in corrispondenza dell'altezza mozzo degli aerogeneratori esistenti.

A valle dell'applicazione di tale procedura di calcolo, è possibile determinare le tabelle di frequenza per bin di direzione e di velocità in corrispondenza dell'altezza mozzo degli aerogeneratori esistenti e del punto di installazione della torre anemometrica considerata nell'analisi.

Si ottengono le seguenti statistiche di ventosità (climatologia):

CODICE DOCUMENTO					OGGETTO DELL' ELABORATO		PAGINA
IMP.	DISC.	TIPO DOC.	PROG.	REV.	TROIA SAN CIREO (FG) Studio Anemologico Valutazione risorsa eolica e analisi di producibilità		20 di 34
TSC	ENG	REL	0044	1			

version	:	43				
site	name	:	Troia	TSC_Met2_Extended_LT_with_SVA2_LT_Correlated		
measurement	period	:	19/04/2010	00:10	-	18/03/2020 00:10
site	position	:	15°19'15"	41°20'16"		
coordinate	system	:	3			
measurement	height	:	80			
number	of	sectors	:	12		
number	of	bins	:	50		
total	records	:	840637			

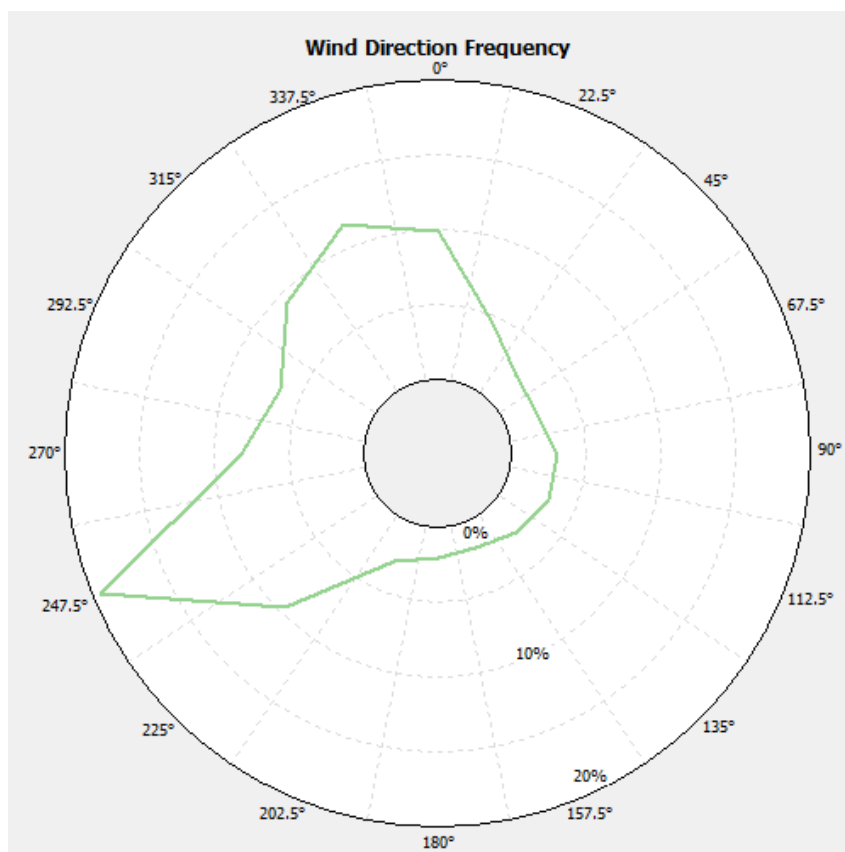


Figura 8: Rosa del vento TSC Met 2 80m

CODICE DOCUMENTO					OGGETTO DELL' ELABORATO	PAGINA
IMP.	DISC.	TIPO DOC.	PROG.	REV.	TROIA SAN CIREO (FG) Studio Anemologico Valutazione risorsa eolica e analisi di producibilità	21 di 34
TSC	ENG	REL	0044	1		

Bin				Settore											
				1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1	0	-	1	0.488	0.51	0.422	0.429	0.516	0.566	0.463	0.487	0.614	0.669	0.647	0.499
2	1	-	2	0.548	0.539	0.443	0.447	0.497	0.475	0.378	0.379	0.524	0.752	0.883	0.643
3	2	-	3	0.857	0.684	0.527	0.588	0.647	0.509	0.372	0.4	0.779	1.382	1.592	1.069
4	3	-	4	1.184	0.68	0.427	0.554	0.69	0.417	0.309	0.421	1.11	1.981	1.94	1.315
5	4	-	5	1.347	0.593	0.286	0.49	0.557	0.264	0.279	0.441	1.472	1.524	1.551	1.387
6	5	-	6	1.417	0.481	0.19	0.385	0.361	0.168	0.226	0.435	1.45	0.923	1.049	1.429
7	6	-	7	1.428	0.361	0.138	0.282	0.214	0.115	0.178	0.383	1.588	0.709	0.714	1.508
8	7	-	8	1.351	0.258	0.108	0.192	0.127	0.079	0.125	0.338	1.725	0.667	0.49	1.538
9	8	-	9	1.157	0.187	0.077	0.128	0.087	0.055	0.087	0.295	1.777	0.633	0.333	1.432
10	9	-	10	0.905	0.157	0.059	0.08	0.054	0.036	0.062	0.254	1.774	0.528	0.228	1.235
11	10	-	11	0.683	0.108	0.042	0.068	0.044	0.021	0.042	0.211	1.669	0.46	0.142	0.952
12	11	-	12	0.48	0.09	0.031	0.061	0.04	0.018	0.034	0.172	1.584	0.383	0.077	0.658
13	12	-	13	0.355	0.083	0.025	0.06	0.034	0.014	0.023	0.144	1.445	0.293	0.046	0.46
14	13	-	14	0.24	0.073	0.03	0.049	0.025	0.014	0.017	0.128	1.28	0.248	0.027	0.327
15	14	-	15	0.161	0.06	0.023	0.045	0.018	0.006	0.012	0.112	1.116	0.192	0.018	0.21
16	15	-	16	0.119	0.058	0.019	0.037	0.015	0.005	0.008	0.098	0.933	0.139	0.011	0.139
17	16	-	17	0.084	0.039	0.018	0.034	0.01	0.003	0.008	0.084	0.709	0.101	0.009	0.094
18	17	-	18	0.054	0.034	0.013	0.028	0.006	0.005	0.006	0.066	0.58	0.063	0.006	0.062
19	18	-	19	0.035	0.029	0.011	0.016	0.007	0.003	0.006	0.053	0.44	0.036	0.003	0.044
20	19	-	20	0.019	0.019	0.01	0.018	0.005	0.003	0.002	0.04	0.335	0.03	0.001	0.021
21	20	-	21	0.016	0.015	0.009	0.014	0.007	0.001	0.002	0.034	0.247	0.023	0.001	0.009
22	21	-	22	0.008	0.01	0.006	0.01	0.004	0.003	0.002	0.027	0.198	0.018	0.001	0.006
23	22	-	23	0.004	0.008	0.004	0.007	0.004	0.001	0.001	0.021	0.14	0.013	0	0.001
24	23	-	24	0.002	0.006	0.003	0.005	0.003	0.001	0	0.017	0.111	0.013	0	0.001
25	24	-	25	0.002	0.003	0.003	0.003	0.002	0	0	0.01	0.088	0.008	0	0
26	25	-	26	0.001	0.002	0.005	0.002	0.001	0	0	0.01	0.056	0.007	0	0
27	26	-	27	0.001	0.002	0.004	0.001	0.002	0	0	0.007	0.041	0.003	0	0
28	27	-	28	0	0.002	0.001	0.002	0.001	0	0	0.005	0.03	0.002	0	0
29	28	-	29	0	0.002	0.001	0.001	0	0	0	0.002	0.022	0.001	0	0
30	29	-	30	0	0.001	0.001	0	0	0	0	0.002	0.015	0.001	0	0
31	30	-	31	0	0.001	0	0	0	0	0	0.002	0.012	0	0	0
32	31	-	32	0	0.001	0	0	0	0	0	0.001	0.008	0	0	0
33	32	-	33	0	0.001	0	0	0	0	0	0.002	0.005	0	0	0
34	33	-	34	0	0	0	0	0	0	0	0.001	0.003	0	0	0
35	34	-	35	0	0	0	0	0	0	0	0.001	0.002	0	0	0
36	35	-	36	0	0	0	0	0	0	0	0.001	0.001	0	0	0
37	36	-	37	0	0	0	0	0	0	0	0	0.001	0	0	0
38	37	-	38	0	0	0	0	0	0	0	0	0.001	0	0	0
39	38	-	39	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
40	39	-	40	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Figura 9: Tabella di frequenze TSC Met 2 80m

CODICE DOCUMENTO					OGGETTO DELL' ELABORATO	PAGINA
IMP.	DISC.	TIPO DOC.	PROG.	REV.	TROIA SAN CIREO (FG) Studio Anemologico Valutazione risorsa eolica e analisi di producibilità	22 di 34
TSC	ENG	REL	0044	1		

4 CURVA DI POTENZA

La curva di potenza garantita fornita dal costruttore è valida per una densità dell'aria standard pari a $\rho = 1,225 \text{ kg/m}^3$; risulta dunque necessario apportare una correzione in base alla densità prevista nelle zone dell'impianto, stimabili in funzione della quota media (c.a. 341 s.l.m. dell'area d'impianto). La densità di sito viene calcolata sulla base dei dati storici della stazione meteorologica di Foggia.

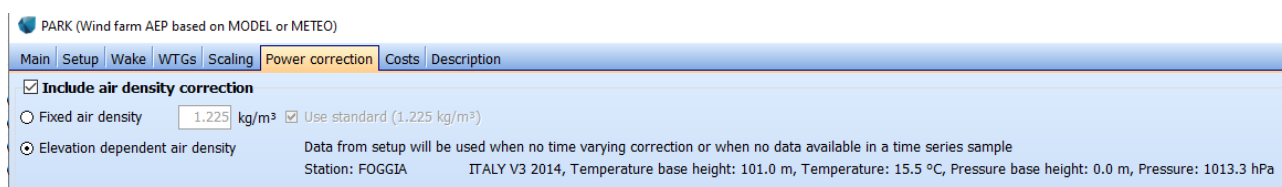


Figura 30: Dati storici stazione meteorologica di Foggia

Si ipotizza quindi un valore di densità dell'aria media pari a $\rho = 1,161 \text{ kg/m}^3$.

Il primo aerogeneratore analizzato è la Enercon E175 6.0MW ad altezza mozzo 132.5 m, la cui curva di potenza, alla densità media di sito risulta:

Power and efficiency vs. wind speed

Data used in calculation, Mean air density: 1.161 kg/m^3

Wind speed [m/s]	Power [kW]	Cp
1.0	0.0	0.00
2.0	0.0	0.00
3.0	137.6	0.36
4.0	413.8	0.46
5.0	855.1	0.49
6.0	1,486.1	0.49
7.0	2,341.1	0.49
8.0	3,380.6	0.47
9.0	4,417.6	0.43
10.0	5,218.6	0.37
11.0	5,693.7	0.31
12.0	5,916.6	0.25
13.0	5,999.1	0.20
14.0	6,000.0	0.16
15.0	6,000.0	0.13
16.0	6,000.0	0.10
17.0	6,000.0	0.09
18.0	6,000.0	0.07
19.0	6,000.0	0.06
20.0	6,000.0	0.05

Figura 41: Aerogeneratore Enercon E175 6.0MW

CODICE DOCUMENTO					OGGETTO DELL' ELABORATO	PAGINA
IMP.	DISC.	TIPO DOC.	PROG.	REV.	TROIA SAN CIREO (FG) Studio Anemologico Valutazione risorsa eolica e analisi di producibilità	23 di 34
TSC	ENG	REL	0044	1		

Il secondo aerogeneratore analizzato è la Siemens Gamesa SG170 6.6MW ad altezza mozzo 135m, la cui curva di potenza, alla densità media di sito risulta:

Power and efficiency vs. wind speed

Data used in calculation, Mean air density: 1.161 kg/m³

Wind speed [m/s]	Power [kW]	Cp
1.0	0.0	0.00
2.0	0.0	0.00
3.0	79.2	0.22
4.0	306.0	0.36
5.0	714.8	0.43
6.0	1,302.2	0.46
7.0	2,112.5	0.47
8.0	3,172.3	0.47
9.0	4,377.1	0.46
10.0	5,441.0	0.41
11.0	6,125.6	0.35
12.0	6,446.0	0.28
13.0	6,559.3	0.23
14.0	6,590.5	0.18
15.0	6,598.0	0.15
16.0	6,599.9	0.12
17.0	6,600.0	0.10
18.0	6,600.0	0.09
19.0	6,336.0	0.07
20.0	6,072.0	0.06
21.0	5,808.0	0.05
22.0	5,544.0	0.04
23.0	5,280.0	0.03
24.0	5,280.0	0.03
25.0	5,280.0	0.03

Figura 52: Aerogeneratore Siemens Gamesa SG170 6.6MW

CODICE DOCUMENTO					OGGETTO DELL' ELABORATO	PAGINA
IMP.	DISC.	TIPO DOC.	PROG.	REV.	TROIA SAN CIREO (FG) Studio Anemologico Valutazione risorsa eolica e analisi di producibilità	24 di 34
TSC	ENG	REL	0044	1		

Il terzo aerogeneratore analizzato è la Vestas V172 7.2MW ad altezza mozzo 117m, la cui curva di potenza, alla densità media di sito risulta:

Power and efficiency vs. wind speed

Data used in calculation, Mean air density: 1.163 kg/m³

Wind speed [m/s]	Power [kW]	Cp
1.0	0.0	0.00
2.0	0.0	0.00
3.0	21.7	0.06
4.0	265.5	0.31
5.0	673.6	0.40
6.0	1,267.6	0.43
7.0	2,088.0	0.45
8.0	3,154.1	0.46
9.0	4,444.0	0.45
10.0	5,644.8	0.42
11.0	6,617.7	0.37
12.0	7,100.8	0.30
13.0	7,195.9	0.24
14.0	7,200.0	0.19
15.0	7,200.0	0.16
16.0	7,200.0	0.13
17.0	7,200.0	0.11
18.0	7,124.0	0.09
19.0	6,789.0	0.07
20.0	6,472.0	0.06
21.0	5,946.0	0.05
22.0	5,069.0	0.04
23.0	4,121.0	0.03
24.0	3,169.0	0.02
25.0	2,328.0	0.01

Figura 63: Aerogeneratore Vestas V172 7.2MW

CODICE DOCUMENTO					OGGETTO DELL' ELABORATO	PAGINA
IMP.	DISC.	TIPO DOC.	PROG.	REV.	TROIA SAN CIREO (FG) Studio Anemologico Valutazione risorsa eolica e analisi di producibilità	25 di 34
TSC	ENG	REL	0044	1		

5 APPLICAZIONE DEL MODELLO CFD

5.1 Il modello digitale del terreno

Lo studio delle caratteristiche eoliche del sito è stato affrontato con un modello CFD che, a fronte di un dominio di calcolo impostato utilizzando i dati di orografia relativi ad un DTM (Digital Terrain Model) con passo di 15 m, fornisce informazioni sul comportamento del vento nei vari settori di provenienza, nonché i profili verticali della velocità nei punti più significativi, quali anemometri e/o aerogeneratori. Di seguito è riportato il dominio di calcolo.

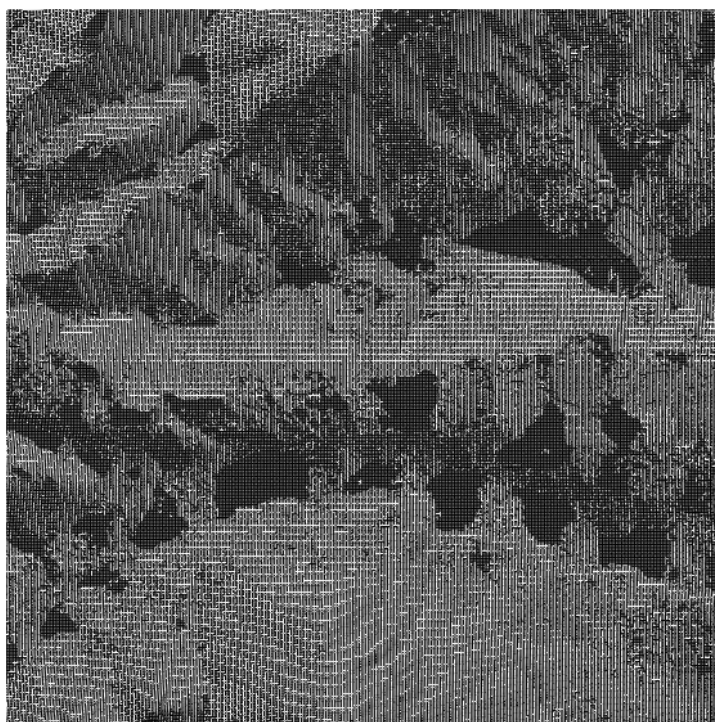


Fig 1. Digital terrain model - Grid (xy).

Body fitted co-ordinates (BFC) are used in grid generation. The above plot displays the resolution at ground level.

	x	y	z	total
Grid spacing (m)	15.0	15.0	Variable	-
Number of cells	335	334	40	4475600

Figura 7: Discretizzazione orizzontale del dominio di calcolo

CODICE DOCUMENTO					OGGETTO DELL' ELABORATO	PAGINA
IMP.	DISC.	TIPO DOC.	PROG.	REV.	TROIA SAN CIREO (FG) Studio Anemologico Valutazione risorsa eolica e analisi di producibilità	26 di 34
TSC	ENG	REL	0044	1		

Di seguito invece la discretizzazione verticale del dominio di calcolo e relativa distanza dal terreno dei primi dieci nodi

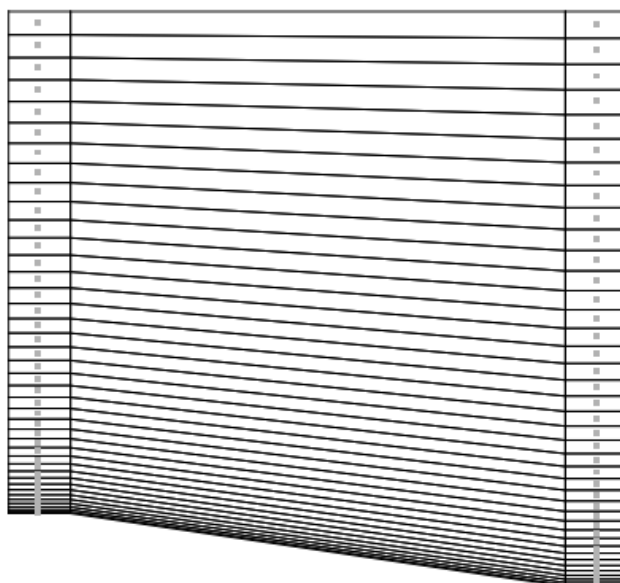


Fig 1. Digital terrain model - Grid (z).

The grid extends 1990.0 (m) above the point in the terrain with the highest elevation. The grid is refined towards the ground. The left and right columns display a schematic view of the distribution at the position with maximum and minimum elevation respectively. The nodes, where results from the simulations are available, are situated in the cell centers indicated by dots.

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
z-dist. max (m)	2.5	9.6	20.0	32.5	47.3	64.2	83.3	104.6	128.1	153.8
z-dist. min (m)	2.5	10.3	22.2	36.5	53.4	72.8	94.7	119.2	146.1	175.5

Figura 8: Discretizzazione verticale del dominio di calcolo

CODICE DOCUMENTO					OGGETTO DELL' ELABORATO	PAGINA
IMP.	DISC.	TIPO DOC.	PROG.	REV.	TROIA SAN CIREO (FG) Studio Anemologico Valutazione risorsa eolica e analisi di producibilità	27 di 34
TSC	ENG	REL	0044	1		

5.2 La rugosità

La lunghezza di rugosità (z_0) è il parametro che caratterizza la superficie su cui spira il vento, maggiore è il suo valore maggiori saranno le asperità del terreno ed i disturbi creati dal suolo al flusso ventoso.

Fisicamente z_0 può essere immaginata come la dimensione del vortice turbolento che viene creato dall'interazione del vento con il suolo, per cui si tratta di una grandezza in grado di intervenire nella modifica della distribuzione verticale della velocità del vento.

Il valore di z_0 è stato standardizzato in base alle tipologie di terreno (categorie di riferimento) che si possono presentare nella realtà ed è riportato in diverse tipologie di classificazioni.

In questo caso, in particolare, si dispone di mappe di rugosità estrapolate da CLC (Corine Land Cover), che si sovrappongono ai DTM indicati in precedenza, in modo da coprire tutto il dominio.

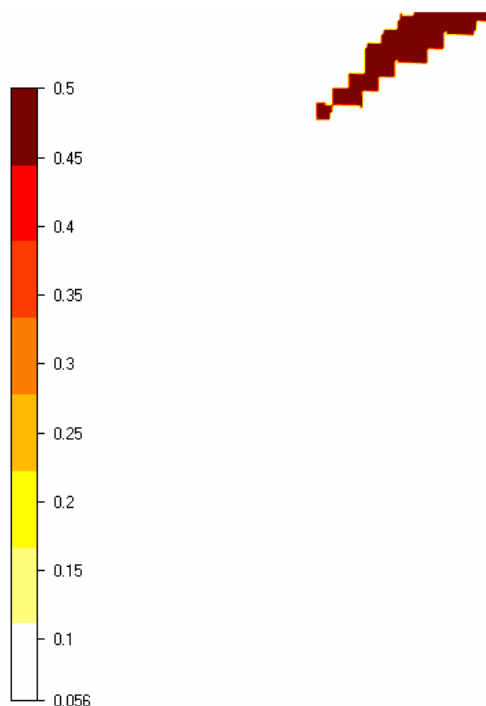


Figura 9: Mappa di rugosità

CODICE DOCUMENTO					OGGETTO DELL' ELABORATO	PAGINA
IMP.	DISC.	TIPO DOC.	PROG.	REV.	TROIA SAN CIREO (FG) Studio Anemologico Valutazione risorsa eolica e analisi di producibilità	28 di 34
TSC	ENG	REL	0044	1		

5.3 La risorsa eolica

Il calcolo CFD è stato effettuato sui 12 settori di direzione impostando una velocità di 10 m/s come vento geostrofico al di sopra dello strato limite; le rilevazioni anemometriche sono state poi utilizzate per scalare il campo di moto del vento e conseguentemente calcolare la mappa della ventosità media e la produzione attesa dalle singole turbine eoliche.

Di seguito si riporta la mappa di ventosità relativa all'area d'impianto, calcolata a 117 m s.l.s., cioè a quota mozzo della configurazione della Vestas V172 7.2MW.

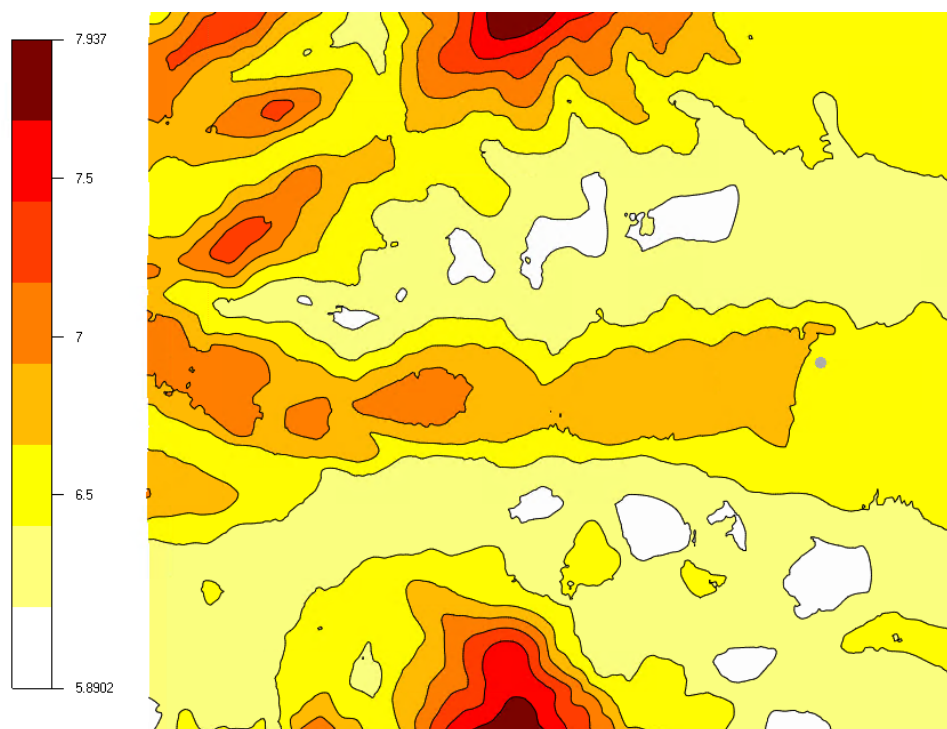


Figura 10: Mappa di ventosità a 117m s.l.s

CODICE DOCUMENTO					OGGETTO DELL' ELABORATO	PAGINA
IMP.	DISC.	TIPO DOC.	PROG.	REV.	TROIA SAN CIREO (FG) Studio Anemologico Valutazione risorsa eolica e analisi di producibilità	29 di 34
TSC	ENG	REL	0044	1		

5.4 Risultati del modello

A questo punto sono noti tutti gli elementi per avere una prima stima della producibilità energetica prevista per l'aerogeneratore che rappresenta la media dell'impianto, risultante dalla somma dei prodotti tra il numero di ore/anno e la potenza certificata per ogni bin di velocità del vento:

	Scenario		
	E175 6.0MW	SG170 6.6MW	V172 7.2MW
Numero WTG	8	8	8
Potenza Unitaria	6	6.6	7.2
Produzione media lorda attesa [MWh/anno]	157438	164827	165948

Le perdite per effetto scia sono calcolate dal software CFD. In questo caso si è preferito utilizzare il modello di Jensen, che è uno dei modelli di calcolo delle scie implementati.

Enercon E175 6.0MW					
WTG	Lordo		Netto Scia		Perdite Scia
	v [m/s]	MWh/y	v [m/s]	MWh/y	
R-TSC01	7.16	20714	6.91	19503	5.8%
R-TSC02	7.08	20466	6.78	19064	6.9%
R-TSC03	6.92	19928	6.55	18128	9.0%
R-TSC04	7.01	20381	6.55	17987	11.7%
R-TSC05	6.94	20196	6.65	18866	6.6%
R-TSC06	6.49	18678	6.38	18214	2.5%
R-TSC07	6.46	18527	6.19	17192	7.2%
R-TSC08	6.46	18548	6.14	17026	8.2%
All	6.82	19680	6.52	18247	7.2%

CODICE DOCUMENTO					OGGETTO DELL' ELABORATO	PAGINA
IMP.	DISC.	TIPO DOC.	PROG.	REV.	TROIA SAN CIREO (FG) Studio Anemologico Valutazione risorsa eolica e analisi di producibilità	30 di 34
TSC	ENG	REL	0044	1		

Siemens Gamesa SG170 6.6MW					
WTG	Lordo		Netto Scia		Perdite Scia
	v [m/s]	MWh/y	v [m/s]	MWh/y	
R-TSC01	7.17	21883	6.92	20545	6.1%
R-TSC02	7.10	21582	6.78	20078	7.0%
R-TSC03	6.95	20933	6.55	18979	9.3%
R-TSC04	7.03	21421	6.54	18753	12.5%
R-TSC05	6.95	21182	6.66	19763	6.7%
R-TSC06	6.52	19381	6.40	18897	2.5%
R-TSC07	6.49	19209	6.19	17693	7.9%
R-TSC08	6.49	19235	6.15	17551	8.8%
All	6.84	20603	6.52	19032	7.6%

Vestas V172 7.2MW					
WTG	Lordo		Netto Scia		Perdite Scia
	v [m/s]	MWh/y	v [m/s]	MWh/y	
R-TSC01	7.03	22293	6.78	20912	6.2%
R-TSC02	6.95	21910	6.64	20405	6.9%
R-TSC03	6.78	21094	6.39	19116	9.4%
R-TSC04	6.87	21692	6.39	18961	12.6%
R-TSC05	6.79	21419	6.50	19987	6.7%
R-TSC06	6.33	19342	6.21	18817	2.7%
R-TSC07	6.30	19102	6.01	17516	8.3%
R-TSC08	6.29	19097	5.96	17348	9.2%
All	6.67	20744	6.36	19133	7.7%

CODICE DOCUMENTO					OGGETTO DELL' ELABORATO	PAGINA
IMP.	DISC.	TIPO DOC.	PROG.	REV.	TROIA SAN CIREO (FG) Studio Anemologico Valutazione risorsa eolica e analisi di producibilità	31 di 34
TSC	ENG	REL	0044	1		

6 ANALISI DELLE PERDITE E DELLE INCERTEZZE

L'output del modello, in termini di energia annua producibile, deve essere decurtato di tutte le perdite esterne, al fine di poter determinare la producibilità annua netta, meglio nota come P50.

Le perdite esterne, oltre alle perdite per effetto scia di cui si è già parlato in precedenza, vengono suddivise in:

Perdite per mancata disponibilità (WTG e BOP)	3.5%
Perdite varie/performance	2.0%
Perdite elettriche	3.5%
Perdite ambientali	1.0%
Curtailments	5.4%
Totale perdite escluso scie	14.5%

CODICE DOCUMENTO					OGGETTO DELL' ELABORATO	PAGINA
IMP.	DISC.	TIPO DOC.	PROG.	REV.	TROIA SAN CIREO (FG) Studio Anemologico Valutazione risorsa eolica e analisi di producibilità	32 di 34
TSC	ENG	REL	0044	1		

La produzione netta attesa, ovvero quella che viene ritenuta più probabile, risulta quindi pari a:

Enercon E175 6.0MW	
Numero Aerogeneratori	8
Produzione netta per WTG P50 (MWh/y)	15595

Siemens Gamesa SG170 6.6MW	
Numero Aerogeneratori	8
Produzione netta per WTG P50 (MWh/y)	16266

Vestas V172 7.2MW	
Numero Aerogeneratori	8
Produzione netta per WTG P50 (MWh/y)	16352

Moltiplicando la produzione netta del WTG per il numero di WTG dell'impianto si ottiene la stima P50 della produzione netta dell'impianto:

$$Pr od_{netta_tot} = Pr od_{netta_WTG} \times N_{WTG}$$

Enercon E175 6.0MW	
Numero Aerogeneratori	8
Produzione netta P50 dell'intero impianto (MWh/y)	124760

Siemens Gamesa SG170 6.6MW	
Numero Aerogeneratori	8
Produzione netta P50 dell'intero impianto (MWh/y)	130126

Vestas V172 7.2MW	
Numero Aerogeneratori	8
Produzione netta P50 dell'intero impianto (MWh/y)	130813

CODICE DOCUMENTO					OGGETTO DELL' ELABORATO	PAGINA
IMP.	DISC.	TIPO DOC.	PROG.	REV.	TROIA SAN CIREO (FG) Studio Anemologico Valutazione risorsa eolica e analisi di producibilità	33 di 34
TSC	ENG	REL	0044	1		

Una volta ottenuto il valore P50, rappresentativo di tutto l'impianto, vengono individuati i relativi valori di producibilità P65.2 P75 e P90, a valle di una specifica analisi di incertezza (o analisi di confidenza).

Questo tipo di analisi, individua tre differenti macro-aree, per ognuna delle quali viene determinata la relativa incertezza di calcolo. Si riportano i valori per le diverse configurazioni:

Enercon E175 6.0MW	
Incertezza sulla storicizzazione del sito	4.8%
Incertezza sul processo di micrositing	6.6%
Incertezza sulla misura della pwc	5.0%
Incertezza complessiva	9.6%

Siemens Gamesa SG170 6.6MW	
Incertezza sulla storicizzazione del sito	4.8%
Incertezza sul processo di micrositing	6.7%
Incertezza sulla misura della pwc	5.0%
Incertezza complessiva	9.6%

Vestas V172 7.2MW	
Incertezza sulla storicizzazione del sito	4.8%
Incertezza sul processo di micrositing	6.2%
Incertezza sulla misura della pwc	5.0%
Incertezza complessiva	9.3%

CODICE DOCUMENTO					OGGETTO DELL' ELABORATO	PAGINA
IMP.	DISC.	TIPO DOC.	PROG.	REV.	TROIA SAN CIREO (FG) Studio Anemologico Valutazione risorsa eolica e analisi di producibilità	34 di 34
TSC	ENG	REL	0044	1		

Tale valore è ottenuto come somma statistica delle diverse componenti.
Considerando proprio l'incertezza complessiva ottenuta, si possono infine determinare, a partire dal P50, i percentili P62.5, P75 e P90 della gaussiana.

Enercon E175 6.0MW		
P50 [GWh/y - heq]	124.8	2599
P62.5 [GWh/y - heq]	121.0	2520
P75 [GWh/y - heq]	116.7	2431
P90 [GWh/y - heq]	109.5	2280

Siemens Gamesa SG170 6.6MW		
P50 [GWh/y - heq]	130.1	2465
P62.5 [GWh/y - heq]	126.1	2389
P75 [GWh/y - heq]	121.7	2305
P90 [GWh/y - heq]	114.1	2161

Vestas V172 7.2MW		
P50 [GWh/y - heq]	130.8	2271
P62.5 [GWh/y - heq]	126.9	2204
P75 [GWh/y - heq]	122.6	2129
P90 [GWh/y - heq]	115.3	2001