



Regione Puglia
Provincia di Foggia
Comuni di Troia e Lucera



Potenziamento del Parco Eolico di Troia San Vincenzo

Codifica proponente:

IMP.	DISC.	TIPO DOC.	PROGR.	REV.
TSV	ENG	REL	00119	00

Titolo:

RELAZIONE ANEMOLOGICA

Numero documento:

Commissa						Fase	Tipo doc.	Prog. doc.	Rev.				
2	3	2	2	0	2	D	R	0	1	1	9	0	0

Proponente:

ERG Eolica San Vincenzo



PROGETTO DEFINITIVO

Progettazione:



PROGETTO ENERGIA S.R.L.

Via Cardito, 202 | 83031 | Ariano Irpino (AV)
Tel. +39 0825 891313
www.progettoenergia.biz | info@progettoenergia.biz



SERVIZI DI INGEGNERIA INTEGRATI
INTEGRATED ENGINEERING SERVICES

Progettista:

Ing. Massimo Lo Russo



Sul presente documento sussiste il DIRITTO di PROPRIETA'. Qualsiasi utilizzo non preventivamente autorizzato sarà perseguito ai sensi della normativa vigente

REVISIONI	N.	Data	Descrizione revisione	Redatto	Controllato	Approvato
		00	25.09.2023	EMISSIONE PER AUTORIZZAZIONE	I. CIRIELLO	D. LO RUSSO



ERG Eolica San Vincenzo

RELAZIONE DI STIMA

Potenziamento Parco Eolico di Troia San Vincenzo



Codifica Elaborato: 232202_D_R_0119 Rev. 00

INDICE

1. INTRODUZIONE	3
2. RAPPRESENTAZIONE DEL SITO	3
2.1. DESCRIZIONE DEL SITO	3
2.2. LAYOUT RIPOTENZIATO	5
2.3. AEROGENERATORI ADOTTATI	5
2.4. ALLACCIAMENTO ALLA RETE ELETTRICA.....	9
3. CARATTERIZZAZIONE ANEMOLOGICA.....	9
3.1. STRUMENTI UTILIZZATI.....	9
3.2. RACCOLTA DEI DATI E VALIDAZIONE.....	9
3.3. ANALISI ANEMOLOGICA E STATISTICA DEI DATI	10
4. CURVA DI POTENZA	14
5. APPLICAZIONE DEL MODELLO CFD	17
5.1. IL MODELLO DIGITALE DEL TERRENO	17
5.2. LA RUGOSITÀ.....	18
5.3. LA RISORSA EOLICA.....	20
5.4. RISULTATI DEL MODELLO.....	20
6. ANALISI DELLE PERDITE E DELLE INCERTEZZE	22

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

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 21 turbine eoliche Senvion MM82 da 2000 kW, per una potenza complessiva di 42 MW.

Il nuovo layout ripotenziato si sviluppa nell'area del parco già esistente e prevede un numero totale di 10 macchine.

La zona presenta un'orografia piuttosto semplice e pianeggiante, con altezze che arrivano fino a 300 m s.l.m.

L'impianto si trova nelle vicinanze di Troia.

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

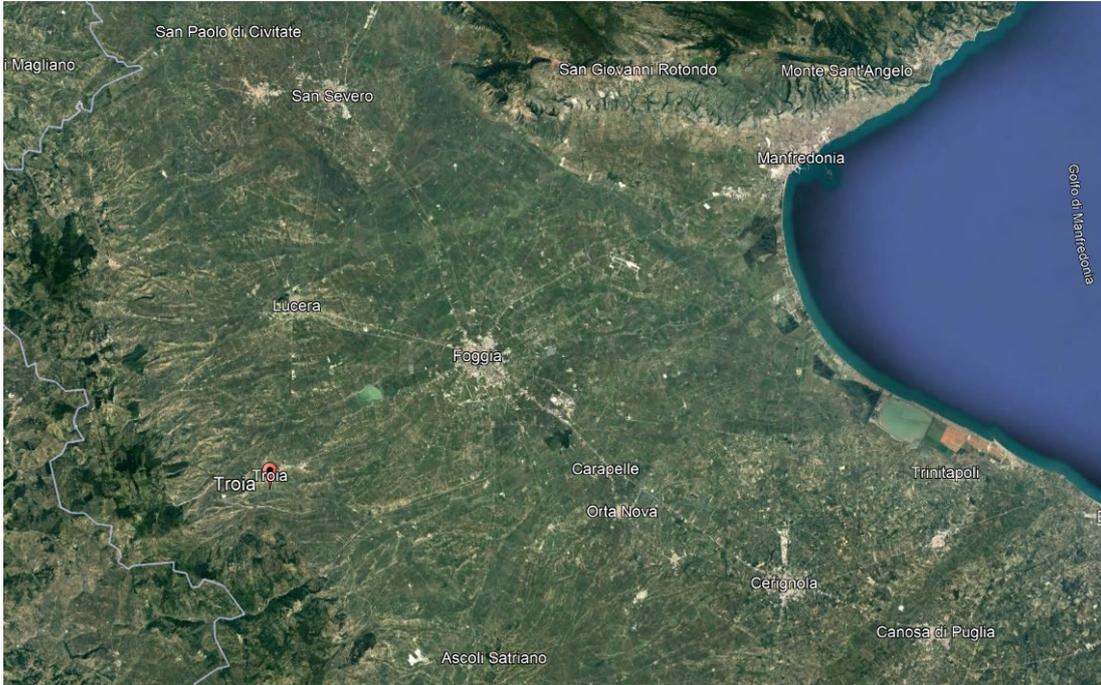


Figura 1: Inquadramento del sito



Figura 2: Inquadramento del sito

2.2. LAYOUT RIPOTENZIATO

Il layout di impianto è composto da 10 aerogeneratori, dislocati all'interno del territorio comunale di Troia.

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

Coordinate UTM WGS 84 F33			
WTG	Est	Nord	Quota [m]
R-TSV01	532901	4583660	248.2
R-TSV02	532908	4583103	251.7
R-TSV03	533728	4582952	238.0
R-TSV04	532030	4582610	283.6
R-TSV05	531430	4581880	300.0
R-TSV06	532789	4582558	268.1
R-TSV07	532450	4583200	267.8
R-TSV08	530898	4582454	216.6
R-TSV09	530584	4581930	267.4
R-TSV10	530505	4581445	252.1

2.3. AEROGENERATORI ADOTTATI

Per la stima di producibilità energetica di Troia San Vincenzo 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

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

Source
ENERCON GmbH

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
 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

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	10! 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

Name (AM 0, 6.6MW) - 1.225 kg/m3 Auto		<input checked="" type="radio"/> Edit/show power curve <input type="radio"/> Edit/show CT curve <input type="radio"/> Edit/show uncertainty																																																																																																																															
Source SGRE		<table border="1"> <thead> <tr> <th>Wind speed [m/s]</th> <th>Power [kW]</th> <th>Cp</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>3.00</td><td>89.00</td><td>0.237</td></tr> <tr><td>3.50</td><td>178.00</td><td>0.299</td></tr> <tr><td>4.00</td><td>328.00</td><td>0.369</td></tr> <tr><td>4.50</td><td>522.00</td><td>0.412</td></tr> <tr><td>5.00</td><td>758.00</td><td>0.436</td></tr> <tr><td>5.50</td><td>1,040.00</td><td>0.450</td></tr> <tr><td>6.00</td><td>1,376.00</td><td>0.458</td></tr> <tr><td>6.50</td><td>1,771.00</td><td>0.464</td></tr> <tr><td>7.00</td><td>2,230.00</td><td>0.468</td></tr> <tr><td>7.50</td><td>2,757.00</td><td>0.470</td></tr> <tr><td>8.00</td><td>3,346.00</td><td>0.470</td></tr> <tr><td>8.50</td><td>3,974.00</td><td>0.465</td></tr> <tr><td>9.00</td><td>4,600.00</td><td>0.454</td></tr> <tr><td>9.50</td><td>5,177.00</td><td>0.434</td></tr> <tr><td>10.00</td><td>5,660.00</td><td>0.407</td></tr> <tr><td>10.50</td><td>6,024.00</td><td>0.374</td></tr> <tr><td>11.00</td><td>6,272.00</td><td>0.339</td></tr> <tr><td>11.50</td><td>6,424.00</td><td>0.304</td></tr> <tr><td>12.00</td><td>6,510.00</td><td>0.271</td></tr> <tr><td>12.50</td><td>6,556.00</td><td>0.241</td></tr> <tr><td>13.00</td><td>6,579.00</td><td>0.215</td></tr> <tr><td>13.50</td><td>6,590.00</td><td>0.193</td></tr> <tr><td>14.00</td><td>6,596.00</td><td>0.173</td></tr> <tr><td>14.50</td><td>6,598.00</td><td>0.156</td></tr> <tr><td>15.00</td><td>6,599.00</td><td>0.141</td></tr> <tr><td>15.50</td><td>6,600.00</td><td>0.127</td></tr> <tr><td>16.00</td><td>6,600.00</td><td>0.116</td></tr> <tr><td>16.50</td><td>6,600.00</td><td>0.106</td></tr> <tr><td>17.00</td><td>6,600.00</td><td>0.097</td></tr> <tr><td>17.50</td><td>6,600.00</td><td>0.089</td></tr> <tr><td>18.00</td><td>6,600.00</td><td>0.081</td></tr> <tr><td>18.50</td><td>6,468.00</td><td>0.073</td></tr> <tr><td>19.00</td><td>6,336.00</td><td>0.066</td></tr> <tr><td>19.50</td><td>6,204.00</td><td>0.060</td></tr> <tr><td>20.00</td><td>6,072.00</td><td>0.055</td></tr> <tr><td>20.50</td><td>5,940.00</td><td>0.050</td></tr> <tr><td>21.00</td><td>5,808.00</td><td>0.045</td></tr> <tr><td>21.50</td><td>5,676.00</td><td>0.041</td></tr> <tr><td>22.00</td><td>5,544.00</td><td>0.037</td></tr> <tr><td>22.50</td><td>5,412.00</td><td>0.034</td></tr> <tr><td>23.00</td><td>5,280.00</td><td>0.031</td></tr> </tbody> </table>		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
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																																																																																																																															
Date (m/d/yyyy) Stop wind speed 8/29/2021 25.0 m/s																																																																																																																																	
Air density Tip angle 1.225 kg/m3 0.00 °																																																																																																																																	
<input type="checkbox"/> Measured on high voltage side of step up transformer																																																																																																																																	
Power control <input type="radio"/> Stall <input checked="" type="radio"/> Pitch <input type="radio"/> Active stall																																																																																																																																	
Ct curve <input type="radio"/> Standard stall <input type="radio"/> Standard pitch <input checked="" type="radio"/> User defined																																																																																																																																	
Uncertainty <input checked="" type="radio"/> None <input type="radio"/> IEC cat A & IEC cat <input type="radio"/> IEC combined																																																																																																																																	
Remarks D2850368-001 SGRE ON SG 6.6-170 Standard Ct and Power Curve Rev.0 Mode AM 0 - Air Density.pdf																																																																																																																																	

Il terzo aereogeneratore 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

Name		<input checked="" type="radio"/> Edit/show power curve <input type="radio"/> Edit/show CT curve <input type="radio"/> Edit/show uncertainty	
Level 0 & 0S - Calculated - PO7200 - 07-2022		Auto	
Source			
Manufacturer			
Date (m/d/yyyy)	Stop wind speed	Wind speed [m/s]	Power [kW]
7/8/2022	25.0 m/s	3.00	32.00
Air density	Tip angle	3.50	129.00
1.225 kg/m3	0.00 °	4.00	288.00
<input type="checkbox"/> Measured on high voltage side of step up transformer		4.50	481.00
Power control		5.00	715.00
<input type="radio"/> Stall <input checked="" type="radio"/> Pitch <input type="radio"/> Active stall		5.50	999.00
<input type="radio"/> Standard stall <input type="radio"/> Standard pitch <input checked="" type="radio"/> User defined		6.00	1,340.00
Uncertainty		6.50	1,739.00
<input checked="" type="radio"/> None <input type="radio"/> IEC cat A & IEC cat <input type="radio"/> IEC combined		7.00	2,203.00
Remarks		7.50	2,729.00
Based Vestas Document no.: 0127-1584 V01.		8.00	3,324.00
		8.50	3,986.00
		9.00	4,685.00
		9.50	5,314.00
		10.00	5,904.00
		10.50	6,441.00
		11.00	6,854.00
		11.50	7,078.00
		12.00	7,160.00
		12.50	7,195.00
		13.00	7,200.00
		13.50	7,200.00
		14.00	7,200.00
		14.50	7,200.00
		15.00	7,200.00
		15.50	7,200.00
		16.00	7,200.00
		16.50	7,200.00
		17.00	7,200.00
		17.50	7,194.00
		18.00	7,124.00
		18.50	6,959.00
		19.00	6,789.00
		19.50	6,630.00
		20.00	6,472.00
		20.50	6,262.00
		21.00	5,946.00
		21.50	5,538.00
		22.00	5,069.00
		22.50	4,597.00
		23.00	4,121.00
		23.50	3,636.00
		24.00	3,169.00
		24.50	2,718.00
		25.00	2,328.00

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

2.4. ALLACCIAMENTO ALLA RETE ELETTRICA

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

3. CARATTERIZZAZIONE ANEMOLOGICA

3.1. STRUMENTI UTILIZZATI

La campagna anemometrica è stata condotta in sito con due stazioni di misura:

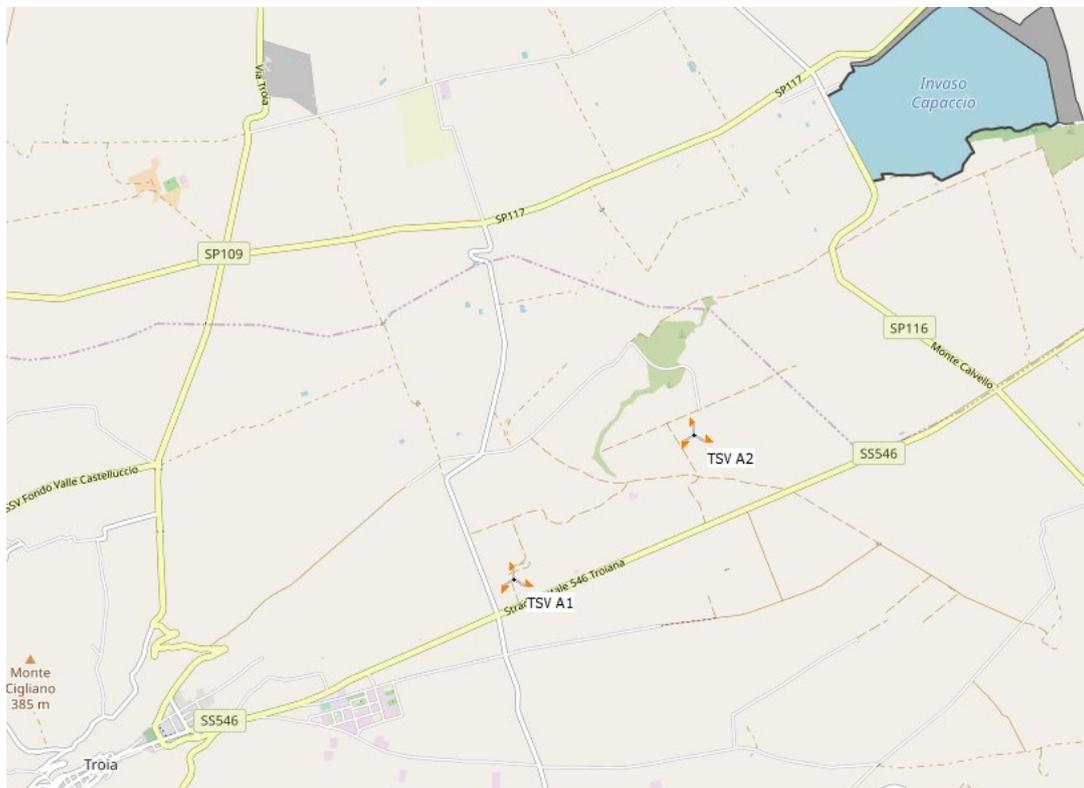


Figura 3: Stazioni di misura in sito

Stazione Anemometrica	Coord Est	Coord Nord	Quota [m]	Altezza [m]	dal	al
TSV A1	530554	4581136	290	80	01/01/2019	30/07/2022
TSV A2	532486	4582710	270	80	01/05/2010	31/05/2023

3.2. RACCOLTA DEI DATI E VALIDAZIONE



Figura 6: Profilo mensile di velocità TSV A1

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

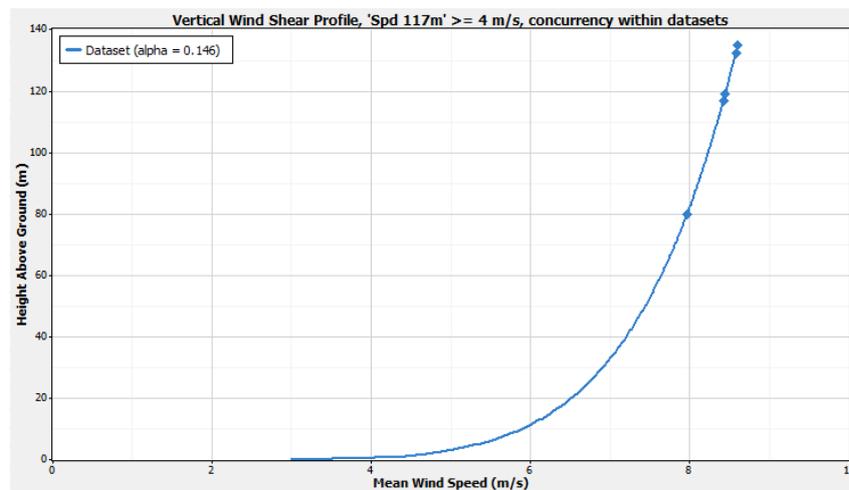


Figura 7: Profilo di velocità verticale

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.

Nel caso specifico di Troia San Vincenzo, il valore del parametro α è stato misurato da sensori di velocità a 80m, 60m, 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 Senvion MM82, 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: 2016-2022) 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):

version	:	43					
site	name	:	Troia	SVA1_Extended_LT_with_SVA2_LT_Correlated			
measurement	period	:	07/27/2006	12:50	-	07/26/2023	02:10
site	position	:	530554	4581136			
coordinate	system	:	3				
measurement	height	:	80				
number	of	sectors	:	12			
number	of	bins	:	50			
total	records	:	870531				

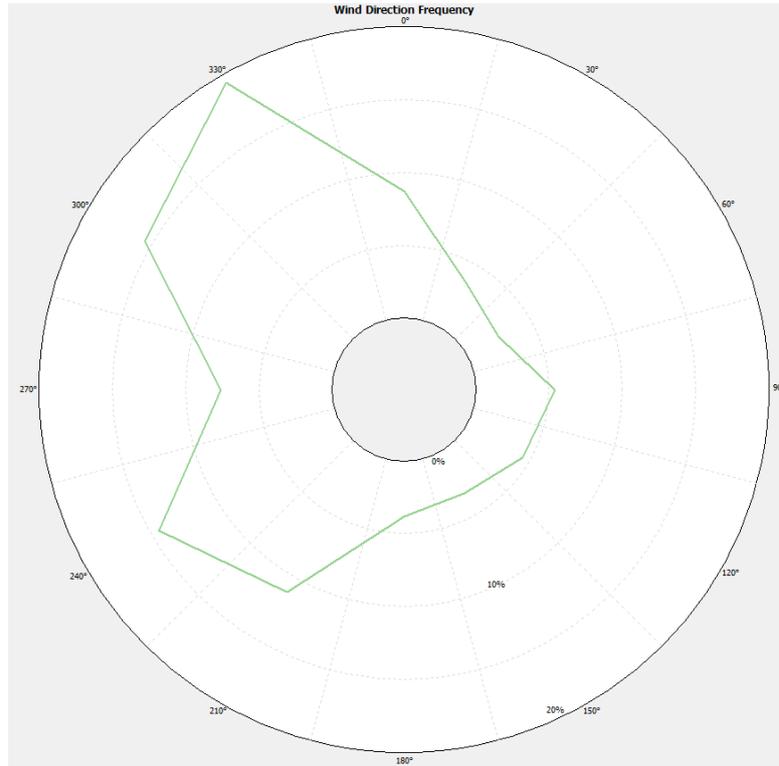


Figura 8: Rosa del vento TSV A1 80m

				Settore											
Bin				1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1	0	-	1	0.00292	0.00257	0.00244	0.00336	0.00307	0.00264	0.00227	0.00260	0.00336	0.00339	0.00355	0.00337
2	1	-	2	0.00391	0.00342	0.00314	0.00364	0.00367	0.00319	0.00269	0.00340	0.00440	0.00442	0.00507	0.00459
3	2	-	3	0.00685	0.00547	0.00460	0.00579	0.00570	0.00500	0.00409	0.00631	0.00911	0.00796	0.01134	0.00922
4	3	-	4	0.00889	0.00686	0.00442	0.00698	0.00735	0.00623	0.00517	0.00962	0.01433	0.01247	0.02087	0.01683
5	4	-	5	0.00970	0.00602	0.00362	0.00756	0.00772	0.00542	0.00535	0.01115	0.01601	0.01282	0.02484	0.02345
6	5	-	6	0.00913	0.00411	0.00259	0.00711	0.00595	0.00362	0.00474	0.01130	0.01521	0.01014	0.02175	0.02436
7	6	-	7	0.00909	0.00278	0.00178	0.00584	0.00409	0.00219	0.00364	0.01116	0.01375	0.00715	0.01721	0.02268
8	7	-	8	0.00775	0.00181	0.00118	0.00435	0.00237	0.00155	0.00291	0.00958	0.01171	0.00481	0.01284	0.01934
9	8	-	9	0.00654	0.00105	0.00065	0.00258	0.00148	0.00106	0.00204	0.00825	0.00988	0.00336	0.00967	0.01554
10	9	-	10	0.00566	0.00059	0.00028	0.00157	0.00093	0.00075	0.00140	0.00700	0.00832	0.00255	0.00756	0.01299
11	10	-	11	0.00447	0.00035	0.00016	0.00090	0.00057	0.00049	0.00101	0.00600	0.00663	0.00180	0.00588	0.01059
12	11	-	12	0.00347	0.00029	0.00011	0.00065	0.00040	0.00040	0.00077	0.00492	0.00573	0.00132	0.00465	0.00811
13	12	-	13	0.00265	0.00017	0.00008	0.00050	0.00028	0.00026	0.00048	0.00435	0.00483	0.00098	0.00329	0.00627
14	13	-	14	0.00170	0.00009	0.00006	0.00045	0.00018	0.00015	0.00035	0.00351	0.00390	0.00080	0.00230	0.00481
15	14	-	15	0.00120	0.00009	0.00002	0.00043	0.00012	0.00009	0.00023	0.00291	0.00334	0.00055	0.00156	0.00362
16	15	-	16	0.00091	0.00008	0.00002	0.00037	0.00008	0.00006	0.00016	0.00221	0.00280	0.00044	0.00116	0.00275
17	16	-	17	0.00069	0.00006	0.00001	0.00028	0.00006	0.00004	0.00009	0.00191	0.00248	0.00032	0.00083	0.00194
18	17	-	18	0.00052	0.00004	0.00001	0.00020	0.00004	0.00003	0.00006	0.00142	0.00201	0.00021	0.00057	0.00137
19	18	-	19	0.00037	0.00002	0.00000	0.00015	0.00004	0.00003	0.00003	0.00108	0.00159	0.00014	0.00034	0.00111
20	19	-	20	0.00027	0.00003	0.00000	0.00015	0.00002	0.00002	0.00002	0.00083	0.00127	0.00011	0.00021	0.00078
21	20	-	21	0.00024	0.00002	0.00000	0.00012	0.00001	0.00001	0.00002	0.00058	0.00092	0.00006	0.00017	0.00052

				Settore											
Bin				1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
22	21	-	22	0.00015	0.00001	0.00000	0.00012	0.00002	0.00001	0.00001	0.00048	0.00081	0.00006	0.00009	0.00030
23	22	-	23	0.00010	0.00001	0.00000	0.00010	0.00001	0.00000	0.00001	0.00034	0.00061	0.00003	0.00006	0.00014
24	23	-	24	0.00008	0.00001	0.00000	0.00007	0.00000	0.00001	0.00001	0.00021	0.00042	0.00003	0.00003	0.00006
25	24	-	25	0.00005	0.00000	0.00000	0.00005	0.00000	0.00000	0.00001	0.00015	0.00038	0.00002	0.00002	0.00005
26	25	-	26	0.00002	0.00000	0.00000	0.00003	0.00000	0.00001	0.00001	0.00013	0.00027	0.00002	0.00001	0.00003
27	26	-	27	0.00001	0.00000	0.00000	0.00002	0.00000	0.00000	0.00000	0.00008	0.00019	0.00001	0.00001	0.00001
28	27	-	28	0.00001	0.00000	0.00000	0.00001	0.00000	0.00000	0.00000	0.00007	0.00016	0.00000	0.00000	0.00001
29	28	-	29	0.00000	0.00000	0.00000	0.00001	0.00000	0.00000	0.00000	0.00005	0.00009	0.00000	0.00000	0.00000
30	29	-	30	0.00000	0.00000	0.00000	0.00001	0.00000	0.00000	0.00000	0.00003	0.00008	0.00000	0.00000	0.00000
31	30	-	31	0.00000	0.00000	0.00000	0.00001	0.00000	0.00000	0.00000	0.00003	0.00005	0.00000	0.00000	0.00000
32	31	-	32	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00001	0.00003	0.00000	0.00000	0.00000
33	32	-	33	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00002	0.00002	0.00000	0.00000	0.00000
34	33	-	34	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00001	0.00002	0.00000	0.00000	0.00000
35	34	-	35	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00001	0.00002	0.00000	0.00000	0.00000
36	35	-	36	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00001	0.00002	0.00000	0.00000	0.00000
37	36	-	37	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00001	0.00000	0.00000	0.00000
38	37	-	38	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000
39	38	-	39	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000
40	39	-	40	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00001	0.00000	0.00000	0.00000
41	40	-	41	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000
42	41	-	42	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000

Figura 9: Tabella di frequenze TSV A1 80m

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. 259 s.l.m. dell'area d'impianto). La densità di sito viene calcolata sulla base dei dati storici della stazione meteorologica di Foggia.

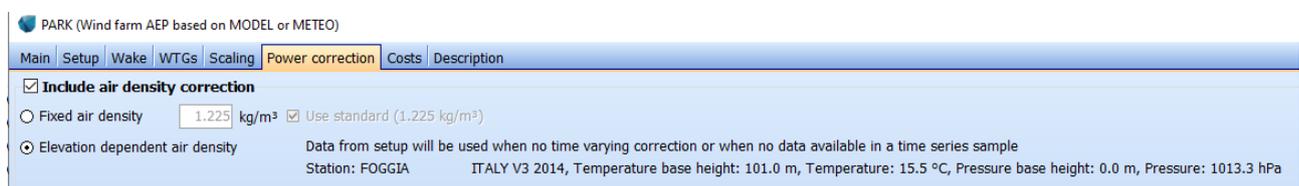


Figura 30: Dati storici stazione meteorologica di Foggia

Si ipotizza quindi un valore di densità dell'aria media pari a $\rho = 1,176 \text{ kg/m}^3$.

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 speedData used in calculation, Mean air density: 1.176 kg/m³

Wind speed [m/s]	Power [kW]	Cp
1.0	0.0	0.00
2.0	0.0	0.00
3.0	139.8	0.37
4.0	419.6	0.46
5.0	866.0	0.49
6.0	1,504.8	0.49
7.0	2,370.0	0.49
8.0	3,419.0	0.47
9.0	4,459.6	0.43
10.0	5,254.2	0.37
11.0	5,716.3	0.30
12.0	5,927.4	0.24
13.0	5,999.3	0.19
14.0	6,000.0	0.15
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

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 speedData used in calculation, Mean air density: 1.176 kg/m³

Wind speed [m/s]	Power [kW]	Cp
1.0	0.0	0.00
2.0	0.0	0.00
3.0	81.5	0.23
4.0	311.2	0.36
5.0	725.0	0.43
6.0	1,319.7	0.46
7.0	2,140.2	0.47
8.0	3,213.2	0.47
9.0	4,429.0	0.46
10.0	5,491.2	0.41
11.0	6,158.7	0.35
12.0	6,460.6	0.28
13.0	6,563.9	0.22
14.0	6,591.8	0.18
15.0	6,598.2	0.15
16.0	6,600.0	0.12
17.0	6,600.0	0.10
18.0	6,600.0	0.08
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

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: 1.178 kg/m³

Wind speed [m/s]	Power [kW]	Cp
1.0	0.0	0.00
2.0	0.0	0.00
3.0	29.4	0.08
4.0	272.3	0.31
5.0	684.4	0.40
6.0	1,284.0	0.43
7.0	2,115.1	0.45
8.0	3,197.8	0.46
9.0	4,522.7	0.45
10.0	5,740.4	0.42
11.0	6,730.4	0.37
12.0	7,134.5	0.30
13.0	7,198.8	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	7,199.5	0.11
18.0	7,112.0	0.09
19.0	6,774.0	0.07
20.0	6,456.0	0.06
21.0	5,911.0	0.05
22.0	5,031.0	0.03
23.0	4,083.0	0.02
24.0	3,141.0	0.02
25.0	2,308.0	0.01

Figura 63: Aerogeneratore Vestas V172 7.2MW

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.

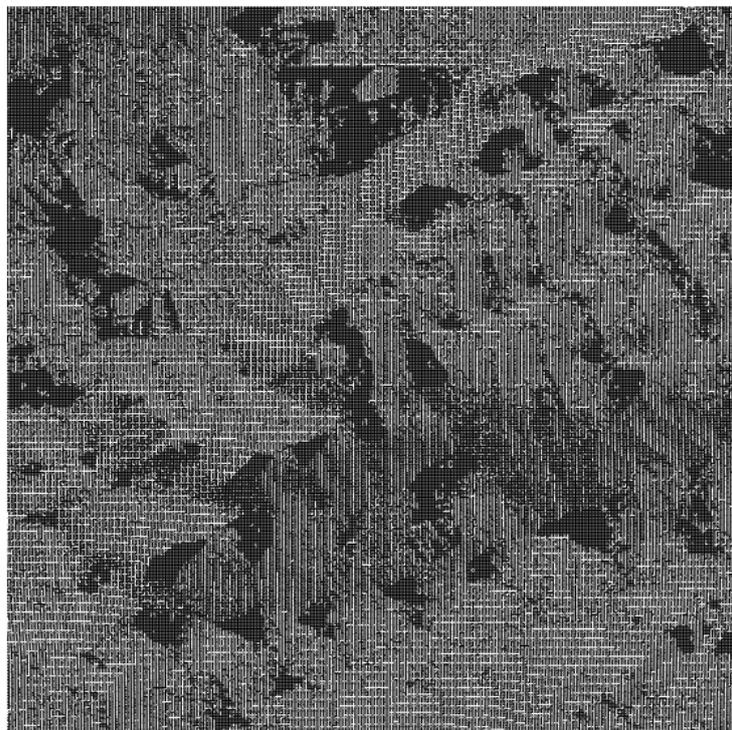


Fig 1. Digital terrain model - Grid (xy).

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

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

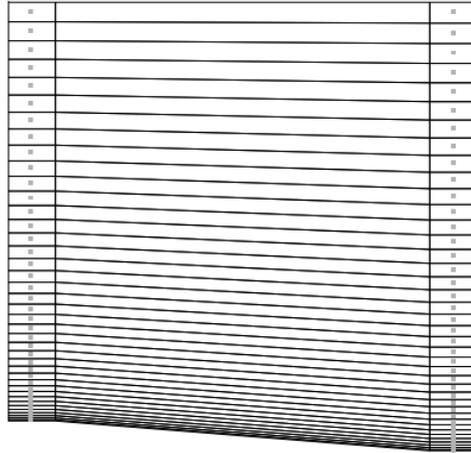


Fig 1. Digital terrain model - Grid (z).

The grid extends 2045.0 (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	9.8	20.4	33.3	48.4	65.8	85.5	107.4	131.5	157.9
z-dist. min (m)	2.5	10.1	21.5	35.3	51.5	70.2	91.2	114.7	140.5	168.8

Figura 8: Discretizzazione verticale del dominio di calcolo

5.2. LA RUGOSITÀ

La lunghezza di rugosità (z_0) è il parametro che caratterizza la superficie su cui spirava 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

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.

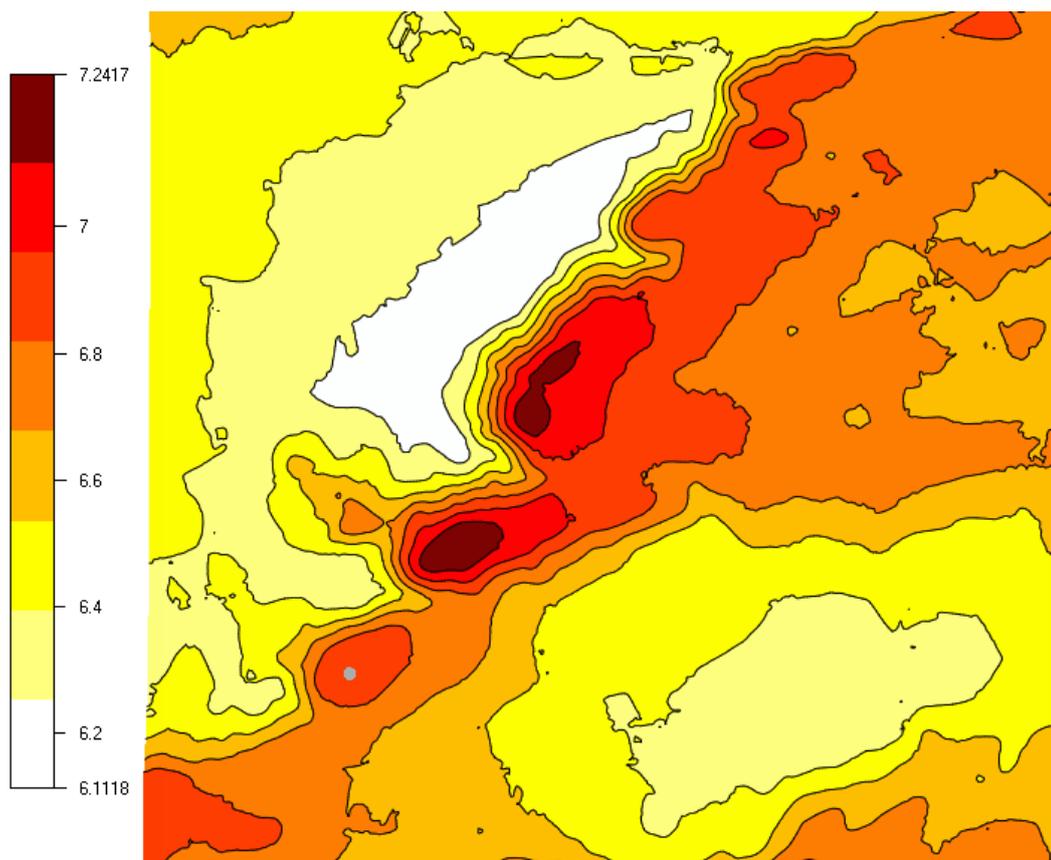


Figura 10: Mappa di ventosità a 117m s.l.s

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	10	10	10
Potenza Unitaria	6.0	6.6	7.2
Produzione media lorda attesa [MWh/anno]	178982	181918	180957

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-TSV01	6.54	18322	6.26	16939	7.5%
R-TSV02	6.42	17848	5.98	15591	12.6%
R-TSV03	6.37	17652	6.11	16352	7.4%
R-TSV04	6.59	18483	6.36	17337	6.2%
R-TSV05	6.74	19119	6.47	17760	7.1%
R-TSV06	6.48	18063	6.11	16123	10.7%
R-TSV07	6.59	18542	6.31	17096	7.8%
R-TSV08	5.95	15969	5.77	15082	5.6%
R-TSV09	6.46	17983	6.33	17367	3.4%
R-TSV10	6.19	17001	6.06	16421	3.4%
All	6.43	17898	6.18	16607	7.2%

Siemens Gamesa SG170 6.6MW					
WTG	Lordo		Netto Scia		Perdite Scia
	v [m/s]	MWh/y	v [m/s]	MWh/y	
R-TSV01	6.56	18674	6.27	17163	8.1%
R-TSV02	6.44	18141	5.97	15710	13.4%
R-TSV03	6.39	17911	6.12	16520	7.8%
R-TSV04	6.60	18859	6.36	17607	6.6%
R-TSV05	6.75	19573	6.47	18079	7.6%
R-TSV06	6.50	18384	6.11	16276	11.5%
R-TSV07	6.61	18922	6.31	17348	8.3%
R-TSV08	5.97	16017	5.78	15074	5.9%
R-TSV09	6.48	18282	6.34	17640	3.5%
R-TSV10	6.21	17155	6.08	16549	3.5%
All	6.45	18192	6.18	16796	7.6%

Vestas V172 7.2MW					
WTG	Lordo		Netto Scia		Perdite Scia
	v [m/s]	MWh/y	v [m/s]	MWh/y	
R-TSV01	6.42	18647	6.16	17184	7.8%
R-TSV02	6.30	18032	5.89	15726	12.8%
R-TSV03	6.24	17774	6.02	16471	7.3%
R-TSV04	6.46	18840	6.26	17674	6.2%
R-TSV05	6.63	19686	6.40	18319	6.9%
R-TSV06	6.36	18307	6.03	16308	10.9%
R-TSV07	6.48	18936	6.22	17450	7.8%
R-TSV08	5.80	15644	5.64	14726	5.9%
R-TSV09	6.35	18268	6.25	17682	3.2%
R-TSV10	6.03	16823	5.93	16245	3.4%
All	6.31	18096	6.08	16778	7.2%

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	1.5%
Perdite ambientali	1.0%
Curtailments	4.4%
Totale perdite escluso scie	11.9%

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

Enercon E175 6.0MW	
Numero Aerogeneratori	10
Produzione netta per WTG P50 (MWh/y)	14635

Siemens Gamesa SG170 6.6MW	
Numero Aerogeneratori	10
Produzione netta per WTG P50 (MWh/y)	14802

Vestas V172 7.2MW	
Numero Aerogeneratori	10
Produzione netta per WTG P50 (MWh/y)	14786

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

$$Prod_{netta_tot} = Prod_{netta_WTG} \times N_{WTG}$$

Enercon E175 6.0MW	
Numero Aerogeneratori	10
Produzione netta P50 dell'intero impianto (MWh/y)	146348

Siemens Gamesa SG170 6.6MW	
Numero Aerogeneratori	10
Produzione netta P50 dell'intero impianto (MWh/y)	148019

Vestas V172 7.2MW	
Numero Aerogeneratori	10
Produzione netta P50 dell'intero impianto (MWh/y)	147860

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	4.0%
Incertezza sul processo di micrositing	7.5%
Incertezza sulla misura della pwc	5.0%
Incertezza complessiva	9.9%

Siemens Gamesa SG170 6.6MW	
Incertezza sulla storicizzazione del sito	4.0%
Incertezza sul processo di micrositing	7.6%
Incertezza sulla misura della pwc	5.0%
Incertezza complessiva	10.0%

Vestas V172 7.2MW	
Incertezza sulla storicizzazione del sito	4.0%
Incertezza sul processo di micrositing	7.1%
Incertezza sulla misura della pwc	5.0%
Incertezza complessiva	9.6%

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]	146.3	2439
P62.5 [GWh/y - heq]	141.7	2362
P75 [GWh/y - heq]	136.6	2276
P90 [GWh/y - heq]	127.8	2129

Siemens Gamesa SG170 6.6MW		
P50 [GWh/y - heq]	148.0	2243
P62.5 [GWh/y - heq]	143.3	2172
P75 [GWh/y - heq]	138.1	2092
P90 [GWh/y - heq]	129.1	1956

Vestas V172 7.2MW		
P50 [GWh/y - heq]	147.9	2054
P62.5 [GWh/y - heq]	143.4	1991
P75 [GWh/y - heq]	138.3	1921
P90 [GWh/y - heq]	129.7	1802

