

**Mod. 8.3.02-Rev0**

*TEA REPORT 21-254 Rev. 0*

Via Ponte a Piglieri, 8 56122 Pisa

*telephone: + 39 050 6396101*

*telefax: + 39 050 6396110*


*e-mail: [info@tea-group.com](mailto:info@tea-group.com)*

*[www.tea-group.com](http://www.tea-group.com)*

***A. Bertolini***  
***A. Fani***

# **Analisi CFD per il calcolo dell'effetto downwashing e della turbolenza a terra dovuto alle pale eoliche**

**Impianto eolico 34MWp – Porto  
Torres – Eni New Energy**

|   |   |   |  |                               |                              |
|---|---|---|--|-------------------------------|------------------------------|
| <b>TEA SISTEMI SPA</b>                                    |   |  |  |                               |                              |
| <b>CENTRO PER LE TECNOLOGIE ENERGETICHE ED AMBIENTALI</b> |   |   |  |                               |                              |
|   |   | <b>DOC.N°</b><br><b>21-254 Rev. 0</b>   |  |                               |                              |
| <b>PROGETTO</b><br>PROJECT                                | O21/TEL1/C09 (Downwashing_Pala_Eolica)  |   |  |                               |                              |
| <b>DISTRIBUZIONE</b><br>DISTRIBUTION                      | <b>Eni New Energy</b>   |   |  |                               |                              |
| <b>TITOLO</b><br>TITLE                                    | <b><i>Analisi CFD per il calcolo dell'effetto downwashing e della turbolenza a terra dovuto alle pale eoliche</i></b>   |   |  |                               |                              |
| <b>SOMMARIO</b><br>ABSTRACT                               | <p>L'impianto eolico in progetto risulta attiguo ad aree SIN e si trova frequentemente sopravento rispetto alle medesime, è quindi richiesto dalle autorità competenti che il progetto venga integrato con adeguate valutazioni circa gli eventuali effetti collaterali all'installazione degli aerogeneratori sul regime aerodinamico dell'area, quali fenomeni di downwashing e turbolenze a terra, che potrebbero causare la dispersione ad ampio raggio di materiale contaminato eventualmente depositato nelle aree di cui sopra.</p> <p>A tal fine è stata effettuata un'analisi CFD (Computational Fluid Dynamics) del campo di moto generato dalla presenza di una singola pala eolica in campo aperto, per due condizioni meteo.</p> |   |  |                               |                              |
| <b>PAROLE CHIAVE</b><br>KEY WORDS                         | CFD, Downwashing, Turbolenza a terra, Pale Eoliche  |   |  |                               |                              |
| <b>NOTE</b><br>REMARKS                                    |   |   |  |                               |                              |
| 2   |   |   |  |                               |                              |
| 1   |   |   |  |                               |                              |
| 0   | 20/04/2021  | Emesso per commenti   | <i>Alessio Bertolini</i><br>A. Bertolini | <i>Anrea Fani</i><br>A. Fani  | Eni new energy               |
| <b>REV.</b><br>REV.                                       | <b>DATA</b><br>DATE   | <b>DESCRIZIONE</b><br>DESCRIPTION   | <b>REDATTO</b><br>PREPARED               | <b>CONTROLLATO</b><br>CHECKED | <b>APPROVATO</b><br>APPROVED |

File: TEA21-254Rev0\_Downwashing\_Pala\_Eolica\_Report

## INDICE

|          |   |           |
|----------|---|-----------|
| <b>1</b> | <b>INTRODUZIONE</b> .....                   | <b>4</b>  |
| <b>2</b> | <b>METODOLOGIA</b> .....                    | <b>5</b>  |
| 2.1      | DATI DI BASE ED IMPOSTAZIONI NUMERICHE..... | 5         |
| 2.1      | SOFTWARE UTILIZZATO.....                    | 7         |
| 2.2      | DATI AMBIENTALI.....                        | 7         |
| 2.3      | CONDIZIONI OPERATIVE.....                   | 12        |
| <b>3</b> | <b>RISULTATI</b> .....                      | <b>14</b> |
| <b>4</b> | <b>CONCLUSIONI</b> .....                    | <b>20</b> |
| <b>5</b> | <b>BIBLIOGRAFIA</b> .....                   | <b>21</b> |

## 1 INTRODUZIONE

L'obiettivo del presente lavoro è quello calcolare l'effetto downwashing e la turbolenza a terra dovuto alla presenza delle pale eoliche nell'ambito del progetto di un impianto eolico di tipo on-shore di potenza nominale complessiva pari a 34MW e costituito da 6 aerogeneratori di potenza nominale unitaria paria a 5.67MW, che Eni New Energy S.p.A. intende realizzare nelle aree di pertinenza Eni Rewind S.p.A. limitrofe allo Stabilimento Industriale di Porto Torres (SS).

L'impianto eolico in progetto risulta attiguo ad aree SIN e si trova frequentemente sopravento rispetto alle medesime, è quindi richiesto dalle autorità competenti che il progetto venga integrato con adeguate valutazioni circa gli eventuali effetti collaterali all'installazione degli aerogeneratori sul regime aerodinamico dell'area, quali fenomeni di downwashing e turbolenze a terra, che potrebbero causare la dispersione ad ampio raggio di materiale contaminato eventualmente depositato nelle aree di cui sopra.

A tal fine è stata effettuata un'analisi CFD (Computational Fluid Dynamics) del campo di moto generato dalla presenza di una singola pala eolica in capo aperto, per due condizioni meteo. L'analisi è stata quindi svolta senza tenere in considerazione la reale geometria del sito (conformazione del terreno, presenza di serbatoi, edifici etc.), che in prima approssimazione è pianeggiante. Il risultato di questa analisi preliminare è quindi la valutazione del campo di moto in prossimità del terreno con e senza pala eolica al fine di escludere o meno l'eventuale fenomeno del downwashing.

## 2 METODOLOGIA

Il presente capitolo descrive la metodologia adottata per il calcolo della turbolenza atmosferica generata da una pala eolica. Lo studio del campo di moto nell'intorno della turbina eolica è stato effettuato utilizzando il codice di calcolo CFD (Computational Fluid Dynamics) commerciale STAR-CCM+.

Nei paragrafi successivi sono riportati in dettaglio i dati di base, le assunzioni adottate ed i principali risultati ottenuti.

### 2.1 DATI DI BASE ED IMPOSTAZIONI NUMERICHE

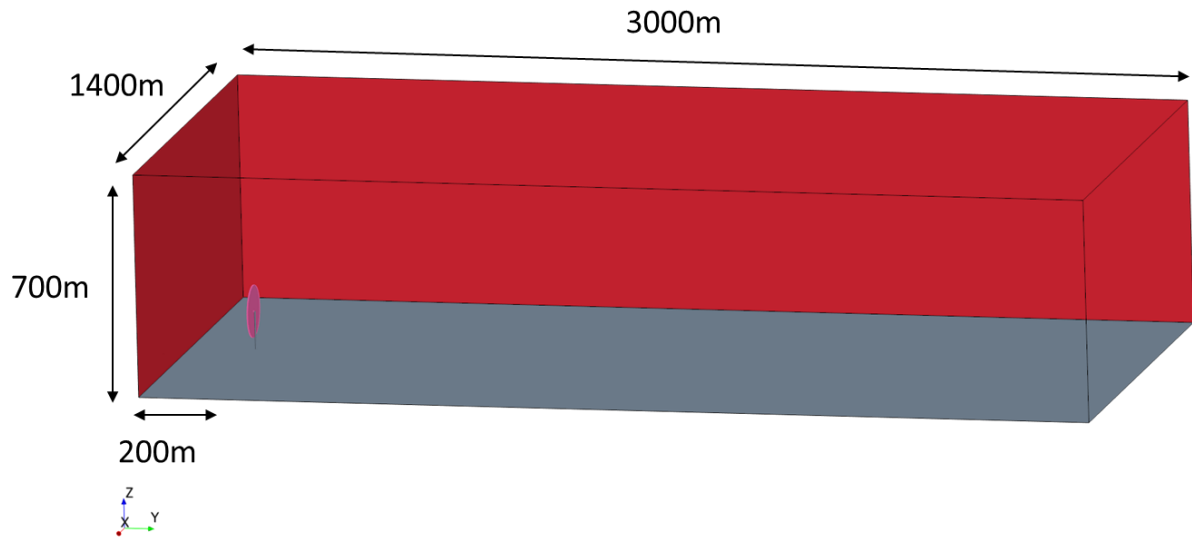
Lo studio è stato condotto simulando un dominio sufficientemente grande da non avere influenza delle condizioni al contorno sul risultato. Il dominio analizzata è riportata in Figura 1. Come è possibile vedere dall'immagine è stata simulata una sola pala eolica in campo aperto, posizionata a 200m dalla superficie d'ingresso del vento. Le dimensioni del dominio simulato sono 3000m x 1400m x 700m.

L'aerogeneratore ha le seguenti caratteristiche:

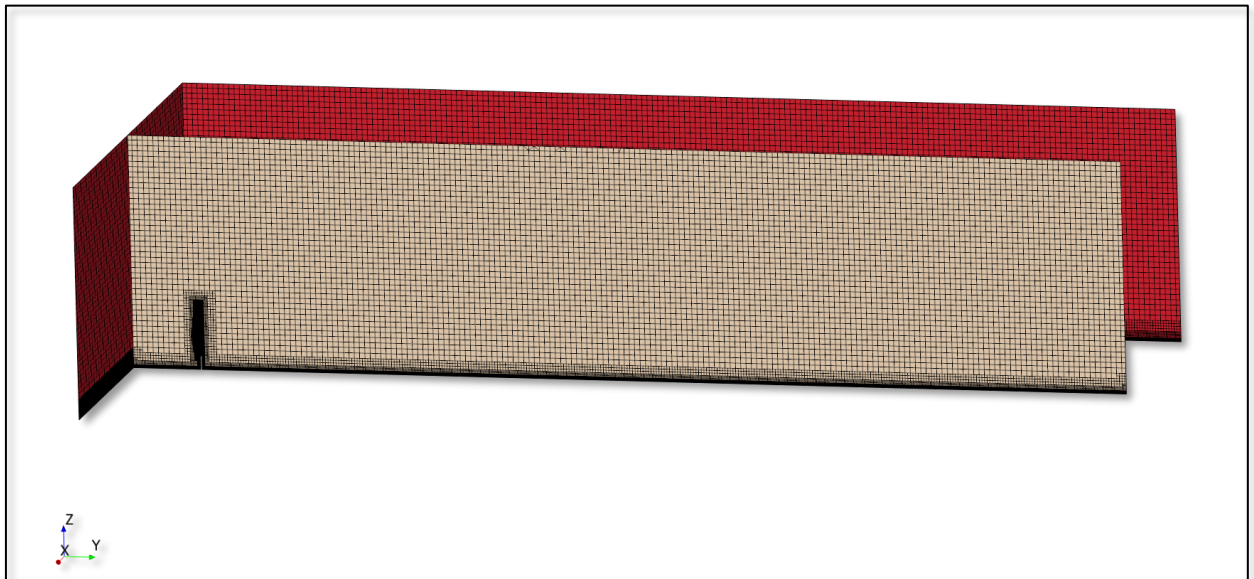
- Altezza hub dell'aerogeneratore: 119m;
- Diametro rotore: 165m.

Per descrivere il moto della pala si è utilizzato il modello virtual disk. Questo modello, simula l'effetto di una turbomacchina sul campo di flusso circostante. La geometria della turbina non è risolta, invece, le forze del corpo create dalla macchina rotante sono distribuite su un volume cilindrico del disco.

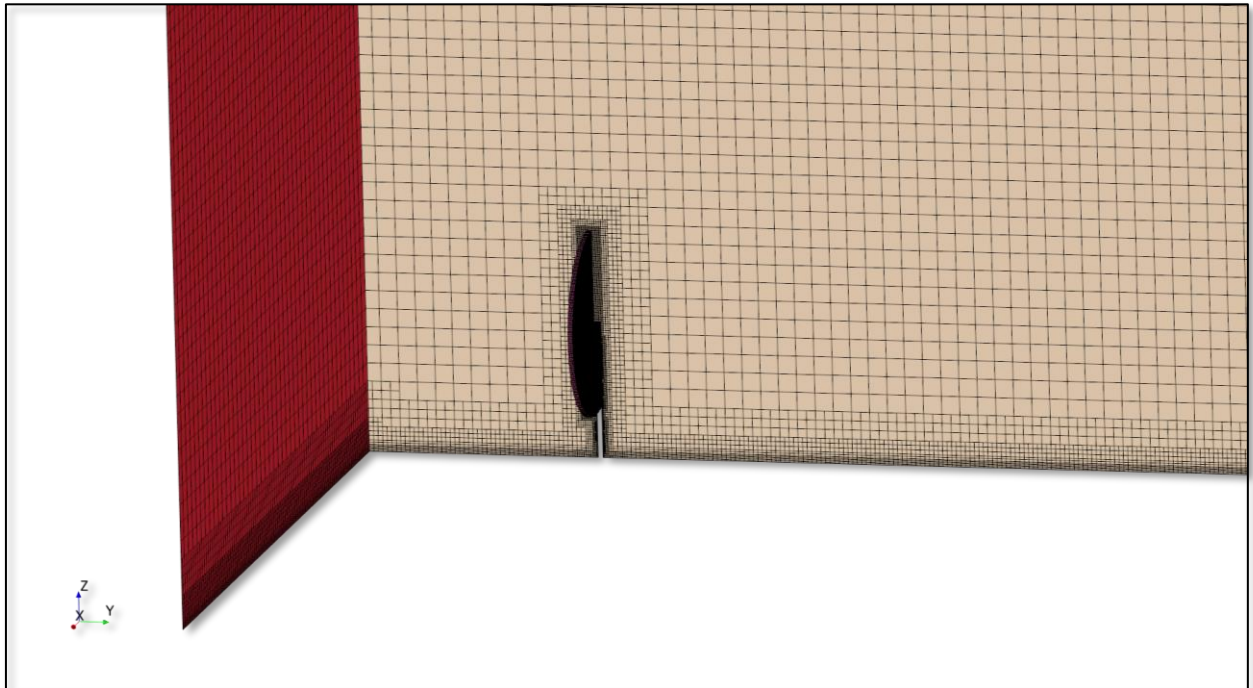
La discretizzazione del dominio di calcolo è stata fatta utilizzando celle trimmate. Celle con dimensioni minori sono state create in prossimità della turbina eolica ed in prossimità del suolo. In Figura 2 e Figura 3 sono riportati dei particolari della discretizzazione del dominio utilizzato.



**Figura 1 – Geometria: dominio di calcolo**



**Figura 2 – Particolare della discretizzazione del dominio di calcolo**



**Figura 3 – Particolare della discretizzazione del dominio di calcolo**

## 2.1 SOFTWARE UTILIZZATO

STAR-CCM+<sup>1</sup> è uno strumento CFD (Fluidodinamica Computazionale) ampiamente utilizzato in molti settori industriali ed accademici, basato sul metodo dei volumi finiti. Appropriato per analisi 3D-2D sia transitorie che stazionarie. Permette di simulare problemi multifase, reazioni chimiche, scambio termico, cambiamenti di fase, flussi laminari e turbolenti e molte altre tematiche relative alla fluidodinamica complessa.

## 2.2 DATI AMBIENTALI

I dati meteo<sup>2</sup> della zona sono riportati in Figura 4, in termini di rosa dei venti e frequenze. Per ogni direzione di vento le frequenze associate alle diverse velocità di vento sono rappresentate con una distribuzione di Weibull.

Per l'analisi CFD sono state prese in considerazione due condizioni meteo:

- **Caso 1:** velocità del vento di **5.8m/s** a 120m di altezza
- **Caso 2:** velocità del vento di **15m/s** a 120m di altezza.

Per entrambe le condizioni meteo si è consideratata una classe di stabilità D.

I profili di vento e turbolenza imposti, per il Caso 1, sono riportati in Figura 5, Figura 6 e Figura 7, mentre quelli per il Caso 2 sono riportati in Figura 8, Figura 9 e Figura 10.

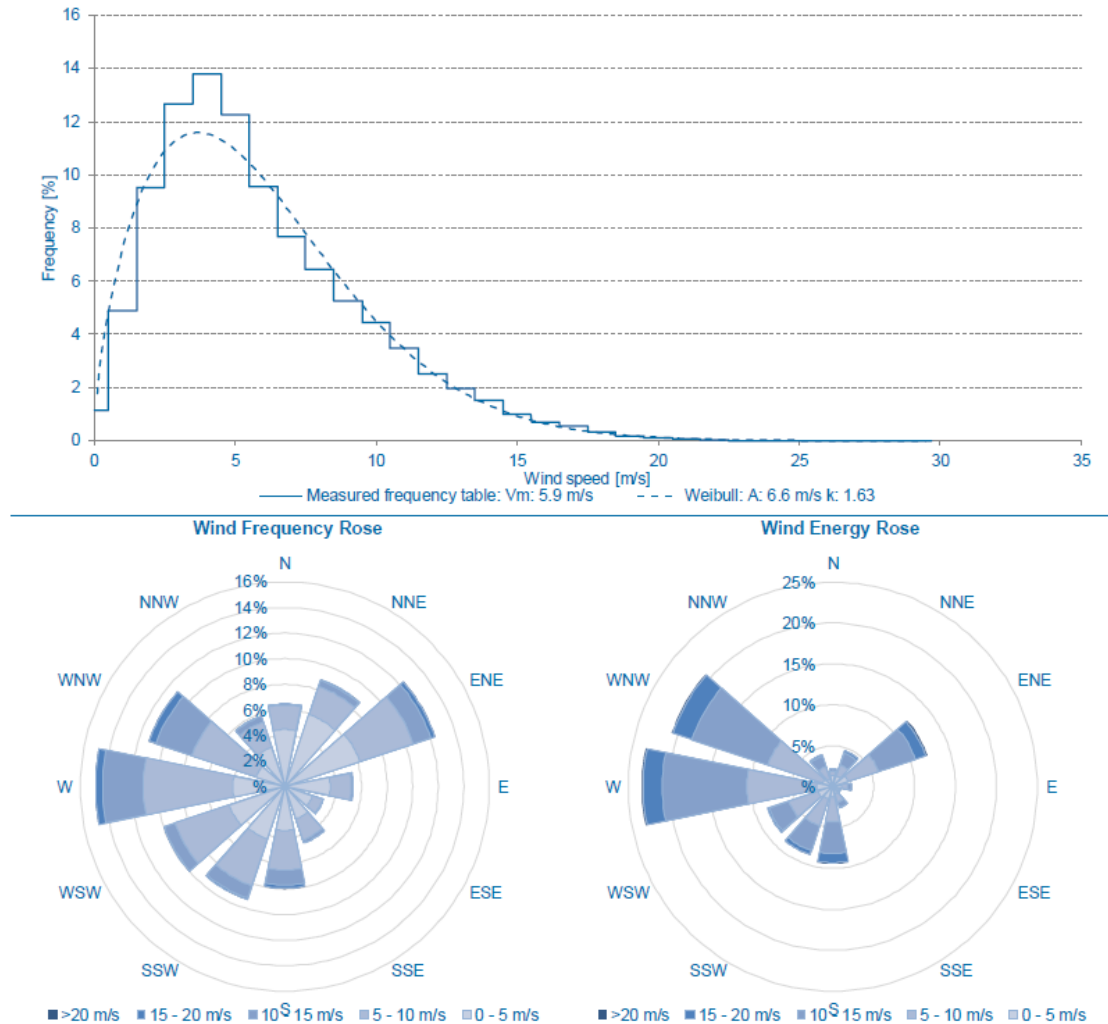
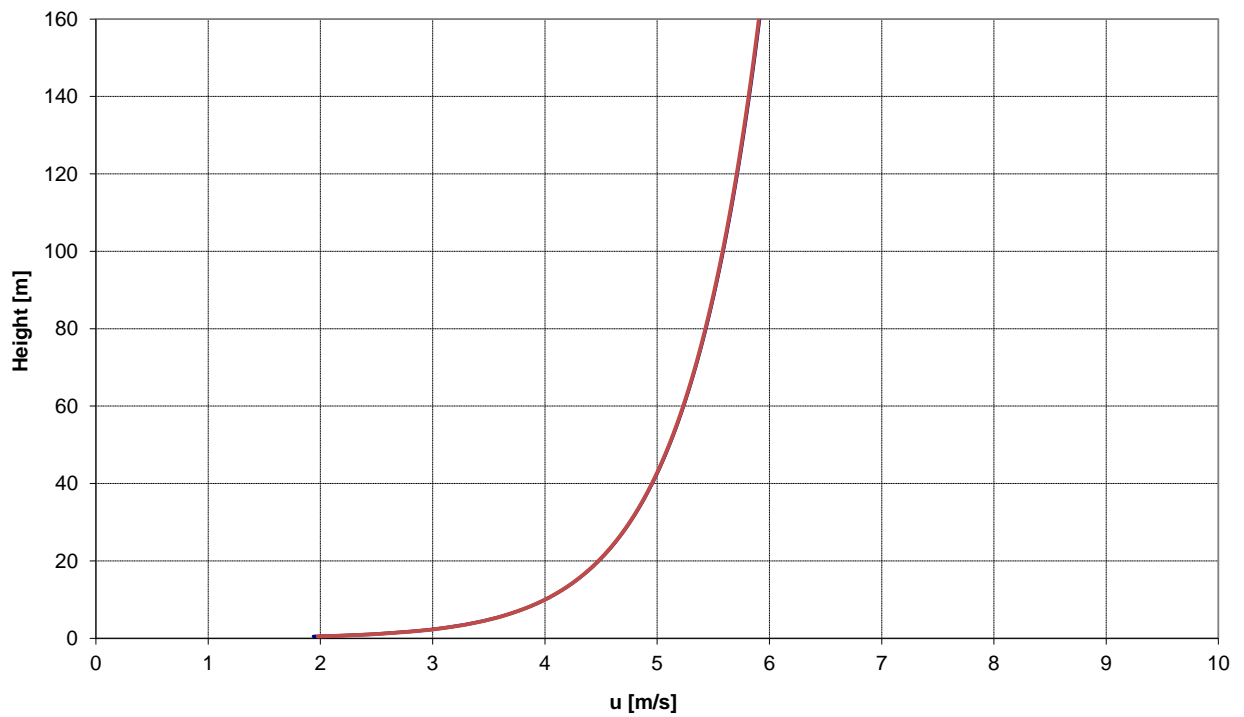
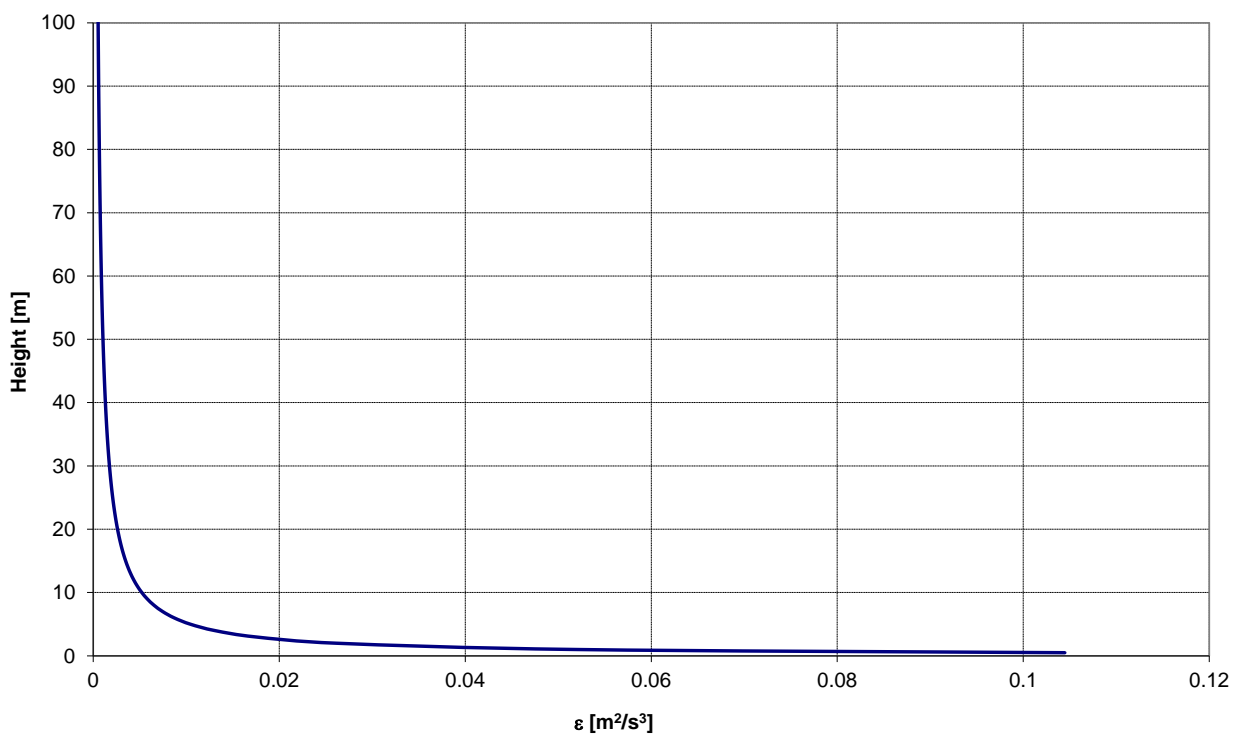


Figura 4 – Dati meteo a 120m di altezza

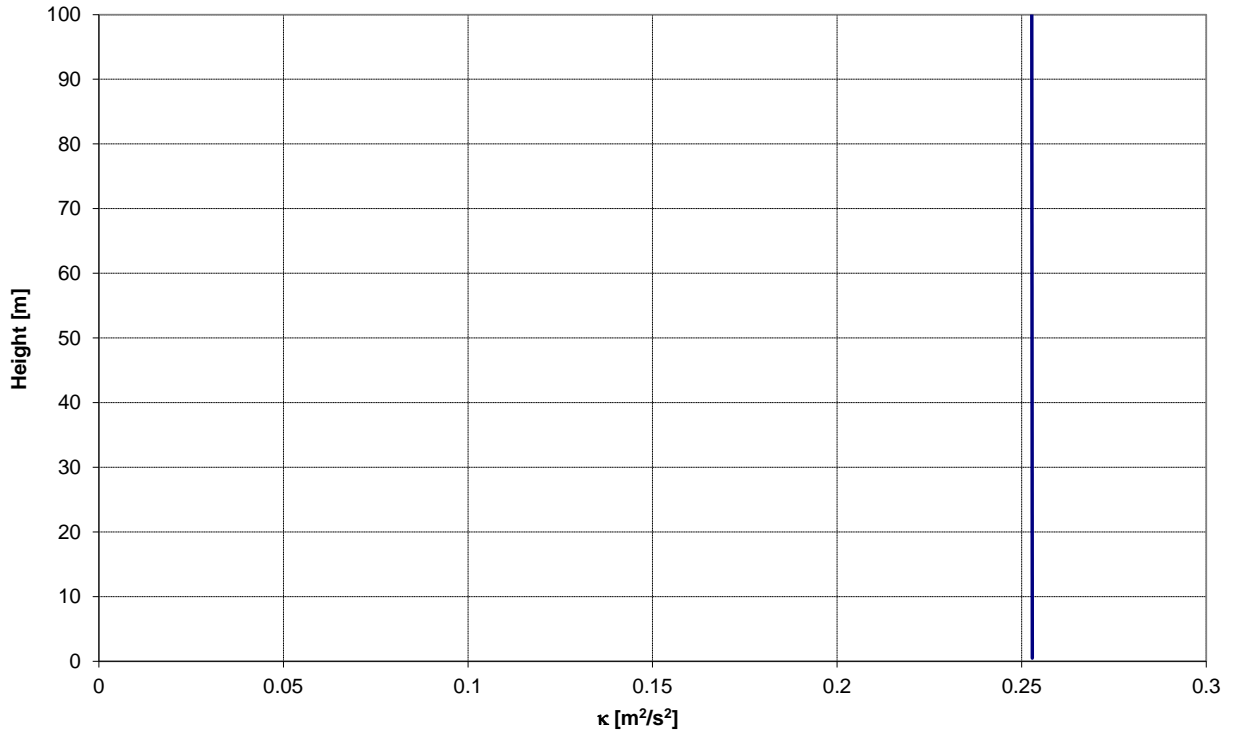




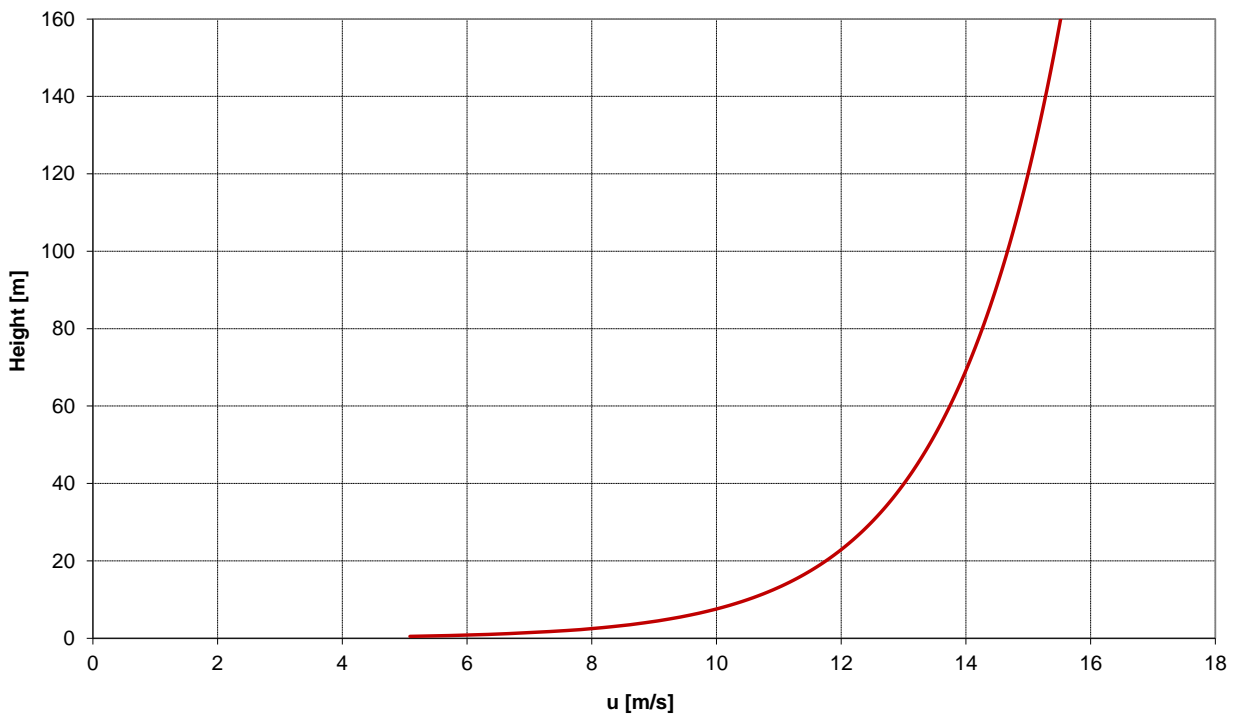
**Figura 5 – Profilo di velocità Caso 1**



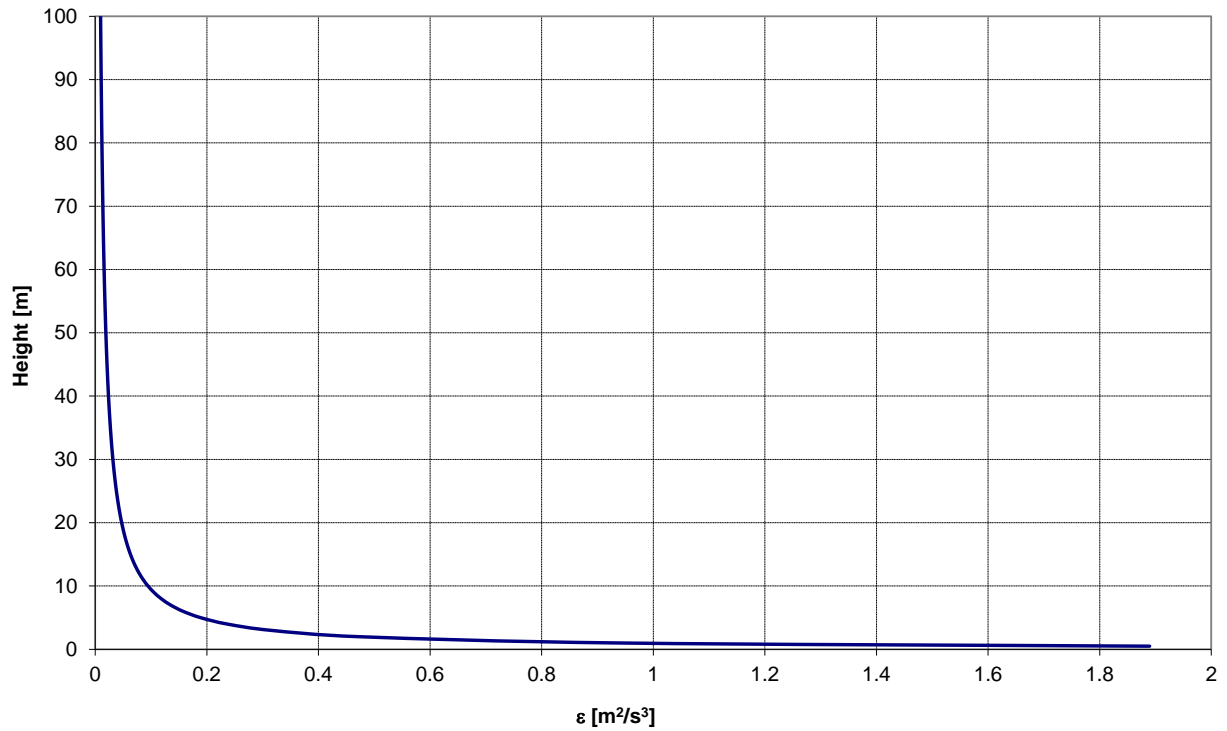
**Figura 6 – Profilo di turbolenza ε Caso 1**



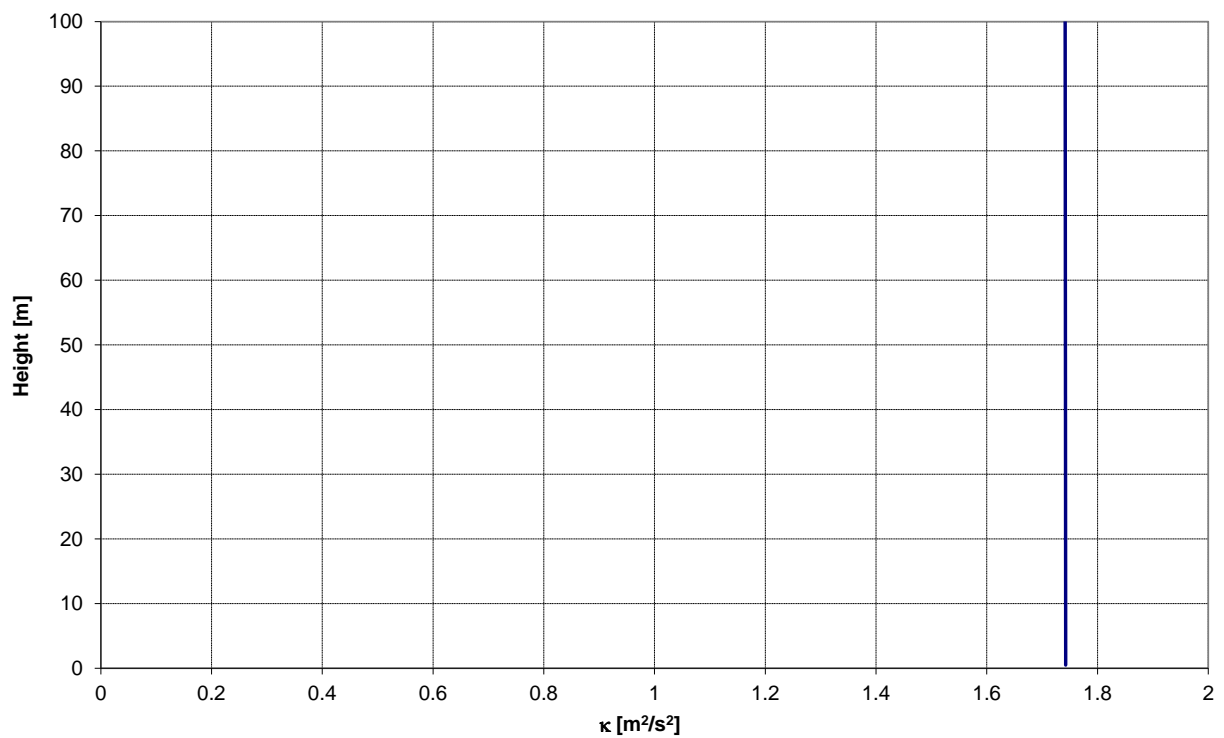
**Figura 7 – Profilo di turbolenza  $\kappa$  Caso 1**



**Figura 8 – Profilo di velocità Caso 2**



**Figura 9 – Profilo di turbolenza  $\epsilon$  Caso 2**



**Figura 10 – Profilo di turbolenza  $\kappa$  Caso 2**

### 2.3 CONDIZIONI OPERATIVE

La velocità di rotazione del rotore è funzione della velocità del vento, come riportato in Tabella

1. Per velocità inferiori a 3m/s la turbina eolica è ferma.

| Wind Speed [m/s] | Speed [RPM] |
|------------------|-------------|
| 3.0              | 5,26        |
| 3.5              | 5,50        |
| 4.0              | 5,50        |
| 4.5              | 5,50        |
| 5.0              | 5,51        |
| 5.5              | 5,74        |
| 6.0              | 6,22        |
| 6.5              | 6,75        |
| 7.0              | 7,29        |
| 7.5              | 7,82        |
| 8.0              | 8,34        |
| 8.5              | 8,86        |
| 9.0              | 9,20        |
| 9.5              | 9,29        |
| 10.0             | 9,32        |
| 10.5             | 9,32        |
| 11.0             | 9,32        |
| 11.5             | 9,32        |
| 12.0             | 9,32        |
| 12.5             | 9,32        |
| 13.0             | 9,32        |
| 13.5             | 9,32        |
| 14.0             | 9,33        |
| 14.5             | 9,33        |
| 15.0             | 9,32        |
| 15.5             | 9,32        |
| 16.0             | 9,32        |
| 16.5             | 9,32        |
| 17.0             | 9,32        |
| 17.5             | 9,32        |
| 18.0             | 9,32        |
| 18.5             | 9,29        |
| 19.0             | 9,00        |
| 19.5             | 8,72        |
| 20.0             | 8,52        |
| 20.5             | 8,32        |
| 21.0             | 8,10        |
| 21.5             | 7,84        |
| 22.0             | 7,57        |
| 22.5             | 7,30        |

| Wind Speed<br>[m/s] | Speed<br>[RPM] |
|---------------------|----------------|
| 23.0                | 7,07           |
| 23.5                | 6,84           |
| 24.0                | 6,61           |

**Tabella 1 – Velocità media di rotazione del rotore in funzione della velocità del vento**

### 3 RISULTATI

Di seguito vengono riportati i principali risultati delle simulazioni effettuate.

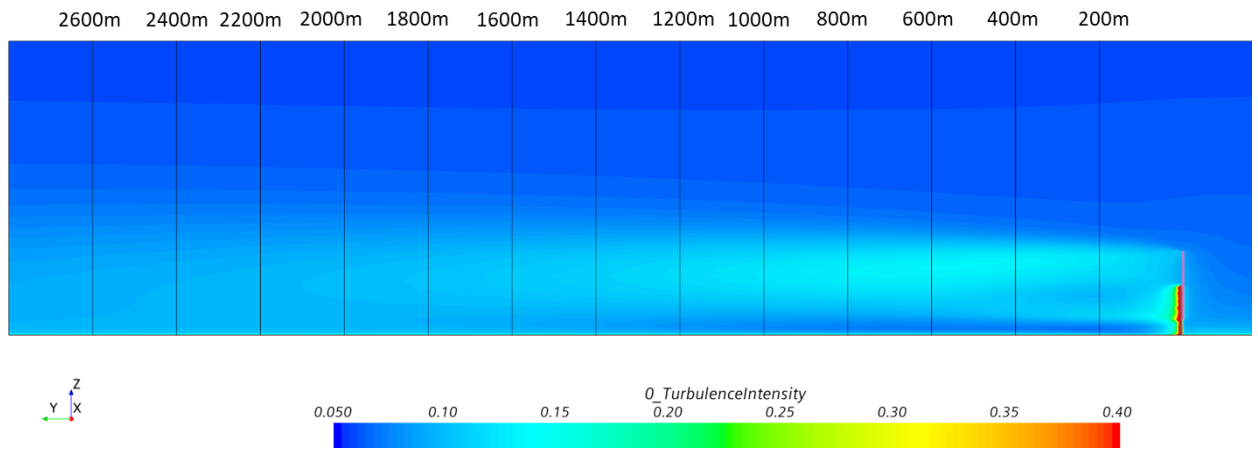
Per valutare la turbolenza generata dalla turbina eolica si è utilizzata l'intensità turbolenta (I), definita come:

$$I = \frac{(w'_{rms})}{v}$$

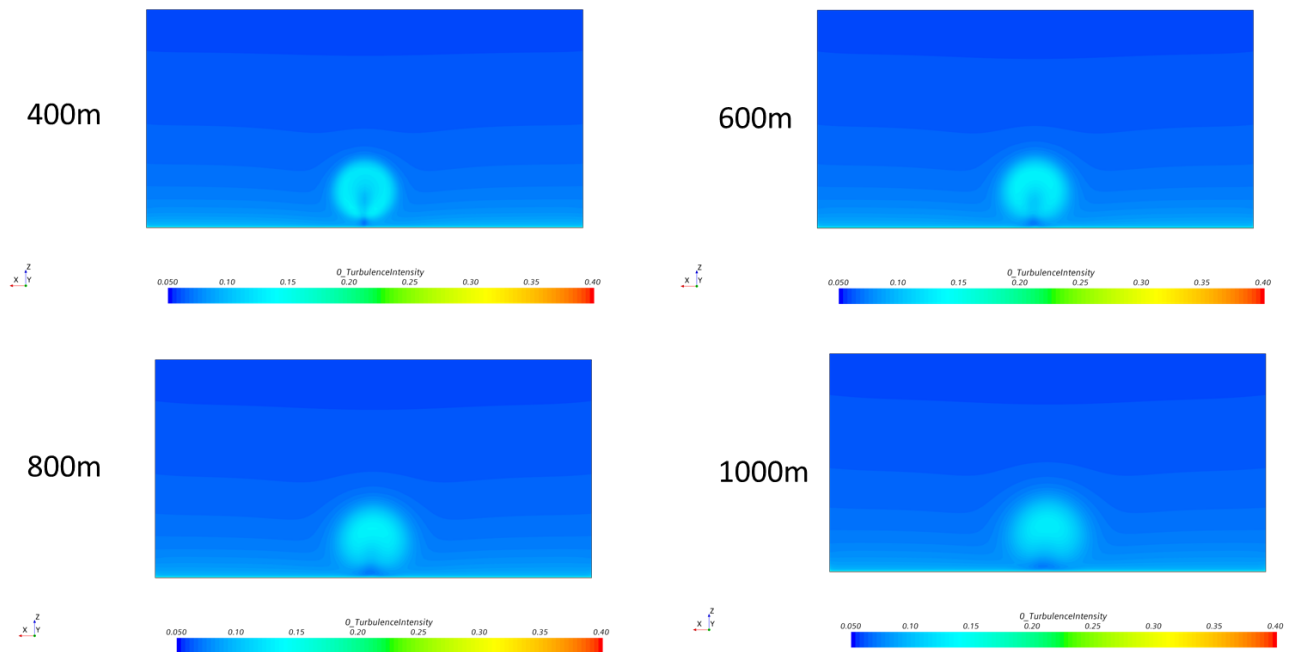
Dove  $v$  è la velocità e mentre  $w'_{rms}$  è la componente dell'energia cinetica turbolenta ( $k$ ) definita come:

$$k = \frac{(u'_{rms})^2 + (v'_{rms})^2 + (w'_{rms})^2}{2} \text{ con } u'_{rms} = v'_{rms} = w'_{rms}$$

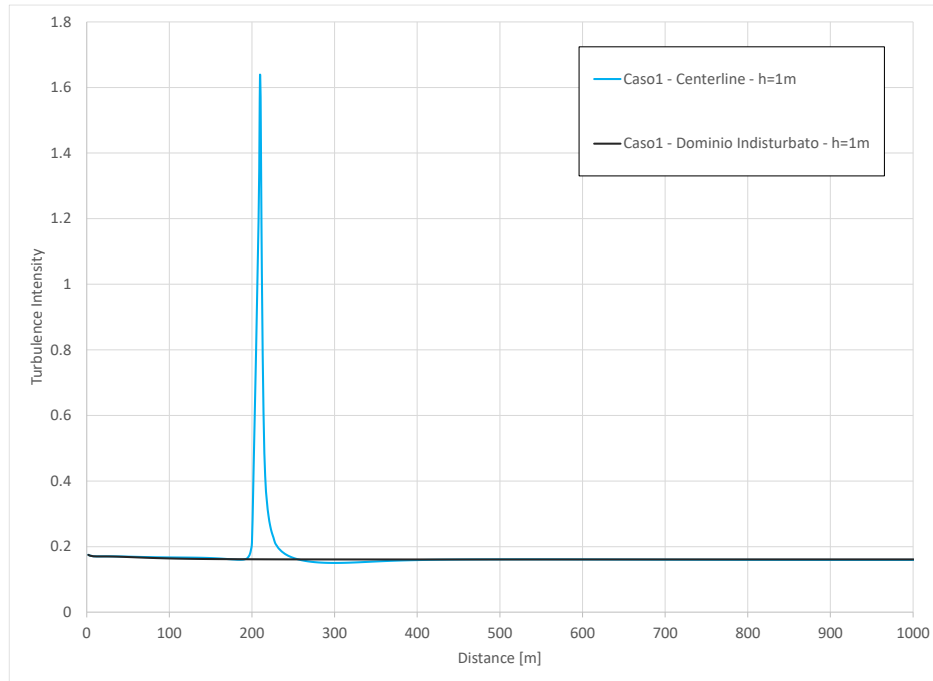
In Figura 11 e Figura 12 sono riportati i valori d'intensità turbolenta (I), rispettivamente su un piano verticale posto al centro della turbina eolica e su dei piani verticali a varie distanze dalla pala eolica. Dalle immagini è possibile notare come la turbolenza aumenti, rispetto al dominio indisturbato, soprattutto nelle zone ad altezza pala, quindi qualche metro sopra al suolo. Per meglio valutare questo comportamento, in Figura 13 e Figura 14 sono riportati i valori di turbolenza. In Figura 13 è riportato il valore I ad 1m di altezza dal suolo, lungo il piano verticale posto al centro della turbina (curva azzurra) ed il valore di turbolenza per il campo indisturbato (curva nera). In Figura 14 sono invece riportati i valori di turbolenza a varie distanze dalla pala, lungo la verticale ed in rosso è riportato il valore di turbolenza per il campo di moto indisturbato. Come si nota dai due grafici, l'intensità turbolenta aumenta in prossimità della pala, per poi decrescere, fino a valori inferiori al campo indisturbato **dopo circa 50m**, e dopo qualche centinaio di metri si riporta al valore indisturbato. Valori di turbolenza superiori al campo indisturbato si possono riscontrare tra i 30 ed i 300m di altezza.



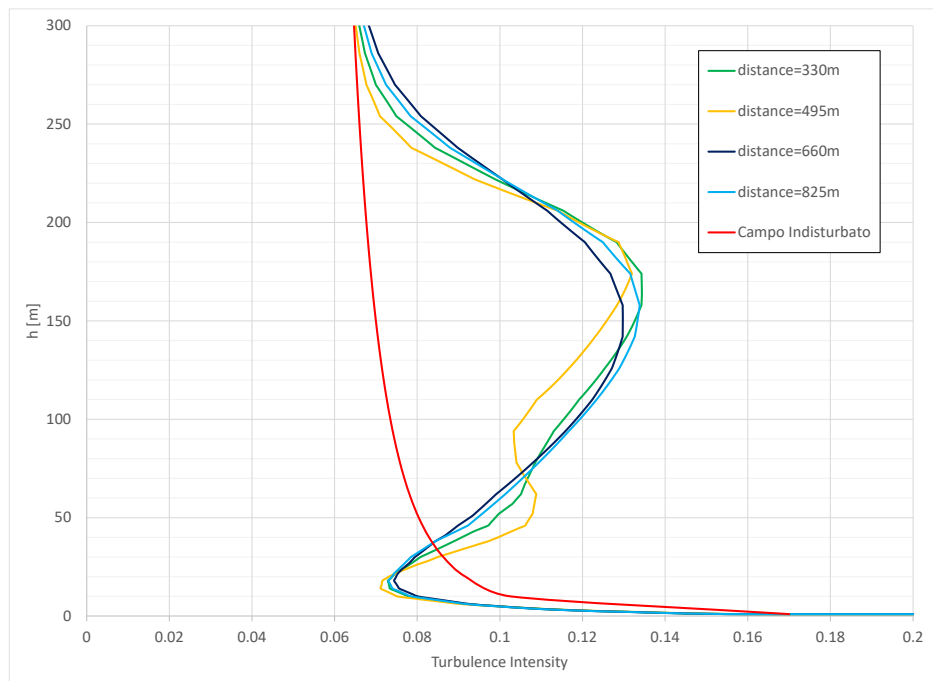
**Figura 11 – Caso 1: Colormap su una superficie verticale posta al centro della turbina eolica**



**Figura 12 – Caso 1: Colormap su superfici verticali poste rispettivamente a 400m, 600m, 800m e 1000m**



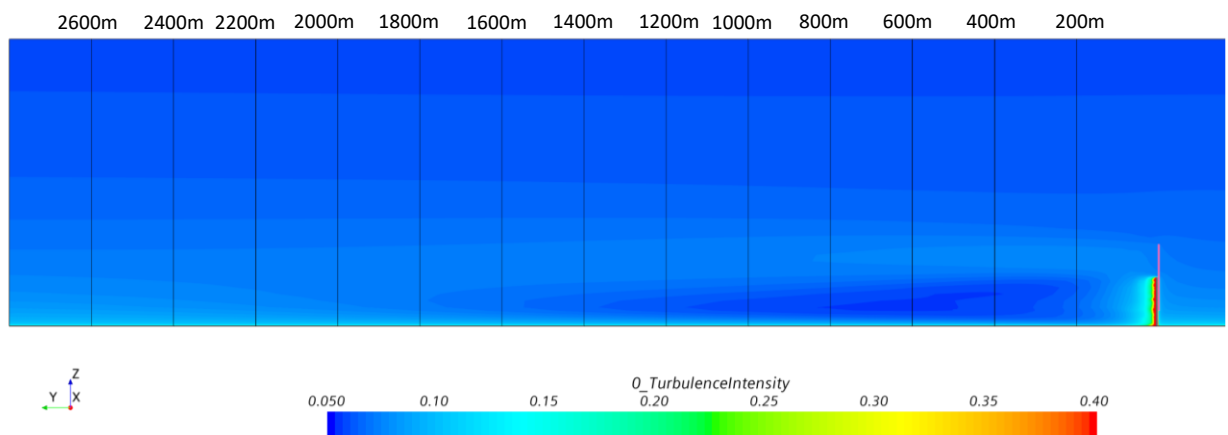
**Figura 13 – Caso 1: Andamento dell'intensità turbolenta ad 1m dal suolo**



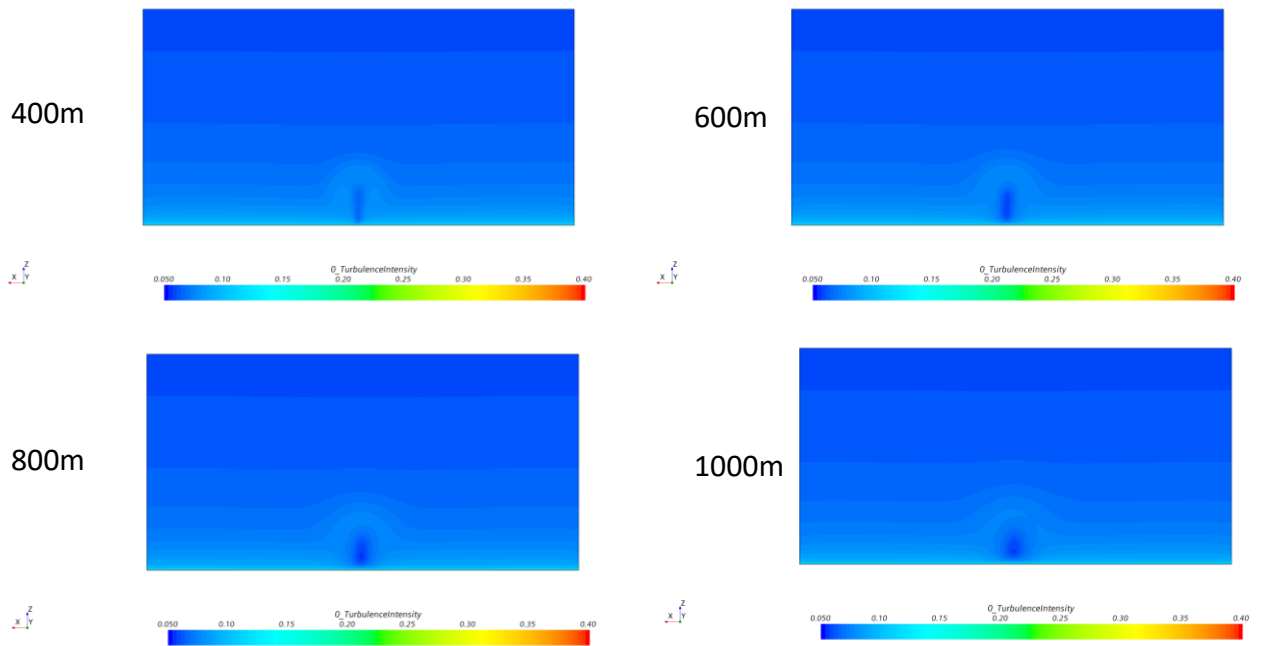
**Figura 14 – Caso 1: Andamento dell'intensità turbolenta a varie distanze dalla turbina eolica**



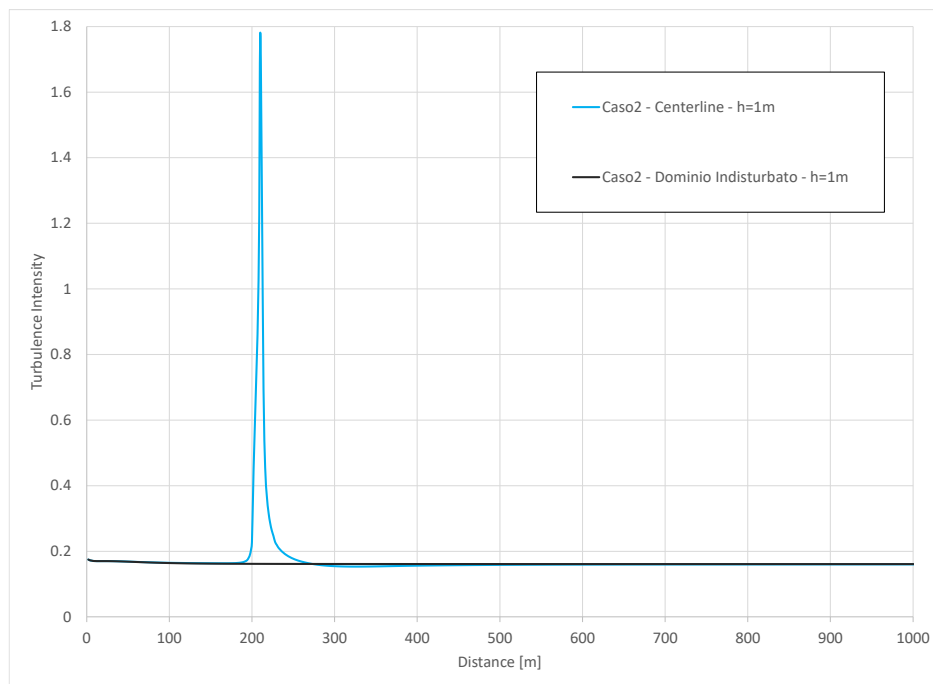
La stessa analisi effettuata per il Caso 1 è stata effettuata per il Caso 2. In Figura 15 e Figura 16 sono riportati i valori d'intensità turbolenta (I), rispettivamente su un piano verticale posto al centro della turbina eolica e su dei piani verticali a varie distanze dalla pala eolica. Anche in questo caso è possibile notare come la turbolenza aumenta, rispetto al dominio indisturbato, nelle zone ad altezza pala, quindi non al suolo. Per meglio valutare questo comportamento, in Figura 17 e Figura 18 sono riportati i valori di turbolenza. In Figura 17 è riportato il valore I ad 1m di altezza dal suolo, lungo il piano verticale posto al centro della turbina (curva azzurra) ed il valore di turbolenza per il campo indisturbato (curva nera). In Figura 18 sono invece riportati i valori di turbolenza a varie distanze dalla pala lungo la verticale ed in rosso è riportato il valore di turbolenza per il campo di moto indisturbato. Come si nota dai due grafici, l'intensità turbolenta aumenta in prossimità della pala, per poi decrescere, fino a valori inferiori al campo indisturbato **dopo circa 50m**, e dopo qualche centinaio di metri si riporta al valore del campo indisturbato. Valori di turbolenza superiori al campo indisturbato si possono riscontrare tra i 130 ed i 300m di altezza.



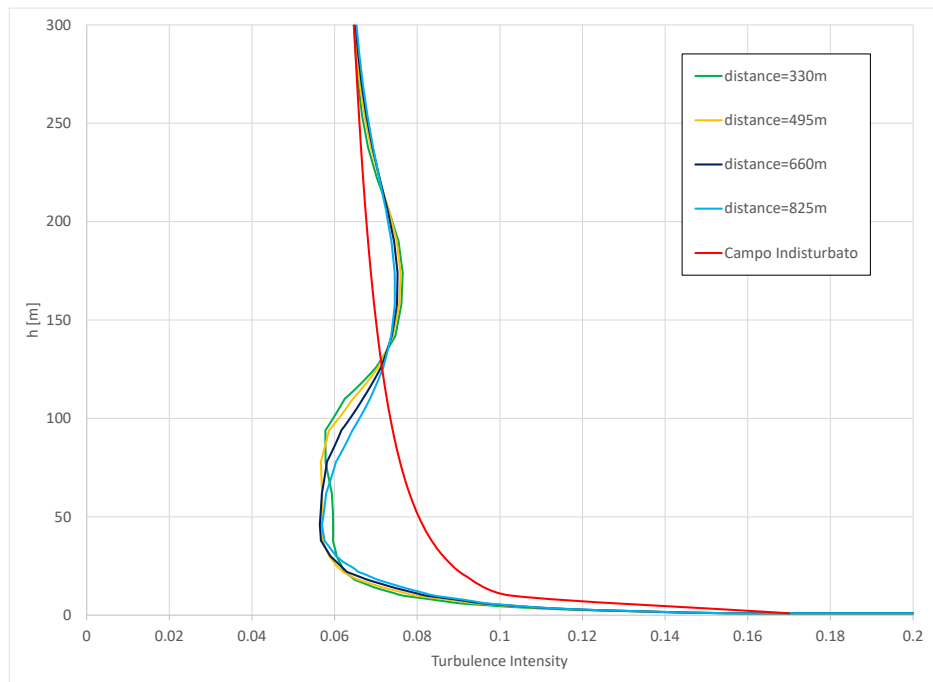
**Figura 15 – Caso 2: Colormap su una superficie verticale posta al centro della turbina eolica**



**Figura 16 – Caso 2: Colormap su superfici verticali poste rispettivamente a 400m, 600m, 800m e 1000m**



**Figura 17 – Caso 2: Andamento dell'intensità turbolenta ad 1m dal suolo**



**Figura 18 – Caso 2: Andamento dell'intensità turbolenta a varie distanze dalla turbina eolica**

## 4 CONCLUSIONI

L'impianto eolico in progetto risulta attiguo ad aree SIN e si trova frequentemente sopravento rispetto alle medesime, è quindi richiesto dalle autorità competenti che il progetto venga integrato con adeguate valutazioni circa gli eventuali effetti collaterali all'installazione degli aerogeneratori sul regime aerodinamico dell'area, quali fenomeni di downwashing e turbolenze a terra, che potrebbero causare la dispersione ad ampio raggio di materiale contaminato eventualmente depositato nelle aree di cui sopra.

A tal fine è stata effettuata un'analisi CFD (Computational Fluid Dynamics) del campo di moto generato dalla presenza di una singola pala eolica in capo aperto, per due condizioni meteo. Dallo studio svolto è possibile affermare che l'aumento di turbolenza a terra dovuto alla presenza della turbina eolica si esaurisce nei primi 50m circa a valle delle pale.

## 5 BIBLIOGRAFIA

---

1 STAR CCM+® by Siemens Digital Industries Software v.

2 Wind measurement campaign & Energy assessment - ENI Industrial Plant Porto Torres (SS), Eni  
22/10/2018