



Università Politecnica delle Marche
Scuola di Dottorato di Ricerca in Scienze dell'Ingegneria
Corso di Dottorato in Ingegneria Industriale

Site assessment and in situ maintenance of a wind farm

Tesi di dottorato di
Erika Costanzo

Tutor:

Prof. Ing. Renato Ricci

Coordinatore del corso di dottorato:

Prof. F. Mandorli

XVII ciclo – nuova serie

SOMMARIO

Gli effetti dell'orografia di uno specifico sito sul flusso di vento incidente su una turbina eolica possono essere analizzati attraverso due metodologie: misure dirette in sito o test sperimentali in galleria del vento su modelli in scala. La prima opzione ha come vantaggio l'individuazione delle reali condizioni di flusso che si sviluppano in una data area, a prezzo però di tempi di esecuzione delle prove non indifferenti e limitato numero di punti che si possono indagare a causa degli elevati costi associati all'acquisto delle attrezzature richieste. La seconda opzione consente sicuramente una notevole riduzione dei tempi e dei costi, ma le approssimazioni che necessariamente occorre fare possono condurre a risultati pesantemente distanti dalla realtà.

In questo lavoro è stato affrontato il primo dei due metodi esposti attraverso la certificazione di una turbina eolica direttamente in orografia complessa.

Poiché il caso di studio è protetto da segreto industriale, il contributo della scrivente è stato, in particolare, la definizione delle procedure necessarie a caratterizzare gli effetti del sito sul flusso incidente mediante prove dirette, un commento critico a quanto è stato affrontato ed un'analisi delle normative di riferimento durante lo svolgimento dei lavori.

Parallelamente alla certificazione della turbina è emerso quanto siano difficoltose le operazioni di ispezione della macchina, specie in orografia complessa. Tipicamente avvengono tramite l'arrampicata su fune di un operatore, ma in situazioni in cui i venti sono più forti e le condizioni climatiche possono cambiare velocemente, queste operazioni sono tutt'altro che banali.

Il gruppo di ricerca di cui la scrivente è stata parte, ha quindi deciso di intraprendere la messa appunto di un sistema basato sull'utilizzo di un mezzo aereo a pilotaggio remoto il cui scopo fosse quello di consentire ispezioni visive e nell'infrarosso dello stato di manutenzione delle turbine eoliche.

INDICE DEI CONTENUTI

INTRODUZIONE	15
CAPITOLO 1	
LA SITE CALIBRATION, UN CASO REALE: L'AREA MONTANA DI SERRAPETRONA (MC).....	19
INTRODUZIONE	19
1.1 LA SITE CALIBRATION DELL'AREA MONTANA DI SERRAPETRONA (MC)	20
1.1.1 INQUADRAMENTO GENERALE.....	20
1.1.2 RILEVAZIONE DEGLI OSTACOLI.....	22
1.1.3 RILEVAZIONE DELLE CARATTERISTICHE TOPOGRAFICHE.....	25
1.1.4 INSTALLAZIONE DELLE TORRI ANEMOMETRICHE	26
1.1.5 IN SITU COMPARISON OF ANEMOMETERS.....	35
1.1.6 SITE CALIBRATION.....	38
1.2 DETERMINAZIONE DELLA POWER CURVE	44
1.3 VALUTAZIONE DELLE INCERTEZZE	48
1.3.1 INCERTEZZE DI CATEGORIA A	49
1.3.2 INCERTEZZE DI CATEGORIA B	50
CAPITOLO 2	
IEC 61400-12-1:2017, IL NUOVO QUADRO NORMATIVO. ASPETTI INNOVATIVI ED OSSERVAZIONI	55
INTRODUZIONE	55
2.1 REMOTE SENSING DEVICES (RSD) [7.2.5]	56
2.2 NUOVA DEFINIZIONE DELLA VELOCITÀ DEL VENTO: REWS, ROTOR EQUIVALENT WIND SPEED [7.2.6, 9.1.3.2]	58
2.3 WIND SHEAR E WIND VEER [7.2.8, ANNEX Q]	62
2.4 NORMALIZZAZIONE DEI DATI [9.1]	63
2.5 VALUTAZIONE DEGLI OSTACOLI E DEL TERRENO [ANNEX A E B].....	65
2.6 SITE CALIBRATION [ANNEX C].....	67
2.7 INSTALLAZIONE DEI SENSORI SULLA TORRE METEO [ANNEX G].....	73
2.7.1 ANEMOMETRI INSTALLATI IN CIMA TORRE [G.2]	74
2.7.2 ANEMOMETRI INSTALLATI IN CIMA TORRE IN CONFIGURAZIONE SIDE-BY-SIDE [G.3].....	74
2.8 INCERTEZZE DI MISURA (ANNEX E)	81

2.9	NORMALIZZAZIONE DELLA POWER CURVE RISPETTO ALLA TURBOLENZA [ANNEX M].....	88
-----	---	----

CAPITOLO 3

PREVISIONE NUMERICA DEL FLUSSO DI VENTO	97
--	-----------

INTRODUZIONE	97
--------------------	----

3.1 WINDSIM	97
-------------------	----

3.1.1 MODELLO DIGITALE DEL TERRENO	102
--	-----

3.1.2 SIMULAZIONI NUMERICHE	108
-----------------------------------	-----

3.2 OPENFOAM	124
--------------------	-----

3.2.1 CREAZIONE DELLA GRIGLIA DI CALCOLO	125
--	-----

3.2.2 CONDIZIONI INIZIALI E A CONTORNO	126
--	-----

3.2.3 CONDIZIONI A PARETE.....	127
--------------------------------	-----

3.2.4 RUGOSITA' VARIABILE	128
---------------------------------	-----

3.2.5 SIMULAZIONI NUMERICHE	129
-----------------------------------	-----

CONCLUSIONI PARTE PRIMA	139
-------------------------------	-----

INTRODUZIONE PARTE SECONDA	143
----------------------------------	-----

CAPITOLO 4

UN DRONE ESACOTTERO CON SISTEMA ANTI-COLLISIONE	152
--	------------

INTRODUZIONE	152
--------------------	-----

4.1 IL DRONE ESACOTTERO	153
-------------------------------	-----

4.2 IL SISTEMA ANTI-COLLISIONE	159
--------------------------------------	-----

4.2.1 I SENSORI A CONTATTO	161
----------------------------------	-----

4.2.2 SVILUPPO LATO HARDWARE.....	163
-----------------------------------	-----

4.2.2.1 ACQUISIZIONE SEGNALI SERVO	165
--	-----

4.2.2.2 MODULO MEMORIA SD	167
---------------------------------	-----

4.2.2.3 LETTURA DATI GPS	168
--------------------------------	-----

4.2.2.4 REALIZZAZIONE DELL'HARDWARE	169
---	-----

4.2.3 SVILUPPO LATO SOFTWARE	172
------------------------------------	-----

4.2.3.1 CODICE SOFTWARE.....	173
------------------------------	-----

4.2.4 TEST FUNZIONALI	175
-----------------------------	-----

4.2.5 CONSIDERAZIONI FINALI SUL DRONE ESACOTTERO... ..	177
--	-----

CAPITOLO 5

PROGETTO A.D.E.L.E. PROGETTO E COSTRUZIONE DEL MULTIROTORE DEDICATO	180
--	------------

INTRODUZIONE	180
--------------------	-----

5.1 DESCRIZIONE GENERALE DELLA STRUTTURA.....	182
---	-----

5.2 IL TELAIO	183
---------------------	-----

5.2.1 ANALISI STRUTTURALI BRACCETTI MOTORI	185
--	-----

5.2.1.1 ANALISI STATICA	186
-------------------------------	-----

5.2.1.2	ANALISI DINAMICA A SIMULAZIONE DI UN URTO	188
5.3	PROPULSIONE ED ELETTRONICA DI POTENZA	190
5.4	AVIONICA DI BORDO	196
5.5	EQUIPAGGIAMENTO	200
5.5.1	TELECAMERA NEL VISIBILE E TERMOCAMERA.....	200
5.5.2	ANALIZZATORE GAS DR1000	202
5.5.3	TETRACAM MACAW.....	203
5.6	COSTRUZIONE DEL DRONE	205
5.7	PROGRAMMAZIONE PIXHAWK 2 CUBE.....	208
5.7.1	MANDATORY HARDWARE	209
5.7.2	OPTIONAL HARDWARE	215
5.8	STIME FINALI DELLE AUTONOMIE DI VOLO	216
5.9	TEST DI VOLO	217
	CONCLUSIONI PARTE SECONDA.....	225
	BIBLIOGRAFIA	227

INDICE DELLE FIGURE

Fig. 1: Profilo verticale di velocità	15
Fig. 2: Effetti di un rilievo sul profilo di velocità	17
Fig. 3: Area d'intervento Serrapetrona	22
Fig. 4: Settori validi (verde) e settori esclusi (rosso) dalla site calibration ..	24
Fig. 5: Dettagli della struttura delle torri	27
Fig. 6: Requisiti di installazione degli strumenti secondo IEC 61400-12-1 Annex G.....	28
Fig. 7: Zone di influenza della torre di misura sul campo di moto	28
Fig. 8: Dettagli dei braccetti di supporto per gli strumenti prima della loro installazione	29
Fig. 9: Configurazione TORRE_1	31
Fig. 10: Configurazione TORRE_2	32
Fig. 11: Vista delle due torri ultimate	33
Fig. 12: vista dell'asta di captazione principale (a), delle aste secondarie (b) e (c) e delle due piastre equipotenziali (d) ed (e).....	34
Fig. 13: Data-set utilizzato per il confronto tra i due anemometri	36
Fig. 14: Regressione lineare tra l'anemometro principale e l'anemometro di controllo.....	37
Fig. 15: Database collezionato per TORRE_1	41
Fig. 16: Database collezionato per TORRE_2	42
Fig. 17: Fattori di correzione del flusso e validazione dei settori di misura ..	43
Fig. 18: Effetto della normalizzazione della velocità del vento.....	45
Fig. 19: Esempi di curva di potenza nel caso di data-set esteso (a) e nel caso di data-set riorganizzato in bin di velocità (b)	47
Fig. 20: Esempio di calcolo della AEP	48
Fig. 21: Altezze di misura della REWS in caso di torre più alta dell'hub ..	59
Fig. 22: Altezze di misura della REWS in caso di torre avente altezza inferiore all'hub	59
Fig. 23: Wind shear exponent vs ora del giorno presso il sito eolico di Serrapetrona.....	69
Fig. 24: Modalità di installazione dei sensori in configurazione top-mounted	75
Fig. 25: Modalità di installazione dei sensori in configurazione side-by-side mounted	76
Fig. 26: Esempio delle dimensioni necessarie a soddisfare i requisiti dell'Annex G in relazione all'installazione di anemometro montato in configurazione	79

Fig. 27: Esempio di una possibile installazione di impianto parafulmine ..	80
Fig. 28: Dettaglio di una possibile installazione di impianto parafulmine..	81
Fig. 29: Initial zero turbulence power curve	89
Fig. 30: Theoretical zero turbulence power curve	90
Fig. 31: Final zero turbulence power curve	90
Fig. 32: Modelli digitali del terreno esportati da Global Mapper senza (a) e con (b) sovrapposizione del layer ASTER GDEM.....	103
Fig. 33: Vista satellitare del primo dominio (rosso)	104
Fig. 34: Vista satellitare del secondo dominio (verde)	104
Fig. 35: Vista satellitare del terzo dominio (azzurro)	105
Fig. 36: Vista satellitare del quarto ed ultimo dominio (rosa)	105
Fig. 37: Modello digitale 3D del primo dominio realizzato da WindSim.	106
Fig. 38: Mappa di rugosità del primo dominio invernale (a) ed estiva (b)	106
Fig. 39: Modello digitale 3D del quarto dominio realizzato da WindSim	107
Fig. 40: Griglia di calcolo nel piano XY con infittimento finale	107
Fig. 41: Mappa di rugosità del quarto dominio invernale (a) ed estiva (b)	108
Fig. 42: Vista satellitare degli object inseriti	110
Fig. 43: Shift di direzione del vento - input 0° - quarto dominio - rugosità estiva.....	111
Fig. 44: Shift di direzione del vento - input 30° - quarto dominio - rugosità estiva.....	112
Fig. 45: Shift di direzione del vento - input 60° - quarto dominio - rugosità estiva.....	112
Fig. 46: Shift di direzione del vento - input 90° - quarto dominio - rugosità estiva.....	113
Fig. 47: Shift di direzione del vento - input 120° - quarto dominio - rugosità estiva.....	113
Fig. 48: Shift di direzione del vento - input 150° - quarto dominio - rugosità estiva.....	114
Fig. 49: Shift di direzione del vento - input 180° - quarto dominio - rugosità estiva.....	114
Fig. 50: Shift di direzione del vento - input 210° - quarto dominio - rugosità estiva.....	115
Fig. 51: Shift di direzione del vento - input 240° - quarto dominio - rugosità estiva.....	115
Fig. 52: Shift di direzione del vento -input 270° - quarto dominio - rugosità estiva.....	116
Fig. 53: Shift di direzione del vento - input 300° - quarto dominio - rugosità estiva.....	116

Fig. 54: Shift di direzione del vento - input 330° - quarto dominio - rugosità estiva	117
Fig. 55: Profilo verticale di velocità-quarto dominio-input 0°	117
Fig. 56: Profilo verticale di velocità-quarto dominio-input 30°	118
Fig. 57: Profilo verticale di velocità-quarto dominio-input 60°	118
Fig. 58: Profilo verticale di velocità-quarto dominio-input 90°	119
Fig. 59: Profilo verticale di velocità-quarto dominio-input 120°	119
Fig. 60: Profilo verticale di velocità-quarto dominio-input 150°	120
Fig. 61: Profilo verticale di velocità-quarto dominio-input 180°	120
Fig. 62: Profilo verticale di velocità-quarto dominio-input 210°	121
Fig. 63: Profilo verticale di velocità-quarto dominio-input 240°	121
Fig. 64: Profilo verticale di velocità-quarto dominio-input 270°	122
Fig. 65: Profilo verticale di velocità-quarto dominio-input 300°	122
Fig. 66: Profilo verticale di velocità-quarto dominio-input 330°	123
Fig. 67: Vista 3D del modello digitale del terreno generato da OpenFOAM	125
Fig. 68: Vista 3D della griglia di calcolo generata da OpenFOAM.....	126
Fig. 69: Shift di direzione del vento - input 0° - rugosità estiva	130
Fig. 70: Shift di direzione del vento - input 0° - rugosità invernale.....	130
Fig. 71: Shift di direzione del vento - input 210° - rugosità estiva	131
Fig. 72: Shift di direzione del vento - input 210° - rugosità invernale.....	131
Fig. 73: Shift di direzione del vento - input 240° - rugosità estiva	132
Fig. 74: Shift di direzione del vento - input 240° - rugosità invernale.....	132
Fig. 75: Confronto profili verticali-torre_temporanea-input 0°-rugosità estiva	133
Fig. 76: Confronto profili verticali-torre_temporanea-input 210°-rugosità estiva.....	133
Fig. 77: Confronto profili verticali-torre_temporanea-input 240°-rugosità estiva.....	133
Fig. 78: Confronto profili verticali-torre_temporanea-input 0°-rugosità invernale	134
Fig. 79: Confronto profili verticali-torre_temporanea-input 210°-rugosità invernale	134
Fig. 80: Confronto profili verticali-torre_temporanea-input 240°-rugosità invernale	134
Fig. 81: Confronto profili verticali-torre_fissa-input 0°-rugosità estiva ...	135
Fig. 82: Confronto profili verticali-torre_fissa-input 210°-rugosità estiva	135
Fig. 83: Confronto profili verticali-torre_fissa-input 240°-rugosità estiva	135
Fig. 84: Confronto profili verticali-torre_fissa-input 0°-rugosità invernale	136

Fig. 85: Confronto profili verticali-torre_fissa-input 210°-rugosità invernale	136
Fig. 86: Confronto profili verticali-torre_fissa-input 240°-rugosità invernale	136
Fig. 87: Confronto con i dati sperimentali-input 0°	137
Fig. 88: Confronto con i dati sperimentali-input 210°	138
Fig. 89: Confronto con i dati sperimentali-input 240°	138
Fig. 90: Time series di una giornata tipo	140
Fig. 91: Analisi dei risultati-torre_temporanea-0°	144
Fig. 92: Analisi dei risultati-torre_fissa-0°	145
Fig. 93: Analisi dei risultati-torre_temporanea 210°	146
Fig. 94: Analisi dei risultati-torre_fissa-210°	147
Fig. 95: Analisi dei risultati-torre_temporanea-240°	148
Fig. 96: Analisi dei risultati-torre_fissa-240°	149
Fig. 96: Drone esacottero DYS 800 V6: vista generale e dettaglio	154
Fig. 97: Nucleo centrale del drone esacottero con i sistemi che compongono l'avionica di bordo.....	157
Fig. 98: Vista del drone completo a sinistra e dettaglio delle attrezzature	159
Fig. 99: Vista del sistema anti-collisione assemblato e dettaglio dall'alto e dal basso dei supporti/sensori di contatto	163
Fig. 100: Esempio di acquisizione segnali servo dalla ricevente al flight controller e dal flight controller verso i motori.....	166
Fig. 101: Protocollo di comunicazione SPI	168
Fig. 102: Schema della logica di comunicazione del sistema anti-collisione	170
Fig. 103: Vista del sistema anti-collisione assemblato	170
Fig. 104: Schema definitivo delle connessioni del sistema anti-collisione	171
Fig. 105: Logica di funzionamento dello sketch Arduino.....	175
Fig. 106: Vista satellitare dell'area di test	176
Fig. 107: Nuova configurazione dell'equipaggiamento del drone: Optris PI450 a sinistra e Sony α6000 a destra	178
Fig. 108: Vista renderizzata del progetto.....	185
Fig. 109: Dettaglio del nucleo centrale.....	185
Fig. 110: Geometria del braccetto.....	186
Fig. 111: Carichi e vincoli applicati al modello.....	187
Fig. 112: Andamento delle deformazioni	187
Fig. 113: Andamento delle tensioni	187
Fig. 114: Dettaglio della mesh.....	188
Fig. 115: Andamento delle deformazioni	189
Fig. 116: Andamento delle tensioni principali.....	190

Fig. 117: Apparato propulsivo: motori, eliche, ESC, batteria.....	192
Fig. 118: Schema dei collegamenti elettrici del drone quadricottero.....	194
Fig. 119: Pixhawk 2 Cube (a) e GPS Here + RTK (b).....	197
Fig. 120: Hardware richiesti ed acquistati per poter abilitare la FrSky Telemetry.....	199
Fig. 121: Sony FCB EV-7520 sulla destra e Flir A655sc	200
Fig. 122: Il flying laboratory DR1000.....	203
Fig. 123: Tetracam Macaw	203
Fig. 124: Fasi di costruzione del drone: assemblaggio del frame e dell'elettronica di potenza	206
Fig. 125: Sonar LV-MaxSonar-EZ. Vista del sensore e dell'installazione a bordo.....	208
Fig. 126: Vista del drone ultimato, numerazione e verso di rotazione dei motori	209
Fig. 127: Switch dedicati alle flight mode	212
Fig. 128: Sistemi di riferimento Normal (a), Simple (b), Super Simple (c)	214
Fig. 129: Vista dell'area di prova nella frazione Morichella, San Ginesio (MC)	217
Fig. 130: Frame catturati durante il primo volo del drone quadricottero..	218
Fig. 131: Quota misurata dal flight controller rispetto al piano di campagna (a) e rispetto al livello del mare (b).....	220
Fig. 132: Velocità di volo stimata dal GPS.....	220
Fig. 133: Verifica delle vibrazioni lungo gli assi X, Y (a) e Z (b) e confronto dei valori con la quota da terra (c)	221
Fig. 134: Parametri RCOUT emessi dal flight controller verso i motori..	222
Fig. 135: Yaw vs DesYaw (a), Roll vs DesRoll (b), Pitch vs DesPitch (c)	223
Fig. 136: Contenuto del file .kmz registrato dal flight controller	224

INDICE DELLE TABELLE

Tab. 1: Settori da escludere per la scia della turbina	22
Tab. 2: Settori da escludere per l'influenza delle turbine del parco eolico sulla turbina da certificare	23
Tab. 3: Settori da escludere per l'influenza delle turbine del parco eolico sull'anemometro di riferimento	24
Tab. 4: Variazioni topografiche consentite	25
Tab. 5: Variazioni topografiche nei settori validi	26
Tab. 6: Risultati dell'analisi per bin dell'anemometro di controllo	35
Tab. 7: Risultati dell'analisi per bin dell'anemometro di principale	36
Tab. 8: Incertezze il cui calcolo è richiesto dalla IEC 61400-12-1 Annex D	49
Tab. 9: Incertezze della velocità del vento calcolate durante la fase di power curve measurement	54
Tab. 10: Criteri per la valutazione degli ostacoli	66
Tab. 11: Criteri per la valutazione delle variazioni topografiche	66
Tab. 12: Tabella E.2 IEC 61400-12-2:2017 lista delle componenti di incertezza	84
Tab. 13: Caratteristiche geometriche del primo dominio	106
Tab. 14: Caratteristiche geometriche del quarto dominio	107
Tab. 15: Impostazioni comuni a tutte le simulazioni WindSim	109
Tab. 16: Caratteristiche geometriche degli object inseriti nelle simulazioni	110
Tab. 19: Caratteristiche griglia di calcolo OpenFOAM	125
Tab. 20: impostazioni principali delle simulazioni con OpenFOAM	129
Tab. 17: Caratteristiche del drone esacottero	155
Tab. 18: Caratteristiche della termocamera Optris PI450	157
Tab. 19: Caratteristica telecamera GoPro Hero 3 Black Edition	158
Tab. 20: Caratteristiche del microcontrollore Arduino Mega2560	165
Tab. 21: Caratteristiche meccaniche del materiale Alluminium Alloy	186
Tab. 22: Numero di nodi ed elementi della mesh simulazione statica	186
Tab. 23: Numero di nodi e di elementi della mesh simulazione dinamica	188
Tab. 24: Tipologia di vincolo e corrispondente valore assegnato	189
Tab. 25: Caratteristiche eliche e motori	191
Tab. 26: Spinte ed assorbimenti caratteristici dei motori	191
Tab. 27: Caratteristiche degli ESC	192
Tab. 28: Caratteristiche del pacco batterie	192
Tab. 29: Stima preliminare delle autonomie di volo	193

Tab. 30: Caratteristiche principali del flight controller.....	197
Tab. 31: Caratteristiche della termocamera Flir A655sc	201
Tab. 32: Caratteristiche Scentroid DR1000	202
Tab. 33: Caratteristiche Tetracam Macaw	204
Tab. 34: Esempi di indagini possibili grazie all'uso di camera multispettrale	204
Tab. 35: Stime finali delle autonomie di volo.....	216

INTRODUZIONE

Nei terreni pianeggianti tipicamente il vento incide sull'hub di una turbina eolica mantenendo le stesse velocità e direzione del flusso indisturbato.

Questa condizione però viene a decadere nel caso di orografie complesse, tipiche del territorio italiano, poiché la velocità del vento misurata all'altezza dell'hub, così come la sua direzione, possono risultare fortemente influenzate dalle caratteristiche topografiche e dalla rugosità del sito e si possono discostare anche di molto dalle caratteristiche del flusso libero indisturbato.

La velocità media del vento, o meglio, il profilo verticale di velocità media, è il primo parametro che viene considerato per caratterizzare fluidodinamicamente un determinato sito geografico.

Il vento subisce l'influenza del territorio su cui spira, modificando la propria velocità in funzione degli ostacoli che trova sulla superficie. In particolare, le masse d'aria in movimento sono rallentate in corrispondenza della superficie terrestre per effetto della sua rugosità.

Considerando la velocità orizzontale a varie altezze, si può tracciare il profilo verticale di velocità che andrà da un valore nullo in prossimità del suolo fino al valore massimo ad un'altezza definita altezza di gradiente δ . La diminuzione man mano che ci si avvicina al suolo è dovuta all'effetto dell'attrito dell'aria con la superficie terrestre. Lo spessore di atmosfera all'interno del quale si risente di questo effetto di rallentamento si chiama Strato Limite Ambientale, o Atmospheric Boundary Layer ABL, e si estende dalla quota del terreno fino all'altezza di gradiente. Oltre questa altezza la velocità media del vento mantiene un valore costante.

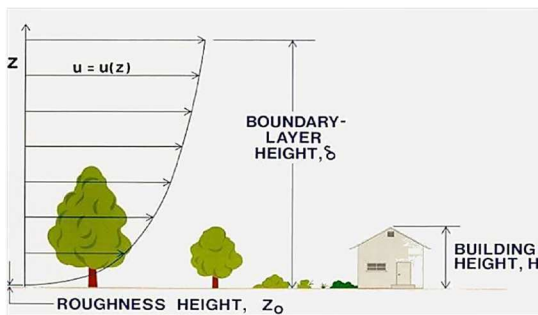


Fig. 1: Profilo verticale di velocità

L'altezza di gradiente non è costante e dipende dalla velocità dell'aria e dal tipo di superficie terrestre su cui essa fluisce; per luoghi con piccole asperità, quali zone desertiche o superfici del mare, lo strato limite ambientale arriva ad altezze di circa 300 metri, per regioni a elevata rugosità, come zone fortemente urbanizzate, si arriva a valori di circa 500 metri.

Le principali leggi che descrivono l'andamento di velocità media in funzione della quota sono due: la legge esponenziale e la legge logaritmica.

La legge esponenziale è una legge empirica che deriva da dati sperimentali.

$$U(z) = U(z_{rif}) \left(\frac{z}{z_{rif}} \right)^{\alpha} \quad \text{Eq. 1}$$

Z è la quota relativa alla velocità $U(z)$ da calcolare, z_{rif} è una quota di riferimento in cui si conosce il valore di velocità $U(z_{rif})$ ed α è un coefficiente che dipende dalla rugosità superficiale definito wind shear exponent.

La legge logaritmica, invece, ha basi teoriche. Viene presa come riferimento per descrivere il profilo verticale della velocità media del vento anche dall'Eurocode1.

$$U(z) = \frac{u^*}{k} \ln \left(\frac{z}{z_0} \right) \quad \text{Eq. 2}$$

Il termine u^* corrisponde alla velocità di attrito che si ottiene da un'analisi degli sforzi per un profilo turbolento, z_0 è la lunghezza di rugosità, geometricamente riconducibile alla dimensione media dei vortici che si formano sulle asperità del terreno, k è la costante di Von Karman (≈ 0.4).

Le considerazioni fatte fino a questo punto sulla velocità media del vento sono valide sotto l'ipotesi di avere caratteristiche orografiche, meteorologiche e di flusso costanti nel tempo e nello spazio.

Le principali cause per cui non è possibile assumere queste ipotesi sono da attribuirsi alla superficie terrestre ed in particolare all'orografia del terreno (cambiamenti della rugosità superficiale o presenza di ostacoli naturali come colline o scarpate).

La presenza di una collina o di una scarpata modificano in maniera sostanziale il profilo verticale di velocità del vento e l'entità delle variazioni dipende dalla forma e dalla pendenza del pendio, definita come:

$$\phi = \tan \alpha = \frac{H}{2L_l} \quad \text{Eq. 3}$$

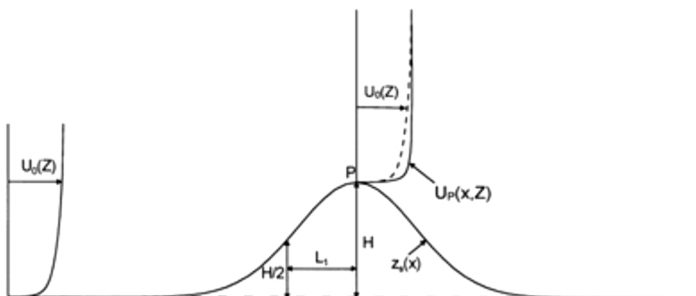


Fig. 2: Effetti di un rilievo sul profilo di velocità

Per capire i fenomeni di rallentamento ed accelerazione del flusso sul profilo del pendio si può far riferimento alle informazioni che ci derivano da Bernoulli in coordinate curvilinee. Nella prima parte del pendio, il centro di curvatura si trova lontano dal suolo, in direzione opposta, e si percepisce quindi un rallentamento dell'aria. Nella fase di superamento della collina, il centro di curvatura delle linee di flusso si trova verso il terreno, vi è un gradiente normale con diminuzione della pressione in prossimità del suolo e conseguentemente un'accelerazione del flusso.

Un altro dei fenomeni che può risultare problematico in orografia complessa è quello della turbolenza, ovvero l'insieme delle fluttuazioni della velocità su una scala temporale relativamente breve, 10 minuti, con formazione di vortici di diverse dimensioni.

L'aria è un fluido reale, e come tale ha una propria viscosità. Ciò genera un legame tra le particelle, per cui quando alcune di esse subiscono un rallentamento od un arresto, l'effetto si risente anche sulle particelle vicine e si propaga, con intensità decrescente, fino a distanze elevate che dipendono in primo luogo dalla forza del legame (ovvero dal valore di viscosità del fluido).

Fisicamente, quindi, si può dire che la turbolenza è generata dallo stiramento meccanico delle masse di aria in movimento: gli strati di aria che si trovano a differenti altezze dal terreno si muovono con velocità medie orizzontali diverse tra loro. Ciò provoca uno stiramento delle particelle d'aria che sono contenute fra tali strati poiché saranno trascinate con una velocità maggiore nella loro parte più alta e, contemporaneamente, saranno rallentate, nella parte inferiore, dalle particelle con componenti di velocità minori.

Questo movimento relativo provoca una rotazione della cella d'aria e, quindi, la formazione di vortici.

La causa di tutto questo va ricercata nella rugosità del sito: quando il vento lambisce il terreno incontra foreste, colline, edifici. Questi ostacoli, naturali e non, producono l'effetto di rallentamento e perturbazione del flusso, dunque turbolenza atmosferica che, contrariamente a quanto accade per la velocità, aumenta all'avvicinarsi del suolo. L'incremento del suo valore è legato, appunto, alla rugosità del terreno sottostante che determina la dimensione media dei vortici ed il loro stiramento. Una zona desertica o uno specchio d'acqua inducono nel flusso una turbolenza decisamente minore rispetto a quella di un'area suburbana.

La conoscenza di tutto quanto descritto finora, è di fondamentale importanza quando si ha a che fare con delle turbine eoliche per due motivi:

1. Gli effetti di un'orografia complessa si traducono in una perturbazione nel normale flusso che incide sull'hub di una turbina eolica e di conseguenza ignorare questo fatto, non analizzarlo accuratamente, potrebbe causare una sovrastima della producibilità elettrica della macchina.
2. La turbolenza può provocare stress, affaticamento ed usura delle pale o di altre componenti della macchina andandone a diminuire drasticamente la vita utile.

Ignorare tutto questo significa sottoporre la macchina ad una serie di sollecitazioni periodiche che ne condizionano il funzionamento, la resa energetica e la vita utile, specialmente per quel che riguarda le pale. Si capisce dunque quanto sia a dir poco vitale per la macchina stessa analizzare in modo quanto più accurato il sito in cui andrà installata soprattutto se questo rientra tra quelli definiti ad orografia complessa.

Per fare ciò la strada più indicata è quella della la site calibration e la successiva power curve measurement, molto indicate perché si tratta di procedure basate su misure anemometriche in situ. Entrambe sono procedure, meglio descritte nei capitoli a seguire, che hanno lo scopo di certificare la macchina nel suo sito di installazione e determinarne il reale comportamento sotto le reali condizioni di flusso di vento. Non si tratta di una procedura obbligatoria, ma soprattutto se si intende installare una macchina in orografia complessa è opportuno affrontarla. Poiché, come si potrà capire in seguito, si tratta di una serie di operazioni complesse e piuttosto costose, sarebbe auspicabile eseguire preliminarmente uno studio tramite software del sito di installazione per verificare se i punti scelti per l'installazione delle attrezzature sono adeguati. Questo aspetto verrà trattato nel capitolo terzo. La descrizione delle procedure di site calibration e power curve measurement, nonché delle normative di riferimento, verranno, invece, trattate nei capitoli primo e secondo.

CAPITOLO 1

LA SITE CALIBRATION, UN CASO REALE: L'AREA MONTANA DI SERRAPETRONA (MC)

INTRODUZIONE

Le procedure della site calibration e della successiva power curve measurement hanno lo scopo di certificare una turbina eolica andando a determinare la reale produzione elettrica della macchina una volta che questa viene installata nel sito. Come accennato in precedenza, le prestazioni di una turbina eolica sono fortemente influenzate dal sito di installazione, soprattutto se questo rientra nella categoria definita ad orografia complessa, pertanto poter certificare una macchina direttamente nel sito consente di acquisire tutta una serie di informazioni circa la sua reale capacità produttiva, quanto questa è influenzata dagli effetti dell'orografia e qual è il reale impatto del flusso di vento su di essa. È quindi possibile capire se il flusso che incide sulla turbina è tale da provocare distribuzioni dei carichi differenti da quelle previste in fase di progetto che possono interferire con la vita utile prevista, oppure se un flusso di vento avente un profilo verticale di velocità diverso da quello di progetto inficia sulla sua produzione elettrica. Tutto questo è possibile solo andando a caratterizzare nel dettaglio il sito dove la macchina è installata, sia prima che questa venga posizionata (site calibration) che durante il suo funzionamento (power curve measurement).

La scrivente durante il suo dottorato ha avuto modo di operare all'interno del Centro di Ricerca e Servizi WEST-lab, Wind Energy Studies and Testing laboratory, dell'Università Politecnica delle Marche. Una delle attività portate avanti dal Centro, a cui la scrivente ha partecipato, è stata proprio la certificazione di una turbina eolica da 2MW installata nel Comune montano di Serrapetrona in provincia di Macerata. Il Centro ha espletato sia la procedura di site calibration che quella di power curve measurement; entrambe verranno di seguito descritte. Si precisa, però, che i dati raccolti durante la power curve measurement non verranno riportati poiché protetti da segreto industriale. La procedura pertanto verrà spiegata facendo riferimento alla normativa dedicata e puramente a livello teorico.

La site calibration consiste, molto brevemente, nell'installazione di due torri anemometriche, una nel punto in cui andrà installata la turbina eolica da

certificare, definita wind turbine position met-mast, ed una chiamata reference met-mast che andrà installata ad una distanza dalla prima compresa tra due e quattro volte il diametro del rotore della turbina. Questa seconda torre rimarrà anche per il periodo della power curve measurement.

Installare temporaneamente una stazione di misura al posto della turbina permette di correlare le condizioni di vento che si hanno nella posizione della macchina con quelle nella posizione dell'anemometro di riferimento e di conseguenza prevedere, durante la successiva fase di power curve measurement, la velocità del vento in corrispondenza dell'hub della turbina avendo a disposizione i soli dati misurati dall'anemometro in cima alla reference met-mast. È quindi fondamentale che le torri abbiano un'altezza pari a quella dell'hub della turbina.

Successivamente, una volta terminata la fase di correlazione tra la velocità rilevata sulla torre anemometrica e la corrispondente in posizione della turbina, si passa alla fase di determinazione della power curve. Si rimuove la wind turbine position met-mast, si installa la turbina eolica ed inizia una nuova campagna di misura il cui scopo è correlare la produzione elettrica della macchina alla velocità del vento che impatta sul rotore dedotta dalle misure registrate dall'anemometro sulla reference met-mast.

La normativa di riferimento per queste procedure è la IEC 61400-12-1:2005 "Wind turbines – Part 12-1: Power performance measurements of electricity producing wind turbines". Tutto quanto descritto in seguito sarà riferito a questa edizione della norma, vigente al momento dell'esecuzione dei lavori, mentre nel capitolo successivo verrà trattata la sua seconda edizione emanata nel 2017. Di questa seconda edizione verranno riportate le più importanti modifiche rispetto alla prima, corredate da un commento critico espresso da parte della scrivente sulla base delle conoscenze acquisite durante la partecipazione ai lavori del centro di ricerca WEST-lab.

1.1 LA SITE CALIBRATION DELL'AREA MONTANA DI SERRAPETRONA (MC)

1.1.1 INQUADRAMENTO GENERALE

Oggetto della certificazione è stata una turbina eolica da 2MW. La macchina ha un rotore di 92m di diametro ed altezza da terra dell'hub di 80m. La società costruttrice, il cui nome non è inserito per questioni di riservatezza, ha scelto

di far certificare la propria macchina nel sito alto-collinare in cui era prevista la sua reale installazione, assieme a quella di altre tre turbine eoliche. Il sito in questione si trova nel Comune di Serrapetrona (MC) in prossimità della frazione denominata Villa d'Aria.

Al momento dell'inizio dei lavori era già installata una prima turbina, denominata da qui in avanti WTG_03, mentre le misure per la certificazione sono state condotte sulla turbina WTG_01, installata dopo la fine del periodo destinato alla site calibration. Le turbine rimanenti sono state montate solo alla fine del periodo di misura.

La Fig.3 porta, oltre alle curve di livello del sito, la posizione delle 4 turbine insieme con le posizioni in cui sono state collocate la reference met-mast e la turbine position met-mast, chiamate rispettivamente TORRE-1 e TORRE-2 destinate alla Site Calibration. Sono inoltre riportate con la nomenclatura P_1Torre__, P_2Torre__ e P_3Torre__ le posizioni dei picchetti di fissaggio a terra delle strutture tralicciate che costituiscono le torri.

È possibile osservare in figura due punti denominati M1106 ed M07699. Questi punti rappresentano due torri anemometriche installate precedentemente alla site calibration per avere un quadro preliminare delle caratteristiche del flusso di vento nel sito. Ritroveremo questi anemometri nel Capitolo 3 quando verranno descritte le simulazioni numeriche che sono state condotte per questo sito, per le quali hanno rappresentato uno dei dati di input. In base a quanto previsto dalla norma IEC61400-12-1:2005 al punto.5.2.1, la torre anemometrica (TORRE-1) deve trovarsi ad una distanza compresa tra 2 e 4 volte il diametro del rotore della turbina (D) che si intende caratterizzare, mentre la torre anemometrica per la site calibration (TORRE-2) deve distare dal punto di installazione della turbina al massimo $0.2H$, con H pari all'altezza dell'hub della turbina eolica in valutazione. La WTG_01 presenta un'altezza dell'hub H di 80m ed un diametro del rotore D di 92m, pertanto posizionando TORRE-1 nel punto riportato in tab.1, ossia a 283m (pari a $3.1D$) dal punto di installazione della turbina, viene soddisfatto il criterio fissato dalla norma.

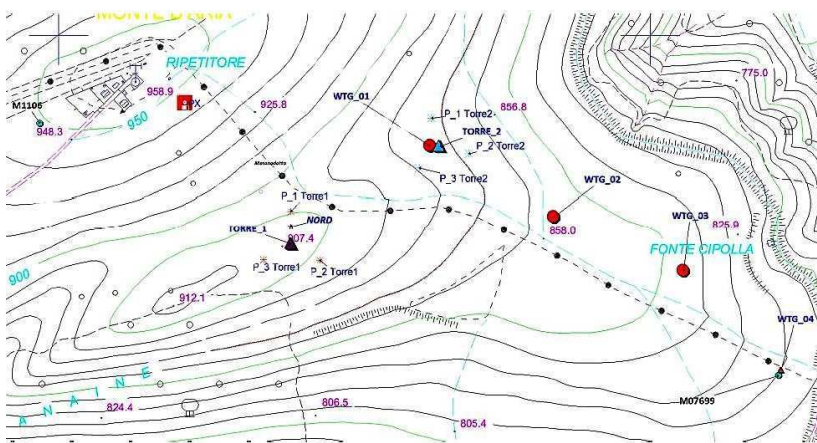


Fig. 3: Area d'intervento Serrapetrona

1.1.2 RILEVAZIONE DEGLI OSTACOLI

Al paragrafo 5.2.2 e nell'Annex A la norma richiede di verificare la presenza di ostacoli significativi nell'intorno della turbina e dell'anemometro di riferimento. Lo scopo è quello di escludere quei settori che vengono investiti da un flusso di vento deviato dalla presenza di questi eventuali ostacoli.

Come prima condizione si deve evitare che l'anemometro di riferimento venga disturbato dalla scia aerodinamica prodotta dalla turbina sotto test; per tale motivo vanno eliminati tutti quei settori di misura in cui la turbina risulta essere sopravento rispetto all'anemometro ed, in particolare, va escluso il settore che vede la turbina sopravento rispetto all'anemometro con un angolo dipendente dal diametro del rotore della turbina D e dalla distanza turbina-anemometro L . I valori da rispettare sono riportati nella tabella sottostante.

IEC 61400-12-1 paragrafo 5.2.2	
Distanza turbina-anemometro (L)	Settore da escludere [$^{\circ}$]
2D	81
2.5D	74
4D	59

Tab. 1: Settori da escludere per la scia della turbina

Nel caso specifico $L=283\text{m}$ equivalente a $3.1D$ e la direzione tra l'anemometro e la turbina è di 55° . Per trovare l'estensione del settore da escludere occorre interpolare i dati contenuti nella tabella 1, ottenendo come risultato un'ampiezza di 68.7° approssimata a 70° . Dunque il settore da escludere per effetto di scia della turbina è quello in direzione 55° con un'ampiezza di 70° , ovvero da 20° a 90° .

In seconda battuta occorre valutare gli altri eventuali ostacoli presenti nel sito. L'Annex A al paragrafo 1 riporta la procedura per valutare l'effetto quando l'ostacolo è rappresentato da un'altra turbina, mentre al paragrafo 2 viene indicato come considerare un generico ostacolo di geometria nota.

Nel nostro caso gli unici ostacoli erano rappresentati dalle turbine WTG_02, WTG_03 e WTG_04. Dato il diametro del rotore D e la distanza L tra la turbine e l'anemometro, l'ampiezza del settore da escludere viene calcolata nel modo seguente:

$$\alpha = \arctan(2.5D / L + 0.15) + 10 \quad \text{Eq. 4}$$

Nella seguente tabella vengono riportati i settori da escludere per interferenza delle turbine del parco su quella sotto test.

Ostacoli per la turbina sotto test					
Ostacolo	Distanza ostacolo [m]	Distanza ostacolo [°]	Ampiezza settore da escludere [°]	Dir. Min. da escludere [°]	Dir. Max. da escludere [°]
WTG_02	247	119	71.4	83	155
WTG_03	492	115	51.2	89	141
WTG_04	725	123	42.6	101	145
TOTALE				83	155

Tab. 2: Settori da escludere per l'influenza delle turbine del parco eolico sulla turbina da certificare

Gli stessi ostacoli devono essere valutati anche in riferimento all'anemometro di TORRE_1.

Ostacoli per l'anemometro principale					
Ostacolo	Distanza ostacolo [m]	Distanza ostacolo [°]	Ampiezza settore da escludere [°]	Dir. Min. da escludere [°]	Dir. Max. da escludere [°]
WTG_02	450	84	53.5	57	111
WTG_03	678	94	43.9	72	116
WTG_04	871	105	39.2	85	125
TOTALE				57	125

Tab. 3: Settori da escludere per l'influenza delle turbine del parco eolico sull'anemometro di riferimento

Ora, dato che al momento della site calibration era presente soltanto la turbina WTG_03, i settori associati alla sua influenza sono stati esclusi, ovvero i settori da 70° a 120°, quelli in cui l'anemometro risente della sua presenza. Si aggiungono poi i settori in cui WTG_01 rappresenta un ostacolo per TORRE_1, dai 20° ai 90°, arrivando complessivamente all'esclusione dei settori da 20° a 120°. Poiché, però, l'eventuale presenza di WTG_02 avrebbe esteso il range dei settori esclusi fino a 160°, si è deciso in via cautelare di ampliare la rosa dei settori esclusi, che sono diventati, infine, tutti quelli compresi tra 20° e 160°.



Fig. 4: Settori validi (verde) e settori esclusi (rosso) dalla site calibration

1.1.3 RILEVAZIONE DELLE CARATTERISTICHE TOPOGRAFICHE

La site calibration viene richiesta, secondo l'Annex B della IEC 61400-12-1, solamente per quei siti aventi un'orografia tale da non rispettare le richieste riportate nell'appena citato Annex. Tali richieste sono riportate sotto forma tabellare dalla normativa.

Variazioni topografiche consentite			
Distanza	Settore	Massima slope [%]	Massima variazione del terreno
<2L	360°	3	<0.04 (H+D)
≥2L e <4L	Nei settori di misura	5	<0.08 (H+D)
≥2L e <4L	Fuori di settori di misura	10	Non applicabile
≥4L e <8L	Nei settori di misura	10	<0.13 (H+D)

Tab. 4: Variazioni topografiche consentite

Data la conformazione del sito di Serrapetrona, eravamo certi che le richieste della norma non sarebbero state soddisfatte. Ad ogni modo la verifica è stata condotta per il primo settore, una circonferenza di raggio <2L. Di seguito i risultati che hanno confermato la necessità di effettuare la site calibration.

Verifica dei requisiti topografici					
Distanza	Settore [°]		Pendenza max	Pendenza calcolata [%]	Max variazione del terreno ammessa Variazione calcolata
<2L=283m	0	10	<3%	1.3	<0.04(H+D) =6.88m 20m
<2L=283m	10	20	<3%	0.6	6.88m 22m
<2L=283m	160	170	<3%	8.8	6.88m 60m
<2L=283m	170	180	<3%	9.8	6.88m 70m
<2L=283m	180	190	<3%	9.7	6.88m 76m
<2L=283m	190	200	<3%	8.9	6.88m 80m
<2L=283m	200	210	<3%	7.1	6.88m 76m
<2L=283m	210	220	<3%	3.4	6.88m 56m
<2L=283m	220	230	<3%	1.5	6.88m 30m
<2L=283m	230	240	<3%	7.4	6.88m 35m

<2L=283m	240	250	<3%	7.6	6.88m	34m
<2L=283m	250	260	<3%	7	6.88m	33m
<2L=283m	260	270	<3%	11	6.88m	59m
<2L=283m	270	280	<3%	14.8	6.88m	78m
<2L=283m	280	290	<3%	17.2	6.88m	87m
<2L=283m	290	300	<3%	16.8	6.88m	78m
<2L=283m	300	310	<3%	14.7	6.88m	68m
<2L=283m	310	320	<3%	12.5	6.88m	64m
<2L=283m	320	330	<3%	9.9	6.88m	56m
<2L=283m	330	340	<3%	7.7	6.88m	46m
<2L=283m	340	350	<3%	5.5	6.88m	37m
<2L=283m	350	360	<3%	3.8	6.88m	30m

Tab. 5: Variazioni topografiche nei settori validi

In virtù della verifica è stata installata la turbine position met-mast TORRE_2 al fine di effettuare la site calibration per valutare gli scostamenti di velocità del vento che si hanno nelle due posizioni, per ogni settore di misura, e quantificare i fattori di correzione di flusso da applicare nella successiva fase di redazione della curva di potenza della turbina.

1.1.4 INSTALLAZIONE DELLE TORRI ANEMOMETRICHE

Le torri meteorologiche installate sul sito sono 2 torri a traliccio della ditta Ferroval, a sezione triangolare di 45cm di lato, peso di 20kg per metro lineare ed altezza di 80m, pari a quella dell'hub della turbina eolica. Le torri sono sostenute in posizione verticale da 9 tiranti in acciaio per ogni vertice del triangolo, per un totale di 27 tiranti, ancorati al terreno tramite una perforazione della profondità di 3m.

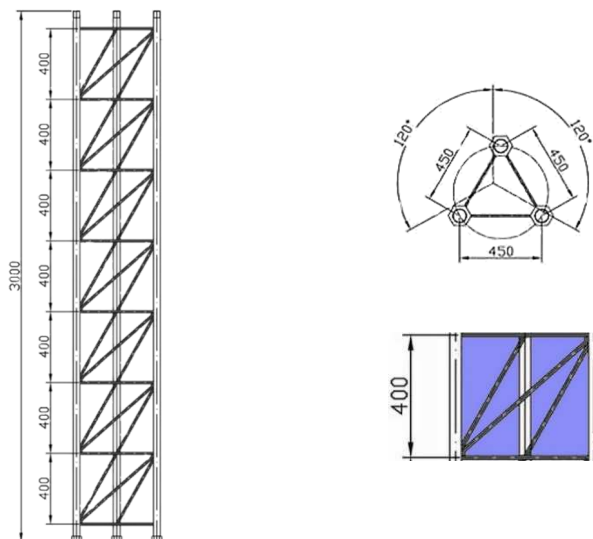


Fig. 5: Dettagli della struttura delle torri

In cima a ciascuna torre è stato posizionato un supporto a forma piramidale per l'installazione dell'anemometro principale in conformità con quanto richiesto dalla IEC 61400-12-1:2005 nell'Annex G secondo cui lo strumento deve essere posizionato ad una quota pari a quella dell'hub della turbina eolica da certificare con una differenza massima compresa tra $\pm 2.5\%$.

In particolare si è deciso di installare l'anemometro secondo la configurazione descritta nel paragrafo G.5 dell'Annex, ovvero un singolo anemometro installato in cima alla torre su un supporto avente diametro non superiore a quello del corpo dello strumento ed un secondo anemometro di riferimento ad una quota inferiore di 2m rispetto alla punta. Risulterà più semplice in questo modo rilevare anomalie nelle letture dello strumento principale.

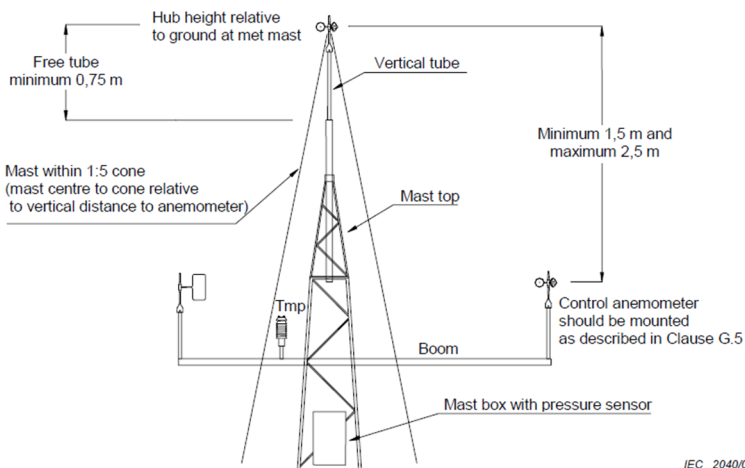


Fig. 6: Requisiti di installazione degli strumenti secondo IEC 61400-12-1 Annex G

Lo stesso Annex riporta anche i criteri da rispettare nell'installazione degli strumenti montati su braccetti laterali lungo il tronco della torre. Nello specifico vengono riportate le distanze dalla torre affinché lo strumento non risenta degli effetti di scia generati dalla struttura.

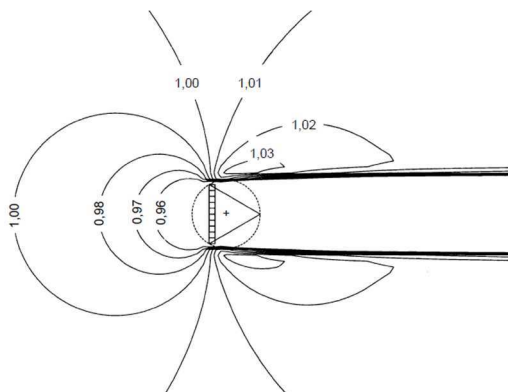


Fig. 7: Zone di influenza della torre di misura sul campo di moto

Da norma è risultata una distanza minima del sensore di 2.54m dallo spigolo della torre. I sensori installati distano dallo spigolo della torre circa 2.58m, quindi anche questo requisito è rispettato.



Fig. 8: Dettagli dei braccetti di supporto per gli strumenti prima della loro installazione

Oltre che dall'anemometro principale e da quello di riferimento, le torri sono corredate ciascuna da altri anemometri, banderuole, sensori di temperatura, un barometro ed un termoigrometro. L'acquisizione dei segnali avviene a mezzo di due acquisitori Nomad2 della ditta SecondWind.

Gli anemometri utilizzati sono principalmente di 2 tipi: NRG e Vector.

Negli anemometri NRG, più economici, l'invio del segnale è basato sulla variazione del flusso nella bobina interna allo strumento. Nell'avvolgimento è presente un traferro che quando viene attraversato fa variare il valore del flusso del campo magnetico e viene inviato l'impulso in voltaggio una volta ad ogni giro delle coppette. Il segnale a impulsi che viene generato ha quindi una frequenza proporzionale alla frequenza di rotazione del rotore, che determina la velocità dell'aria.

Negli anemometri Vector, più costosi, il segnale invece viene inviato una volta al giro tramite un magnete che al suo passaggio chiude un circuito fisso. Le coppette del Vector hanno un profilo conico continuo che risulta più sensibile ai gradienti verticali, mentre quelle degli NRG presentano un tratto

cilindrico all'imbocco della coppetta che offre una resistenza maggiore ai gradienti non orizzontali. Al contrario degli NRG, i Vector necessitano di un'alimentazione elettrica, ma sopportano velocità massime molto maggiori (quasi il doppio), per questo sono stati installati alle quote più alte.

La sommità della torre meteorologica costituisce la posizione più importante in quanto si rileva la velocità effettiva all'altezza dell'hub della futura turbina, quindi è lì che saranno presi i dati per valutare l'effettiva performance della macchina. Per questo motivo è stato scelto di installare alla quota di 80m un anemometro che avesse una classe di accuratezza maggiore rispetto ai modelli appena presentati. Si tratta di un THIES che invia il segnale al data logger in modo completamente elettronico. È dotato, infatti, di tanti fotodiodi che permettono un'acquisizione fino a 1600 Hz contro i 16 Hz del Vector. È facile intuire la complessità, la precisione ed il costo superiori rispetto agli altri strumenti.

Le banderuole servono a rilevare la direzione del vento. Sono dotate di un potenziometro che restituisce un valore in voltaggio pari a 0V quando la posizione della banderuola coincide con il nord. La tensione è poi continua e crescente man mano che ci si allontana da questa posizione. Sono stati adottati i modelli NRG e THIES anche per questi strumenti.

I sensori di temperatura, pressione e umidità relativa completano il quadro delle misurazioni.

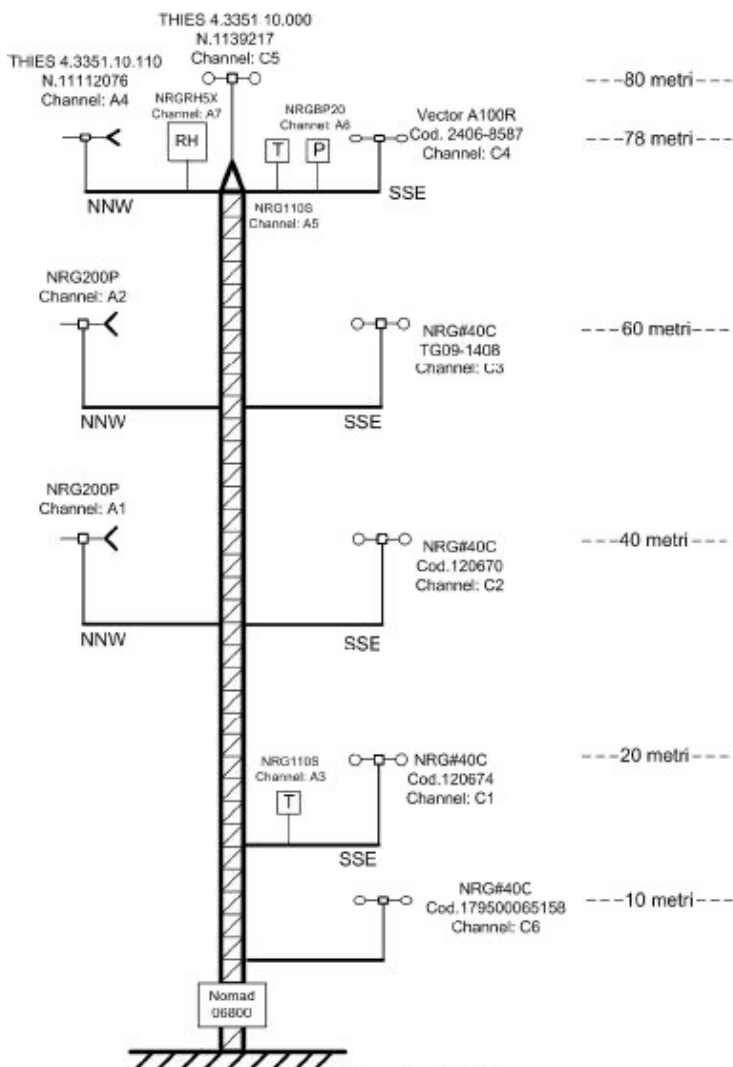


Fig. 9: Configurazione TORRE_1

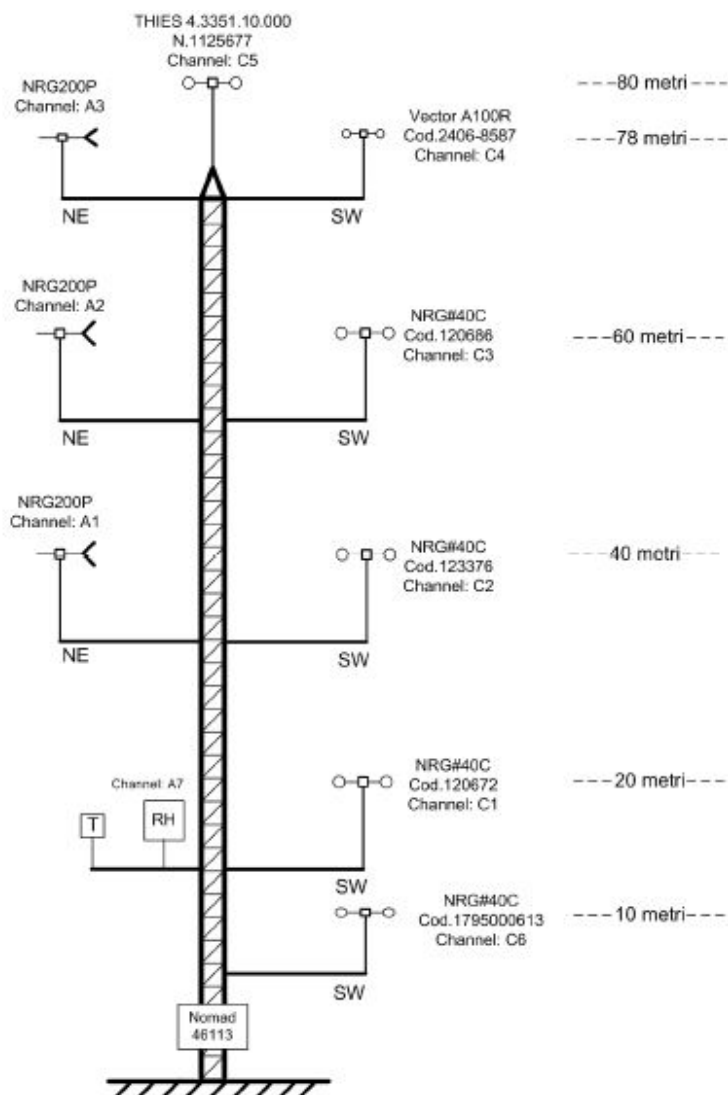


Fig. 10: Configurazione TORRE_2

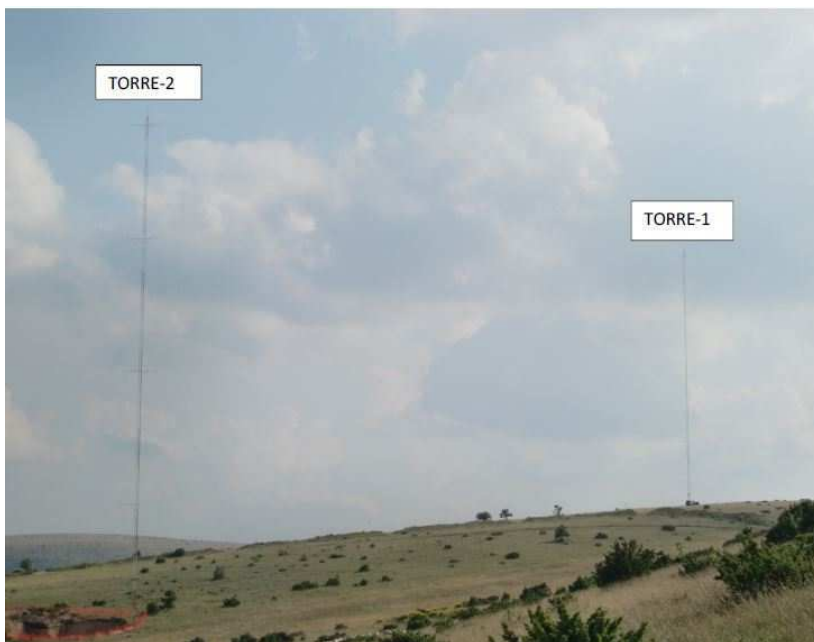


Fig. 11: Vista delle due torri ultimate

A protezione della strumentazione ad 80 e 78m è stato infine inserito un impianto parafulmini. Il sistema è composto da un'asta di captazione posta a protezione del THIES ad 80m e da altre due aste di captazione poste in corrispondenza degli strumenti a 78m.

Il dispositivo di captazione deve essere munito di un cavo conduttore sufficiente da solo a scaricare la sovratensione, indipendentemente dalla struttura che attira la carica del fulmine. La sezione minima del conduttore è in questo caso di 50mm^2 .

E' stato poi necessario l'utilizzo di una piastra equipotenziale che distribuisse in modo uniforme la sovratensione in tutto l'apparato di sicurezza prima di trasmettere la scarica a terra. La piastra è stata posta sul traliccio della torre in mezzo ai due parafulmini orizzontali, connettendo insieme i due cavi conduttori provenienti dai lati. Un'altra piastra equipotenziale è stata posizionata ai piedi della torre prima della messa a terra.

Infine, tutti i telai che supportano gli strumenti installati sono stati sostituiti nell'ultimo tratto verticale da supporti in fibra di vetro isolanti.



(a)



(b)



(c)



(d)



(e)

Fig. 12: vista dell'asta di captazione principale (a), delle aste secondarie (b) e (c) e delle due piastre equipotenziali (d) ed (e)

1.1.5 IN SITU COMPARISON OF ANEMOMETERS

La scelta di equipaggiare TORRE-1 con un anemometro di controllo avrebbe potuto consentire, oltre l'individuazione di anomalie nella misura, di evitare la ricalibrazione dell'anemometro primario alla fine della campagna di misure necessarie alla site calibration. Andava pertanto ricercata una relazione fra il segnale prodotto dall'anemometro primario e da quello di controllo prima di iniziare la site calibration; tale relazione avrebbe dovuto poi essere la stessa alla fine del periodo di site calibration per verificare se vi fossero state variazioni tali da richiedere lo smontaggio del sensore primario e la sua ricalibrazione. Per la ricerca della correlazione che lega i due anemometri si è operato come segue, in accordo con quanto richiesto dall'Annex K al paragrafo K.3.

I dati utili sono i valori della velocità del vento mediati nei 10 minuti.

Sono stati filtrati su un solo settore di direzione, chiamato settore centrale, ortogonale al piano passante per i braccetti di sostegno dei sensori. I braccetti sono installati lungo l'asse 150-330 gradi Nord, dunque le due direzioni individuate sono la 60° e 240°. Il settore 60°, però, rientrava tra quelli esclusi per la presenza di ostacoli pertanto è stato considerato il solo settore 240° come centro banda, associato ad un'apertura angolare fissata a $\pm 40^\circ$. Il settore complessivo considerato va da 200° a 280°.

Dei dati filtrati secondo la direzione sono stati considerati solo quelli in cui la velocità media nei 10 minuti risultava compresa tra 6 e 12m/s ed il tutto è stato riorganizzato secondo bin da 1m/s.

Anemometro di controllo (Vector A100R)							
Bin endpoints [m/s]	Bin endpoints [m/s]	Occorrenze	Media [m/s]	Mediana [m/s]	Min [m/s]	Max [m/s]	Std. Dev. [m/s]
Lower	Upper						
6	7	23	6.52	6.51	6.14	6.98	0.26
7	8	42	7.54	7.56	7.00	7.98	0.28
8	9	54	8.53	8.54	8.00	9.00	0.30
9	10	88	9.54	9.55	9.05	10.00	0.29
10	11	128	10.49	10.50	10.01	10.99	0.28
11	12	64	11.37	11.32	11.01	11.94	0.24

Tab. 6: Risultati dell'analisi per bin dell'anemometro di controllo

Anemometro principale (THIES)							
Bin endpoints [m/s]	Bin endpoints [m/s]	Occorrenze	Media [m/s]	Mediana [m/s]	Min [m/s]	Max [m/s]	Std. Dev. [m/s]
Lower	Upper						
6	7	26	6.53	6.54	6.10	6.94	0.25
7	8	34	7.55	7.68	7.03	7.99	0.33
8	9	55	8.56	8.60	8.04	8.97	0.29
9	10	96	9.56	9.61	9.01	10.00	0.27
10	11	112	10.50	10.50	10.01	10.99	0.29
11	12	99	11.43	11.45	11.00	11.88	0.26

Tab. 7: Risultati dell'analisi per bin dell'anemometro di principale

In Fig.13 è riportato il grafico di tutti i dati presi in considerazione nel data-set.

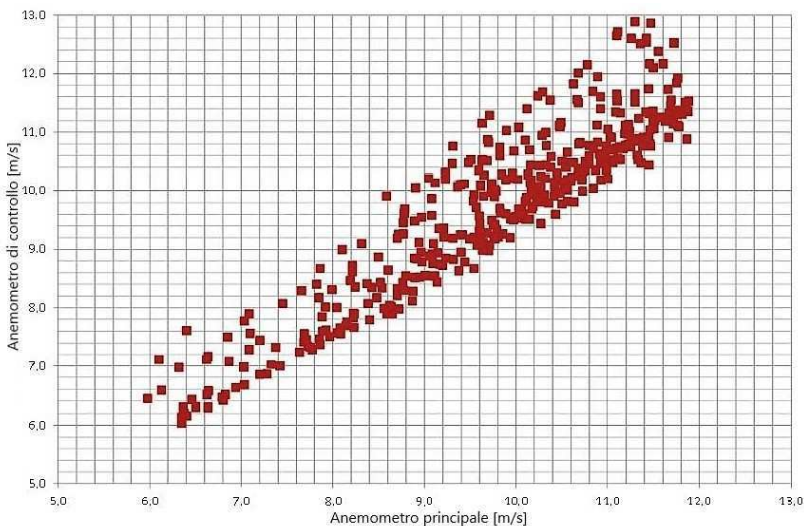


Fig. 13: Data-set utilizzato per il confronto tra i due anemometri

A questo punto è stata fatta una regressione lineare tra l'anemometro principale e quello di controllo.

$$v_{controllo} = m * v_{principale} + b \quad \text{Eq. 5}$$

ed in Fig.14 è riportato il risultato in forma grafica

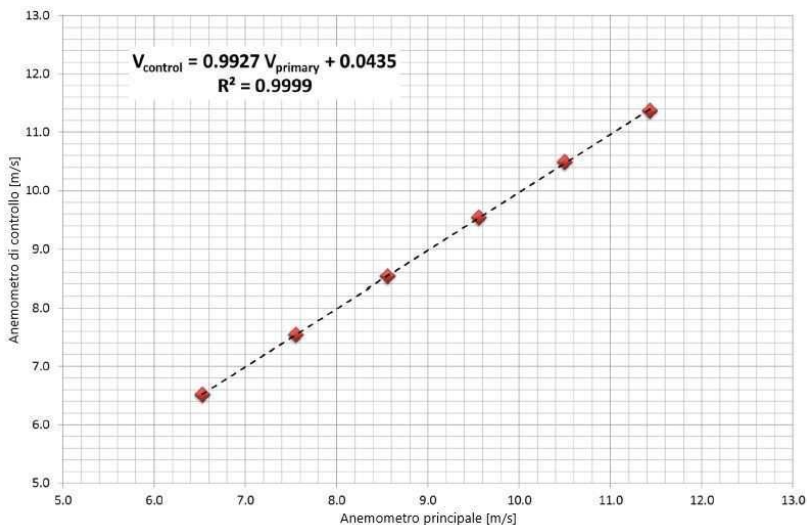


Fig. 14: Regressione lineare tra l'anemometro principale e l'anemometro di controllo

Per comprendere se sia necessaria o meno la ricalibrazione dell'anemometro principale alla fine della site calibration, devono essere soddisfatti i criteri seguenti:

- Ci devono essere almeno 3 dati per bin di misura, ossia da 6 a 12[m/s];
- Calcolare i valori di $V_{control,corr} = m * V_{control} + b$ dove $V_{control}$ sono i dati provenienti dall'anemometro di controllo
- Calcolare, per ogni acquisizione valida, la differenza fra $V_{control,corr}$ ed il valore vero del sensore primario, $V_{primary}$, per ogni bin

$$\Delta V = V_{control,corr} - V_{primary} \quad \text{Eq. 6}$$

- Per ogni bin calcolare il valore medio delle precedenti differenze (Deviazione Sistemica)

$$Deviazione_sistemica = DS_{bin} = \frac{\sum_{i=1}^{Nbin} \Delta V_i}{Nbin} \quad \text{Eq. 7}$$

- A questo punto bisogna calcolare le incertezze standard delle differenze di cui sopra, per ogni bin; tali incertezze coincidono con le Deviazioni Standard (σ_{bin}) del valor medio delle differenze, diviso

la radice quadrata del numero di dati per bin (N_{bin}) (Deviazione Statistica)

$$Incertezza_standard|_{bin} = \frac{\sigma_{bin}}{\sqrt{N_{bin}}} \quad \text{Eq. 8}$$

- Calcolate le Deviazioni Sistematiche e Statistiche per ognuna di esse si effettua la somma in quadratura e si verifica che la Deviazione Totale sia inferiore a 0,1 [m/s] per ogni bin.

Poiché al termine della site calibration questa richiesta non risultava soddisfatta, l'anemometro principale è stato ricalibrato e la componente di incertezza associata alla calibrazione dello strumento è stata calcolata in riferimento al certificato di calibrazione, come richiesto dalla norma (componente $u_{vl,i}$ paragrafo 1.3.2 del presente documento).

1.1.6 SITE CALIBRATION

A questo punto si è passati alla site calibration vera e propria.

In accordo con l'Annex C della IEC 61400-12-1:2005 è stato necessario effettuare un filtraggio dei dati acquisiti sulla base dei seguenti criteri:

- Rottura o malfunzionamento degli strumenti
- Venti al di fuori dei settori di misura validi
- Velocità del vento medie inferiori a 4m/s o superiori a 16m/s
- Qualunque altra condizione atmosferica che possa invalidare le misure (ad es presenza di ghiaccio).

I dati collezionati dopo essere stati sottoposti al suddetto filtraggio, devono poi rispettare altri requisiti affinché il database possa essere considerato completo:

- Almeno 24 ore di dati per ogni direzione valida (ovvero 144 dati da 10 minuti per ogni direzione valida)
- Almeno 6 ore di dati devono contenere velocità del vento superiori ad 8m/s
- Almeno 6 ore di dati devono contenere velocità del vento inferiori a 8m/s
- Il data-set dovrebbe superare una verifica di convergenza dei dati. Tale verifica non è obbligatoria ma è consigliata e consiste nel calcolare per ogni bin la media mobile normalizzata in funzione del numero di ore. In generale in molti siti la media mobile converge entro lo 1% ad un valore stabile già dopo 8-16 ore. Lo scarto si

riduce al 0.5% dopo 24 ore. Se la media mobile normalizzata invece inizia ad allontanarsi dal valore unitario dopo che sembrava essersi stabilizzata, allora è probabile che vi sia un problema sulla coppetta o sull'indicatore di direzione oppure che il sito sia soggetto a fenomeni di lungo corso che non erano stati considerati.

Detto questo, lo scopo della site calibration è quello di determinare i fattori di correzione del flusso definiti come il valor medio del rapporto tra la velocità misurata sulla TORRE_2 e la velocità misurata su TORRE_1 per ogni settore valido:

$$\alpha_i = \frac{1}{N_i} \sum_{j=1}^{N_i} \frac{v_{TORRE_2(j)}}{v_{TORRE_1(j)}} \quad \text{Eq. 9}$$

dove i identifica il settore ed N_i il numero di dati rilevati in quel settore.

Attraverso questi fattori è stato possibile, durante la fase di determinazione della power curve, stimare la velocità del vento all'hub della turbina per poterla correlare alla potenza elettrica prodotta dalla macchina.

Dei fattori di correzione del flusso è stata valutata anche l'incertezza.

La categoria A dell'incertezza è data dal rapporto tra la deviazione standard dei fattori di correzione del flusso nel bin di direzione j -esimo ($S_{\alpha,j}$) divisa per la radice quadrata del numero di dati presenti nel bin di direzione j -esimo (N_j)

$$Incertezza A = \frac{S_{\alpha,i}}{\sqrt{N_i}} \quad \text{Eq. 10}$$

mentre l'incertezza globale associata alla site calibration ($u_{\alpha,i,j}$) è data dal contributo delle incertezze operazionali (in questo caso trascurabili poiché i due anemometri installati su TORRE_1 e TORRE_2 sono dello stesso tipo), delle incertezze associate alla calibrazione dei sensori ($u_{v,l,j}$) e delle incertezze associate al sistema di acquisizione dati ($u_{dv,j}$).

$$u_{\alpha,i,j} = \sqrt{\frac{2u_{v1,i}^2}{V_i^2} + \frac{2u_{dv,i}^2}{V_i^2} + \frac{S_{\alpha,j}^2}{N_j}} \quad \text{Eq. 11}$$

i è l'indice del bin di velocità ed j è l'indice del bin di direzione considerato. I valori numerici delle incertezze verranno riportati a seguire.

Sulla base dei fattori di correzione del flusso è stato necessario effettuare un'altra selezione dei dati utili. Fra un settore ed un altro i fattori di correzione possono cambiare in modo rilevante e ciò fa sì che se tali variazioni si verificano su settori adiacenti si possono commettere degli errori, anche importanti, nel trattare quei dati che cadono ai confini del settore di misura angolare.

Per tale ragione la norma raccomanda di selezionare solo quei settori per i quali i fattori di correzione del flusso varino meno del 2% rispetto ai settori adiacenti. I settori in cui tale requisito non viene rispettato saranno esclusi da quelli validi ai fini della determinazione della curva di potenza.

Vediamo innanzitutto in Fig.15 e 16 come è composto il data-set dopo l'esclusione dei dati sulla base delle condizioni necessarie a ritenere completo il database.

In entrambi i casi solo 10 settori possono entrare a far parte del data-set.

Si applica poi l'esclusione di quei settori in cui non è rispettata la condizione che la differenza fra il fattore di correzione in una data direzione e quelli contigui non debba superare il valore di 0.02. La Fig.17 mostra i fattori di correzione del flusso calcolati per ogni settore e la verifica della bontà del settore in termini di variazione del fattore di correzione tra un settore e quello adiacente. I settori indicati come "incerto" sono quelli in cui lo scostamento dal valore 0.02 non è eccessivo e sono pertanto stati sottoposti ad approvazione da parte dell'ente certificatore circa la loro riabilitazione. L'ente ha però preferito non riammetterli, pertanto al fine di espletare la successiva fase di power curve measurement solamente tre settori saranno utilizzabili.

Le velocità del vento in corrispondenza della turbina saranno dunque stimate applicando alla velocità del vento rilevata dall'anemometro principale su TORRE_1 i fattori di correzione:

- 0.9167 per vento proveniente dal settore 5-15°
- 0.6526 per vento proveniente dal settore 205-215°
- 1.0193 per vento proveniente dal settore 235-245°

ID Settore	Range (°)	Numero totale di dati	Numero di dati fra 4 e 16 m/s	Numero di dati fra 8 e 16 m/s	Recovery Rate(%)	Velocità Media (m/s)	Mediana (m/s)	Velocità Minima (m/s)	Velocità Massima (m/s)	Deviazione Standard (m/s)
1	355 - 5	315	261	204	57	83,86	6,9	4,0	15,2	2,0
2	5 - 15	356	305	195	110	85,2	7,7	4,0	15,9	2,7
3	15 - 25	383	310	198	112	80,94	7,2	6,9	4,0	15,1
4	25 - 35	337	230	112	118	68,25	7,6	8,1	4,0	12,3
5	35 - 45	338	217	116	101	64,2	7,5	7,7	4,0	12,8
6	45 - 55	361	229	134	95	63,43	7,4	7,4	4,0	12,1
7	55 - 65	327	180	143	37	55,05	6,4	6,2	4,0	11,9
8	65 - 75	294	139	123	16	47,28	5,9	5,4	4,0	11,5
9	75 - 85	231	99	97	2	42,86	5,7	5,6	4,1	8,9
10	85 - 95	249	111	90	21	44,58	6,1	5,2	4,0	11,3
11	95 - 105	347	152	102	50	43,8	6,9	6,8	4,0	13,4
12	105 - 115	424	232	146	86	54,72	7,2	6,4	4,0	14,1
13	115 - 125	435	255	201	54	58,62	6,5	6,3	4,0	12,9
14	125 - 135	395	215	181	34	54,43	6,1	5,6	4,0	10,7
15	135 - 145	342	171	139	32	50	6,3	5,9	4,0	10,6
16	145 - 155	199	82	63	19	41,21	6,3	5,8	4,1	10,1
17	155 - 165	145	44	32	12	30,34	6,3	5,4	4,1	11,2
18	165 - 175	121	53	39	14	43,8	7,0	6,6	4,1	14,2
19	175 - 185	144	82	47	35	56,94	7,8	7,2	4,2	13,2
20	185 - 195	278	202	67	135	72,66	9,8	9,6	4,0	16,0
21	195 - 205	659	509	136	373	77,24	10,1	9,9	4,0	16,0
22	205 - 215	1176	908	189	719	77,21	10,9	11,2	4,1	16,0
23	215 - 225	1542	1264	293	971	80,92	10,4	10,3	4,0	16,0
24	225 - 235	1824	1553	518	1025	85,14	9,4	9,4	4,0	15,9
25	235 - 245	1221	981	615	366	80,34	7,5	7,0	4,0	15,9
26	245 - 255	847	634	438	196	74,85	7,0	6,7	4,0	15,7
27	255 - 265	496	340	247	93	68,55	7,0	6,7	4,0	15,9
28	265 - 275	319	168	146	22	57,66	6,2	5,9	4,0	15,8
29	275 - 285	229	116	96	20	50,66	6,3	6,2	4,0	9,6
30	285 - 295	273	174	141	33	63,74	6,6	6,4	4,0	14,3
31	295 - 305	222	176	155	21	75,86	6,6	6,6	4,1	10,6
32	305 - 315	121	81	76	5	66,94	6,1	6,1	4,3	8,7
33	315 - 325	61	20	20	0	32,79	5,1	4,5	4,0	7,5
34	325 - 335	43	15	15	0	34,88	4,7	4,8	4,2	5,6
35	335 - 345	84	48	40	8	57,14	6,0	5,2	4,1	11,0
36	345 - 355	143	101	77	24	70,63	6,8	6,3	4,0	12,5
TOTALE		15313	10857	5631	5026	69,59	8,3	7,7	4,0	16,0

Settori esclusi per ostacoli di scia

Settori esclusi per dati minori di 144 (24h)

Settori esclusi perché privi di almeno 36 dati (6h) oltre 8m/s

Settori esclusi perché privi di almeno 36 dati (6h) al di sotto di 8m/s

Fig. 15: Database collezionato per TORRE_1

ID Settore	Range (°)	Numero totale di dati	Numero di dati fra 4 e 16 m/s	Numero di dati fra 8 e 16 m/s	Recovery Rate(%)	Velocità Media (m/s)	Mediana (m/s)	Velocità Minima (m/s)	Velocità Massima (m/s)	Deviazione Standard (m/s)	
1	355 - 5	312	240	201	39	76.92	6.6	6.4	4.1	14.0	1.9
2	5 - 15	361	290	212	78	80.33	7.4	6.7	4.0	15.8	2.7
3	15 - 25	380	286	201	85	75.26	7.0	6.7	4.0	15.5	2.2
4	25 - 35	339	228	129	99	67.26	7.3	7.6	4.0	11.9	2.1
5	35 - 45	338	193	114	79	57.1	7.2	7.5	4.0	11.8	1.9
6	45 - 55	363	209	126	83	57.58	7.3	7.4	4.1	11.7	2.0
7	55 - 65	326	160	128	32	49.08	6.3	6.0	4.0	10.6	1.7
8	65 - 75	293	108	100	8	36.85	5.8	5.6	4.0	10.1	1.5
9	75 - 85	232	79	78	1	34.05	5.4	5.3	4.0	8.3	1.0
10	85 - 95	248	74	68	6	29.84	5.9	6.0	4.0	9.8	1.4
11	95 - 105	348	124	108	16	35.63	6.5	6.3	4.1	11.6	1.8
12	105 - 115	425	190	131	59	44.71	6.8	6.6	4.0	12.5	2.1
13	115 - 125	434	222	186	36	51.15	6.2	6.1	4.0	10.8	1.6
14	125 - 135	393	180	166	14	45.8	5.8	5.3	4.0	10.3	1.4
15	135 - 145	341	148	132	16	43.4	5.9	5.6	4.0	9.5	1.4
16	145 - 155	202	78	72	6	38.61	5.8	5.2	4.1	10.1	1.5
17	155 - 165	146	37	30	7	25.34	6.1	5.3	4.0	11.2	2.0
18	165 - 175	121	49	41	8	40.5	6.5	5.9	4.0	14.1	2.1
19	175 - 185	144	72	49	23	50	7.3	6.9	4.1	14.5	2.5
20	185 - 195	277	200	75	125	72.2	9.4	9.2	4.1	15.8	3.1
21	195 - 205	653	504	153	351	77.18	10.0	9.8	4.0	16.0	3.0
22	205 - 215	1176	944	216	778	80.27	10.6	10.8	4.0	15.9	3.0
23	215 - 225	1564	1307	340	967	83.57	10.1	9.9	4.0	16.0	3.0
24	225 - 235	1622	1133	400	1043	84.14	9.6	9.6	4.0	16.0	2.9
25	235 - 245	1223	956	579	377	78.17	7.6	7.1	4.0	15.6	2.5
26	245 - 255	850	628	439	189	73.88	7.1	6.8	4.0	15.9	2.1
27	255 - 265	495	379	242	87	66.45	6.9	6.5	4.0	15.8	2.3
28	265 - 275	319	166	149	17	52.04	6.1	5.7	4.0	15.2	1.8
29	275 - 285	227	107	99	8	47.14	5.9	5.9	4.0	8.7	1.2
30	285 - 295	269	136	132	4	50.56	5.9	5.8	4.0	12.8	1.3
31	295 - 305	234	154	153	1	65.81	5.6	5.5	4.0	8.5	1.0
32	305 - 315	121	74	74	0	61.16	5.1	5.1	4.0	7.5	0.7
33	315 - 325	61	20	20	0	32.79	4.8	4.6	4.1	7.2	0.8
34	325 - 335	43	11	11	0	25.58	4.4	4.3	4.0	5.2	0.4
35	335 - 345	84	44	35	9	52.38	5.9	5.0	4.0	11.1	1.9
36	345 - 355	142	95	72	23	66.9	6.8	6.6	4.0	13.3	2.2
TOTALE		15306	10175	5551	4645	66.48	8.2	7.6	4.0	16.0	3.0

- Settori esclusi per ostacoli di scia
- Settori esclusi per dati minori di 144 (24h)
- Settori esclusi perché privi di almeno 36 dati (6h) oltre 8m/s
- Settori esclusi perché privi di almeno 36 dati (6h) al di sotto di 8m/s

Fig. 16: Database collezionato per TORRE_2

ID Settore	Range (*)	Numero totale di dati	Numero di dati fra 4 e 8 m	Recovery Rate(%)	Valore medio	Mediana	Valore Minimo	Valore Massimo	Deviazione Standard	Differenze fra settori adiacenti	Inc.-A (adri.)	Incortezza a 8 m/s (adri.)	Incortezza a 10 m/s (adri.)
1	355 - 5	312	258	82,69	0,822460	0,81560	0,76510	1,24360	0,07220	0,00270	-0,04580	0,00449	0,01662
2	5 - 15	361	308	85,32	0,915970	0,91040	0,70100	1,36040	0,07900	-0,01380	BUONO	0,00450	0,01663
3	15 - 25	380	308	81,05	0,932050	0,92650	0,70040	1,23420	0,06800				
4	25 - 35	339	233	68,73	0,945070	0,93950	0,77610	1,16280	0,06200				
5	35 - 45	338	216	63,91	0,915700	0,92050	0,59920	1,09770	0,07400				
6	45 - 55	336	216	64,28	0,915700	0,92050	0,59920	1,09770	0,07400				
7	55 - 65	326	160	55,21	0,931900	0,92870	0,64680	1,15780	0,07470				
8	65 - 75	293	130	44,37	0,907600	0,91140	0,59690	1,10400	0,08310				
9	75 - 85	232	98	42,24	0,873000	0,86530	0,58410	1,08700	0,11580				
10	85 - 95	248	110	44,35	0,833940	0,84400	0,55400	1,12920	0,10380				
11	95 - 105	428	232	54,38	0,845050	0,84950	0,58490	1,08700	0,08310				
12	105 - 115	428	232	54,38	0,833900	0,82590	0,53170	1,09400	0,10380				
13	115 - 125	434	255	58,76	0,901900	0,90930	0,60680	1,09320	0,07070				
14	125 - 135	393	214	54,45	0,883940	0,90150	0,54530	1,14110	0,09000				
15	135 - 145	341	172	50,44	0,881000	0,88520	0,67550	1,11830	0,08070				
16	145 - 155	202	82	40,59	0,889500	0,87680	0,72120	1,21930	0,08770				
17	155 - 165	182	53	35,12	0,889500	0,88520	0,67550	1,11830	0,08070				
18	165 - 175	121	53	43,81	0,918800	0,91630	0,55650	1,14420	0,11200				
19	175 - 185	144	82	56,94	0,893910	0,91450	0,54480	1,10920	0,11040				
20	185 - 195	277	202	72,92	0,932250	0,94240	0,62950	1,13890	0,08480	-0,02540	0,03340	0,00597	0,01708
21	195 - 205	653	504	77,18	0,955990	0,96220	0,62000	1,15890	0,06790	0,00930	0,02640	0,00302	0,01911
22	205 - 215	1176	908	77,21	0,952960	0,95230	0,61970	1,27770	0,06220	0,01170	-0,00590	0,00206	0,01888
23	215 - 225	1176	908	77,21	0,952960	0,95230	0,61970	1,27770	0,06220	0,01170	-0,00590	0,00206	0,01888
24	225 - 235	1892	1530	80,97	1,021860	1,02880	0,93810	1,28760	0,06930	0,00250	-0,00250	0,00127	0,01885
25	235 - 245	1223	944	77,19	1,019300	1,01930	0,75590	1,29550	0,06780	0,00290	-0,00290	0,00221	0,01900
26	245 - 255	950	618	72,71	1,015400	1,02020	0,67590	1,29550	0,06780	0,00300	-0,00290	0,00254	0,01904
27	255 - 265	493	334	67,47	0,988510	0,99910	0,63390	1,25450	0,10380	0,01730	-0,03390	0,00568	0,01970
28	265 - 275	267	115	50,66	0,976500	0,95650	0,58040	1,21340	0,12100				
29	275 - 285	227	115	50,66	0,976500	0,95650	0,58040	1,21340	0,12100				
30	285 - 295	268	170	63,2	0,765200	0,85210	0,62950	1,13540	0,29580				
31	295 - 305	234	177	75,64	0,805200	0,84090	0,61900	1,14350	0,18270				
32	305 - 315	121	81	66,94	0,823300	0,86170	0,33520	1,06610	0,15240				
33	315 - 325	61	20	32,79	0,909540	0,94260	0,67410	1,13720	0,12970				
34	325 - 335	142	48	33,80	0,918100	0,94680	0,67410	1,13720	0,12970				
35	335 - 345	84	48	57,14	0,918100	0,96980	0,64700	1,33160	0,17190				
36	345 - 355	142	100	70,42	0,969900	0,96900	0,63340	1,28770	0,12970				
TOTALE		15305	10546	68,9	0,949900	0,95810	0,62960	1,96400	0,10670				

Fig. 17: Fattori di correzione del flusso e validazione dei settori di misura

1.2 DETERMINAZIONE DELLA POWER CURVE

Una volta definiti i fattori di correzione del flusso ed i settori validi si è passati alla fase di determinazione della curva di potenza. La torre anemometrica TORRE_2 è stata rimossa ed è stata installata la turbina eolica WTG_01.

Alla base della turbina è stato installato un trasduttore di potenza per la misura della potenza elettrica generata. Questa potenza verrà correlata alla velocità del vento misurata dall'anemometro su TORRE_1 a mezzo dei fattori di correzione del flusso per ricavare la curva di potenza della macchina. In questo modo è possibile determinare il reale comportamento della turbina nel sito di installazione.

Per quanto riguarda l'acquisizione dei dati la norma richiede, al paragrafo 7.3, che essa avvenga mantenendo una frequenza di acquisizione pari ad 1Hz. Di ogni parametro acquisito devono essere calcolati nel periodo di 10 minuti:

- Valor medio
- Deviazione standard
- Massimo
- Minimo

Per garantire che solo i dati ottenuti durante il normale funzionamento della turbina vengano utilizzati per l'analisi, e per garantire che i dati non siano danneggiati, essi sono esclusi dal database nelle seguenti circostanze:

- Velocità del vento fuori dal campo di operatività della turbina
- Mancato funzionamento a causa di una condizione di guasto
- Turbina arrestata manualmente o in una modalità di test o di manutenzione;
- Guasto o degradazione (ad esempio a causa della formazione di ghiaccio) delle apparecchiature di misura;
- Direzione del vento al di fuori del settore di misura.

I criteri di scarto dei dati appena citati sono riportati al paragrafo 7.4 della norma.

Come nella fase della site calibration, anche nella fase di determinazione della power curve si hanno delle ulteriori richieste da soddisfare per poter considerare completo il database (paragrafo 7.6):

- I dati selezionati devono comprendere una gamma di velocità del vento che si estende da 1m/s sotto al cut-in fino a 1,5 volte la velocità del vento per la quale si ha l'85% della potenza nominale della turbina eolica. In alternativa, il range di velocità del vento si estende da 1m/s sotto il cut-in fino ad una velocità del vento per la quale l'AEP-misurato è maggiore o uguale al

95% dell'AEP-estrapolato. La definizione di AEP verrà fornita in seguito.

- Ogni bin di velocità deve comprendere minimo 30min di dati
- Devono essere collezionate almeno 180h di dati.

Qualora un unico bin incompleto impedisca il completamento della prova, può essere stimato per interpolazione lineare dei due bin completi adiacenti. La norma richiede poi, al paragrafo 8.1, di effettuare una normalizzazione dei dati rispetto a due valori della densità dell'aria: la densità dell'aria a livello del mare assunta pari a 1.225kg/m^3 , e la densità dell'aria misurata nel sito. Nel caso in cui la turbina sia regolata a stallo la normalizzazione dei dati va applicata al solo parametro potenza misurata

$$P_n = P_{10\min} \left(\frac{\rho_0}{\rho_{10\min}} \right) \quad \text{Eq. 12}$$

- P_n è la potenza in output normalizzata
- $P_{10\min}$ è la potenza misurata mediata nei 10 minuti
- ρ_0 è la densità dell'aria di riferimento
- $\rho_{10\min}$ è la densità dell'aria calcolata e mediata nei 10 minuti.

Se la turbina ha, invece, un controllo attivo del pitch, la normalizzazione va applicata al parametro velocità media come di seguito.

$$V_n = V_{10\min} \left(\frac{\rho_{10\min}}{\rho_0} \right)^{1/3} \quad \text{Eq. 13}$$

- V_n è la velocità del vento normalizzata
- $V_{10\min}$ è la velocità del vento misurata e mediata nei 10 minuti.

Nel caso specifico la turbina era dotata di un controllo attivo del pitch pertanto la normalizzazione rispetto alla densità dell'aria è stata applicata alla sola velocità del vento mediata nei 10 minuti.

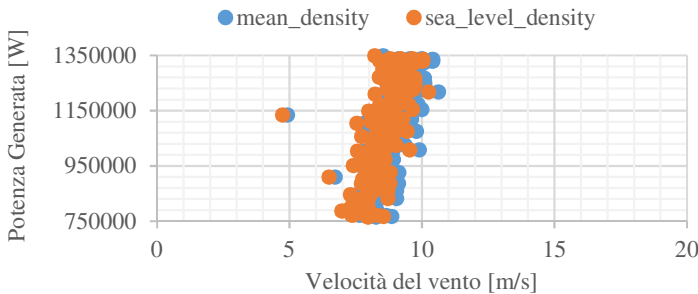


Fig. 18: Effetto della normalizzazione della velocità del vento

In Fig.18 si può osservare l'effetto della differente normalizzazione della velocità del vento: in blu un estratto dei dati normalizzati rispetto alla densità dell'aria misurata nel sito ed in rosso i corrispondenti valori quando si applica la normalizzazione rispetto alla densità di riferimento al livello del mare.

Ci avviaamo dunque verso la determinazione della curva.

I dati acquisiti, filtrati e normalizzati come precedentemente descritto, devono essere riorganizzati in bin di velocità di ampiezza 0.5m/s. Il contenuto di ciascun bin sarà il seguente:

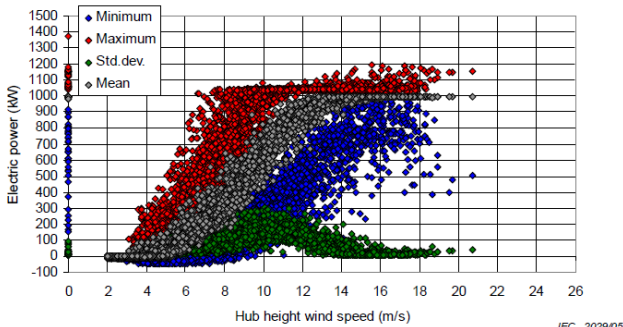
$$V_i = \frac{1}{N_i} \sum_{j=1}^{N_i} V_{n,i,j} \quad \text{Eq. 14}$$

$$P_i = \frac{1}{N_i} \sum_{j=1}^{N_i} P_{n,i,j} \quad \text{Eq. 15}$$

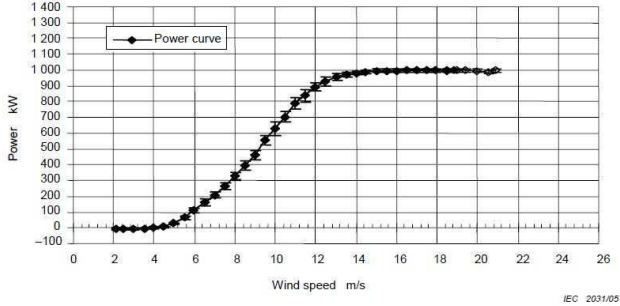
- V_i è la velocità del vento nel bin i-esimo normalizzata e mediata
- $V_{n,i,j}$ è la velocità del vento normalizzata del data-set j-esimo all'interno del bin i-esimo
- P_i è la potenza elettrica normalizzata e mediata nel bin i-esimo
- $P_{n,i,j}$ è la potenza elettrica normalizzata del data-set j-esimo all'interno del bin i-esimo
- N_i è il numero di pacchetti di dati da 10min nel bin i-esimo.

Con questi due dati si costruisce la power curve.

Nelle immagini a seguire due esempi estratti dalla norma (si ricorda che i dati della turbina sono protetti da segreto industriale) di come appare la curva di potenza nel caso di data-set esteso e nel caso di data-set raggruppato per bin di velocità.



(a)



(b)

Fig. 19: Esempi di curva di potenza nel caso di data-set esteso (a) e nel caso di data-set riorganizzato in bin di velocità (b)

Rimane a questo punto da definire la succitata AEP ovvero la Annual Energy Production. Questo parametro viene misurato, in riferimento al paragrafo 8.3, nel seguente modo:

$$AEP = N_h \sum_{i=1}^N [F(V_i) - F(V_{i-1})] \left(\frac{P_{i-1} + P_i}{2} \right) \quad \text{Eq. 16}$$

- N_h è il numero di ore nell'anno = 8760
- N è il numero di bin
- V_i è la velocità del vento normalizzata e mediata nel bin i-esimo
- P_i è la potenza normalizzata e mediata nel bin i-esimo
- $F(V)$ è la funzione di distribuzione di probabilità cumulativa di Rayleigh per la velocità del vento.

In pratica l'AEP viene stimata applicando la curva di potenza misurata a differenti distribuzioni di velocità del vento. Tali distribuzioni fanno capo a quella di Rayleigh e vengono così determinate:

$$F(V) = 1 - \exp \left(-\frac{\pi}{4} \left(\frac{V}{V_{ave}} \right)^2 \right) \quad \text{Eq. 17}$$

- V_{ave} è la velocità del vento media annuale all'altezza dell'hub ed assume valori di 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11 m/s
- V è la velocità del vento V_i

In altri termini per la stima della AEP occorre prima determinare la distribuzione di probabilità cumulativa di Rayleigh $F(V)$ per ogni valore di V_{ave} ; si avrà quindi un valore di $F(V)$ per ogni bin di velocità per ogni V_{ave} . I valori così calcolati verranno combinati con i valori di potenza di ogni bin per ottenere il risultato finale, ovvero una AEP legata a quella specifica curva

di potenza ma rapportata a diversi valori di velocità del vento media annuale all'altezza dell'hub.

Questo è il metodo di calcolo che va applicato a due definizioni di AEP, quella misurata e quella estrapolata.

La AEP misurata è ottenuta dalla curva di potenza assumendo pari a zero la potenza al di sotto e al di sopra del range della curva di potenza misurata.

La AEP estrapolata è ottenuta dalla curva di potenza assumendo nulla la potenza per quelle velocità del vento inferiori alla più bassa velocità della curva di potenza misurata e costante la potenza per velocità del vento comprese tra la più alta velocità della curva misurata ed il cut-out.

L'acquisizione dei dati deve andare avanti fintanto che la differenza tra queste due definizioni di AEP non sarà inferiore al 5%.

Estimated annual energy production (database A) Reference air density: 1,225 kg/m ³ Cut-out wind speed 25 m/s (extrapolation by constant power from last bin)					
Hub height annual average wind speed (Rayleigh)	AEP-measured (measured power curve)	Standard uncertainty in AEP	Standard uncertainty in AEP	AEP-extrapolated (extrapolated power curve)	
m/s	MWh	MWh	%	MWh	
4	481	99	21	481	
5	1083	129	12	1083	
6	1825	152	8	1825	
7	2596	168	7	2596	
8	3305	181	6	3305	
9	3892	197	5	3892	
10	4329	216	5	4329	
11	4615	238	5	4615	

Fig. 20: Esempio di calcolo della AEP

1.3 VALUTAZIONE DELLE INCERTEZZE

L'Annex D della normativa indica quali sono i parametri da includere nel calcolo delle incertezze, mentre l'Annex E fornisce indicazioni su come determinarle seguendo il metodo dei bin.

Come da standard ISO, la norma divide le incertezze in tipo A e tipo B.

Alla categoria A appartengono le incertezze derivanti da fattori che non possono essere tenuti sotto controllo o il cui effetto quantitativo non può

essere ragionevolmente determinato a priori. I parametri più caratteristici per questa categoria sono la deviazione standard e lo scarto quadratico medio. Alla tipologia B appartengono, invece, quelle che derivano da altri dati, che possono essere un insieme di misure indipendenti o specifiche fornite dal costruttore degli strumenti, o incertezze desunte dalla proprietà dei materiali in esame.

Le componenti di incertezza il cui calcolo è richiesto dalla norma sono di seguito riportate.

Measured parameter	Uncertainty component	Uncertainty category
Electric power	Current transformers	B
	Voltage transformers	B
	Power transducer or power measurement device	B
	Data acquisition system (see note)	B
	Variability of electric power	A
Wind speed	Anemometer calibration	B
	Operational characteristics	B
	Mounting effects	B
	Data acquisition system (see note)	B
	Flow distortion due to terrain	B
Air temperature	Temperature sensor	B
	Radiation shielding	B
	Mounting effects	B
	Data acquisition system (see note)	B
Air pressure	Pressure sensor	B
	Mounting effects	B
	Data acquisition system (see note)	B
Data acquisition system	Signal transmission	B
	System accuracy	B
	Signal conditioning	B

Tab. 8: Incertezze il cui calcolo è richiesto dalla IEC 61400-12-1 Annex D

1.3.1 INCERTEZZE DI CATEGORIA A

L'unica incertezza di categoria A che viene richiesto di calcolare è quella relativa alla potenza elettrica, in particolare, l'incertezza standard della potenza normalizzata e mediata nei bin definita come segue.

$$s_{P,i} = \frac{\sigma_{P,i}}{\sqrt{N_i}} \quad \text{Eq. 18}$$

dove:

- $\sigma_{P,i}$ è la deviazione standard della potenza nel bin i-esimo
- N_i è il numero di data-set da 10min nel bin i-esimo

$$\sigma_{P,i} = \sqrt{\frac{1}{N_i - 1} \sum_{j=1}^{N_i} (P_i - P_{n,i,j})^2} \quad \text{Eq. 19}$$

1.3.2 INCERTEZZE DI CATEGORIA B

Incertezze del sistema di acquisizione dati.

Nel sistema di acquisizione dei dati possono esistere differenti incertezze derivanti dalla trasmissione dei dati, dal tipo di segnale, dalla conversione digitale-analogico e dal processamento dei dati stessi.

L'incertezza standard per il sistema di acquisizione può essere espressa come segue:

$$u_{d,i} = \sqrt{u_{d1,i}^2 + u_{d2,i}^2 + u_{d3,i}^2} \quad \text{Eq. 20}$$

Dove:

- $u_{d1,i}$ è l'incertezza nella trasmissione e condizionamento del segnale nel bin i-esimo
- $u_{d2,i}$ è l'incertezza nella digitalizzazione nel bin i-esimo
- $u_{d3,i}$ è l'incertezza delle altre parti del sistema (software, storage dei dati...)

Incertezza nella potenza elettrica

L'incertezza nella potenza elettrica per ogni bin di velocità, $u_{P,i}$, è calcolata combinando i contributi dei trasduttori di potenza ($u_{P3,i}$), dei trasformatori di corrente e tensione ($u_{P1,i}$ e $u_{P2,i}$ rispettivamente), ed ovviamente del sistema di acquisizione dati.

$$u_{P,i} = \sqrt{u_{P1,i}^2 + u_{P2,i}^2 + u_{P3,i}^2 + u_{dP,i}^2} \quad \text{Eq. 21}$$

Per quanto riguarda il contributo dei trasformatori di corrente, la norma ritiene attendibile un valore limite dell'incertezza pari a $\pm 0.75\%$ della corrente. Ritiene inoltre che possa essere considerata una distribuzione

dell'incertezza di tipo rettangolare. Considerando infine che ogni trasformatore contribuisce per un terzo alla misura della potenza, si può assumere quanto segue:

$$u_{P1,i} = \frac{0.75\% * P_i[kW]}{\sqrt{3}} \frac{1}{3} = 0.43\% P_i \quad \text{Eq. 22}$$

Per i trasformatori di tensione vale lo stesso concetto ma considerando un valore limite dell'incertezza pari a $\pm 0.5\%$

$$u_{P2,i} = \frac{0.5\% * P_i[kW]}{\sqrt{3}} \frac{1}{3} = 0.29\% P_i \quad \text{Eq. 23}$$

Per quanto riguarda il trasduttore di potenza si assume che un trasduttore con una potenza nominale di 2000kW abbia un'incertezza limite di 10kW; la distribuzione dell'incertezza viene assunta nuovamente rettangolare pertanto

$$u_{P3,i} = \frac{10kW}{\sqrt{3}} = 5.8kW \quad \text{Eq. 24}$$

Incetenza nella velocità del vento

Le componenti di tipo B che concorrono alla valutazione dell'incertezza totale della velocità sono le seguenti:

- $u_{v1,i}$: incertezza nella calibrazione dell'anemometro
- $u_{v2,i}$: incertezza nelle caratteristiche operazionali dell'anemometro
- $u_{v3,i}$: incertezza dovuta al sistema di montaggio dell'anemometro, legata alla una distorsione di flusso incidente
- $u_{v4,i}$: incertezza dovuta all'orografia del terreno in prossimità dell'anemometro
- $u_{dv,i}$: incertezza nel sistema di acquisizione dei dati

$$u_{V,i} = \sqrt{u_{v1,i}^2 + u_{v2,i}^2 + u_{v3,i}^2 + u_{v4,i}^2 + u_{dv,i}^2} \quad \text{Eq. 25}$$

L'incertezza $u_{V1,i}$ (in genere variabile fra 0.7% e 5.2%) è calcolata come somma in quadratura di tre incertezze: u_{vel} , u_{IUT} e u_{LR} secondo la seguente espressione.

$$u_{V1,i} = \sqrt{u_{vel,i}^2 + u_{IUT,i}^2 + u_{LR,i}^2} \quad \text{Eq. 26}$$

Il primo termine è deducibile dalla calibrazione in galleria del vento come valor medio dei rapporti tra l'incertezza associata ad ogni lettura, riportata nel certificato di calibrazione dello strumento, e la corrispondente velocità del vento di galleria, anch'essa riportata nel certificato.

Il secondo termine è invece correlato all'incertezza legata alla misura dell'uscita dell'anemometro; è ragionevole assumere per questo parametro un valore pari a 0.01.

L'ultima componente indica l'incertezza associata alla regressione lineare con cui viene calibrato l'anemometro. Nel caso specifico questa componente è stata calcolata nel modo seguente:

$$u_{LR} = \sum_{j=i}^N \frac{k^* STE_v}{T_i} \frac{1}{N} \quad \text{Eq. 27}$$

$$STE_v = \sum \frac{(T_i - m^* f_i - b)^2}{n-2} \quad \text{Eq. 28}$$

- T_i è la velocità del vento in galleria alla prova i-esima
- k è il fattore di confidenza pari a 2
- N è il numero di prove effettuate per la calibrazione
- f_i è l'output dello strumento alla prova i-esima [Hz]
- m e b sono la slope e l'offset della curva di calibrazione
- STE_v è l'errore standard della stima della regressione lineare

Passiamo ora al secondo contributo $u_{v2,i}$.

Questo contributo è, come già riferito, legato alle caratteristiche operazionali dell'anemometro e porta al proprio interno la caratteristica del sito di installazione; più precisamente al suo interno rientra la turbolenza del sito di misura che, in genere, è diversa da quella di galleria del vento. L'Annex-I della norma riporta un metodo per il calcolo di u_{v2} ed assume che tale incertezza presenti una distribuzione rettangolare.

Il calcolo richiede che per ogni bin vengano calcolati i valori di una funzione peso così definita:

$$w_i = 5 + 0.5V_i[m/s] \quad \text{Eq. 29}$$

da cui è possibile calcolare il numero di classe dell'anemometro nel bin i-esimo k_i

$$k_i = 100 \left| \frac{\varepsilon_{i,max}}{w_i} \right| \quad \text{Eq. 30}$$

dove $\varepsilon_{i,max}$ è la deviazione massima della velocità riscontrata all'interno di uno stesso bin, calcolata come il massimo valore tra la differenza valore medio meno valore minimo e la differenza valore massimo meno valore medio della velocità del vento. Dunque si avrà un valore di $\varepsilon_{i,max}$ ed un valore di k_i per ogni bin di velocità.

Il valore massimo di tutti i k_i , ossia k , è quello che viene indicato come numero di classe caratteristico, per l'anemometro.

$$k = \max(k_i) \quad \text{Eq. 31}$$

A questo punto l'incertezza u_{v2} per ogni bin viene calcolata come segue:

$$u_{v2,i} = (0.05 + 0.005V_i) \frac{k}{\sqrt{3}} \quad \text{Eq. 32}$$

Valutazione dell'incertezza u_{v3} .

Siamo alla componente associata alla distorsione di flusso dovuta agli effetti di montaggio, considerati solo quando l'anemometro non è installato su un tubo centrale posto in cima alla torre di misura e dunque lungo lo sviluppo verticale della torre.

Poiché nel nostro caso le incertezze nella velocità del vento sono state calcolate solo in riferimento all'anemometro principale posto ad 80m e poiché tale anemometro era installato in cima alla torre, questa componente non è stata considerata.

Valutazione dell'incertezza u_{v4} .

Questa incertezza è anch'essa legata ad una deviazione del flusso incidente ma questa volta la deviazione è dovuta all'orografia del terreno che circonda la torre.

Se non viene eseguita la site calibration il valore di questa componente è compreso tra il 2% ed il 3% della velocità del vento. Se invece il sito è tale da richiedere la calibrazione si procede come di seguito.

Si parte dall'incertezza standard della site calibration, già descritta e calcolata nel paragrafo 1.1.6

$$u_{\alpha,i,j} = \sqrt{\frac{2u_{v1,i}^2}{V_i^2} + \frac{2u_{dv,i}^2}{V_i^2} + \frac{S_{\alpha,j}^2}{N_j}} \quad \text{Eq. 33}$$

e da qui si calcola

$$u_{v4,i,j} = \sqrt{2 \cdot u_{v1,i}^2 + 2 \cdot u_{dv,i}^2 + \frac{S_{\alpha,j}^2 \cdot V_i^2}{N_j}} \quad \text{Eq. 34}$$

fino ad arrivare al valore complessivo sui 360°, per ogni bin di velocità

$$u_{v4,i} = \frac{\sum_j u_{v4,i,j} \cdot N_{i,j}}{\sum_j N_{i,j}} \quad \text{Eq. 35}$$

- I pedici i e j indicano rispettivamente il bin di velocità i-esimo ed il bin di direzione j-esimo

- $S_{\alpha,j}^2$ è la deviazione standard dei fattori di correzione del flusso determinati durante la site calibration nel bin di direzione j-esimo (decima colonna “deviazione standard” di Fig. 17)
- N_j è il numero di fattori di correzione del flusso nel bin di direzione j-esimo
- $N_{i,j}$ è il numero di dati della power curve per il bin di velocità del vento i-esimo ed il bin di direzione j-esimo. Ad esempio $N_{1,j}$ è il numero di dati che si hanno considerando il primo bin di velocità (e quindi 0.25-0.75m/s) ed il j-esimo bin di direzione. In altre parole si va a determinare il numero di volte per cui un vento avente una velocità media appartenente al primo bin ha soffiato da direzioni che rientrano nel bin di direzione 1 (355°-5°), nel bin 2 (5°-15°), nel 3 (15°-25°) e così via, fino a creare una matrice avente tante colonne quanti sono i bin di velocità e tante righe quanti sono i bin di direzione. L'intersezione tra riga e colonna viene completata con i dati acquisiti durante la fase di determinazione di power curve.

Tipologia di incertezza	Simbolo	Valore dell'incertezza	Unità di misura	Note
Incertezza dovuta alla calibrazione dell'anemometro	$U_{v1,i}$	0.62%	%	Valore percentuale che andrà moltiplicato per V_i velocità normalizzata e mediata nel bin i-esimo
Incertezza dovuta alle caratteristiche dell'anemometro	$U_{v2,i}$	-	[m/s]	Non si ha un unico valore ma va calcolata reimplementando la formula di volta in volta per ogni bin
Incertezza dovuta alla distorsione del flusso	$U_{v4,i}$	-	[m/s]	Non si ha un unico valore ma va calcolata reimplementando la formula di volta in volta per ogni bin
Incertezza del sistema di acquisizione dati anemometro	$U_{dv,i}$	0.003	[m/s]	Valore unico da aggiungere così com'è di volta in volta per ogni bin

Tab. 9: Incertezze della velocità del vento calcolate durante la fase di power curve measurement

CAPITOLO 2

IEC 61400-12-1:2017, IL NUOVO QUADRO NORMATIVO. ASPETTI INNOVATIVI ED OSSERVAZIONI

INTRODUZIONE

La normativa di riferimento per il power performance test è la IEC 61400-12-1:2005 “Wind turbines – Part 12-1: Power performance measurements of electricity producing wind turbines”, edizione 1 emanata nel 2005.

La norma, come descritto nel capitolo precedente, riporta le procedure di misurazione e reporting necessari per fornire risultati accurati, precisi e coerenti, che possono essere replicati ai fini della valutazione delle prestazioni di potenza delle turbine eoliche.

Nel 2017 il quadro ha subito una non trascurabile variazione con l’emanazione di una seconda edizione, la IEC 61400-12-1:2017, rivisitata ed ampliata.

La curva di potenza determinata per una specifica macchina eolica dovrebbe essere indipendente dalle condizioni di flusso che si sviluppano nel sito di installazione e la vecchia edizione della norma non considerava adeguatamente contributi come l’intensità di turbolenza, il wind shear od il wind veer. Nella nuova edizione, invece, questi fattori trovano una più ampia e specifica trattazione proprio allo scopo di slegare da essi la curva di potenza determinata e fare in modo che essa sia specificatamente della macchina e non della macchina per un dato sito. Questo comporta ovviamente requisiti differenti ed a volte più stringenti rispetto alla prima edizione, nonché procedure più lunghe e complesse per la site calibration e la determinazione della curva.

Riassumendo quelli che sono i principali cambiamenti, si hanno:

- Inserimento di una nuova definizione di velocità del vento (REWS);
- Possibilità di utilizzo di remote sensing devices (RSD);
- Specifico trattamento di wind shear e wind veer, intesi come variazione di velocità e direzione del vento, rispettivamente, in corrispondenza del rotore;
- Specifico trattamento della turbolenza atmosferica;
- Revisione della correzione della densità dell’aria;

-
- Revisione della site calibration;
 - Revisione della definizione di power curve;
 - Revisione della determinazione degli ostacoli;
 - Precisazione circa i requisiti topografici;
 - Nuove disposizioni circa l'installazione degli strumenti di misura
 - Nuove componenti di incertezza.

2.1 REMOTE SENSING DEVICES (RSD) [7.2.5]

Un primo aspetto innovativo introdotto dalla nuova IEC 61400-12-1:2017 è la possibilità di utilizzare quelli che vengono definiti remote sensing devices, ovvero dispositivi che non necessitano di installazioni in quota, bensì a terra, e che consentono di misurare la velocità del vento fino a quote di oltre 200m, a seconda dello strumento. Quando si parla di RSD ci riferiamo essenzialmente a sodar e lidar. Il loro funzionamento è basato sulla generazione di impulsi a frequenza nota, sonori nel caso del sodar, laser nel caso del lidar, che vengono riflessi dall'aria in movimento. La variazione della frequenza del segnale riflesso allo strumento è legata alla velocità dell'aria. Attraverso il loro utilizzo è possibile determinare la velocità e la direzione del vento, la turbolenza atmosferica, i profili verticali della velocità del vento, la rotor equivalent wind speed (di seguito descritta). L'aspetto interessante è che può incentivare l'utilizzo di questi strumenti è il fatto che essendo completamente amovibili non richiedono autorizzazioni per la loro installazione. Ad ogni modo, la norma specifica che il loro utilizzo è limitato ad applicazioni in terreni definiti non complessi secondo quanto riportato nell'Annex B *Assessment of terrain at the test site*. Questa prescrizione viene ribadita anche all'interno del nuovo Annex L *The application of remote sensing technology* dedicato interamente a questa tecnologia.

Osservazione

Con l'espressione remote sensing devices ci si riferisce a sodar e lidar. In realtà, però, i sodar non sono particolarmente indicati perché soffrono molto il fenomeno dell'eco; se installati in prossimità della torre, le misure fornite non sarebbero accettabili poiché influenzate dalle riflessioni generate dalla torre meteorologica. Anche durante le attività svolte da WEST-lab si è potuto constatare questo problema, che ha reso le misure di velocità del vento inutilizzabili, pertanto si consiglia l'utilizzo dei soli lidar.

C'è poi un secondo aspetto molto importante. La norma, come appena detto, ripete più volte che l'utilizzo dei RSD, al fine della determinazione della curva di potenza, è consentito solo nelle orografie in cui sono rispettati i requisiti dell'Annex B. In altre parole il regime del flusso di vento nel sito deve essere tale da non richiedere la site calibration e quindi omogeneo ed uniforme. Questa restrizione ha, a parer nostro, più di una spiegazione.

- 1) I remote sensing devices assumono l'ipotesi di flusso uniforme all'interno del volume scansionato. Il valore di velocità del vento, od altro parametro misurato, viene poi assunto come costante all'interno di quel volume, che generalmente è dell'ordine di diversi metri. Lo strumento, in altre parole, scansiona un certo volume, ma la misura viene riportata ad una sola quota ben precisa all'interno di quel volume. Tra un punto di misura ed il successivo, il valore della misura viene considerato costante. Questa ipotesi non può essere valida nel caso di orografie complesse caratterizzate da flusso tutt'altro che uniforme; il risultato sarebbero valori di incertezze non accettabili.*
- 2) Per verificare l'affidabilità e la precisione delle misure effettuate tramite RSD, questi vanno calibrati in sito. La procedura, riportata nell'Annex L della norma, consiste nel confrontare le misure con quelle derivate da un anemometro installato su una torre in una posizione molto vicina e quantificare la sensibilità dello strumento. Per poter operare questo confronto è necessario che le condizioni del flusso indagato siano le medesime, soprattutto in termini di direzione del vento. I RSD infatti misurano intensità e direzione. Non è possibile stabilire una relazione certa tra le misure nel caso di orografia complessa, poiché sarebbero inevitabili delle variazioni del flusso tra il volume scansionato dal remote sensing device e lo strumento di riferimento. Potrebbero esserci relazioni tra le velocità misurate, ma non si conosce la reale direzione del vento misurato dalle coppette dell'anemometro, quindi qualsiasi confronto sarebbe basato su condizioni ambientali non coincidenti.*

Per questi motivi la sostituzione di un anemometro a coppette con un remote sensing device per determinare la HHWS e la REWS (di seguito definite) è possibile solo per quelli definiti flat terrain, e dunque rispondenti ai requisiti dell'Annex B, nei quali le caratteristiche del flusso sono omogenee ed uniformi.

Un esempio di quanto appena detto è riportato in [6] "Wind turbine power production and annual energy production depend on atmospheric stability and turbulence" di C. M. St. Martin, J. K. Lundquist, A. Clifton, G. S. Poulos

and S.J. Schreck, in cui si è provato ad utilizzare un lidar NRG/LEOSPHERE WINDCUBE v1 per misurare la velocità del vento tra i 40 ed i 200m di altezza ad intervalli di 20m. La power curve determinata utilizzando i dati forniti dal lidar ha mostrato valori di scatter molto elevati, attribuiti dagli stessi autori alla non omogeneità del flusso nel sito scelto. Di conseguenza la curva è stata scartata.

Purtroppo in Italia le aree idonee all'installazione di parchi eolici sono prevalentemente ad orografia complessa, ad eccezione di pochi casi come la Puglia, pertanto difficilmente sarà possibile determinare la velocità del vento e la power curve tramite remote sensing devices.

2.2 NUOVA DEFINIZIONE DELLA VELOCITÀ DEL VENTO: REWS, ROTOR EQUIVALENT WIND SPEED [7.2.6, 9.1.3.2]

Nella precedente edizione normativa si fa riferimento alla HHWS, Hub Height Wind Speed, definendola come la velocità del vento che deve essere misurata ad un'altezza pari a quella dell'hub della turbina eolica ed utilizzata come velocità di riferimento durante la determinazione della curva di potenza e nella stesura dei report. Viene misurata da un anemometro installato sulla torre meteorologica ad un'altezza pari a quella dell'hub della turbina in fase di certificazione. Nella nuova edizione viene introdotta una nuova definizione, la REWS Rotor Equivalent Wind Speed. La norma precisa che la HHWS rimane comunque la principale definizione di velocità del vento imprescindibile, ma aggiunge questa seconda definizione di velocità del vento chiamata REWS, non obbligatoria ai fini della certificazione, che richiede la misura della velocità del vento ad almeno tre altezze all'interno dell'area del rotore. La REWS viene calcolata come segue:

$$V_{eq} = \left(\sum_{i=1}^{n_H} v_i^3 \frac{A_i}{A} \right)^{1/3} \quad \text{Eq. 36}$$

- n_H rappresenta il numero di misure (> 3);
- v_i è la velocità del vento misurata all'altezza i -esima;
- A è l'area spazzata dal rotore;
- A_i è l'area dell' i -esimo segmento di cui è rappresentativa la velocità v_i .

Le tre altezze minime a cui questa velocità del vento deve essere calcolata variano a seconda del tipo di torre anemometrica installata. Se si è in presenza di una torre più alta dell'altezza dell'hub, le misure saranno condotte almeno:

- All'altezza dell'hub $\pm 1\%$;
- Ad un'altezza compresa tra $H-R$ e $H-2/3R$;
- Ad un'altezza compresa tra $H+2/3R$ ed $H+R$.

Si fa quindi riferimento all'area spazzata dal rotore ipotizzando che essa sia suddivisa in n intervalli.

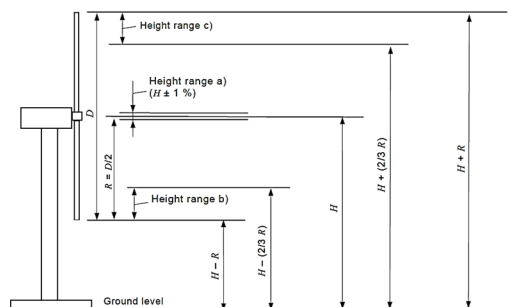


Fig. 21: Altezze di misura della REWS in caso di torre più alta dell'hub

Qualora, invece, la torre avesse un'altezza pari a quella dell'hub, od inferiore, le misure andranno eseguite nella metà inferiore del rotore e dovrebbero essere condotte rispettando le seguenti due prescrizioni:

- Un anemometro installato su un braccetto quanto più possibilmente vicino all'altezza dell'hub;
- Indagando un range di altezza compreso tra $H-R$ ed $H-2/3R$.

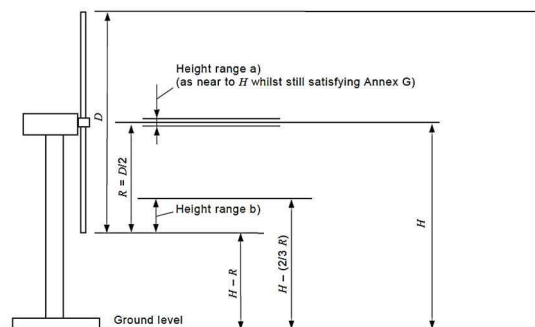


Fig. 22: Altezze di misura della REWS in caso di torre avente altezza inferiore all'hub

In aggiunta alle altezze minime di misura, la norma propone anche tre diverse opzioni per misurare la Rotor Equivalent Wind Speed:

- 1) Combinando le misure provenienti dall'anemometro montato in cima alla torre anemometrica (in accordo con l'Annex G di seguito descritto) all'altezza dell'hub con quelle effettuate tramite remote sensing device;
- 2) Utilizzando direttamente le misure effettuate con i remote sensing devices qualora non si avesse a disposizione un anemometro all'altezza dell'hub;
- 3) Utilizzando le misure effettuate con anemometri installati in configurazione side-mounted lungo l'altezza della torre, distribuiti sull'area del rotore, purché ce ne sia uno ad altezza hub e la torre sia quindi più alta dell'altezza dell'hub.

Le prime due possibilità esposte hanno un requisito in comune, ovvero che il terreno soddisfi i requisiti riportati nell'Annex B.

Osservazione

La definizione di velocità del vento riportata IEC 61400-12-1:2005 era basata esclusivamente su un solo contributo di velocità misurato ad una quota da terra pari a quella dell'hub. Attraverso la procedura della site calibration si determinavano i fattori di correzione del flusso da applicare a tale velocità e dalla combinazione dei due veniva stimata la velocità del vento incidente sul rotore della turbina. Questo tipo di velocità del vento, però, potrebbe risultare incompleta poiché trascura importantissimi contributi, specie in orografie complesse, come il wind shear od il wind veer. Per questo motivo viene introdotta nella nuova edizione la definizione di REWS, una velocità del vento misurata combinando i valori di almeno tre diverse altezze e non più una sola. In questo modo i contributi dello shear vengono presi in considerazione. La norma però specifica che l'utilizzo della REWS non è alternativo alla HHWS bensì aggiuntivo, poiché la HHWS è comunque in grado di rappresentare con un buon livello di affidabilità l'energia cinetica captata dal rotore. Per questo è stata definita nello standard precedente come la velocità sulla base della quale definire la power curve e continuerà ad esserlo anche nel nuovo standard. La power curve basata sulla REWS può essere definita parallelamente per tener conto delle reali condizioni del sito. Emerge però una prima complicazione per l'applicazione della REWS: in orografia complessa non è possibile fare ricorso alle prime due opzioni per poterla calcolare. Infatti, se l'orografia è complessa, per definizione non incontra i requisiti riportati nell'Annex B, come invece è richiesto. È dunque possibile applicare solo il terzo dei metodi descritti che comporta

l'installazione di una torre più alta dell'altezza dell'hub. Questa richiesta, però, comporta dei problemi tecnici pratici difficilmente superabili. In orografia complessa, dove i venti sono molto intensi, le torri anemometriche comuni, strallate, se sono troppo alte soffrono di problemi di instabilità; è stato constatato in diverse occasioni durante le attività svolte dal centro WEST-lab, che gli stralli non abbiano retto causando il crollo della torre. Si trattava di torri aventi altezze di circa 100m. Poiché si richiede di installare una torre più alta dell'altezza dell'hub, difficilmente potrà essere strallata, ma dovrà essere autoportante. Il conseguente aumento dei costi non sarà trascurabile. Si aggiunge poi il fatto che una struttura così alta crea comunque un problema di oscillazioni che va ad inficiare sulla precisione degli strumenti installati in cima. Si può quindi concludere che il calcolo della REWS in orografie complesse non è impossibile ma poco praticabile.

Dunque, ricapitolando, la norma lascia un ampio margine di scelta nella configurazione da adottare:

- Innanzitutto si può, almeno per ora, scegliere se eseguire la certificazione secondo la prima o la seconda edizione.
- Se si sceglie di adottare la seconda edizione possiamo scegliere se usare o meno la definizione di REWS, qualora ce ne fossero le condizioni. Se si decide di non utilizzarla la configurazione è analoga a quella prevista dall'edizione 1 con torre anemometrica avente altezza pari a quella dell'hub e calcolo della HHWS. Se si decide di utilizzare la definizione di REWS c'è di nuovo un bivio:
 - Se il terreno non incontra i requisiti dell'Annex B occorre installare una torre avente altezza superiore a quella dell'hub e disporre gli anemometri in modo da averne comunque uno all'altezza dell'hub;
 - Se il terreno incontra i requisiti dell'Annex B e si vuole ricorrere all'uso di RSD, bisogna prima decidere l'altezza della torre:
 - Se si intende installare una short mast che non raggiunge l'altezza dell'hub, si calcola la REWS direttamente dalle misure effettuate tramite RSD;
 - Se la torre da installare avrà la stessa altezza dell'hub, verranno combinate le misure dell'anemometro all'altezza dell'hub con quelle dei RSD.

2.3 WIND SHEAR E WIND VEER [7.2.8, ANNEX Q]

Un parametro che può avere una forte influenza sulla potenza generata da una turbina eolica e che rappresenta un altro aspetto innovativo proposto dalla nuova edizione della norma è il wind shear. Con l'espressione wind shear ci si riferisce alla variazione della velocità del vento all'aumentare della quota dal suolo.

Può essere determinato attraverso anemometri distribuiti su più altezze lungo la torre meteorologica oppure, quando possibile, attraverso i remote sensing devices. Le altezze minime a cui effettuare le misure sono le stesse descritte per il calcolo della REWS, ribadendo che 3 è il numero minimo dei punti. Sarebbe opportuno effettuare misure a quante più altezze possibile.

Wind shear e REWS sono strettamente correlati tra loro poiché andando a calcolare la velocità del vento e quindi la REWS su più altezze, si è automaticamente tracciato il profilo verticale della velocità del vento.

Il wind veer, invece, è la variazione della direzione del vento all'aumentare dell'altezza da terra. Quando la REWS viene calcolata tenendo in considerazione anche questo fattore, la sua espressione cambia e diventa la seguente:

$$v_{eq} = \left(\sum_{i=1}^n \left(v_i \cos(\phi_i) \right)^3 \frac{A_i}{A} \right)^{1/3} \quad \text{Eq. 37}$$

ϕ_i è l'angolo che si viene a formare tra la direzione del vento misurata all'hub e quella misurata sul segmento i-esimo.

Osservazione

Wind shear e wind veer possono avere un forte impatto sulla produzione elettrica di una turbina e sulle sue condizioni di lavoro: gli effetti del wind veer possono tradursi in un allineamento non perfettamente perpendicolare del rotore rispetto al vento incidente, mentre un vento non uniforme in intensità può causare carichi altrettanto non uniformi sulla pala. Il più delle volte la traduzione è un calo dell'efficienza della macchina che si fa risentire tanto più quanto aumentano le dimensioni del rotore.

Il fatto che questa nuova edizione preveda uno specifico trattamento del wind shear è molto importante perché consente di caratterizzare in modo più accurato il sito in esame, capire qual è la reale distribuzione di velocità dall'hub verso terra ed avere maggiori informazioni sul reale regime di lavoro della macchina eolica. Un rapido esempio: se, il wind shear fosse

molto accentuato, il profilo della velocità sarebbe uniforme e tutta la pala della turbina starebbe lavorando in condizioni di vento uniforme. Se invece il wind shear fosse poco accentuato, il gradiente sarebbe basso e la velocità varierebbe, anche se di poco, lungo tutta l'altezza. Il primo caso è meno significativo rispetto al secondo perché la turbina lavora in una condizione ottimale.

La norma però riporta un concetto non esattamente corretto a proposito del wind shear. All'interno del paragrafo 3.1 dell'Annex C viene data una classificazione dell'orografia secondo tre tipologie: un'orografia non complessa (tipo A) in cui non sono presenti significative variazioni in elevazione, un'orografia moderatamente complessa (tipo B) che include montagne e colline consistenti, ed una tipologia C che rappresenta le orografie più estreme in cui si possono facilmente verificare fenomeni di separazione del flusso. Ora, secondo la norma nella tipologia B il wind shear è tipicamente basso, relativamente consistente e non particolarmente significativo. In realtà questo concetto non è propriamente corretto perché la situazione descritta accade pochissime volte perché dipende molto dal profilo della collina. Generalmente una montagna, o collina, non è uniforme in tutte le direzioni quindi se anche in una direzione avesse quell'andamento, non è detto che lo abbia anche nelle altre. Se fosse molto ripida ci sarebbero poi dei fenomeni di separazione, per cui questo concetto deve essere assunto con la dovuta cautela e non può essere generalizzato a tutti i casi di terreno di tipologia B.

2.4 NORMALIZZAZIONE DEI DATI [9.1]

Altre novità sono relative alla normalizzazione dei dati. Avendo prescritto uno specifico trattamento del wind shear, la norma richiede che i dati vengano corretti anche in funzione di esso. Vengono forniti due fattori di correzione. Il primo viene definito per il caso in cui siamo in presenza di RSD con torre meteorologica ad altezza hub oppure RSD con una short mast. In questo caso il fattore di correzione del flusso è definito come

$$f_{r,RSD} = \frac{v_{eq,RSD}}{v_{h,RSD}} \quad \text{Eq. 38}$$

- $v_{eq,RSD}$ è la rotor equivalent wind speed misurata tramite RSD secondo l'eq 36 (eq 5 nella norma);
- $v_{h,RSD}$ è la hub height wind speed misurata tramite RSD.

Il secondo fattore viene definito nel caso di torre più alta dell'hub

$$f_{r,MM} = \frac{v_{eq,MM}}{v_{h,MM}} \quad \text{Eq. 39}$$

- $v_{eq,MM}$ è la rotor equivalent wind speed misurata dagli anemometri sulla torre meteorologica;
- $v_{h,MM}$ è la hub height wind speed misurata dall'anemometro ad altezza hub.

Se la velocità del vento all'altezza dell'hub è misurata utilizzando un anemometro ed il wind shear è misurato tramite RSD, si applica il fattore di correzione del flusso e la rotor equivalent wind speed finale sarà:

$$v_{eq,final} = f_{r,RSD} * v_{h,MM} \quad \text{Eq. 40}$$

Un'altra modifica è approntata alla normalizzazione della potenza in uscita dal generatore ed alla velocità del vento. Le formule rimangono le stesse, dunque

$$P_n = P_{10min} \left(\frac{\rho_0}{\rho_{10min}} \right) \quad \text{Eq. 41}$$

$$V_n = V_{10min} \left(\frac{\rho_{10min}}{\rho_0} \right)^{1/3} \quad \text{Eq. 42}$$

Dove

- P_n è la potenza in output normalizzata
- V_n è la velocità del vento normalizzata
- P_{10min} è la potenza misurata mediata nei 10 minuti
- V_{10min} è la velocità del vento misurata e mediata nei 10 minuti
- ρ_0 è la densità dell'aria di riferimento
- ρ_{10min} è la densità dell'aria calcolata e mediata nei 10 minuti

Quello che cambia rispetto alla prima edizione è proprio questo ultimo fattore, che nella precedente versione era espresso come:

$$\rho_{10min} = \frac{B_{10min}}{R_0 T_{10min}} \quad \text{Eq. 43}$$

mentre in questa seconda edizione è espresso come

$$\rho_{10min} = \frac{1}{T_{10min}} \left(\frac{B_{10min}}{R_0} - \Phi P_w \left(\frac{1}{R_0} - \frac{1}{R_w} \right) \right) \quad \text{Eq. 44}$$

I termini comuni mantengono gli stessi significati, dunque:

- B_{10min} è la pressione dell'aria misurata e mediata nei 10 minuti all'altezza dell'hub
- T_{10min} è la temperatura in [K] misurata e mediata nei 10 minuti all'altezza dell'hub
- R_0 è la costante universale dei gas per l'aria secca 287.05 [J/kgK]

I nuovi termini sono invece:

- Φ umidità relativa
- R_w è la costante universale dei gas per il vapore acqueo 461.5 [J/kgK]
- P_w è la pressione di vapore uguale a $0.0000205 \exp(0.0631846 T_{10min})$ [Pa]

Osservazione

La formula 44 riportata nella edizione 2017 in realtà era presente anche nella edizione 2005, con la differenza che in questo secondo caso si specificava di determinare la densità dell'aria secondo la prima equazione indicata (43), e si raccomandava in caso di elevate temperature di utilizzare la seconda formulazione. Dunque era più un consiglio. Nel caso della nuova edizione invece diventa la prassi e di conseguenza si ottiene una misura più realistica e precisa perché tiene conto anche dell'umidità relativa, la cui misura diventa, peraltro, obbligatoria.

2.5 VALUTAZIONE DEGLI OSTACOLI E DEL TERRENO [ANNEX A E B]

A differenza di quanto contenuto nella prima edizione, la determinazione degli ostacoli avviene nell'edizione due solo sulla base dell'altezza. Sono prescrizioni leggermente più restrittive rispetto a quelle riportate nell'edizione uno. Si prescrive l'altezza massima che può avere un ostacolo a seconda dell'altezza dell'hub, del diametro del rotore, del settore di misura e della distanza tra la torre e la turbina.

Distance	Sector	Maximum obstacle height from terrain surface
$< 2L$	360°	$< 1/3 (H - 0.5 D)$
$\geq 2L$ and $< 4L$	Preliminary measurement sector	$< 2/3 (H - 0.5 D)$
$\geq 4L$ and $< 8L$	Preliminary measurement sector	$< (H - 0.5 D)$
$\geq 8L$ and $< 16L$	Preliminary measurement sector	$< 4/3 (H - 0.5 D)$
$\geq 2L$ and $< 16L$	Clearly outside preliminary measurement sector by 40° or more	No limit to height

Tab. 10: Criteri per la valutazione degli ostacoli

Per quanto concerne, invece, la valutazione delle interferenze tra torri eoliche, i criteri sono rimasti invariati.

Se i criteri per la valutazione degli ostacoli risultano più restrittivi rispetto alla prima edizione, i criteri per la valutazione della massima variazione del terreno sono invece meno restrittivi.

Distance	Sector	Maximum slope %	Maximum terrain variation from place
$< 2L$	360°	< 3	$< 1/3 (H - 0.5 D)$
$\geq 2L$ and $< 4L$	measurement sector	< 5	$< 2/3 (H - 0.5 D)$
$\geq 2L$ and $< 4L$	outside measurement sector	< 10	Not applicable
$\geq 4L$ and $< 8L$	measurement sector	< 10	$< (H - 0.5 D)$
$\geq 8L$ and $< 16L$	measurement sector	< 10	Not applicable

Tab. 11: Criteri per la valutazione delle variazioni topografiche

2.6 SITE CALIBRATION [ANNEX C]

Una importante novità riguarda la procedura della site calibration. La norma riconosce che ci sono fattori che possono causare delle differenze sistematiche tra le caratteristiche del vento sulla torre di riferimento e quelle sulla torre posizionata al posto della turbina ed influenzare così i risultati della site calibration: tipologia di terreno, posizione delle torri, condizioni atmosferiche come wind shear, turbolenza, stabilità. Per questo motivo modifica la procedura descritta nella edizione del 2005 e ne introduce una completamente nuova basata su due metodi legati proprio ad uno di questi parametri: una procedura legata al wind shear ed una per il caso in cui il wind shear dovesse essere valutato come un parametro non influente per il sito in esame.

Come nella precedente edizione, sarà necessario installare due torri: una sarà la reference mast che rimarrà anche durante la fase di determinazione della power curve, ed una sarà installata nell'intorno del punto in cui andrà installata la turbina eolica, per la precisione ad una distanza massima di $0.2H$ (H = altezza dell'hub della turbina). La distanza tra le due torri dovrà essere compresa tra 2 e 4 volte il diametro della turbina, come nella precedente edizione.

La posizione in cui condurre i test dovrà essere scelta con cura in modo da ottimizzare la raccolta di dati validi e fornire una buona correlazione tra la reference mast e la wind turbine met-mast. In particolare dovrà essere attentamente considerata la tipologia di orografia con cui ci troviamo a lavorare. Come già accennato, questo Annex riporta una classificazione del terreno in tre tipologie:

- Tipo A: non sono presenti significative variazioni in elevazione per cui si può assumere il terreno sostanzialmente pianeggiante. Secondo quanto riportato dalla norma, quando si conduce una site calibration in terreni di questo tipo, le condizioni di wind shear sulla reference mast e quelle sulla wind turbine met-mast possono variare notevolmente. In questo caso i risultati della site calibration saranno fortemente dipendenti dal wind shear e dalla direzione del vento.
- Tipo B: rientrano nella tipologia B i terreni tipicamente definiti ad orografia complessa, quindi caratterizzati da montagne, grandi colline e significative variazioni in elevazione in genere. Tipicamente, secondo la norma, per questo tipo di orografia si presenta un wind shear basso e consistente, a volte negativo; per

questo ci si aspetta che non sia significativo tanto quanto quello che si presenta nella tipologia di terreno A.

- Tipo C: è la categoria più estrema in cui le asperità possono facilmente provocare fenomeni di separazione del flusso o di ricircolo attorno alla turbina. L'orografia è così complessa che potrebbe non esserci affatto una correlazione tra il vento misurato sulla reference met-mast e la turbina in fase di test.

Poiché, indipendentemente dalla categoria di terreno, il wind shear può indurre una componente dinamica che modifica la correlazione tra la velocità del vento sulle due torri di misura, il primo passo indicato per la site calibration è proprio la valutazione delle condizioni di shear nel sito.

Allo scopo la norma riporta gli elementi che devono essere determinati per ogni set di 10 minuti:

- Wind speed ratio: rapporto tra la HHWS sulla wind turbine met-mast e la velocità del vento sulla reference met-mast
- Wind shear exponent: utilizzando la power law si va a calcolare per entrambe le torri l'esponente del wind shear.

$$v_{zi} = v_h \left(\frac{z_i}{H} \right)^\alpha \quad \text{Eq. 45}$$

Dove:

- v_h è la hub height wind speed;
- H è l'altezza dell'hub;
- v_{zi} è la velocità del vento all'altezza z_i ;
- α è il wind shear exponent.

Per valutare le condizioni di shear nel sito, la norma consiglia di redigere i seguenti grafici per entrambe le torri di misura:

- Wind shear exponent vs. time of day;
- Shear exponent vs. wind direction;
- Shear exponent vs. wind speed;
- Wind speed vs. time of day.

Osservazione

Da questi grafici si inizia ad avere una panoramica delle condizioni sul sito e delle eventuali correlazioni tra i dati misurati sulle due torri meteorologiche.

In particolare uno molto esplicativo delle caratteristiche del sito è il primo di quelli elencati. Andando a graficare la variazione del wind shear exponent in funzione dell'ora del giorno è possibile trarre conclusioni circa la stabilità

atmosferica del sito e sulla radiazione solare che esso riceve. Se la radiazione solare sul sito è bassa, non si avrà attività termica tra il giorno e la notte, dunque non si avranno fenomeni di instabilità atmosferica, l'altezza dello strato limite sarà pressoché costante e lo shear exponent non subirà notevoli variazioni nell'arco delle 24 ore. Se, invece, si registrano trend calanti nei valori del wind shear exponent nelle ore centrali del giorno significa che si hanno fenomeni di turbolenza dovuta alle attività termiche nel sito che creano un rimescolamento dell'aria alle basse quote e quindi un profilo verticale di velocità più piatto associato proprio a wind shear exponent più bassi. Di seguito un esempio di variazione del wind shear exponent in relazione alle ore del giorno estrapolato dai dati acquisiti presso il sito eolico di Serrapetrona. È possibile osservare l'andamento appena descritto.

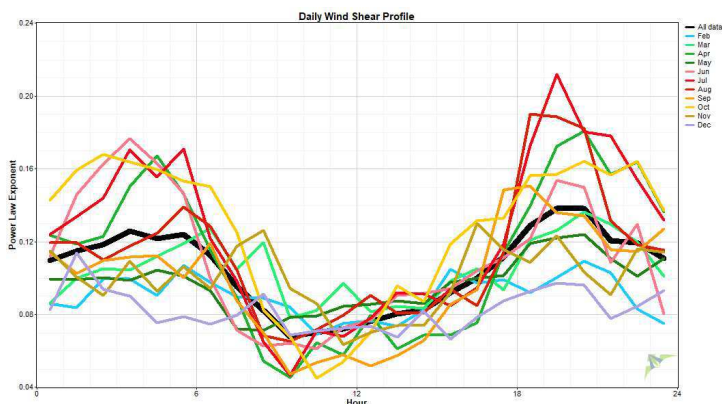


Fig. 23: Wind shear exponent vs ora del giorno presso il sito eolico di Serrapetrona

Successivamente si passa a valutare se realmente lo shear può essere considerato un fattore significativo: lo è se più del 25% dei dati raccolti presenta un esponente maggiore di 0.25.

A questo punto si determina se lo shear sulla reference mast è rappresentativo dello shear sulla turbine location met-mast e dunque sulla futura turbina.

Il metodo più rapido consiste nel diagrammare contemporaneamente lo shear exponent misurato sulla reference mast e quello misurato sulla turbine location met-mast. Di questo grafico è importante calcolare la regressione lineare che potrà essere utilizzata durante la power curve measure per stimare lo shear sulla turbina.

Sulla base del risultato di questo confronto si andrà avanti seguendo due metodi:

- Metodo 1 [C.5.2]: Bin della direzione del vento e del wind shear. Viene applicato quando emerge che lo shear è un parametro con un'influenza significativa per il sito in esame e che c'è una correlazione tra le due torri. Si raccolgono i dati in bin di direzione di 10° e di shear exponent di 0.05 centrati sui multipli di 0.05. Per ogni combinazione di bin di direzione e shear si determina il wind speed ratio (fattore di correzione del flusso) andando così a creare una matrice. Se dopo aver completato la matrice i fattori di correzione non cambiano di molto all'aumentare del wind shear, allora è possibile eliminare i bin di quest'ultimo parametro e valutare i dati riorganizzandoli solo sulla base dei bin di direzione.
- Metodo 2 [C.5.3]: regressione lineare quando lo shear non ha un'influenza significativa. I dati collezionati vengono suddivisi in bin di direzione, anch'essi di 10°, e per ogni bin viene calcolata una regressione lineare ponendo la velocità del vento misurata sulla wind turbine location met-mast come variabile dipendente e la velocità del vento misurata sulla reference mast come variabile indipendente. Si avranno quindi una slope, un'intercetta ed un valore di R^2 per ogni bin di direzione ed il fattore di correzione del flusso avrà, appunto, la forma di una regressione lineare.

Durante la fase di determinazione della power curve, i fattori di correzione del flusso andranno applicati alla velocità del vento misurata sulla reference mast per predire la velocità del vento sulla turbina eolica tramite la seguente relazione

$$v_{turb_predicted} = F(WD, a) * V_{PM} \quad \text{Eq. 46}$$

dove:

- $V_{Turb_predicted}$ è la velocità del vento sulla turbina stimata a partire dalla velocità misurata sulla reference mast;
- $F(WD, \alpha)$ è il fattore di correzione del flusso, dipendente o meno a seconda dei casi dallo shear exponent;
- V_{PM} è la velocità del vento misurata sulla reference mast.

L'ultima fase della site calibration sarà quella relativa alla verifica della qualità del database collezionato ed al calcolo delle incertezze.

Si calcola il parametro chiamato residual

$$residual = V_{turb_predicted} - V_{turb_measured} \quad \text{Eq. 47}$$

per ogni set di dati da 10 minuti.

Si calcola contemporaneamente il *self_consistency_parameter*

$$self_consistency_parameter = \frac{V_{turb_predicted}}{V_{turb_measured}} \quad \text{Eq. 48}$$

Dall'analisi dei due si verifica se i risultati sono affetti da errori di bias. Il loro valor medio riflette il bias medio, mentre la deviazione standard viene utilizzata per calcolare l'incertezza statistica della site calibration.

Si passa quindi al quality check, che avviene su più livelli.

- Convergenza dei dati: per ogni bin di direzione si calcola la media mobile del *self_consistency_parameter* che deve convergere allo 0.5% della media finale entro il maggiore tra 16 ore ed il 25% dei data point per il bin considerato. In caso positivo si può considerare completo il database per quel bin. Se, invece, questo non avviene si può operare un filtraggio dei dati per tentare di spiegare e correggere la non convergenza. Se anche in questo caso il risultato non cambia, un diverso check, in accordo con il paragrafo [C.8], andrà condotto durante la fase di power curve measure. Se nuovamente i dati non convergono, quel bin dovrà essere escluso dai settori di misura.
- Correlazione per la regressione lineare. Nel caso in cui i fattori di correzione del flusso venissero determinati attraverso il metodo 2, per ogni bin di direzione occorrerà valutare il livello di correlazione sulla base del coefficiente di correlazione della regressione r .
- Fattore di correzione tra bin adiacenti. La variazione del fattore di correzione tra bin adiacenti deve essere $< 2\%$. Questa verifica va condotta applicando il *self_consistency_parameter* come segue:
 - Si calcola il fattore di correzione del flusso,
 - Lo si trasla in modo che venga applicato al bin adiacente,
 - Si calcola la nuova $V_{Turb_predicted}$ ed i *self_consistency_parameters* per ogni data set di 10 minuti,
 - Si media il *self_consistency_parameter* in ogni bin. Se tale valore di media non è compreso tra 0.98 e 1.02 si elimina il bin o si incrementano le incertezze andando a calcolare la componente $u_{VT,coc,i}$ come segue:

$$u_{VT,coc,i,j} = \frac{1}{2} \left(\frac{|1 - sccp_{j,j-1}|}{2\sqrt{3}} + \frac{|1 - sccp_{j,j+1}|}{2\sqrt{3}} \right) \quad \text{Eq. 49}$$

$u_{VT,coc,i}$ è la componente di incertezza relativa alla variazione del fattore di correzione del flusso tra bin

adiacenti, $sccp_{j,j-1}$ è il self_consistency_parameter del bin di direzione del vento j ottenuto applicando il fattore di correzione del bin $j-1$ e $sccp_{j,j+1}$ è il self_consistency_parameter del bin di direzione del vento j ottenuto applicando il fattore di correzione del bin $j+1$.

Osservazione

Nella vecchia edizione della normativa veniva richiesto che durante la procedura di site calibration venissero determinati dei fattori di correzione del flusso necessari per correlare la velocità del vento misurata dall'anemometro principale all'altezza dell'hub con la corrispondente velocità, alla medesima altezza, in corrispondenza della turbina sotto test. Nel fare questo non venivano richieste particolari considerazioni circa la distribuzione verticale dei profili di velocità, era semplicemente richiesto che le velocità all'altezza dell'hub fossero tra loro correlabili. Era certamente ritenuto buon senso prevedere dei piani di misura ulteriori lungo lo sviluppo verticale delle torri meteorologiche, come è stato fatto nel caso specifico di Serrapetrona ad esempio, ma non era obbligatorio.

Con la nuova edizione, invece, viene riconosciuta l'importanza di valutare che non solo le velocità all'hub siano tra loro confrontabili, ma che anche il modo in cui il profilo verticale di velocità si sviluppa in altezza lo sia; questo viene fatto inserendo come obbligatoria la valutazione del wind shear per poter espletare la procedura della site calibration, andando ad inserire più piani di misura tra il piano di campagna e l'altezza dell'hub. In questo la norma è stata lungimirante poiché così facendo i punti in cui sono installate la torre anemometrica di riferimento e la turbina eolica sono veramente correlabili tra loro. Prima, infatti, era possibile che si manifestasse una casualità per la quale all'altezza dell'hub le velocità effettivamente coincidevano, ma il modo in cui i profili verticali raggiungevano quelle velocità a quelle quote poteva essere completamente differente. A quel punto si sarebbe perso ogni senso di correlazione tra i due punti, ma non essendo obbligatorio l'inserimento di più piani di misura era frequente che questo aspetto non venisse affatto considerato e che questa problematica non emergesse. Adesso invece questo aspetto viene superato.

Si ritiene che la spiegazione di un contenuto della norma così differente ed ampliato rispetto alla prima edizione possa essere il seguente.

Le dimensioni delle turbine eoliche sono cambiate notevolmente negli anni. Fino a qualche anno fa erano comuni turbine con 40m di palo e 48m di diametro del rotore, poi sono arrivate turbine con pali da 50, 52m, dopo

ancora c'è stato un salto e si sono diffuse turbine da 80m di palo per 80m di diametro ed infine, negli ultimissimi anni, le dimensioni si sono stabilizzate su pali da circa 100, 120m con rotori del diametro dai 120 ai 160m. Di conseguenza la metà inferiore del rotore si è avvicinata di molto al terreno e gli effetti dello shear sono divenuti sempre più importanti perché riguardano una porzione del disco rotorico molto maggiore. Peraltro questi effetti non si ripropongono solamente nella forma di produzione energetica complessivamente inferiore rispetto a quanto previsto in fase di progetto, ma anche come vita utile potenzialmente inferiore perché sottopongono il mozzo della turbina e le pale a distribuzioni di sollecitazioni molto differenti tra la metà superiore e quella inferiore del rotore. Era quindi perentorio che la norma venisse aggiornata in funzione dell'evoluzione subita dalle macchine eoliche stesse.

Il risultato è una procedura che, nell'ottica di una completa caratterizzazione del sito in esame, risulta estremamente più completa e ricca di informazioni ottenibili rispetto alla precedente edizione molto più scarsa.

2.7 INSTALLAZIONE DEI SENSORI SULLA TORRE METEO [ANNEX G]

Anche l'Annex G risulta notevolmente diverso tra la prima e la seconda edizione della norma. In questo capitolo vengono fornite le indicazioni relative all'installazione degli strumenti sulle torri meteo e valgono sia per la fase di site calibration che per la successiva determinazione della power curve.

Vengono richiesti un anemometro all'altezza dell'hub ed uno di controllo posto ad una distanza che verrà in seguito specificata. Devono essere installati in modo tale da minimizzare le distorsioni del flusso generate dalla torre e dai supporti stessi. La configurazione ideale prevede che l'anemometro principale sia installato in cima alla torre, ma può essere accettata anche una situazione in cui entrambi siano installati in cima seguendo quella che viene definita side-by-side top mounted configuration. Si ottiene una ridondanza delle misure con un incremento solo marginale nelle distorsioni del flusso sui sensori, purché questi siano adeguatamente separati.

Indipendentemente dalla configurazione scelta, è fondamentale che la struttura sia stabile e che minimizzi le vibrazioni indotte, le oscillazioni.

Vediamo nel dettaglio quali sono i requisiti di installazione dettati dalla normativa e le difficoltà legate alla loro applicazione.

2.7.1 ANEMOMETRI INSTALLATI IN CIMA TORRE [G.2]

Installare un anemometro in cima alla torre è sicuramente la soluzione che genera meno interferenze di tutte. Lo strumento deve essere sostenuto in modo che le sue coppette si trovino ad almeno 1,5 m al di sopra della torre e di qualsiasi altra fonte di disturbo del flusso ed in modo tale che nessuna parte della struttura di supporto o della torre stessa si estendano all'esterno di un mezzo cono fittizio avente i lati in rapporto 11: 1 e vertice coincidente con le coppette dell'anemometro. Il diametro della base del cono viene posto uguale alla larghezza della torre. Quest'ultima richiesta deve essere soddisfatta per una distanza pari ad almeno 4 m dalle coppette.

Il supporto dello strumento deve essere costituito da un tubo verticale di diametro non superiore al corpo dell'anemometro stesso. La lunghezza combinata del tubo e dell'anemometro (misurata sulle coppette) deve essere di almeno 0,75 m. L'anemometro deve poi essere tenuto fermo, il che richiede il montaggio del braccetto di supporto all'interno di un altro tubo di diametro maggiore rispetto a quello del supporto ma comunque inferiore al corpo dell'anemometro. Il massimo scostamento dell'anemometro dalla verticale deve essere inferiore ai 2°.

2.7.2 ANEMOMETRI INSTALLATI IN CIMA TORRE IN CONFIGURAZIONE SIDE-BY-SIDE [G.3]

Oltre alle prescrizioni contenute nel paragrafo [G.2], vale quanto segue. Le coppette dell'anemometro devono essere montate al di sopra del braccetto di sostegno ad una distanza da esso pari ad almeno 20 volte il diametro del braccetto, anche se si consigliano 25 volte il diametro del braccio.

Il braccetto, costituito sia dalla porzione orizzontale che dai supporti verticali, deve avere una sezione circolare. Per quanto riguarda la distanza reciproca tra gli anemometri viene prescritto uno spazio di separazione compreso tra 2,5 e 4 m.

Nessun altro strumento deve essere posizionato più vicino di 1,5 m dalle coppette dell'anemometro, né al di fuori del mezzo cono 11: 1 per una distanza di almeno 4 m sotto le coppette.

L'influenza di un anemometro sull'altro deve essere valutata ed il settore di misura deve essere conseguentemente limitato in modo tale che l'incertezza complessiva della misura della velocità del vento rimanga entro i limiti desiderati.

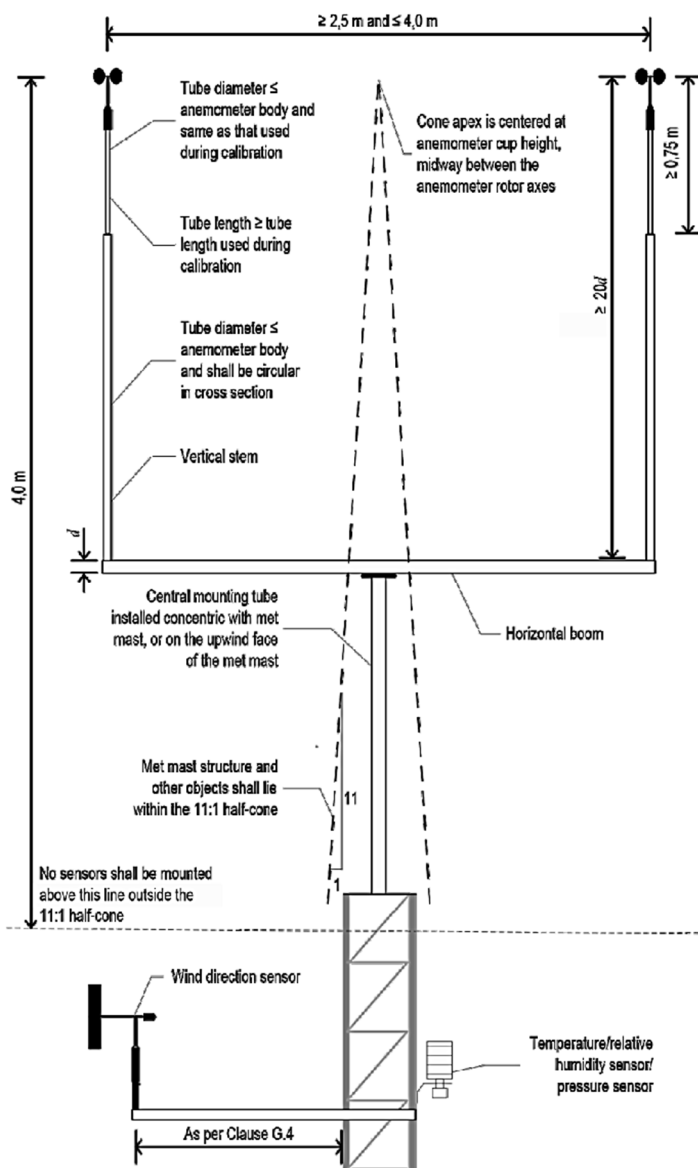


Fig. 25: Modalità di installazione dei sensori in configurazione side-by-side mounted

Osservazione

Lo scopo dell'ente normatore è quello di consigliare le modalità di installazione ritenute più idonee al fine di limitare effetti di distorsione del flusso sui sensori e dunque letture erranee. Il problema è che appare evidente come poca attenzione sia stata posta all'applicazione pratica sul campo.

Alla fine del paragrafo [G.1] viene richiesto che le strutture di sostegno degli strumenti siano stabili e tali da evitare di indurre vibrazioni. Nei paragrafi successivi vengono però richiesti bracci di sostegno liberi da ogni ostacolo che si sviluppino per oltre 2m di altezza dalla cima della torre. Queste due richieste risultano tra loro contrastanti poiché aste di questo tipo, installate in cima ad una torre meteorologica, non possono che essere flessibili ed indurre oscillazioni non trascurabili con ritorsioni sulla precisione dello strumento stesso.

Viene poi richiesto di installare l'anemometro, o gli anemometri, in cima alla torre facendo in modo che per almeno 4m al di sotto di essi non vi siano oggetti che si estendono oltre un mezzo cono fittizio i cui lati stanno tra di loro in un rapporto 11:1. Il tutto deve essere sorretto da un tubo il cui diametro non può essere superiore al diametro dell'anemometro stesso, e quindi dell'ordine di qualche centimetro. Si ricorda, per quanto possa sembrare banale, che i siti eolici sono per definizione ventosi. La norma ritiene che sia possibile installare in condizioni di vento un oggetto avente queste dimensioni, a quote facilmente superiori agli 80m e di sostenere il tutto con un tubo il cui diametro è di solo qualche centimetro. Risulta superfluo commentare ponendo l'attenzione su come tutte queste richieste appaiano in contraddizione con la richiesta di solidità e stabilità contenute all'inizio dell'Annex

Quello che viene volgarmente definito "effetto frusta" inevitabilmente verrebbe a crearsi e la struttura subirebbe delle oscillazioni difficilmente controllabili influenzando negativamente non solo sulla precisione dello strumento montato in cima, come detto in precedenza, ma anche sulla solidità del tutto.

Si ritiene poi di dover evidenziare alcuni aspetti specifici della configurazione side-by-side. La norma dichiara che anemometri installati in cima torre in questa configurazione offrono una ridondanza nelle misure al prezzo di un marginale incremento delle distorsioni del flusso, a patto che essi siano installati ad una distanza adeguata tra loro e su supporti stabili. Le perplessità sono due: se da un lato è vero che anemometri in questa configurazione offrano ridondanza delle misure a prezzo di un discreto incremento della distorsione del flusso, è vero anche che comunque una distorsione c'è, ed è quindi buona pratica scartare quei settori per cui si

risentono gli effetti di scia di un anemometro sull'altro, ovvero due settori. Ora, in un caso di orografia complessa questo può essere problematico perché già in fase di valutazione del terreno e degli ostacoli risulteranno ragionevolmente scartati parecchi settori e la site calibration può comportare l'esclusione di altri settori ancora (come abbiamo potuto constatare nel sito eolico di Serrapetrona in cui, a valle di tutte le analisi, i settori utili al fine della power curve measurement sono risultati essere solo 3). Il rischio è quindi che rimangano pochi settori validi per poter espletare la procedura della power curve measurement. Qualora non fosse possibile procedere con una configurazione top-mounted, si consiglia di cercare di installare gli anemometri orientandoli secondo settori già scartati. Non è detto, ovviamente, che questo sia possibile.

La seconda perplessità riguarda la distanza reciproca a cui gli anemometri devono essere installati per minimizzare i reciproci effetti di scia. Nel primo paragrafo si parla solamente di distanza "adequata", ma quella effettiva che viene poi proposta nel paragrafo [G.3] risulta esageratamente elevata e di difficile applicazione perché comporta una struttura finale flessibile e soggetta ad oscillazioni, andando ulteriormente ad aggravare la situazione precedentemente descritta.

Dunque riassumendo, la norma richiede che vi siano stabilità e rigidità nella struttura, ma le richieste specifiche relative alle distanze di installazione dei sensori, siano essi top-mounted o side-by-side mounted, non sembrano andare incontro a questo requisito.

Si riporta un breve esempio di come sarebbe una configurazione top-mounted che rispetta i requisiti dell'Annex G.

Si supponga di avere una turbina avente altezza dell'hub H pari a 100m, diametro del rotore D pari a 120m e che il lato della torre anemometrica tralicciata sia pari a 50cm. L'anemometro dovrà essere posizionato ad una quota pari ad $H \pm 1\%$. Il mezzo cono fittizio avrà dimensioni pari a 25cm come base (la base del cono è pari al lato della torre) ed altezza conseguente pari a 2.75m. Dunque l'altezza del braccio di supporto dell'anemometro, che si ricorda dover avere diametro al massimo pari a quello dell'anemometro stesso, dovrà avere un'altezza di 2.75m per fare in modo che nessuna parte della torre sporga al di fuori del mezzo cono. Tutti gli altri strumenti, banderuola, anemometro di riferimento ed altro, devono distare dall'anemometro principale almeno 4m, quindi andranno installati al di sotto della linea dei 96m.

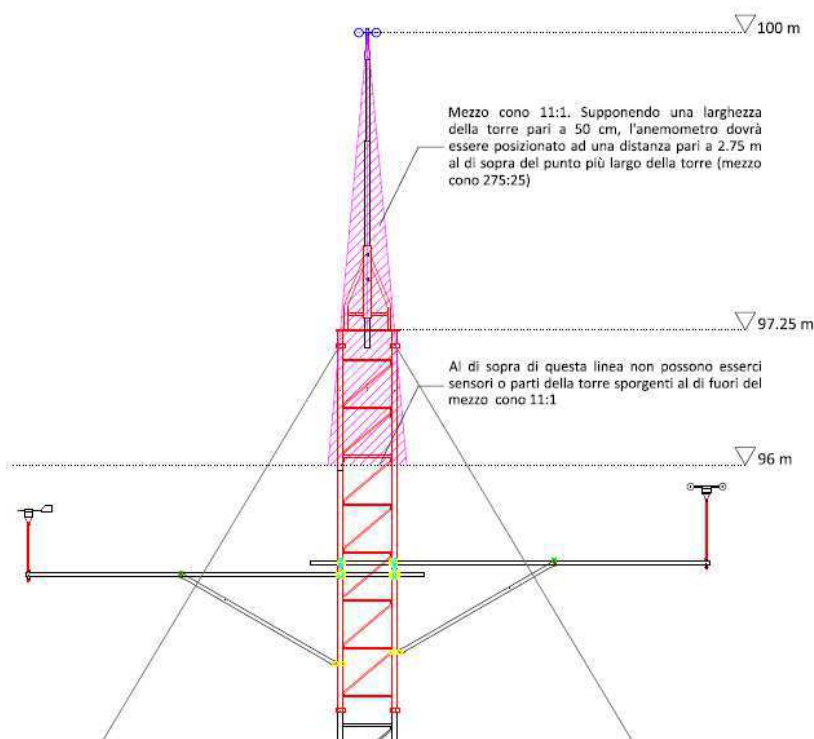


Fig. 26: Esempio delle dimensioni necessarie a soddisfare i requisiti dell'Annex G in relazione all'installazione di anemometro montato in configurazione top-mounted

Al di là di questi problemi, ce n'è uno ritenuto veramente importante, un aspetto che la norma si limita a discutere in pochissime righe e che invece è di vitale importanza soprattutto in orografie complesse: la presenza di un impianto parafulmine.

La norma si limita a dire che se dovesse essere installato un sistema di protezione dai fulmini, il captatore dovrebbe essere montato in cima alla torre ad una distanza dall'anemometro principale pari a 30 volte il diametro del captatore stesso ed in modo tale che l'anemometro non sia nella scia generata quando il vento è nel settore di misura. Il captatore deve avere un diametro minimo di 1cm, quindi la richiesta di distanza pari a 30 diametri implica che si troverà molto vicino all'anemometro generando interferenza. Quest'ultimo aspetto, però, tutto sommato sarebbe facilmente superato

sacrificando il settore in cui si risente del disturbo, ma il vero problema è che la norma non tiene conto di cosa significhi a livello pratico installare un'asta che sarà lunga almeno un metro a protezione, e quindi al di sopra, di tutto un sistema che ha le caratteristiche di installazione descritte poc'anzi. Poiché viene specificato che nessun oggetto può sporgere al di fuori del semi-cono 11:1 per almeno 4m al di sotto della linea delle coppette, l'unico punto in cui il parafulmine potrebbe essere installato è immediatamente al di sotto dell'anemometro principale. Nelle immagini a seguire si può vedere un esempio di come potrebbe essere installato il parafulmine. Supponendo un'asta di captazione dell'altezza di 1m al di sopra del piano dell'anemometro principale, l'angolo di protezione che verrebbe a formarsi per questo piano sarebbe di 71° , mentre l'angolo di protezione che si verrebbe a creare a protezione del secondo piano di strumentazione (posto alla quota di 96m) risulterebbe pari a 59° . Dunque un solo parafulmine sarebbe sufficiente a proteggere gli strumenti più importanti, ma rimane comunque la difficoltà di dover installare un'asta alta almeno 1m a 30cm di sbalzo da un'alta asta alta oltre 2m, avente un diametro inferiore a quello del corpo dell'anemometro ed avente all'estremo libero l'anemometro stesso.

Se nel caso di un solo anemometro montato in cima alla torre è pressoché impossibile a causa delle sollecitazioni che indurrebbe al supporto dell'anemometro, nel caso in cui gli anemometri siano due side-by-side lo è a tutti gli effetti.

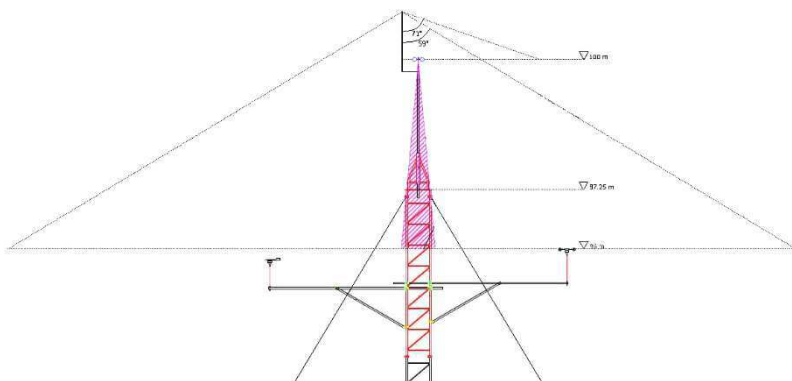


Fig. 27: Esempio di una possibile installazione di impianto parafulmine

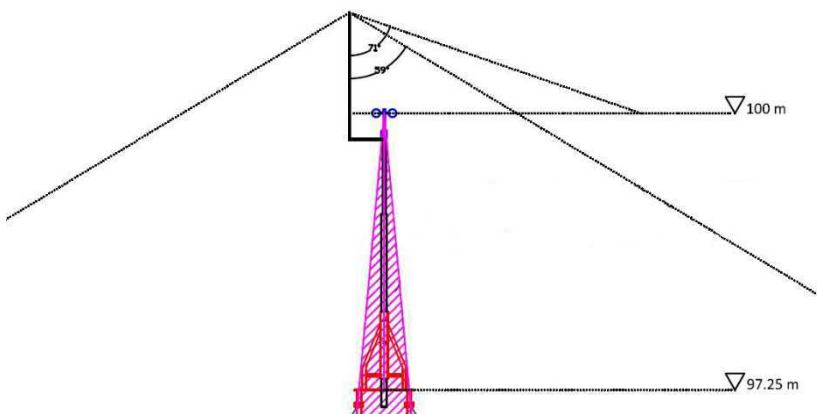


Fig. 28: Dettaglio di una possibile installazione di impianto parafulmine

2.8 INCERTEZZE DI MISURA (ANNEX E)

Un notevole cambiamento è stato apportato dalla nuova edizione della IEC alla tematica delle incertezze di misura. Il fatto che siano state introdotte una nuova definizione della velocità del vento, la possibilità di utilizzare nuovi strumenti di misura, lo specifico trattamento di alcune caratteristiche ambientali non contemplate nella edizione precedente, ha reso necessaria un'ampia revisione e l'inserimento di nuove componenti di incertezza. In particolare si è passati da circa venti contributi richiesti dalla 61400-12-1:2005 ad oltre 60 richiesti dalla 61400-12-1:2017. Per non dilungare eccessivamente la trattazione, non verranno presentate le singole componenti, ma verrà data una breve definizione solamente di quelle che concorrono alla determinazione dell'incertezza della velocità del vento.

Viene comunque di seguito riportato un estratto della norma, la tabella E.2, che contiene l'elenco di tutte le incertezze il cui calcolo è richiesto, in modo che il lettore potrà comunque avere un quadro complessivo della questione.

Category B: Instruments	Note	Uncertainty	Sensitivity	Magnitude
Power output		$u_{P,i}$	$c_{P,i} = 1$	
Current transformers	a	$u_{P,CT,i}$		0,75 %
Voltage transformers	a	$u_{P,VT,i}$		0,5 %
Power transducer or power measurement device	a	$u_{P,PT,i}$		0,5 %
DAQ (see E.4.2)	d	$u_{dP,i}$		0,1 % to 0,2 %
Wind speed		$u_{V,i}$		
Wind speed measurement		$u_{VHW,i}$		
Wind speed (cup or sonic)		$u_{VS,i}$		
Calibration	b	$u_{VS,precal,i}$	For the AEP uncertainty (and for the last bin of the power curve uncertainty) use:	From calibration
Post calibration / In-situ	b	$u_{VS,postcal,i}$		0,2 m/s
Classification	c	$u_{VS,class,i}$		1,0 %
Mounting effects			$c_{V,i} = \frac{P_i - P_{i-1}}{V_i - V_{i-1}}$	
Single top-mounted	d	$u_{VS,mnt,i}$		0,5 %
Side-by-side mounted	d	(same)	For the power curve uncertainty, use:	1,0 %
Side-mounted	d	(same)	$c_{V,i} = \frac{1}{2} \left(\frac{(P_{i+1} - P_i)}{(V_{i+1} - V_i)} + \frac{(P_i - P_{i-1})}{(V_i - V_{i-1})} \right)$	1,5 %
Lightning finial	d	$u_{VS,igt,i}$		0,1 % to 0,2 %
DAQ (see E.4.2)	d	$u_{dVS,i}$		0,1 % to 0,2 %

Wind speed (RSD)		$u_{VR,i}$	$c_{V,i}$ (see above)	
Calibration	bc	$u_{VR,ver,i}$		2 % to 3 %
In-situ check	c	$u_{VR,isc,i}$		See E.7.3
Classification	c	$u_{VR,class,i}$		1,0 % to 1,5 %
Mounting	c	$u_{VR,mnt,i}$		0,1 %
Flow variation in different probe volumes at same height	d	$u_{VR,flow,i}$		2 % to 3 % see E.7.6
Monitoring test	c	$u_{VR,mon,i}$		0,5 %
Rotor equivalent wind speed		$u_{REWS,i}$	$c_{V,i}$ (see above)	
Wind shear	c	$u_{REWS,shear,i}$		See E.8.2
Wind veer	c	$u_{REWS,veer,i}$		See E.8.3
Wind speed – Terrain effects		$u_{VT,i}$	$c_{V,i}$ (see above)	
Without site calibration				
Flow distortion due to terrain	d	$u_{VT,i}$	$c_{V,i}$ (see above)	2 % or 3 % (offshore 1 % or 2 %)
With site calibration				
Anemometer calibration	b	$u_{VT,precal,i}$		From calibration
Post calibration / In-situ	b	$u_{VT,postcal,i}$		0,2 m/s
Anemometer classification	c	$u_{VT,class}$		1,0 %
Mounting effects				
Single top-mounted	d	$u_{VT,mnt,i}$		0,5 %
Side-by-side mounted	d	(same)		1,0 %
Side-mounted	d	(same)		1,5 %
Lightning finial	d	$u_{VT,igt,i}$		0,1 % to 0,2 %

Category B: Instruments	Note	Uncertainty	Sensitivity	Magnitude
DAQ (see E.4.2)	d	$u_{dVT,i}$		0,1 % to 0,2 %
Change of correction (adjacent wind direction bins)	c	$u_{VT,cor,i}$		See E.9.8
Removal of wind direction sensor between site calibration and power curve measurement	c	$u_{VT,rmv,i}$		See E.9.9
Seasonal variation	c	$u_{VT,sv,i}$		See E.9.10
Air density		$u_{AD,i}$		
<u>Temperature</u>		$u_{T,i}$	$c_{T,i}$ (see E.10.2)	
Temperature sensor	ab	$u_{T,cal,i}$		0,4 K to 0,6 K
Radiation shielding	cd	$u_{T,shield,i}$		1,5 K to 2,5 K
Mounting effects	cd	$u_{T,mnt,i}$		0,25 K to 0,4 K
DAQ (see E.4.2)	c	$u_{dT,i}$		0,1 % to 0,2 %
<u>Air pressure</u>		$u_{B,i}$	$c_{B,i}$ (see E.10.7)	
Pressure sensor	ab	$u_{B,cal,i}$		2 hPa to 4 hPa
Mounting effects	a	$u_{B,mnt,i}$		10 % of correction
DAQ (see E.4.2)	c	$u_{dB,i}$		0,1 % to 0,2 %
<u>Relative Humidity</u>		$u_{RH,i}$	$c_{RH,i}$ (see E.10.11)	
Humidity sensor	ab	$u_{RH,cal,i}$		1 % to 2 % (RH)
Mounting effects	cd	$u_{RH,mnt,i}$		0,1 % to 0,2 %
DAQ (see E.4.2)	c	$u_{dRH,i}$		0,1 % to 0,2 %
<u>Method</u>	cd	$u_{AD,method,i}$	$c_{AD,method,i} = c_{V,i}$ (for actively regulated turbines) $c_{AD,method,i} = c_{V,i} = 1$ (for stall regulated turbines)	0,2 % to 0,3 % on wind speed
Air density normalisation				
Method		$u_{M,i}$	$c_{V,i}$ (see above)	
Wind conditions	d	$u_{M,wc,i}$		See E.11.2.1 bullet a) or b).
Wind conditions – wind shear	d	$u_{M,shear,i}$		See E.11.2.2
Wind conditions – wind veer	d	$u_{M,veer,i}$		See E.11.2.3
Wind conditions – upflow	d	$u_{M,upflow,i}$		See E.11.2.4
Wind conditions – turbulence	d	$u_{M,t,i}$		0,3 % to 0,5 % (only for RSD with lower met mast) See E.11.2.5
Seasonal effects	d	$u_{M,sfx,i}$		0,7 % See E.11.3
Turbulence normalisation	d	$u_{M,tinorm,i}$		See E.11.4
Cold climate	d	$u_{M,co,i}$		0,5 % to 1 %
Wind direction				
Wind direction vane / sonic		$u_{WV,i}$	None (see E.12.2.1)	
Calibration	b	$u_{WV,cal,i}$		See E.12.2.1
North mark	c	$u_{WV,nm,i}$		See E.12.2.2
Boom orientation	d	$u_{WV,bo,i}$		See E.12.2.3
Operation (influence of mast)	c	$u_{WV,oe,i}$		See E.12.2.4

Category B: Instruments	Note	Uncertainty	Sensitivity	Magnitude
Magnetic declination angle	c	$u_{wv,mda,i}$		See E.12.2.5
DAQ (see E.4.2)	c	$u_{dWV,i}$		See E.12.2.6
Wind direction (RSD)		$u_{WR,i}$	None (see E.12.3)	
Verification	ab	$u_{WR,ver,i}$		See E.12.3.1
Classification	c	$u_{WR,class,i}$		See L.4.4
Monitoring test	c	$u_{WR,mon,i}$		See E.12.3.2
Flow variation in different probe volumes at same height	c	$u_{WR,fv,i}$		See E.12.3.3
Alignment	d	$u_{WR,align,i}$		See E.12.3.4
Magnetic declination angle	c	$u_{WR,mda,i}$		See E.12.3.5
DAQ (see E.4.2)	c	$u_{dWR,i}$		See E.12.3.6
Category A: Statistical				
Electric power	e	$s_{p,I}$	$c_{p,I} = 1$	
Site calibration	e	s_{sc}	$c_{v,I}$ (see above)	
NOTE Identification of uncertainties: a = reference to standard; b = calibration; c = other "objective" method"; d = "guesstimate"; e = statistics.				

Tab. 12: Tabella E.2 IEC 61400-12-2:2017 lista delle componenti di incertezza

Si passa quindi alla definizione dell'incertezza nella misura della velocità del vento u_{vi} . Questa incertezza viene determinata attraverso tre componenti, ognuna delle quali composta a sua volta da ulteriori sotto-componenti.

$$u_{v,i} = \sqrt{u_{VHW,i}^2 + u_{VT,i}^2 + u_{M,i}^2} \quad \text{Eq. 50}$$

- $u_{VHW,i}$ rappresenta le incertezze associate al tipo di strumento utilizzato per la misura
- $u_{VT,i}$ rappresenta le incertezze dovute agli effetti di distorsione del flusso provocati dal terreno
- $u_{M,i}$ rappresenta le incertezze associate al metodo.

1) Incertezze associate agli strumenti $u_{VHW,i}$

L'incertezza legata all'hardware passa attraverso tre contributi:

1.1 incertezze relative all'uso di sensori installati su torre anemometrica $u_{VS,i}$

1.2 incertezze relative all'uso di remote sensing devices $u_{VR,i}$

1.3 incertezze relative al calcolo della REWS $u_{VREWS,i}$

Questi contributi, però, non concorrono tutti contemporaneamente, ma viene specificato al paragrafo E.14 della norma che la componente di incertezza legata al tipo di hardware utilizzato è pari ad una tra la $u_{VS,i}$, $u_{VR,i}$ o $u_{VREWS,i}$.

La $u_{VS,i}$ passa attraverso 6 componenti:

1.1.a $u_{VS,precal,i}$ incertezza della calibrazione dei sensori prima della fase di determinazione della power curve. È analoga alla $u_{V1,i}$ descritta nel paragrafo 1.3.2.

1.1.b $u_{VS,postcal,i}$ incertezza relativa alla calibrazione in sito e/o dopo la site calibration. Questo contributo è esplicitato all'interno dell'Annex K ed è relativo alla comparazione dell'anemometro principale con quello di riferimento. È la componente che va analizzata per stabilire la necessità o meno di ricalibrare lo strumento al termine della site calibration.

1.1.c $u_{VS,class,i}$ incertezza dovuta alle caratteristiche operazionali dello strumento ed è esplicitata all'interno dell'Annex I. E' la componente definita $u_{V2,i}$ nella precedente edizione ed è rimasta invariata anch'essa.

1.1.d $u_{VS,mnt,i}$. Nella prima edizione, al paragrafo E.5.3, la norma dichiarava che questa componente, associata alla distorsione del flusso a causa delle modalità di installazione del sensore (ex $u_{V3,i}$) poteva essere trascurata se il sensore era installato in cima alla torre di misura rispettando i requisiti dell'Annex G. La nuova edizione, invece, richiede di assegnare a questa componente un valore fisso pari allo 0.5% della velocità del vento misurata. Non è chiara la motivazione di una tale scelta, anche in considerazione del fatto che l'anemometro secondo la 61400-12-1:2017 ha già visto modificare i suoi requisiti di installazione aumentando la distanza da possibili fonti di distorsione del flusso, dunque non è chiaro perché venga anche aggiunta una componente di incertezza che prima poteva essere trascurata.

1.1.e $u_{VS,igt,i}$ è la componente aggiunta quando il parafulmine è installato senza rispettare i requisiti espressi nell'Annex G. In questo caso il suo valore sarà pari allo 0.1-0.2% della velocità del vento misurata.

1.1.f $u_{dVS,i}$ è la componente associata al sistema di acquisizione dati è rimasta invariata rispetto alla precedente edizione.

Rimettendo insieme il tutto otteniamo

$$u_{VS,i} = \sqrt{u_{VS,precal,i}^2 + u_{VS,postcal,i}^2 + u_{VS,class,i}^2 + u_{VS,mnt,i}^2 + u_{VS,igt,i}^2 + u_{dVS,i}^2} \quad \text{Eq. 51}$$

La $u_{VR,i}$ è determinata anch'essa attraverso 6 componenti

1.2.a $u_{VR,ver,i}$ è l'incertezza legata alla calibrazione del RSD, discussa in modo approfondito nell'Annex L. Valori di default di questa componente sono compresi tra l'1 ed il 3% della velocità del vento misurata.

1.2.b $u_{VR,isc,i}$. Questa componente viene considerata solamente quando l'utilizzo dei RSD è associato ad una torre di misura più bassa dell'altezza dell'hub della turbina. Il concetto è equivalente a quanto descritto per la verifica in sito dell'anemometro principale rispetto a quello di riferimento,

con la differenza che il RSD rappresenta lo strumento di misura principale e l'anemometro installato su torre funge da strumento di confronto.

1.2.c $u_{VR,class,i}$. Le incertezze operazionali vengono desunte dal report di classificazione dello strumento.

1.2.d $u_{VR,mnt,i}$ è l'incertezza relativa all'installazione dello strumento associata ad un suo livellamento non ottimale. È una componente strettamente legata al tipo di strumento ed ha un valore di default pari allo 0.1% della velocità del vento misurata.

1.2.e $u_{VR,flow,i}$. Incertezza relativa alle variazioni del flusso all'interno del volume di misura. Per una corretta stima di questa componente la norma raccomanda la consultazione del produttore dello strumento per accordarsi circa il miglior metodo di calcolo in relazione al sito di installazione.

1.2.f $u_{VR,mon,i}$ è infine la componente relativa al monitoraggio dello strumento necessario all'individuazione di eventuali malfunzionamenti.

$$u_{VR,i} = \sqrt{u_{VR,ver,i}^2 + u_{VR,isc,i}^2 + u_{VR,class,i}^2 + u_{VR,mnt,i}^2 + u_{VR,flow,i}^2 + u_{VR,mon,i}^2} \quad \text{Eq. 52}$$

La $u_{REWS,i}$ viene infine considerata quando viene utilizzata la definizione di Rotor Equivalent Wind Speed ed è associata a due contributi:

1.3.a $u_{REWS,shear,i}$ è la componente relativa alle misure di velocità del vento multiple su cui la REWS si basa. Il modo in cui è richiesto di quantificare questo contributo cambia a seconda del set-up di misura: si può essere nel caso in cui viene determinata utilizzando le misure provenienti da più anemometri a coppette o sonici, nel qual caso le componenti di incertezza saranno le stesse già elencate in relazione alla $u_{VS,i}$, oppure si può essere nel caso in cui la REWS sia calcolata utilizzando dati provenienti da RSD, per cui le incertezze saranno le medesime presentate in relazione a $u_{VR,i}$, oppure ancora si può essere nella condizione in cui la REWS è ricavata da anemometri a coppette/sonici installati su torre e lo shear è ricavato tramite RSD. In questo caso la $u_{REWS,shear,i}$ sarà dedotta combinando entrambe le situazioni precedenti.

1.3.b $u_{REWS,veer,i}$ è la componente associata agli effetti del wind veer sulla definizione della REWS

$$u_{REWS,i} = \sqrt{u_{REWS,shear,i}^2 + u_{REWS,veer,i}^2} \quad \text{Eq. 53}$$

2) Incertezze associate agli effetti di distorsione del flusso dovuti al terreno

$u_{VT,i}$

Quando non viene eseguita la procedura di site calibration, poiché il sito è tale da rispettare i requisiti dell'Annex B, l'entità di questa componente di

incertezza viene stimata semplicemente in relazione alla distanza L tra la torre di misura e la turbina eolica. Se tale distanza risulta compresa tra 2 e 3 volte il diametro del rotore della turbina, allora si assumerà un valore di $u_{VT,i}$ pari al 2% della velocità del vento misurata; se la distanza è compresa tra 3 e 4 volte il diametro si assumerà un valore pari al 3% della velocità misurata. La situazione cambia quando invece la site calibration viene condotta. Le sotto-componenti che concorrono nella determinazione della $u_{VT,i}$ diventano in quel caso ben 10:

- 2.1) incertezza dovuta alla calibrazione degli anemometri utilizzati durante la site calibration
- 2.2) incertezze operazionali degli anemometri
- 2.3) incertezze legate alle modalità di installazione
- 2.4) incertezze dovute al sistema di acquisizione dati
- 2.5) incertezze associate all'impianto parafulmini
- 2.6) incertezza relativa al check di convergenza
- 2.7) incertezze relative al check di correlazione
- 2.8) incertezza dovuta alla variazione dei fattori di correzione del flusso tra bin adiacenti
- 2.9) incertezze dovute alla rimozione dello strumento di misura della direzione del vento tra la site calibration e la power curve measurement
- 2.10) incertezza dovuta alla stagionalità.

Ora, gran parte di queste componenti è già stata definita in relazione alla incertezza $u_{VS,i}$, pertanto non verranno ripetute.

Le incertezze 2.6, 2.7 e 2.8 sono state invece descritte al termine paragrafo 2.6 del presente lavoro di tesi.

Le sole nuove componenti rispetto quelle già trattate sono la 2.9 $u_{VT,rmvi}$, che viene considerata quando il sensore di direzione viene rimosso e reinstallato tra la site calibration e la power curve measurement, e la 2.10 $u_{VT,svi}$, incertezza associata al fatto che la site calibration e la power curve measurement potrebbero essere condotte in stagioni differenti.

Complessivamente si avrà quanto segue:

$$u_{VT,i,j} = \sqrt{u_{VT,precal,i,j}^2 + u_{VT,postcal,i,j}^2 + u_{VT,class,i,j}^2 + u_{VT,mnt,i,j}^2 + u_{VT,dgt,i,j}^2 + u_{VT,coc,i,j}^2 + u_{VT,rmv,i,j}^2 + u_{VT,sv,i,j}^2 + u_{dV,i,j}^2 + s_{VT}^2}$$

Eq. 54

Per ottenere l'incertezza in uno specifico bin di velocità considerando la direzione del vento a 360° si dovrà applicare in seguito la seguente equazione

$$u_{VT,i} = \frac{\sum_j u_{VT,i,j} N_{i,j}}{\sum_j N_{i,j}}$$

Eq. 55

dove $N_{i,j}$ è il numero di dati per bin di velocità del vento i e direzione j .

3) Incertezza associata al metodo $u_{M,i}$

Lo specifico metodo utilizzato per misurare ed analizzare la power curve può anch'esso contribuire all'incertezza complessiva del risultato finale.

Lo scopo di questo ultimo contributo è quello di tenere in considerazione gli effetti delle condizioni ambientali quali wind shear, intensità di turbolenza, wind veer ed angolo di upflow, sulle prestazioni in termini di potenza generata di una turbina eolica.

I contributi da considerare sono quindi:

3.1) $u_{M,,shear,i}$ relativa al wind shear ed al fatto che questo sia o meno misurato

3.2) $u_{M,,veer,i}$ relativa al wind veer ed al fatto che questo sia o meno misurato

3.3) $u_{M,,upflow,i}$ relativa all'upflow ed al numero di piani di misura

3.4) $u_{M,,Ti,i}$ relativa all'intensità di turbolenza ed al fatto che sia o meno misurata

3.5) $u_{M,,sfx,i}$ relativa all'influenza degli effetti stagionali sulla power curve

3.6) $u_{M,,tinorm,i}$ relativa alla normalizzazione rispetto alla turbolenza della power curve.

3.7) $u_{M,,cc,i}$ relativa all'esecuzione del test delle prestazioni in climi freddi

$$u_{M,i} = \sqrt{u_{M,,shear,i}^2 + u_{M,,veer,i}^2 + u_{M,,upflow,i}^2 + u_{M,,ti,i}^2 + u_{M,,sfx,i}^2 + u_{M,,tinorm,i}^2 + u_{M,,cc,i}^2}$$

Eq. 56

2.9 NORMALIZZAZIONE DELLA POWER CURVE RISPETTO ALLA TURBOLENZA [ANNEX M]

Come è stato già riportato in precedenza, la power curve di una turbina può essere facilmente influenzata dall'intensità di turbolenza. Per questo motivo la nuova edizione della IEC 61400-12-1 vede aggiungere un Annex appositamente dedicato alla procedura di normalizzazione dei dati in relazione ad essa. Si precisa che tale Annex rientra tra quelli definiti informativi, pertanto non è obbligatorio.

Lo scopo è quello di ridurre l'influenza delle condizioni di turbolenza specifiche del sito andando a derivare dai dati campionati una zero turbulence power curve assumendo l'ipotesi che la velocità media del vento nei 10 minuti segua una distribuzione Gaussiana.

La procedura è piuttosto lunga e viene descritta per semplicità tramite lo schema a seguire, estratto dalla norma e rielaborato. Ad ogni modo le fasi principali sono quattro:

- 1) Si parte dai dati misurati e suddivisi in bin di velocità con cui andiamo a determinare la initial zero turbulence power curve. I parametri per la determinazione della curva sono i seguenti:

- $P = P_i$
- $v = v_i$
- $c_{p,i} = 2 P_i / (\rho v^3 A)$
- $P_{rated} = \max(P_i)$
- $v_{cut-in} = v_i \mid P_i > 0.001 P_{rated}$
- $v_{cut-out} = 100 \text{ ms}^{-1}$
- $v_{rated} = [2 P_{rated} / \rho \max(c_p) A]^{1/3}$

Si assume in questa fase che la potenza generata dalla turbina sia nulla a velocità inferiori al cut-in; che la velocità di cut-in sia pari alla minima velocità del vento per la quale si registra una potenza misurata pari allo 0.1% di quella nominale; che la potenza nominale sia pari alla massima registrata nei bin; che la velocità nominale venga stimata in funzione dell'area del rotore A , della potenza nominale, della densità dell'aria e del massimo coefficiente $c_{p,max}$ pari al maggiore tra i coefficienti misurati; che la velocità di cut-out sia pari a 100 ms^{-1} .

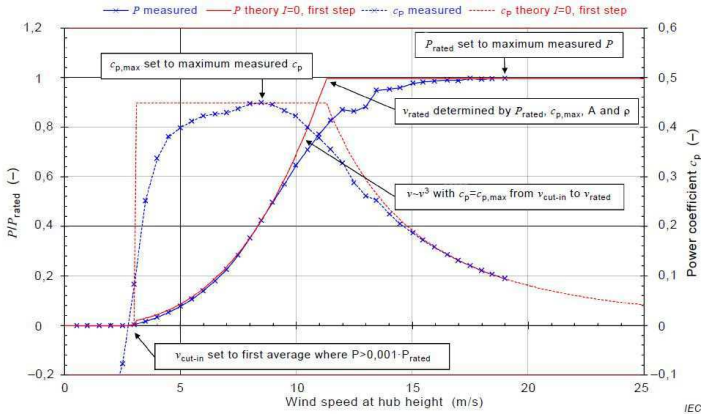


Fig. 29: Initial zero turbulence power curve

- 2) Si determina la theoretical zero turbulence power curve $P_{0,th}$ anche detta initial zero turbulence power curve adjusted. Questa curva, basata sulla prima, è utilizzata per simulare la potenza per ogni bin di velocità del vento della power curve misurata. La potenza

simulata $\hat{P}$ viene ottenuta dall'integrale del prodotto della $P_{0,th}$ moltiplicata per l'intensità di turbolenza in ogni bin. L'intensità di turbolenza e la velocità del vento seguono una distribuzione Gaussiana.

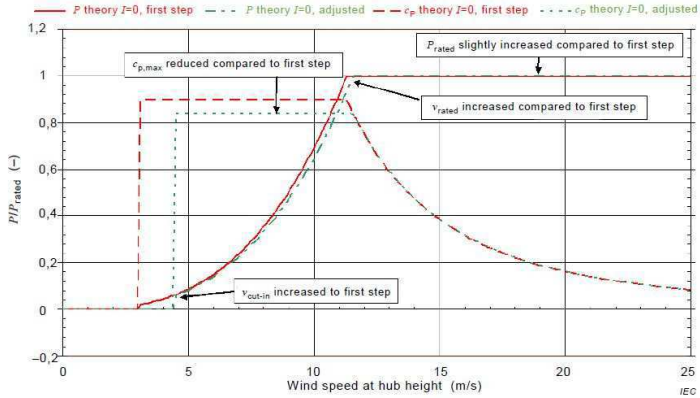


Fig. 30: Theoretical zero turbulence power curve

- 3) Si determina la zero turbulence power curve P_0 andando ad aggiungere alla $P_{0,th}$ la differenza tra la potenza misurata e quella simulata $\hat{P}$.

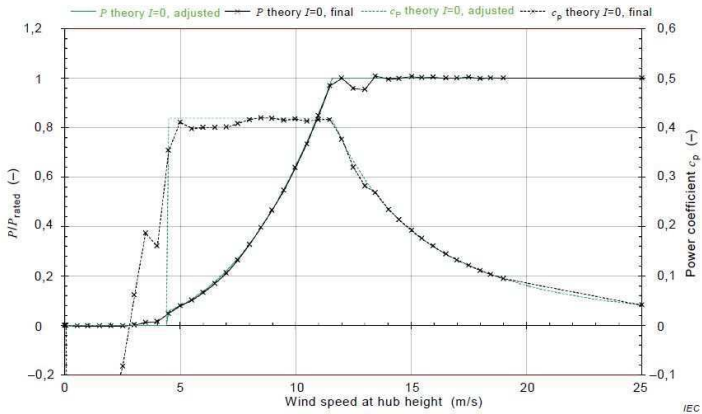
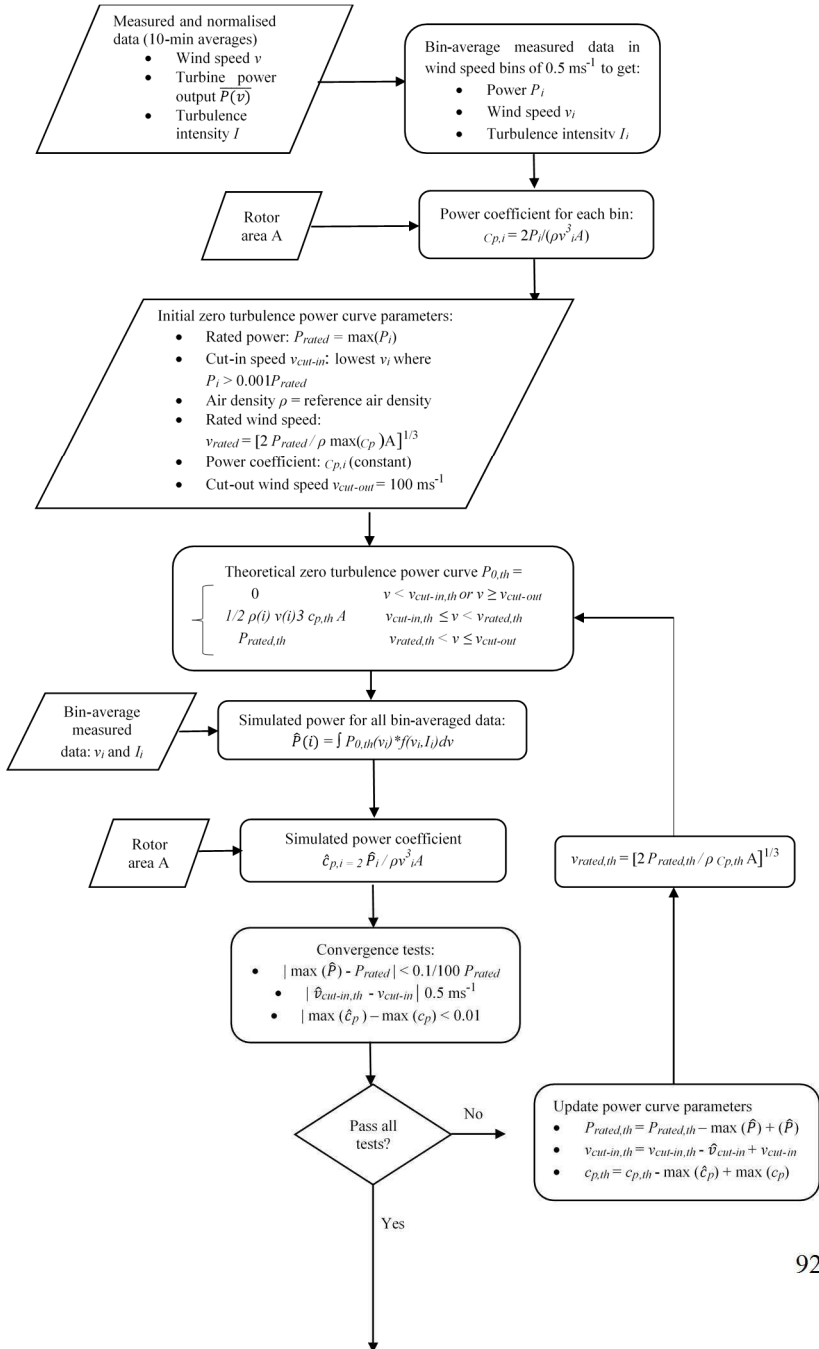
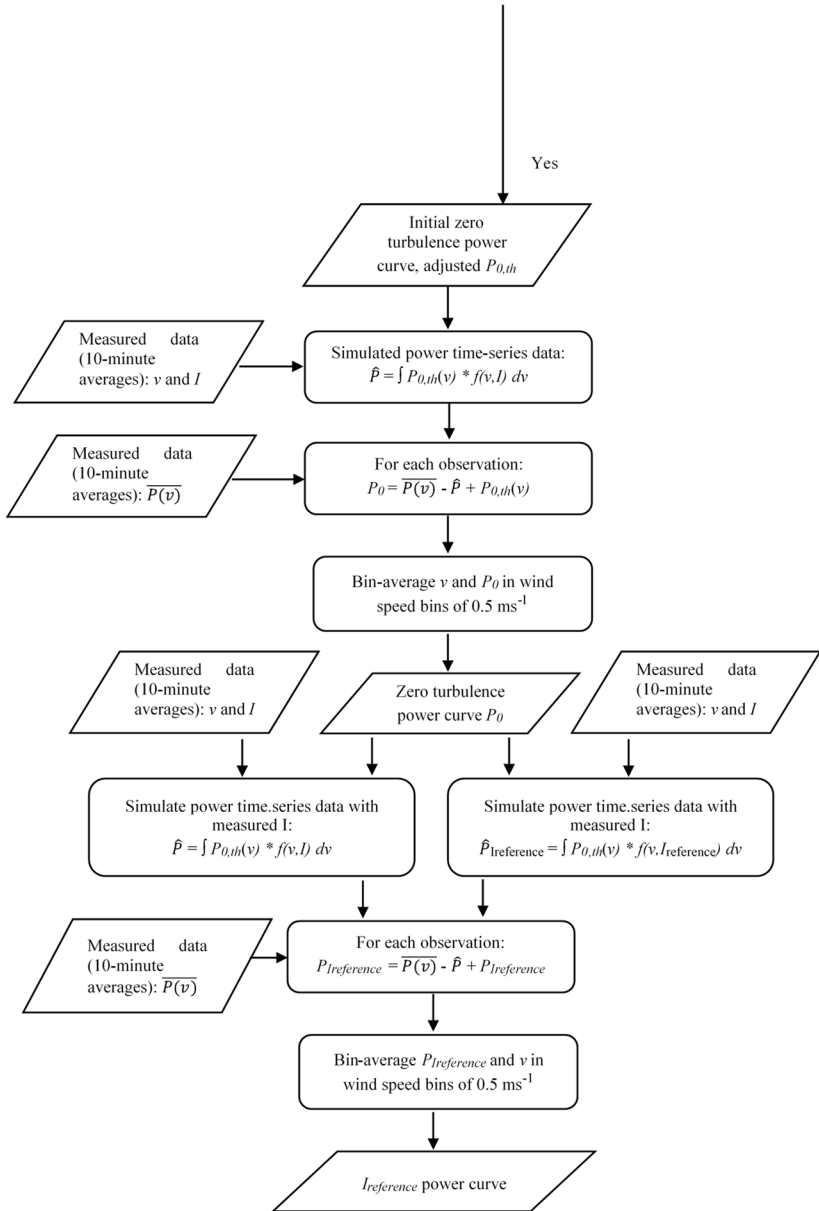


Fig. 31: Final zero turbulence power curve

-
- 4) A questo punto la potenza generata dalla turbina sotto specifiche condizioni di velocità del vento e turbolenza può essere stimata simulando la power curve ad ogni nuovo valore di turbolenza.





Osservazione

La potenza generata da una turbina eolica è un dato estremamente variabile in relazione alle condizioni del sito di installazione. Ecco perché sono notevolmente aumentati gli studi circa le condizioni atmosferiche che possono influenzarla maggiormente. Come lo shear, la turbolenza rientra tra questi, pertanto poterne tener conto in fase di determinazione della power curve, consentirà di ottenere dei risultati più realistici e veritieri.

Secondo L.M. Bardal e L.R Saetran [5] gli effetti della turbolenza sulla power curve sono differenti a seconda della regione della curva che stiamo considerando: nella regione inferiore, dove la potenza aumenta seguendo all'incirca il cubo della velocità, la potenza generata aumenta anche all'aumentare della turbolenza, mentre nella regione a cavallo della potenza nominale si tende ad avere un effetto contrario ovvero una diminuzione all'aumentare della turbolenza. Questo trend è stato evidenziato andando a raggruppare i dati in tre bin di turbolenza in modo da avere un'idea più chiara del comportamento della curva all'aumentare della turbolenza. La diminuzione della potenza nell'intorno della potenza nominale è risultata più marcata nel bin di turbolenza più alta.

L'andamento contrapposto si traduce alla fine di tutto in un output complessivo inferiore. Poiché lo scopo della zero turbulence power curve è quello di ridurre l'influenza delle condizioni specifiche del sito, in questo lavoro hanno visto quali erano i suoi effetti sul caso in esame. La curva di potenza normalizzata ha evidenziato una riduzione nella regione centrale della curva ed un aumento nella zona di transizione con la potenza nominale rispetto alla curva non normalizzata.

Un trend analogo è stato registrato nel lavoro degli stessi autori "Performance test of a 3MW wind turbine – effects of shear and turbulence" [3] ed, ancora, nel lavoro di A. Albers, T. Jakobi, R. Rohden e J. Stoltenjohannes "Influence of Meteorological Variables on Measured Wind Turbine Power Curves" [2]. In questo lavoro sono stati indagati gli effetti del wind shear e della turbolenza sulla curva di potenza ed i risultati sono apparsi molto interessanti. Inizialmente per tutte e tre le turbine indagate si è riscontrata una diminuzione della potenza generata all'aumentare dello shear nel tratto di curva che precede il raggiungimento della potenza nominale ed un andamento opposto nella zona di transizione. Tuttavia gli effetti dello shear sono sembrati dissolti quando sono stati isolati dagli effetti della turbolenza. La spiegazione fornita per questo fenomeno risiede nel fatto che si era notato come lo shear diminuisse all'aumentare della turbolenza e che dunque l'apparente aumento della potenza al diminuire dello shear era in realtà dovuto all'aumento della turbolenza. Dunque se ne può dedurre che

un'analisi della turbolenza è fondamentale per smentire o confermare trend nella potenza generata apparentemente legati ad altri fattori.

CAPITOLO 3

PREVISIONE NUMERICA DEL FLUSSO DI VENTO

INTRODUZIONE

La site calibration è una procedura piuttosto costosa: la somma dei costi necessari per la realizzazione delle torri anemometriche, per l'acquisto degli strumenti per l'acquisizione e l'analisi dei dati, per il personale addetto, facilmente supera il valore di 100.000 €.

Inoltre i tempi necessari per acquisire un database completo sono, in genere, pari ad almeno un anno.

Per questi motivi si è deciso di effettuare uno studio preliminare per verificare se tramite software di calcolo numerici fosse possibile simulare il flusso di vento su uno specifico sito e prevedere quindi il corretto posizionamento degli anemometri all'interno del dominio simulato.

Le simulazioni numeriche sono state realizzate tramite il software WindSim, un codice commerciale ed OpenFOAM, un codice opensource; i risultati del flusso di vento simulato numericamente sono stati poi confrontati con i dati sperimentali acquisiti nel sito.

Le simulazioni sono state condotte per il sito eolico di Serrapetrona. Si è deciso di andare a simulare proprio quest'area perché si avevano a disposizione dati anemometrici acquisiti negli anni passati, prima dell'installazione del parco eolico, con cui poter effettuare una validazione dei risultati ottenuti ed un confronto tra le condizioni del flusso di vento simulato e le condizioni realmente misurate sul sito.

3.1 WINDSIM

WindSim è un software C.F.D. solitamente utilizzato per ottimizzare la produzione energetica dei parchi eolici. Questo è possibile perché il software è in grado di calcolare le caratteristiche del vento di una data area digitalizzata andando a risolvere le equazioni non lineari R.A.N.S. e riuscendo a simulare accuratamente il potenziale del vento in aree caratterizzate da complesse topografia e condizioni climatiche. Grazie alla sua capacità di simulare correttamente la distribuzione del flusso di vento, è spesso utilizzato per

determinare la miglior posizione in cui installare una turbina ed al tempo stesso la sua capacità di determinare parametri come il wind shear, la turbolenza ed altro ancora, aiuta molto i progettisti nella definizione dei carichi a cui la turbina sarà soggetta durante il suo ciclo di vita. Attenzione però: si tratta pur sempre di simulazioni pertanto quando si ha a che fare con un'orografia complessa sarebbe sempre opportuno prevedere di certificare la macchina direttamente nel sito, come ampiamente spiegato nei capitoli precedenti.

È costituito da 6 moduli che devono essere lanciati in sequenza: l'utilizzatore non è abilitato, infatti, a lanciare il modulo successivo senza che quello precedente abbia terminato il suo calcolo. I moduli sono: terrain, wind fields, object, results, wind resources, energy.

Terrain.

In questo modulo vengono inserite tutte le informazioni riguardanti l'orografia e la rugosità del sito di interesse. È possibile impostare la geometria della griglia di calcolo (mesh), attraverso l'impostazione del numero di celle massimo di cui sarà composta, il numero di nodi lungo Z e l'altezza della mesh. È possibile inoltre raffinare la griglia, tramite l'opzione *grid refinement*, in aree di particolare interesse. Per quanto riguarda l'altezza della mesh, questo è un parametro molto importante all'interno del modulo Terrain e rappresenta l'altezza sopra il terreno definita come la distanza tra il punto più alto sul terreno ed il limite superiore del dominio computazionale. Non è banale la sua definizione: da un lato limitare l'altezza del bordo superiore del dominio implicherebbe avere nodi più addensati nella direzione verticale ed avere quindi una maggior precisione dei risultati soprattutto vicino al suolo; d'altro canto se l'altezza è limitata si potrebbero verificare fenomeni di bloccaggio del flusso. Generalmente WindSim suggerisce di utilizzare nella scelta il criterio dell'area aperta, ovvero il rapporto tra l'area aperta della sezione minima (che si può avere, ad esempio, in corrispondenza di un pendio) e l'area aperta della sezione massima, deve essere maggiore di 0,95. È possibile abilitare il programma al soddisfacimento automatico di questo criterio, quindi sarà lui a determinare l'altezza del dominio necessaria. Può succedere che la simulazione non arrivi alla convergenza dei dati. La ragione spesso è da ricercare nella presenza di brusche variazioni nelle pendenze di celle adiacenti. Una soluzione a questo problema può essere l'attivazione della funzione *smoothing*: in termini matematici, le variazioni di pendenza sono rappresentate dalle derivate del secondo ordine delle altezze; impostando il limite di smoothing, tutti i punti con derivata seconda maggiore del limite impostato vengono livellati.

Un'altra tecnica per limitare il rischio di non convergenza dei dati è l'abilitazione dell'opzione *Orthogonalize 3D grid*. Tramite questo comando il programma fa in modo che la griglia sia perpendicolare al terreno.

Wind fields.

In questo modulo vengono calcolate le caratteristiche del vento nell'area di interesse andando a risolvere le equazioni Reynolds Average Navier Stokes (R.A.N.S.), utilizzando il modello numerico a volumi finiti con il solutore CFD "Phoenix". Alla base dei modelli RANS c'è il concetto secondo cui ai fini ingegneristici l'interesse è quasi sempre relativo ai valori medi delle grandezze considerate, dove per media ci si riferisce alla media temporale; le equazioni RANS si ottengono quindi dalla media temporale delle equazioni di conservazione della massa e di conservazione della quantità di moto.

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial \rho u_i}{\partial x_i} = 0 \quad \text{Eq. 57}$$

$$\frac{\partial \rho u_i}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} [\rho u_i u_j + p \delta_{ij} - \tau_{ji}] = 0 \quad \text{Eq. 58}$$

L'equazione di conservazione della massa afferma che la massa si mantiene costante all'interno del volume di controllo. ρ è la densità del fluido ed u_i è la componente i -esima del vettore velocità. L'equazione della quantità di moto afferma invece che la variazione della quantità di moto è uguale alla sommatoria delle forze agenti sul fluido; p è la pressione e τ_{ij} sono gli sforzi viscosi.

Detto questo, una volta impostate nel modulo Wind Fields le condizioni iniziali ed al contorno, il modello di turbolenza, ed il solutore, vengono calcolate le seguenti variabili del campo di flusso del vento: pressione p , componenti della velocità u, v, w , energia cinetica turbolenta KE , tasso di dissipazione turbolenta EP .

Le condizioni al contorno hanno la forma di un profilo verticale di velocità; possono essere specificate tramite profili analitici o *nesting*. I profili del vento analitici sono profili logaritmici su terreni pianeggianti, in cui il profilo verticale della velocità dipende dalla rugosità e dalla stabilità atmosferica. Sappiamo però che questa distribuzione di velocità non è tipica delle orografie complesse, pertanto non sarebbe corretto ipotizzare un'orografia piana immediatamente prima di una complessa come dato di input. La tecnica del nesting, invece, consente di applicare al modello corrente i risultati di un precedente modello 3D; di conseguenza, l'output di una simulazione viene utilizzato come input per una simulazione successiva in modo che il risultato

sia sempre più vicino alle reali condizioni di flusso nel sito. Per attivare questo comando è sufficiente dichiarare quale prova precedente si intende utilizzare per il nesting.

Altro parametro molto importante è il *boundary condition at top*. Nel caso di simulazione di orografia complessa si deve selezionare l'opzione *fixed pressure*.

Per quanto riguarda i modelli di turbolenza disponibili su WindSim, si hanno: Standard k-ε, Realizable k-ε, RNG (ReNormalization Group) k-ε, ed il k-ω di Wilcox. Fanno tutti parte dei modelli a viscosità lineare (Linear eddy viscosity models) a due equazioni, ovvero sono modelli di turbolenza nei quali gli sforzi di Reynolds, ottenuti dalla risoluzione delle RANS, sono modellati da una relazione costitutiva lineare con il campo di deformazione del flusso medio:

$$-\overline{\rho u_i u_j} = 2\mu_t S_{ij} - \frac{2}{3} \rho k \delta_{ij} \quad \text{Eq. 59}$$

$$S_{ij} = \frac{1}{2} \left[\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right] - \frac{1}{3} \frac{\partial u_k}{\partial x_k} \delta_{ij} \quad \text{Eq. 60}$$

μ_t è il coefficiente di viscosità turbolenta, k è l'energia cinetica turbolenta media, S_{ij} è la velocità di deformazione media. Questa relazione lineare è conosciuta anche come "Ipotesi di Boussinesq"; l'inclusione del termine $2/3 \rho k \delta_{ij}$ nella relazione costitutiva lineare è richiesta dall'algebra tensoriale quando si risolvono modelli di turbolenza a 2 equazioni (o per qualsiasi modello di turbolenza che risolva un'equazione di trasporto per k).

Nel k -ε le due variabili di trasporto sono rappresentate dalla k stessa, ovvero l'energia cinetica turbolenta, mentre la seconda è la ε, ovvero la dissipazione turbolenta: la prima determina l'energia della turbolenza, la seconda la scala della turbolenza.

Nel k -ω, come nel k -ε, sono incluse due equazioni di trasporto in più per tenere conto degli effetti storici (convezione e diffusione di energia turbolenta); la prima variabile trasportata è sempre k [m²/s²], la seconda è ω [Hz], che rappresenta la dissipazione specifica di energia turbolenta, e determina la scala della turbolenza.

Il modello k -ω è superiore in vari aspetti al k -ε: raggiunge una maggiore accuratezza per gli strati limite con elevato gradiente di pressione avverso e può essere facilmente integrato nel sottostrato viscoso senza ulteriori funzioni di smorzamento; nella versione di Wilcox risulta, inoltre, molto più accurato per flussi di taglio libero e flussi separati. In virtù di ciò, per le nostre

simulazioni con WindSim abbiamo utilizzato esclusivamente il modello $k-\omega$ di Wilcox.

Per quanto riguarda, infine, i solutori, quelli disponibili sono: Segregated, Coupled, Parallel e GCV. Per il calcolo delle nostre simulazioni abbiamo utilizzato esclusivamente il solutore GCV (General Collocated Velocity). Tramite questo solutore è possibile utilizzare una formulazione della griglia a multi-blocchi strutturati e può gestire griglie altamente non ortogonali, essendo in grado di assicurare la convergenza con angoli inclusi di 10° . In questo modo riesce a risolvere molti problemi riguardanti la convergenza della soluzione.

Objects.

Il modulo Objects è utilizzato per definire tutti gli elementi necessari allo studio del parco eolico: turbine, anemometri ed anemometri trasferiti.

Con l'oggetto "turbina" è possibile definire la posizione della macchina e le sue caratteristiche come la curva di potenza; al posto di ciascuna turbina è possibile estrarre il profilo verticale della velocità del vento ottenuto dai risultati CFD.

Utilizzando l'oggetto "anemometro" possono essere inseriti i dati sperimentali del vento, la velocità e la direzione, relativi ad una reale stazione anemometrica all'interno del sito; inserendo un anemometro nel progetto, i risultati CFD possono essere ponderati con i dati sperimentali.

L'oggetto "anemometro trasferito" consiste in un anemometro virtuale in cui vengono calcolati i dati del campo di vento a partire da dati sperimentali disponibili in un anemometro già presente nel sito. In altre parole, se abbiamo un anemometro nella posizione A, contenente velocità e direzione del vento noti, è possibile prevedere un nuovo anemometro in una nuova posizione B all'interno della mappa; ovvero significa che è possibile "trasferire" i dati sperimentali dalla posizione originale (A) a un'altra (B).

Results.

Il modulo Results consente all'utente di estrarre le informazioni relative alle variabili fluidodinamiche calcolate nel modulo Wind Fields; in particolare, è possibile estrarre dei piani orizzontali XY di tutte le variabili contenute all'interno del database. È possibile specificare, oltre alle altezze a cui estrarre questi piani e per quali settori, anche se normalizzare la variabile estratta rispetto al valore inserito con i dati anemometrici sperimentali, o rispetto ad un valore scalare da noi scelto.

Wind Resources.

Attraverso questo modulo è possibile calcolare le mappe orizzontali della velocità del vento in tutto il sito, ponderando i risultati CFD con i dati anemometrici sperimentali. La procedura per arrivare alle mappe della risorsa vento è fondamentalmente la stessa utilizzata per il calcolo dei dati anemometrici trasferiti, ed anche qui è possibile specificare le altezze a cui estrarre i piani orizzontali a cui estrarre le mappe.

Energy.

Questo modulo consente di stimare l'AEP (Annual Energy Production) per ogni turbina posizionata nel modulo Objects; se sono stati forniti più dati anemometrici, l'AEP basato su ogni anemometro viene calcolato separatamente.

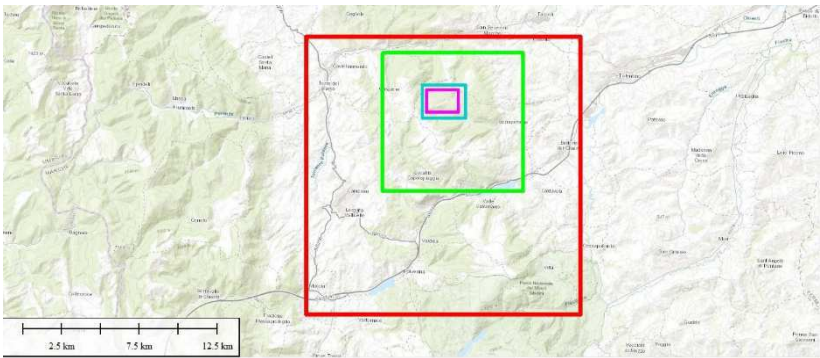
3.1.1 MODELLO DIGITALE DEL TERRENO

Il modello digitale del terreno fornito a WindSim nella forma di un file di estensione .gws, è stato estratto dal software Global Mapper. Al fine di ottenere una soluzione che rappresentasse il più fedelmente possibile l'influenza dell'orografia che circonda il parco eolico di Serrapetrona, sono state effettuate più prove con domini via via meno estesi ed annidati sulla zona di posizionamento delle turbine. Solo nel modello iniziale (il più ampio) sono stati utilizzati i profili di vento pre-registrati di WindSim come condizioni di ingresso per la simulazione; in seguito, con i modelli di dimensioni minori, sono state utilizzate le interpolazioni dei profili di vento derivanti dalle soluzioni dei calcoli precedenti come condizioni in ingresso, attraverso l'utilizzo dell'opzione nesting del modulo Wind Fields.

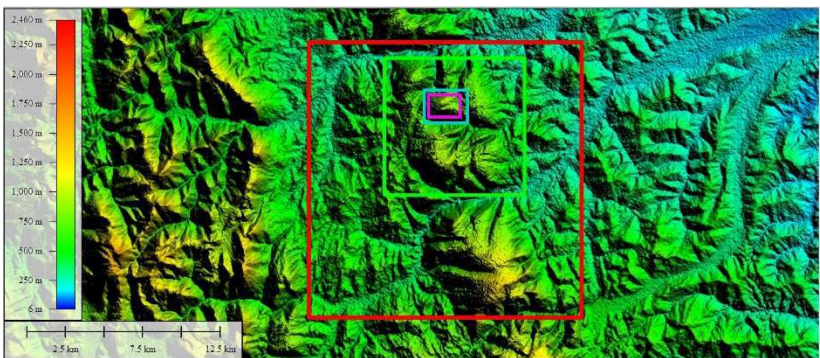
L'elevazione del terreno è stata ottenuta scaricando, sempre tramite Global Mapper, i dati disponibili gratuitamente dalla mappa ASTER GDEM v2 Worldwide Elevation Data (mappatura del terreno con risoluzione di circa 30 metri), mentre scaricando la mappa relativa alla copertura del terreno (sezione Land Cover) Corine Land Cover Europe 2006 (con risoluzione 100 m), è stato possibile ottenere i dati relativi alla rugosità estiva ed invernale del sito di interesse; ciò è possibile grazie all'apposita funzionalità di Global Mapper che consente di creare una griglia di punti con assegnata rugosità z_0 a partire da una mappa contenente i dati relativi alla copertura del terreno.

Nelle seguenti immagini sono visibili il modello digitale del terreno esportato dal programma Global Mapper, le viste satellitari dei domini annidati e le

caratteristiche specifiche dei domini. Per non dilungare eccessivamente la trattazione queste ultime informazioni vengono riportate solamente per il primo e l'ultimo dominio.



(a)



(b)

Fig. 32: Modelli digitali del terreno esportati da Global Mapper senza (a) e con (b) sovrapposizione del layer ASTER GDEM



Fig. 33: Vista satellitare del primo dominio (rosso)

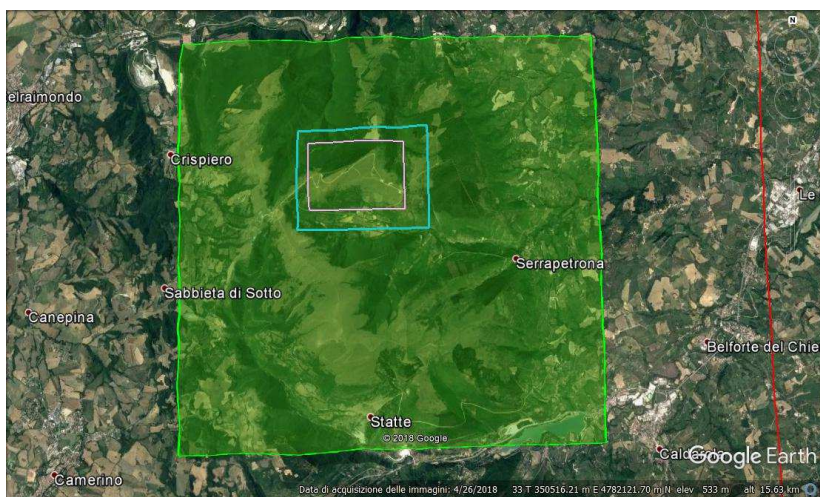


Fig. 34: Vista satellitare del secondo dominio (verde)



Fig. 35: Vista satellitare del terzo dominio (azzurro)

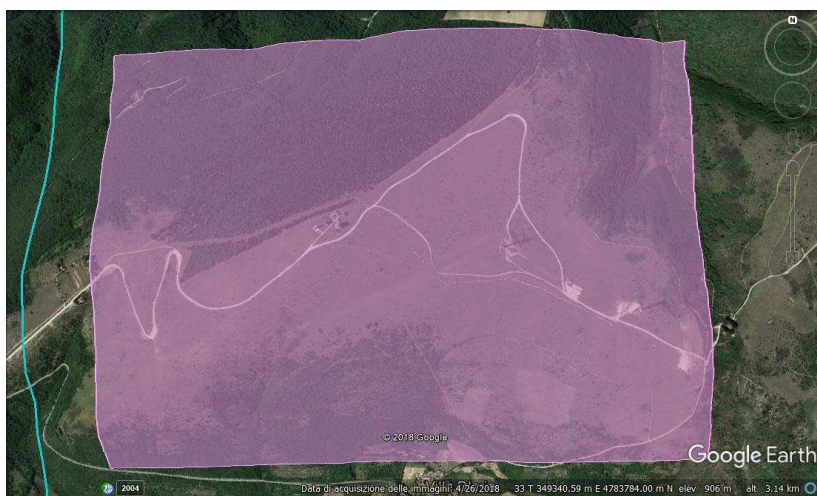


Fig. 36: Vista satellitare del quarto ed ultimo dominio (rosa)

PRIMO DOMINIO				
Coordinate	Nord	Sud	Est	Ovest
UTM [m]	4787890.23	4770130.23	358169.08	340569.08
Estensione in direz N-S	17.8km	Estensione in direz E-O	17.7km	
Griglia di calcolo	Hmesh [m]	N° di celle		
	6700	2197800		
generata da	Celle lungo z	Passo [m]		
WindSim	45	80 x 80		

Tab. 13: Caratteristiche geometriche del primo dominio

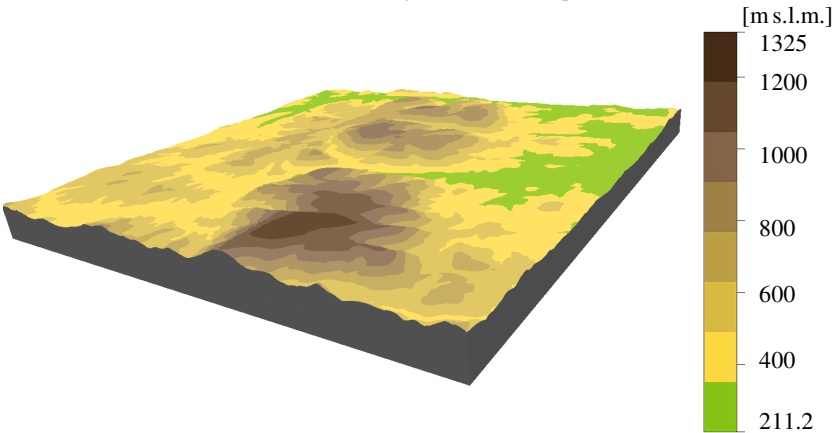


Fig. 37: Modello digitale 3D del primo dominio realizzato da WindSim

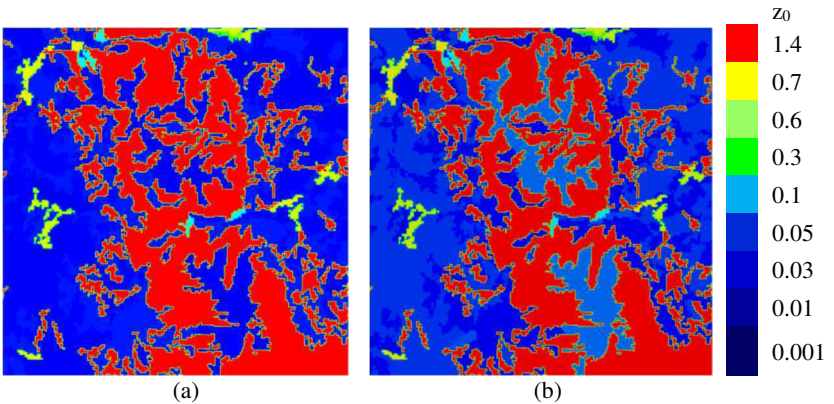


Fig. 38: Mappa di rugosità del primo dominio invernale (a) ed estiva (b)

QUARTO DOMINIO CON REFINEMENT				
Coordinate	Nord	Sud	Est	Ovest
UTM [m]	4784511.0	4783071.0	350308.75	348279.75
Estensione in direz N-S	1.4km	Estensione in direz E-O	2km	
Griglia di calcolo	Hmesh [m]	N° di celle		
	5000	791775		
generata da	Celle lungo z	Passo min [m]	Passo max [m]	
WindSim	45	7 x 7	29.4 x 53.6	

Tab. 14: Caratteristiche geometriche del quarto dominio

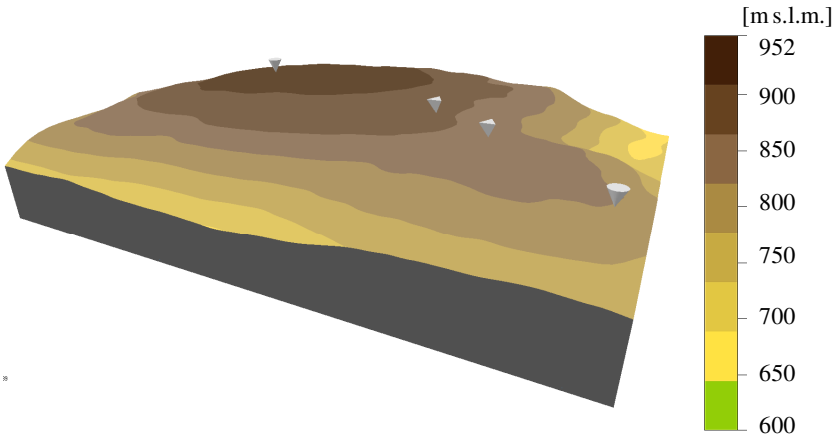


Fig. 39: Modello digitale 3D del quarto dominio realizzato da WindSim

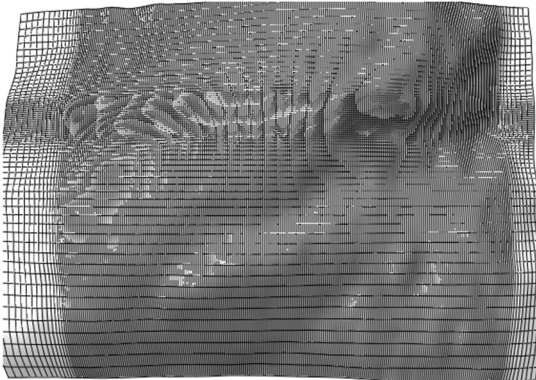


Fig. 40: Griglia di calcolo nel piano XY con infittimento finale

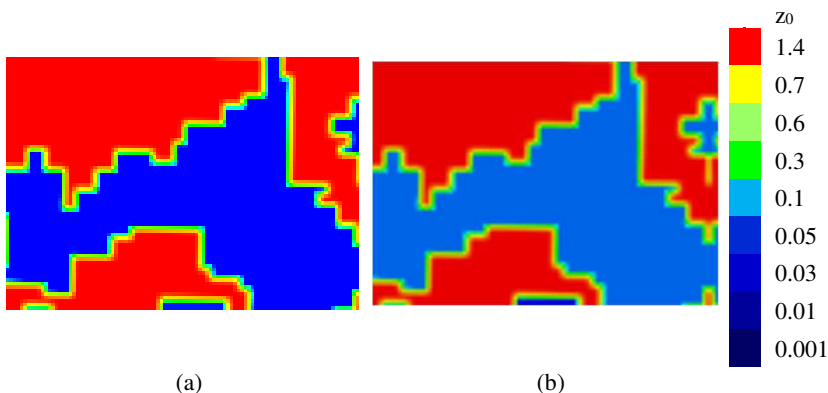


Fig. 41: Mappa di rugosità del quarto dominio invernale (a) ed estiva (b)

3.1.2 SIMULAZIONI NUMERICHE

L'obiettivo principale delle simulazioni è stato quello di porsi, all'interno di un ipotetico progetto di realizzazione di un parco eolico, in una fase preliminare alla site calibration ed effettuare uno studio di pre-fattibilità che evidenziasse quali punti del terreno in esame fossero maggiormente rappresentativi dei parametri di intensità e direzione del vento all'interno del modello digitale del terreno.

Tuttavia, lo studio è stato condotto su un parco eolico già realizzato, pertanto si avevano a disposizione i database collezionati durante le indagini preliminari alla costruzione del parco stesso. Di conseguenza è stato possibile estrapolare i risultati numerici nei punti della mappa corrispondenti a quelli di reale installazione degli anemometri e delle turbine eoliche ed effettuare a posteriori un confronto per validare le simulazioni e confermare o meno la rappresentatività delle reali condizioni di flusso di tali punti scelti nel dominio.

Di seguito le impostazioni comuni a tutte le simulazioni.

Terrain

Orthogonalize 3D grid	True
Number of cells in Z direction	45

Wind fields

Do Nesting	From WindSim project
Sector input type	Uniform distribution of the sector angles
Number of sectors	12
Boundary condition at top	Fixed pressure
Air density	1.16
Turbulence model	k-omega model of Wilcox
Solver	GCV
Number of simultaneous sector	1
Convergence wizard	True
Convergence criteria	0.001
Field value to monitor	Pressure
Height of reduced wind database	300

Tab. 15: Impostazioni comuni a tutte le simulazioni WindSim

Soltanto per la prima simulazione con il dominio di maggior estensione è stato utilizzato il profilo di velocità del vento pre-registrato di WindSim come dato di input. È stata fissata l'altezza del boundary layer a 1500m a.g.l. ed una velocità del vento al di sopra di tale altezza pari a 10m/s.

Per definire la convergenza del calcolo, si è impostato, in ogni prova effettuata, il monitoraggio della pressione in corrispondenza dell'anemometro 1106, le cui coordinate sono di seguito riportate, ed in particolare che il calcolo risulti essere andato a convergenza nel caso in cui i residui della pressione in quel punto abbiano raggiunto una quantità inferiore a 10^{-3} .

Si è scelto di far generare al programma un database contenente i dati fino a 300m di altezza sul livello del terreno e non per tutto lo sviluppo in altezza del dominio.

Sono stati poi inseriti degli objects nell'apposito modulo del programma. Questo consente al software di calcolare ed esportare i profili verticali di velocità in punti di coordinate ben precise.

Objects inseriti nel progetto			
No.	= 1	No.	= 3
x	= 349624.4790879	x	= 348964.9104944
y	= 4783802.230933	y	= 4783840.213202
z [m a.s.l.]	= 868.69	z [m a.s.l.]	= 940.6
Z [m a.g.l.]	= 80	Z [m a.g.l.]	= 30
ID_text	= Torre_temporanea	ID_text	= Anemometro_1106
No.	= 2	No.	= 4
x	= 349389.00	x	= 350213.9085299
y	= 4783637.00	y	= 4783415.219708
z [m a.s.l.]	= 852.8	z [m a.s.l.]	= 820.0
Z [m a.g.l.]	= 80	Z [m a.g.l.]	= 30
ID_text	= Torre_fissa	ID_text	= Anemometro_07699

Tab. 16: Caratteristiche geometriche degli object inseriti nelle simulazioni

Gli object *climatology*, ovvero gli anemometri, vengono definiti attraverso un file contenente i dati di direzione e velocità del vento mediati nei dieci minuti realmente acquisiti dagli strumenti, dunque i dati sperimentali.

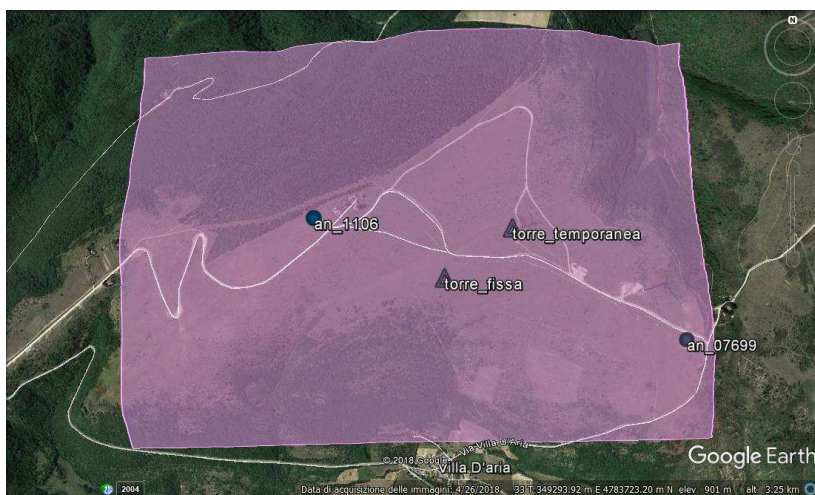


Fig. 42: Vista satellitare degli object inseriti

I risultati ottenuti sono stati analizzati andando a valutare lo shift direzionale rilevato tra la direzione del vento di input e la direzione del vento simulata nei punti corrispondenti alla posizione degli objects, ed i profili verticali di

velocità del vento nei punti corrispondenti alle torri fissa e temporanea. L'obiettivo era quello di capire se il software fosse in grado di stabilire a priori se degli ipotetici punti scelti nel sito fossero davvero idonei o meno ai fini della site calibration, per questo sono stati analizzati i punti corrispondenti alle torri installate realmente.

I piani per la valutazione dello shift di direzione sono estratti alla quota di 80m corrispondente all'altezza dell'hub delle turbine eoliche e quindi degli anemometri utilizzati durante la site calibration.

Tutte queste analisi sono state condotte solamente nell'ultimo dominio, quindi il più piccolo con raffittimento, di cui vengono riportati i risultati per tutti i 12 settori angolari analizzati.

Per quanto riguarda la rugosità si è potuto constatare che i risultati in termini di shift direzionale ad 80m non risentono della variazione tra rugosità estiva ed invernale, o meglio, si hanno delle variazioni ma sono veramente minime; pertanto verranno riportati solamente i risultati ottenuti impostando nella simulazione la rugosità estiva.

Nei profili verticali di velocità, invece, è apprezzabile l'influenza della differente rugosità, pertanto verranno riportati i profili per tutti i dodici settori, facendo sempre riferimento all'ultimo dominio simulato, sia nel caso di rugosità estiva che nel caso di rugosità invernale.

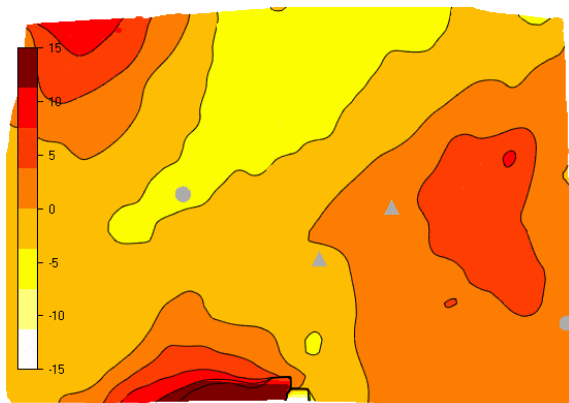


Fig. 43: Shift di direzione del vento - input 0° - quarto dominio - rugosità estiva

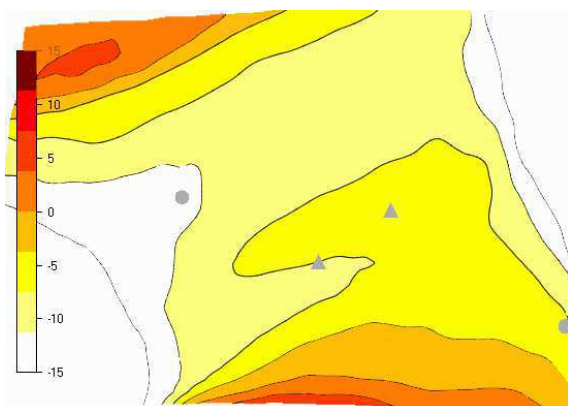


Fig. 44: Shift di direzione del vento - input 30° - quarto dominio - rugosità estiva

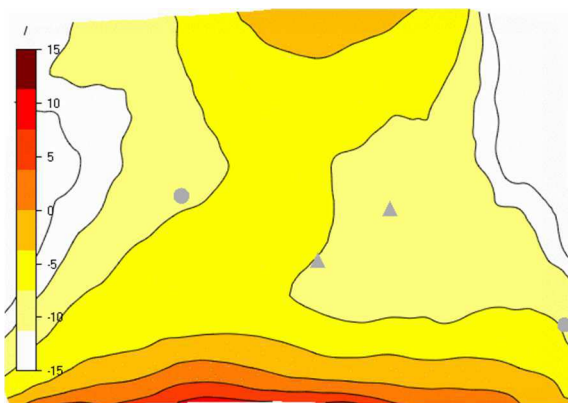


Fig. 45: Shift di direzione del vento - input 60° - quarto dominio - rugosità estiva

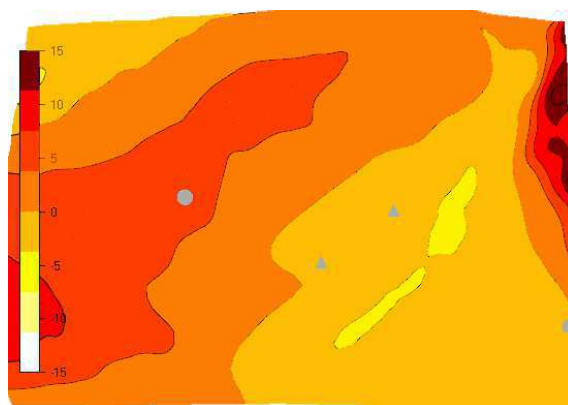


Fig. 46: Shift di direzione del vento - input 90° - quarto dominio - rugosità estiva

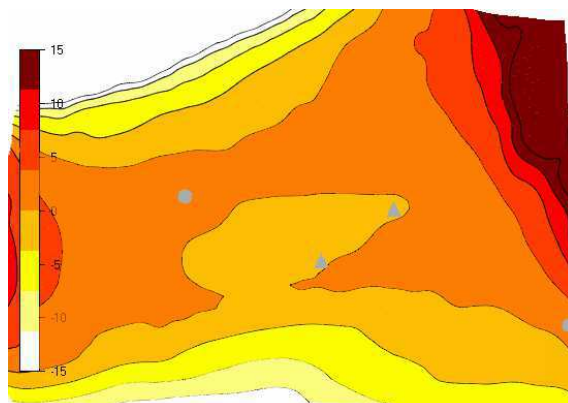


Fig. 47: Shift di direzione del vento - input 120° - quarto dominio - rugosità estiva

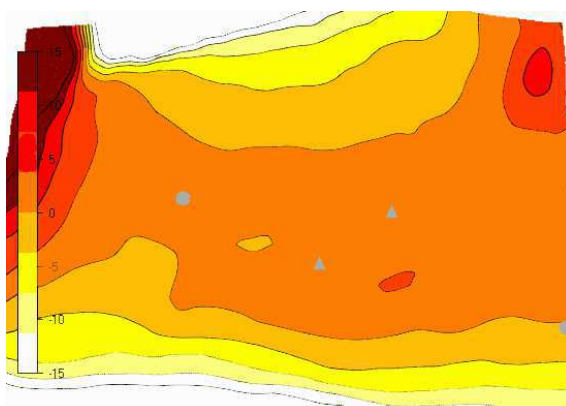


Fig. 48: Shift di direzione del vento - input 150° - quarto dominio - rugosità estiva

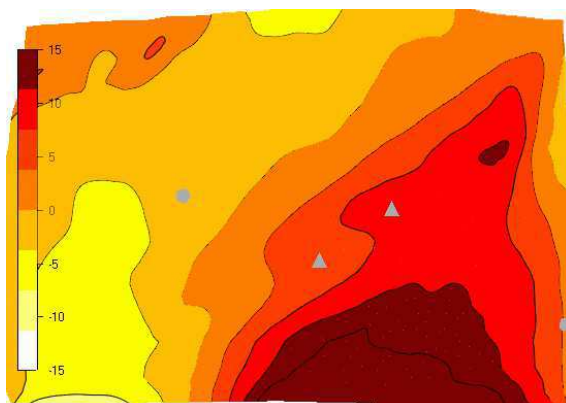


Fig. 49: Shift di direzione del vento - input 180° - quarto dominio - rugosità estiva

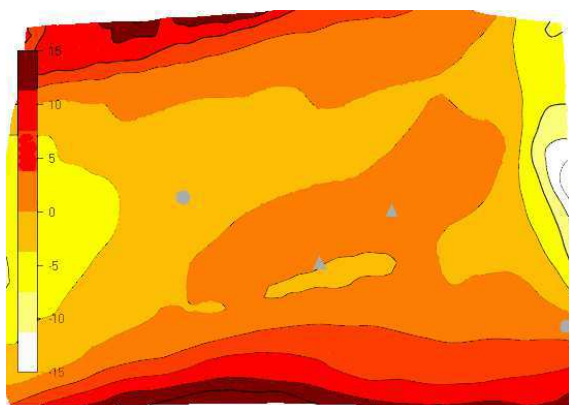


Fig. 50: Shift di direzione del vento - input 210° - quarto dominio - rugosità estiva

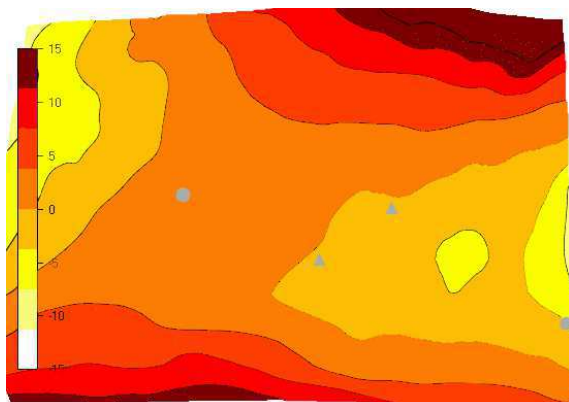


Fig. 51: Shift di direzione del vento - input 240° - quarto dominio - rugosità estiva

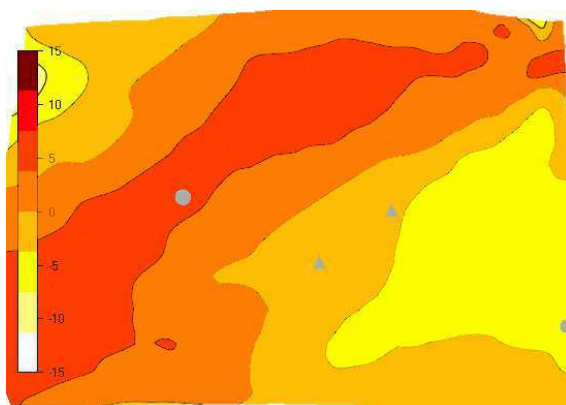


Fig. 52: Shift di direzione del vento -input 270° - quarto dominio - rugosità estiva

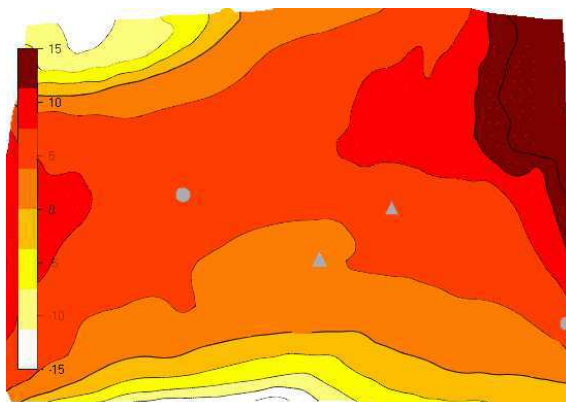


Fig. 53: Shift di direzione del vento - input 300° - quarto dominio - rugosità estiva

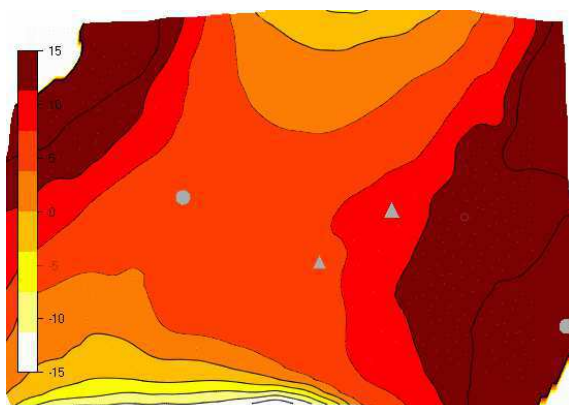


Fig. 54: Shift di direzione del vento - input 330° - quarto dominio - rugosità estiva

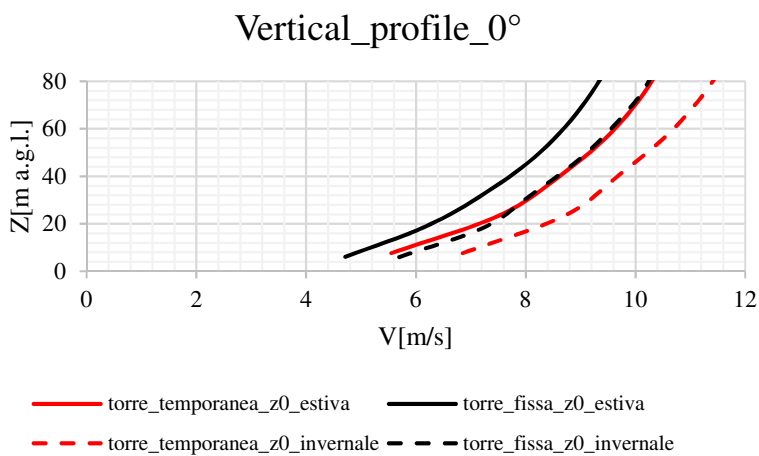


Fig. 55: Profilo verticale di velocità-quarto dominio-input 0°

Vertical_profile_30°

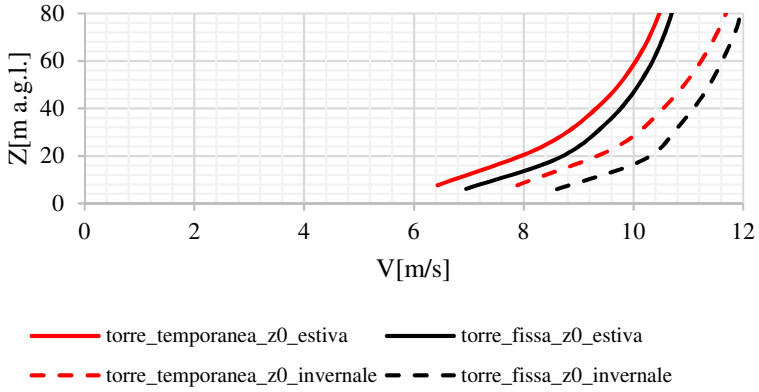


Fig. 56: Profilo verticale di velocità–quarto dominio–input 30°

Vertical_profile_60°

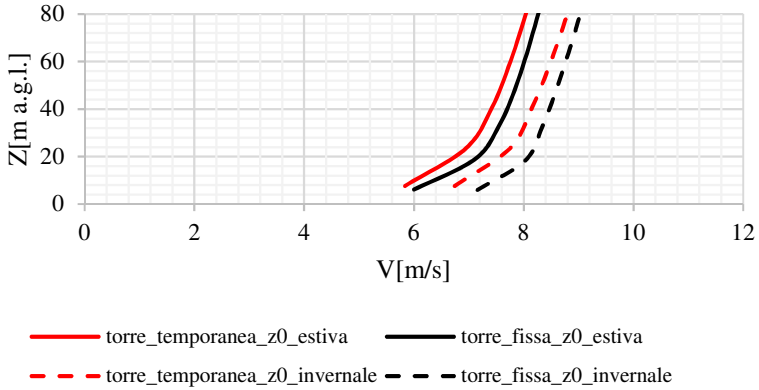


Fig. 57: Profilo verticale di velocità–quarto dominio–input 60°

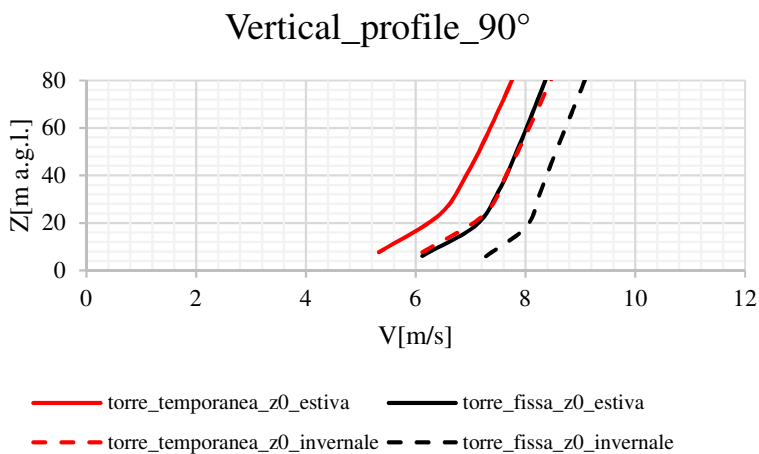


Fig. 58: Profilo verticale di velocità–quarto dominio–input 90°

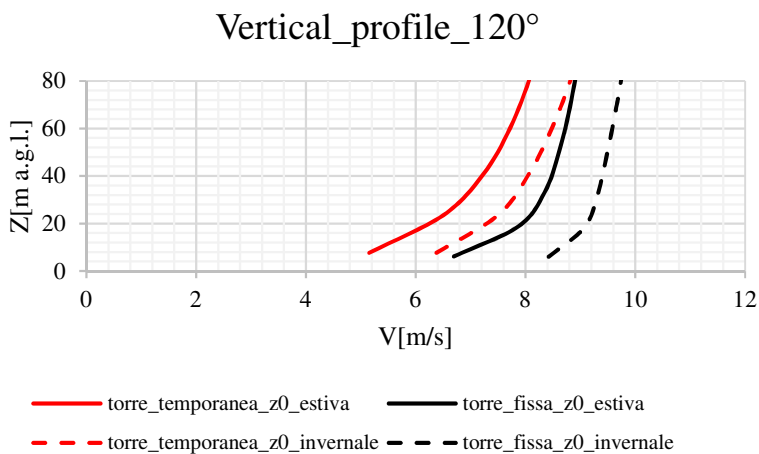


Fig. 59: Profilo verticale di velocità–quarto dominio–input 120°

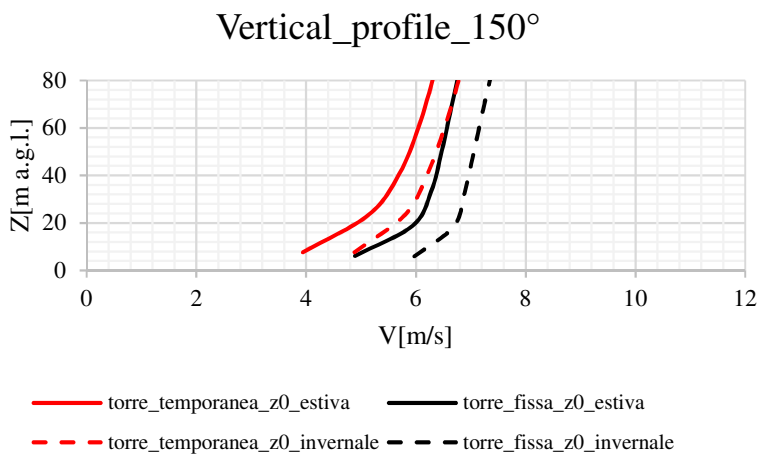


Fig. 60: Profilo verticale di velocità–quarto dominio–input 150°

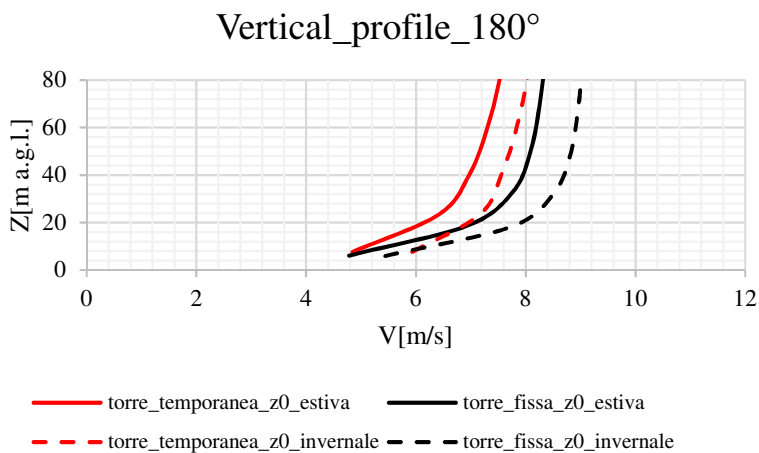


Fig. 61: Profilo verticale di velocità–quarto dominio–input 180°

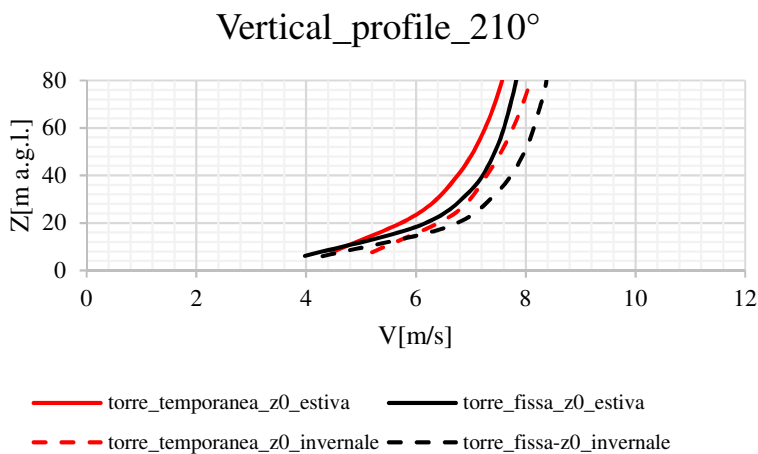


Fig. 62: Profilo verticale di velocità–quarto dominio–input 210°

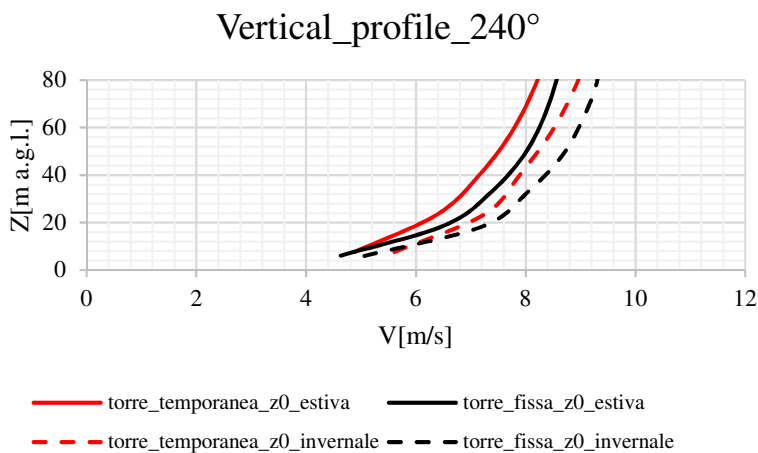


Fig. 63: Profilo verticale di velocità–quarto dominio–input 240°

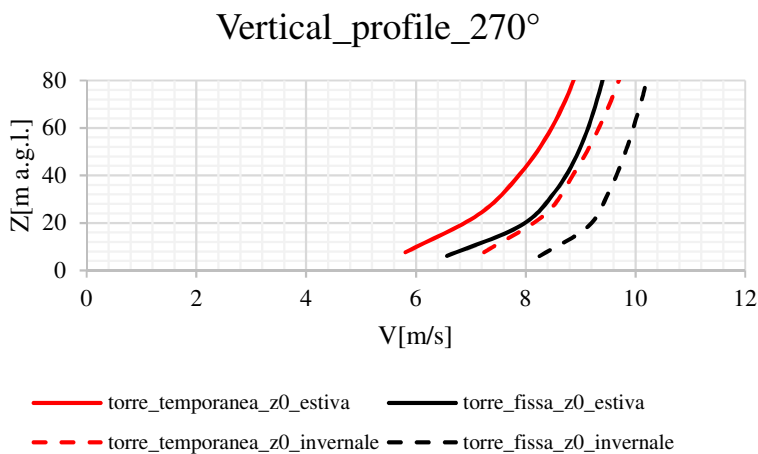


Fig. 64: Profilo verticale di velocità–quarto dominio–input 270°

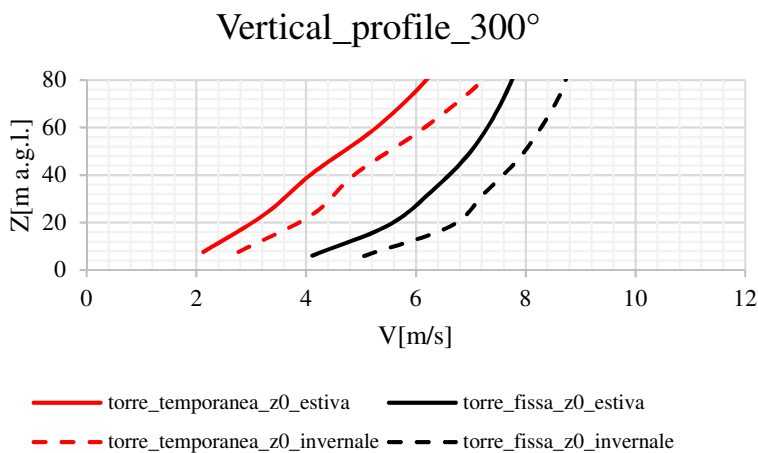


Fig. 65: Profilo verticale di velocità–quarto dominio–input 300°

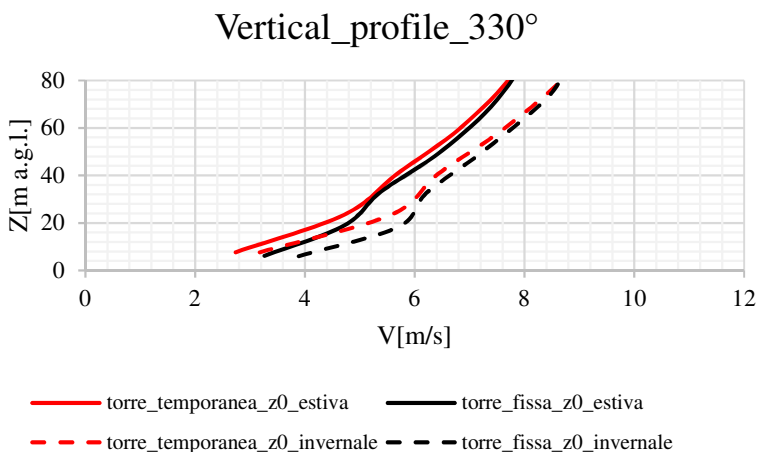


Fig. 66: Profilo verticale di velocità–quarto dominio–input 330°

Andando ad analizzare i grafici relativi allo shift direzionale risultante dalla simulazione numerica nei punti torre_temporanea e torre_fissa (rappresentati dai due triangoli nelle Fig. da 43 a 54) è possibile osservare come la direzione di provenienza del vento registrata sia pressoché la stessa in entrambi i punti, ad eccezione dei settori 180°, 300° e 330° dove la differenza risulta essere di soli 5°.

Questo sta a significare che dal punto di vista della direzione di provenienza del flusso di vento, i due punti scelti sono effettivamente rappresentativi l'uno dell'altro. Non si registrano, peraltro, variazioni eccessive all'interno dell'intero dominio.

Dall'analisi dei profili verticali di velocità emerge, invece, immediatamente l'effetto della differente rugosità del terreno. In tutti i grafici da 55 a 66 è possibile osservare come i profili estratti dalle simulazioni con rugosità estiva, dunque maggiore rispetto al caso invernale, risultino più rallentati e traslati verso il lato sinistro dei grafici. La rugosità è l'unico parametro che è stato variato tra la simulazione da cui si ottengono gli andamenti in linea continua e quella con cui si ottengono gli andamenti in linea tratteggiata di ciascun grafico, per cui i diversi trend dei profili sono attribuibili interamente ad essa. Questo aspetto fa capire l'importanza di effettuare la certificazione di una macchina eolica, e dunque la site calibration e la power curve measurement, cercando di mantenere la stessa stagionalità durante le misure.

Per quanto riguarda la rappresentatività dei punti scelti dal punto di vista della velocità del vento, è possibile notare come, a meno di una differenza nella velocità registrata alle varie altezze, del tutto normale (i fattori di correzione del flusso determinati tramite la site calibration servono proprio a correlare le velocità tra i due punti), i profili verticali sono concordi tra loro, dunque i profili estratti per torre_fissa sono ben rappresentativi dei profili estratti per torre_temporanea, sia nel caso di rugosità estiva che nel caso di rugosità invernale. Fanno eccezione il settore 300° , in cui gli effetti dell'orografia sono tali da azzerare ogni forma di similitudine tra i due profili, il 300° ed il 180° . In questi ultimi due settori i profili non sono del tutto dissimili ma sono quelli in cui si tendono ad avere i maggiori scostamenti.

3.2 OPENFOAM

Successivamente le stesse analisi sono state condotte attraverso OpenFOAM (Field Operation and Manipulation), un pacchetto software open source, scritto in C++, rilasciato da ESI Group. Il fatto di essere open source, lo rende modificabile da parte di chiunque: ciò ne giustifica il largo impiego principalmente in ambito accademico.

Gli eseguibili che costituiscono OpenFoam sono detti applicazioni e sono suddivisi in due categorie:

- Solutori: sviluppati per risolvere un particolare problema di meccanica dei continui
- Utilities: sviluppate per la manipolazione dei dati e coinvolgono le operazioni di pre/post-processing.

Le Utilities sono suddivise in:

- Mesh utilities: generazione della mesh, conversione della mesh, manipolazione della mesh
- Utilities per il calcolo parallelo: decomposizione del dominio, ricostruzione e ridistribuzione del domini
- Utilities di pre-processing: preparazione del caso
- Utilities di post-processing: processamento del risultato della soluzione.

I vantaggi principali di OpenFoam sono la sintassi human-readable per implementazioni di equazioni alle derivate parziali, che permette l'adattamento ai più differenti problemi fisici, e la gestione di griglie non strutturate poliedriche, che permette l'applicazione a casi dalla geometria

anche complessa; inoltre è un sistema caratterizzato da una ampia disponibilità di modelli fisici.

Lo svantaggio è principalmente l'assenza di una vera e propria interfaccia, tutto il lavoro si svolge tramite righe di comando facendo di OpenFoam una soluzione sicuramente poco user-friendly.

3.2.1 CREAZIONE DELLA GRIGLIA DI CALCOLO

Per questioni relative al tempo computazionale che sarebbe stato necessario alla creazione di più griglie di calcolo con domini di estensione variabile, non è stato possibile ripetere il procedimento di annidamento effettuato con WindSim.

Perciò è stata utilizzata solamente la griglia di calcolo con estensione pari all'ultimo dominio, quello con l'infittimento, utilizzato per le ultime simulazioni del flusso di vento con WindSim.

Numero di celle	1818000
Altezza [m]	3000
Numero di celle nel piano XY	7272
Numero di celle lungo Z	250
Fattore di incremento celle lungo Z	20

Tab. 17: Caratteristiche griglia di calcolo OpenFOAM

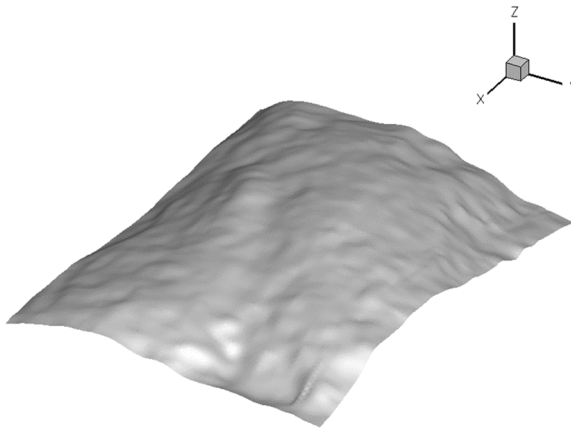


Fig. 67: Vista 3D del modello digitale del terreno generato da OpenFOAM

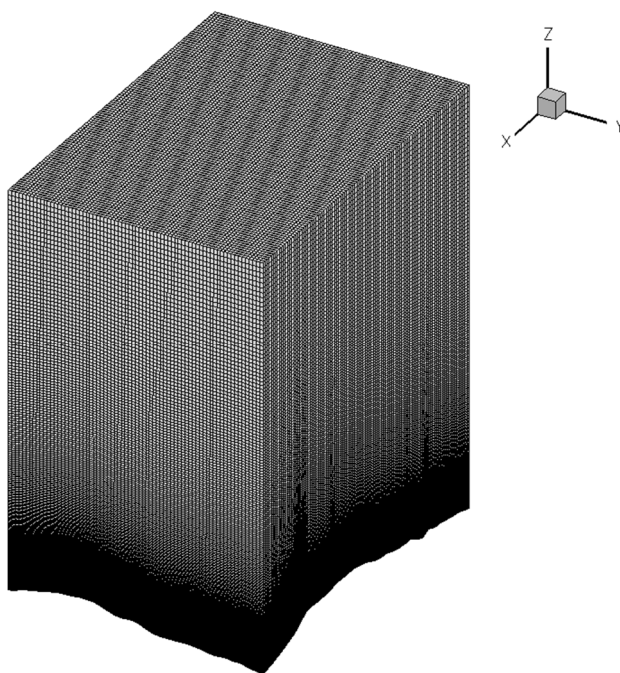


Fig. 68: Vista 3D della griglia di calcolo generata da OpenFOAM

3.2.2 CONDIZIONI INIZIALI E A CONTORNO

La logica seguita nell'impostazione dei boundary è quella della creazione di un tubo di flusso la cui superficie inferiore sarà il terreno del sito eolico di Serrapetrona, ed in cui, a seconda della direzione del vento che si vuole impostare, si andranno a modificare le superfici di ingresso ed uscita.

Per ciò che riguarda le condizioni iniziali del flusso, al fine di simulare correttamente lo strato limite atmosferico, sono stati implementati i profili di velocità (U) in ingresso logaritmici. È stata impostata una Z_{rif} pari a 1779,21m (risultante dalla impostazione dell'altezza dello strato limite pari a 1000m oltre l'elevazione relativa massima del modello digitale del terreno del sito eolico di Serrapetrona), ed una corrispondente velocità di flusso libero pari a 10m/s.

Per quanto riguarda il modello di turbolenza, inizialmente si è cercato di simulare il flusso ambientale all'interno dello strato limite utilizzando il

modello k- ω SST, tuttavia, nonostante lo studio e la ricerca dei parametri e delle impostazioni che consentissero di avere una convergenza del calcolo, non è stato ottenuto un test-case soddisfacente.

Per questo motivo, si è deciso di utilizzare il modello di turbolenza standard k- ϵ .

3.2.3 CONDIZIONI A PARETE

Mentre il flusso scorre sulla parete, si sviluppano grandi sforzi di taglio e forti gradienti di velocità all'interno dello strato limite; ad un certo punto, il flusso diventa turbolento e, a causa della turbolenza che si crea, aumenta il rimescolamento del flusso all'interno dello strato limite.

Vicino alla parete la velocità cambia rapidamente: l'utilizzo della velocità adimensionale u^+ e della distanza dalla parete adimensionale y^+ produce un profilo di velocità prevedibile, all'interno dello strato limite, per un'ampia gamma di flussi.

$$y^+ = \frac{\rho^* u^{*} y}{\mu} \quad \text{Eq. 61}$$

$$u^* = \sqrt{\frac{\tau_w}{\rho}} \quad \text{Eq. 62}$$

$$u^+ = \frac{1}{k} \ln(y^+) + C^+ \quad \text{Eq. 63}$$

Nei CFD le zone più importanti sono il sotto-strato viscoso “viscous sub-layer” e la “log-law layer”; i vari modelli di turbolenza richiedono differenti considerazioni a seconda che si risolva o meno, il sotto-strato viscoso del profilo logaritmico.

Nel caso in cui si voglia risolvere lo strato limite fino al sotto-strato viscoso, si necessitano mesh molto raffinate vicino alla parete, ed in termini di y^+ , si deve avere $y^+ < 10$; questo è l'approccio più accurato, ma comporta maggiori costi computazionali.

Nel caso in cui non si abbia interesse nel calcolare lo strato limite fino al sotto-strato viscoso, si necessita delle funzioni a parete; in termini di y^+ , le wall function modellano bene tutte le mesh con $y^+ > 30$; questo approccio ha minori costi computazionali, ma occorre essere attenti alle formulazioni delle funzioni a parete, per comprenderne le limitazioni.

Per lo studio del nostro caso è stata realizzata una mesh molto raffinata, con y del primo centro cella pari a 0.5m. Nonostante ciò, sono state implementate le funzioni a parete per le variabili di trasporto:

- $k \rightarrow kwqwallfunction$: osservando il codice sorgente, questa funzione di parete impone la condizione di gradiente nullo “zeroGradient” a parete
- $\varepsilon \rightarrow epsilonwallfunction$: questa funzione considera l’equilibrio tra la produzione e la dissipazione di energia cinetica turbolenta ε . Per imporre il valore di ε alla prima cella a parete, l’espressione è la seguente:

$$\varepsilon = \frac{C_\mu^{0.75} k^{1.5}}{ky_p} \quad \text{Eq. 64}$$

dove C_μ è una costante propria del modello di turbolenza pari a 0.09, k è la costante di Von Karman pari a 0.4, y_p è l’altezza del primo centro cella pari a 0.5m.

- $\text{nut} \rightarrow \text{nutRoughWallfunction}$: questa funzione permette di calcolare lo sforzo tangenziale per una parete rugosa in base alla legge di parete; lo sforzo tangenziale viene poi incluso nel bilancio della quantità di moto permettendo così il calcolo della velocità tangenziale vicino alla parete, all’interno quindi dello strato limite.

3.2.4 RUGOSITA’ VARIABILE

L’implementazione di una rugosità variabile ha costituito uno dei problemi principali nell’impostazione del nostro caso perché OpenFOAM di default permette solamente una distribuzione costante dei valori di rugosità, dunque un unico valore che viene assegnato all’intero dominio.

Per superare questo problema sono stati creati ad hoc dei file che contenessero la rugosità variabile per tutte le celle appartenenti al boundary di ingresso del flusso di vento.

Questi file sono costituiti da un’unica colonna ed, essendo il numero di celle lungo Z pari a 250, da righe aventi il valore della rugosità aerodinamica $z_{0,1}$ della 1° cella della 1° colonna del boundary ripetuta per 250 volte, di seguito avremo la ripetizione, sempre per 250 volte, della rugosità aerodinamica della 1° cella della 2° colonna del boundary $z_{0,2}$, e così via fino al completamento dell’intero boundary. Ciò che ha reso possibile la creazione dei file e la corretta assegnazione dei valori di rugosità alle singole celle è stato il fatto

che la mesh stessa è stata creata direttamente all'interno di OpenFOAM, e non attraverso un altro meshatore, dunque era nota la numerazione delle singole celle sulla base della quale sono stati creati i file di rugosità nell'ordine corretto.

3.2.5 SIMULAZIONI NUMERICHE

A causa dell'elevato costo computazionale delle simulazioni numeriche con questo software (per alcuni calcoli si è raggiunto un tempo di convergenza della soluzione di circa 2 giorni), si è deciso di effettuare le prove limitandosi ai soli settori validati alla fine della procedura di site calibration descritta nel capitolo 1 e dunque 0°, 210°, 240°.

Di seguito le impostazioni delle prove effettuate.

Prova	Rugosità	Settore	Modello di turbolenza	N° di iterazioni
Prova 1	Estiva	0	Standard k-ε	4500
Prova 2	Invernale	0	Standard k-ε	4500
Prova 3	Estiva	210	Standard k-ε	3111
Prova 4	Invernale	210	Standard k-ε	3071
Prova 5	Estiva	240	Standard k-ε	2955
Prova 6	Invernale	240	Standard k-ε	2956

Tab. 18: impostazioni principali delle simulazioni con OpenFOAM

Al fine di analizzare le mappe di angolo relativo tra il settore di ingresso del flusso di vento e la direzione del vento interna al dominio, sono state implementate delle equazioni per la stima di questo parametro, appositamente create per ogni settore di ingresso simulato:

Settore 0:

$$\alpha_{relative} = \cos^{-1} \left[\frac{(U_x * 0 + U_y * (-1))}{\text{MAX}(U_{mag} * \sqrt{0 + 1}; 1,0e^{-6})} \right] * \frac{360}{2\pi} * \text{SIGN}(U_x) \quad \text{Eq. 65}$$

Settore 210:

$$\alpha_{relative} = \cos^{-1} \left[\frac{(U_x * 0,5 + U_y * 0,866)}{\text{MAX}(U_{mag} * \sqrt{0,5 + 0,866}; 1,0e^{-6})} \right] * \frac{360}{2\pi} * \text{SIGN} \left[\tan \left(\frac{U_y}{\text{MAX}(U_x; 1,0e^{-6})} \right) - \tan \left(\frac{0,866}{0,5} \right) \right] \quad \text{Eq. 66}$$

Settore 240:

$$\alpha_{relative} = \cos^{-1} \left[\frac{(U_x * 0,866 + U_y * 0,5)}{\left[\text{MAX}(U_{mag} * \sqrt{0,5 + 0,866}; 1,0e^{-6}) \right]} \right] * \frac{360}{2\pi} \quad \text{Eq. 67}$$

$$* \text{SIGN} \left[\tan \left(\frac{U_y}{\text{MAX}(U_x; 1,0e^{-6})} \right) - \tan \left(\frac{0,5}{0,866} \right) \right]$$

U_x, U_y e U_mag sono rispettivamente la componente lungo X, lungo Y ed il modulo della velocità.

Di seguito i risultati ottenuti dalle simulazioni.



Fig. 69: Shift di direzione del vento - input 0° - rugosità estiva

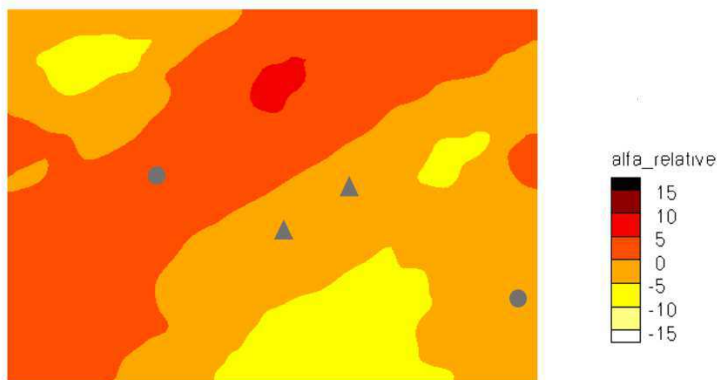


Fig. 70: Shift di direzione del vento - input 0° - rugosità invernale

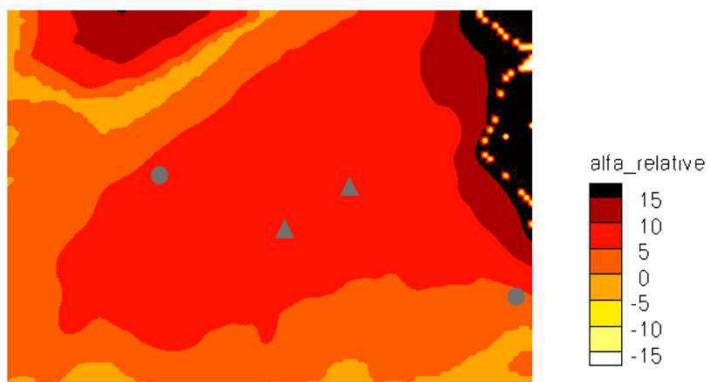


Fig. 71: Shift di direzione del vento - input 210° - rugosità estiva



Fig. 72: Shift di direzione del vento - input 210° - rugosità invernale

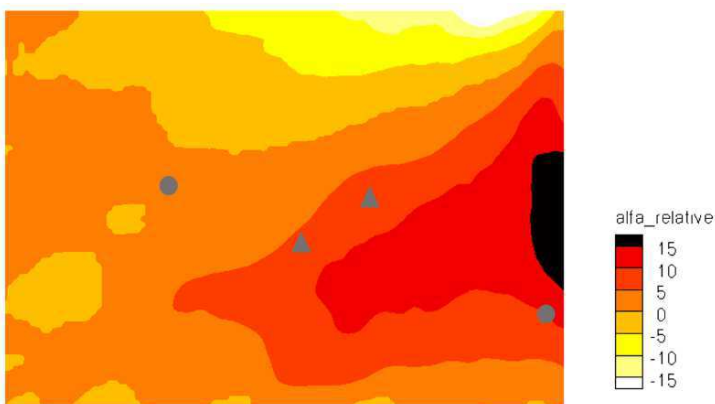


Fig. 73: Shift di direzione del vento - input 240° - rugosità estiva

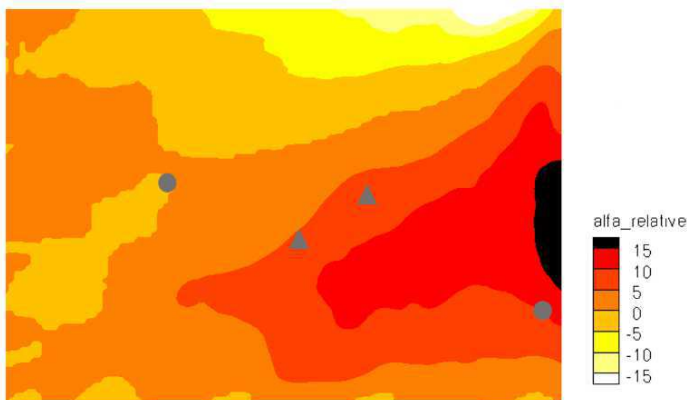


Fig. 74: Shift di direzione del vento - input 240° - rugosità invernale

Analizzando i risultati delle simulazioni con OpenFOAM appare subito evidente quanto essi siano differenti da quelli generati da WindSim. I punti torre_fissa e torre_temporanea (i triangoli) sono analoghi in termini di direzione del vento rilevata (fig. da 69 a 74) che appare invariata tra i due punti, ma presentano andamenti nettamente differenti per quanto riguarda i profili verticali di velocità (Fig. da 75 a 86). Per brevità di trattazione i profili verticali simulati da OpenFOAM sono riportati a seguire inserendo nello stesso grafico il corrispondente profilo simulato da WindSim.

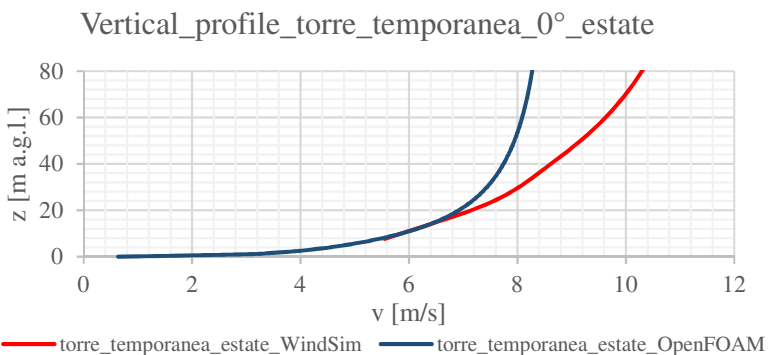


Fig. 75: Confronto profili verticali-torre_temporanea-input 0°-rugosità estiva

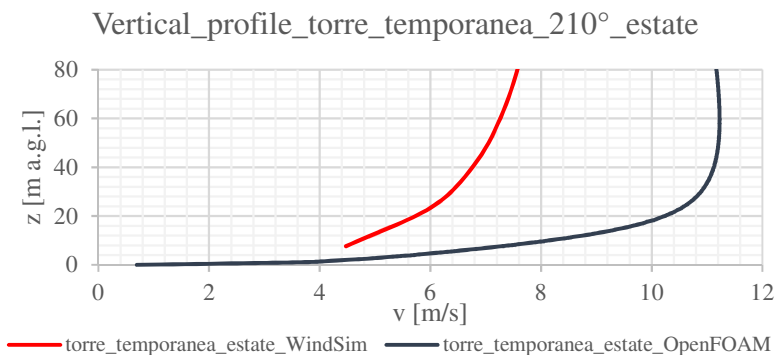


Fig. 76: Confronto profili verticali-torre_temporanea-input 210°-rugosità estiva

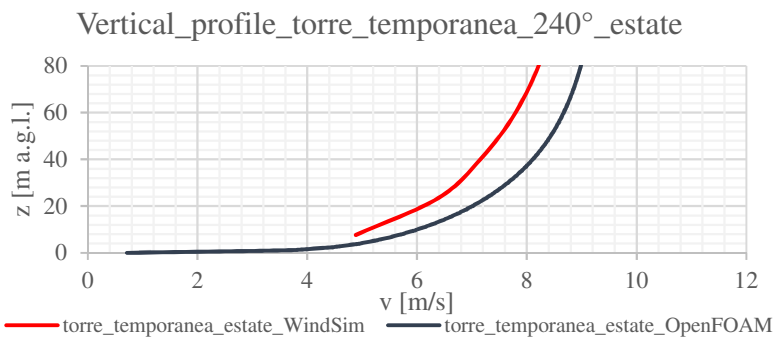


Fig. 77: Confronto profili verticali-torre_temporanea-input 240°-rugosità estiva

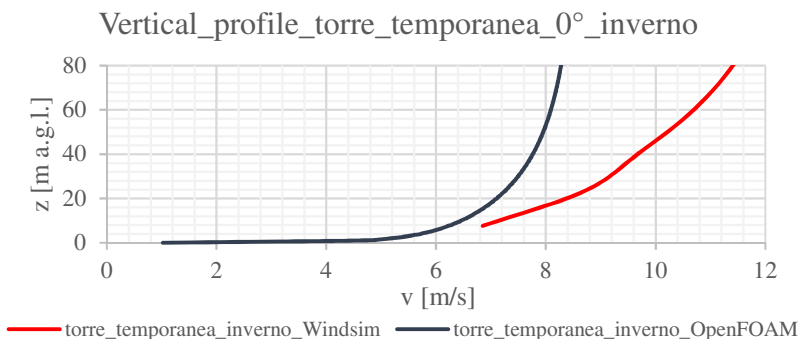


Fig. 78: Confronto profili verticali-torre_temporanea-input 0°-rugosità invernale

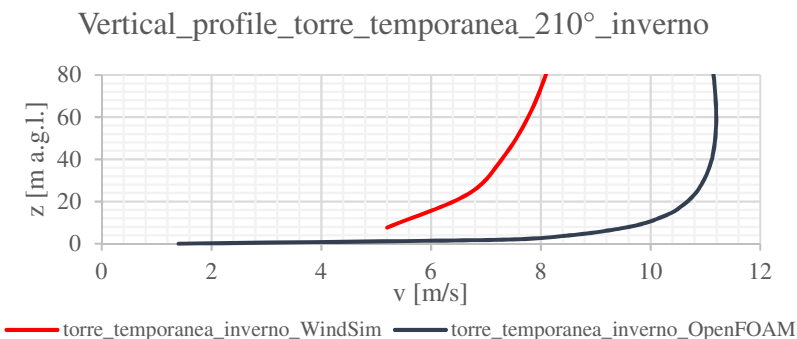


Fig. 79: Confronto profili verticali-torre_temporanea-input 210°-rugosità invernale

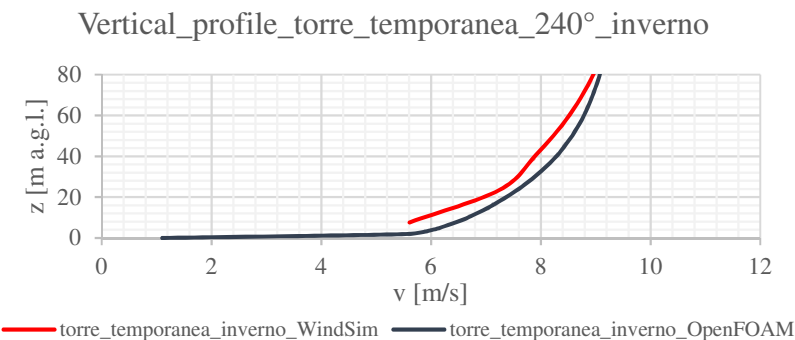


Fig. 80: Confronto profili verticali-torre_temporanea-input 240°-rugosità invernale

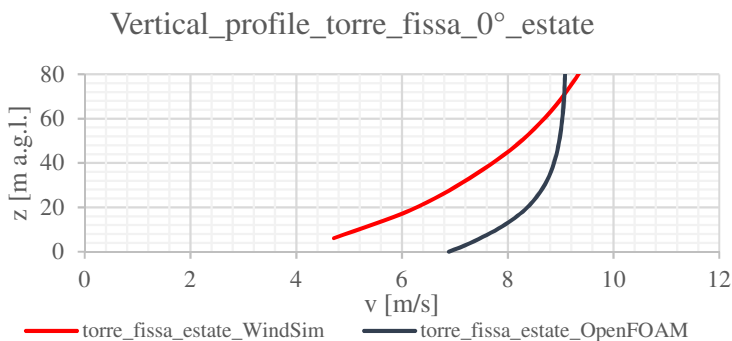


Fig. 81: Confronto profili verticali-torre_fissa-input 0°-rugosità estiva

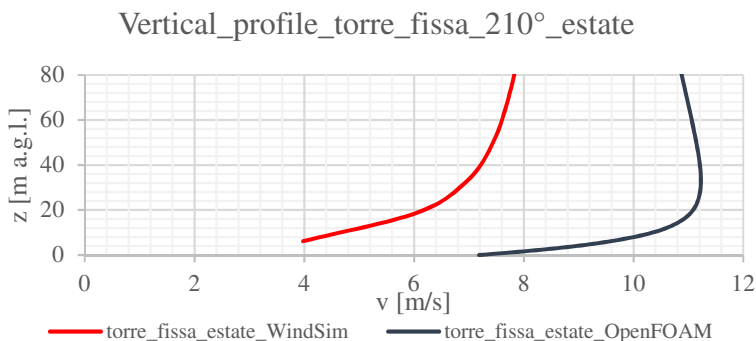


Fig. 82: Confronto profili verticali-torre_fissa-input 210°-rugosità estiva

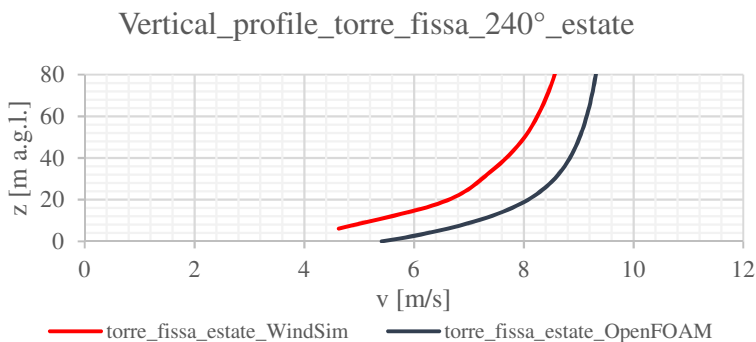


Fig. 83: Confronto profili verticali-torre_fissa-input 240°-rugosità estiva

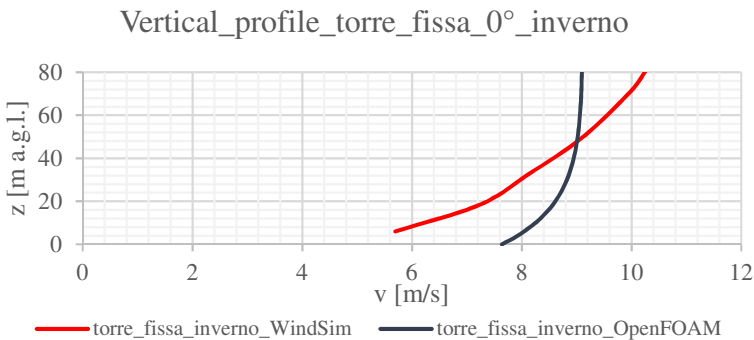


Fig. 84: Confronto profili verticali-torre_fissa-input 0°-rugosità invernale

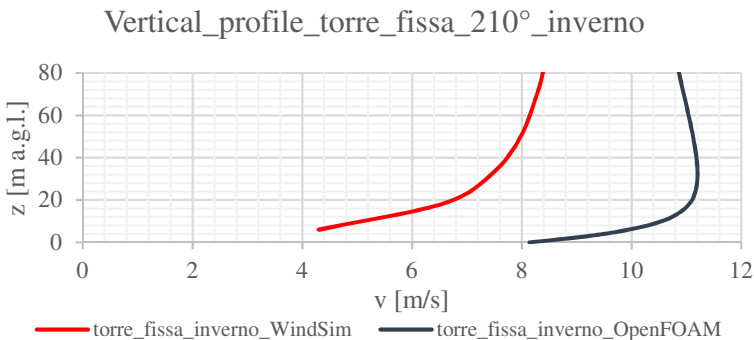


Fig. 85: Confronto profili verticali-torre_fissa-input 210°-rugosità invernale

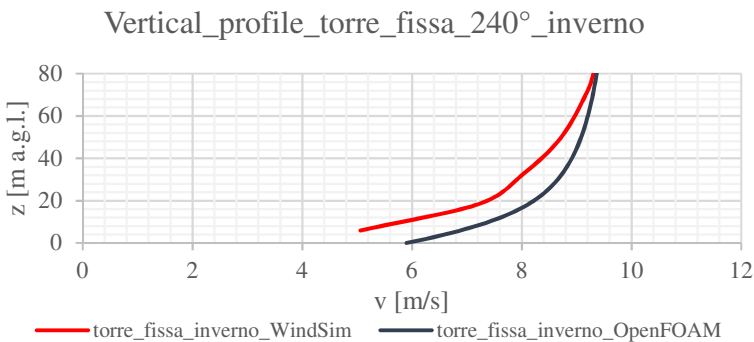


Fig. 86: Confronto profili verticali-torre_fissa-input 240°-rugosità invernale

La discordanza tra i risultati ottenuti attraverso i due software è molto elevata. Mentre WindSim vede un profilo verticale che si sta ancora sviluppando, OpenFOAM simula un profilo molto più definito in entrambi i punti di estrazione dei dati ed in entrambi i casi di rugosità.

A questo punto è stato necessario confrontare i dati ottenuti tramite le simulazioni con dei dati sperimentali. Pertanto si è deciso di utilizzare i dati anemometrici raccolti dall'anemometro 07699 e stabilire se e quale dei due software si avvicina maggiormente ai dati reali. Sono stati estratti per le tre direzioni 0° , 210° e 240° i profili verticali generati da WindSim ed OpenFOAM nel punto del dominio avente le coordinate dell'anemometro 07699.

La scelta di confrontare risultati con i dati acquisiti proprio da questo anemometro è dovuta al fatto che era quello con il maggior numero di dati raccolti.

Il confronto è avvenuto previa adimensionalizzazione di ogni profilo rispetto alla propria velocità, simulata o misurata, ad 80m.

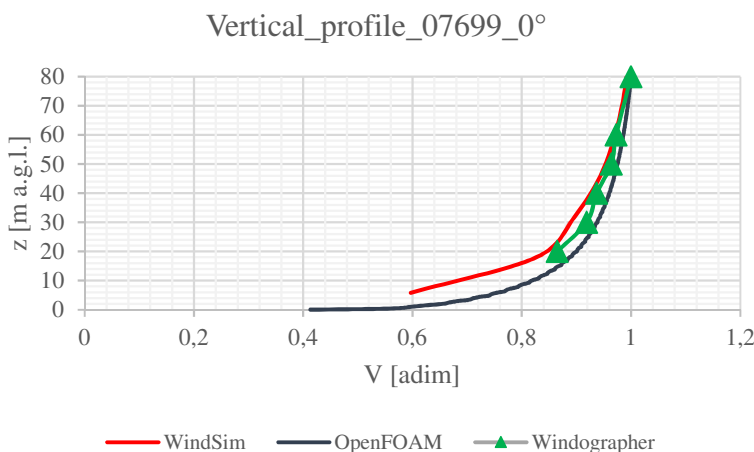


Fig. 87: Confronto con i dati sperimentali-input 0°

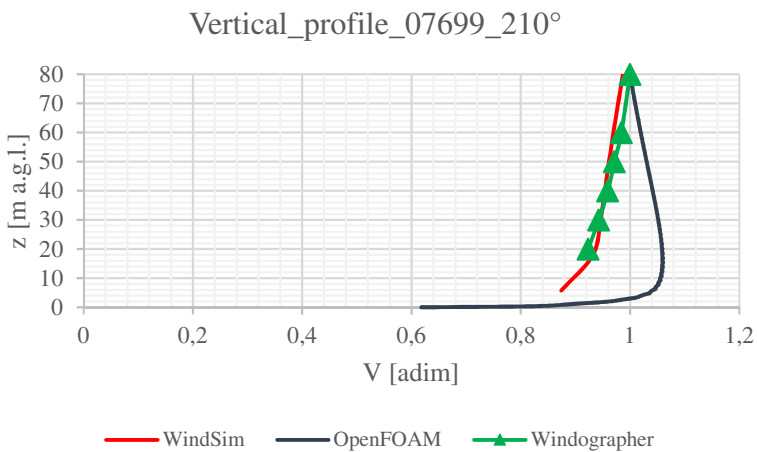


Fig. 88: Confronto con i dati sperimentali-input 210°

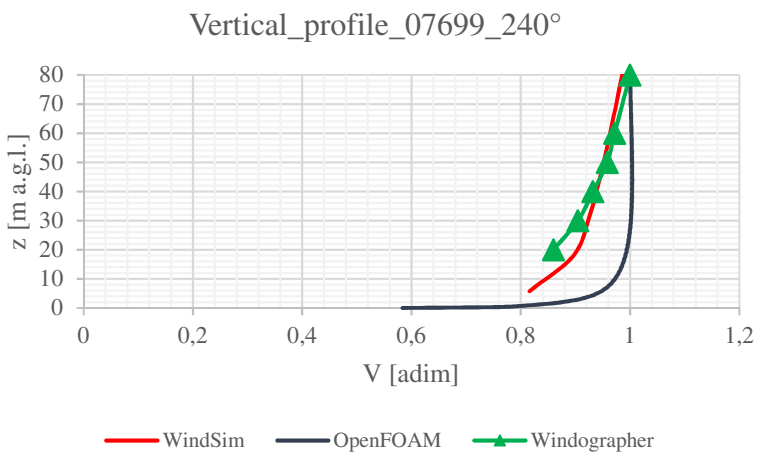


Fig. 89: Confronto con i dati sperimentali-input 240°

CONCLUSIONI PARTE PRIMA

Lo scopo di questa prima parte di lavoro, che riassume le attività svolte dalla scrivente durante la prima metà della sua esperienza in qualità di dottoranda, è stato quello di analizzare i metodi di valutazione dell'influenza di un'orografia complessa sul flusso di vento.

Fino a qualche anno fa, la stima del flusso di vento di un sito veniva effettuata esclusivamente tramite un approccio sperimentale-teorico. Era possibile percorrere due strade: la prima consisteva, e consiste tutt'ora, nel disporre delle stazioni anemometriche sul territorio da studiare e fare delle analisi statistiche dei dati anemometrici raccolti sul lungo periodo; i dati ottenuti in corrispondenza delle stazioni vengono poi successivamente estesi alle altre zone del dominio considerato mediante relazioni teoriche suggerite da opportuni protocolli di calcolo.

Le spese associate a questo metodo sono molto alte a causa dei costi d'affitto delle stazioni anemometriche, ed inoltre non consente di avere un numero elevato di punti di rilevazione dei dati.

La seconda via consisteva nell'allestimento di un modello in scala sul quale effettuare prove in galleria del vento. In questo modo era possibile ottenere dati in molti più punti del dominio ma, al tempo stesso, rimaneva il problema caratteristico della modellazione di un sistema fisico; sono sempre necessarie delle semplificazioni che possono influire più o meno pesantemente sulla veridicità dei dati ottenuti.

La scrivente ha avuto la fortuna di poter prendere parte all'esecuzione del primo dei due metodi attraverso la certificazione della turbina eolica da 2MW installata nel comune di Serrapetrona (MC).

Attraverso questa procedura è stato possibile analizzare in maniera più dettagliata il sito e analizzando, ad esempio, le time series acquisite durante i lavori (Fig. 90), ovvero l'andamento della velocità in un periodo, è stato possibile constatare lo schiacciamento dei valori di velocità alle varie quote nelle ore centrali della giornata. Al contrario, nelle ore serali e notturne si ha una dilatazione delle linee. Questo fenomeno è spiegabile tramite gli effetti di riscaldamento e di rilascio del calore del terreno. Nelle ore più calde il suolo rilascia calore e provoca un rimescolamento convettivo tra i vari strati dell'atmosfera. In conseguenza del rimescolamento, le velocità degli strati superiori tendono a ridursi ed al contempo quelle degli strati inferiori tendono a crescere. Vi è un trasferimento di quantità di moto tra i vari livelli ed un avvicinamento delle linee. Nelle ore notturne, il terreno rimane più freddo, e non riesce ad influenzare il moto delle masse d'aria.

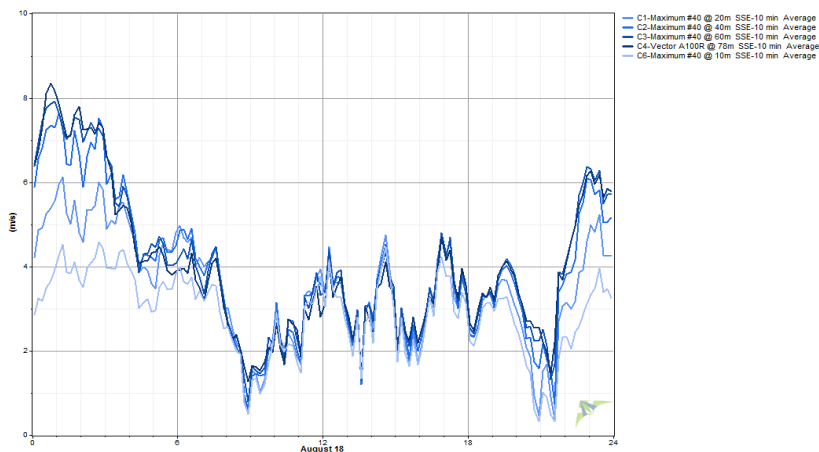


Fig. 90: Time series di una giornata tipo

Se non si effettuano misure dirette sul sito considerazioni come questa non possono aver luogo.

La norma di riferimento per la certificazione era la IEC 61400-12-1:2005. Attraverso le attività svolte all'interno del centro WEST-lab è stato possibile individuare alcune criticità di contenuto per quanto riguarda l'applicazione in orografie complesse.

La prima condizione difficilmente soddisfacibile, è quella che impone una differenza tra il fattore di correzione del flusso in un settore angolare e quello adiacente minore di 0.02. Questo parametro infatti risulta troppo restrittivo e comporta lo scarto di tanti settori per la calibrazione del sito. Nel caso specifico ha comportato l'esclusione di ben 7 settori, il che ha reso molto più lunga la durata delle acquisizioni ai fini del completamento dei database perché i settori di direzione validi erano solamente 3.

Il secondo aspetto fonte di non pochi problemi è stato l'impianto parafulmine. La norma infatti non prevede affatto la presenza di tale elemento, ma questa è una carenza molto grave, soprattutto se si intende affrontare una certificazione in orografia complessa. Installare le aste di captazione a quote così elevate non è stata un'impresa banale, soprattutto perché non si aveva alcun suggerimento in merito, ma è stato fondamentale perché una fulminazione, assai frequente nell'area che circonda il sito, avrebbe comportato danni economici in termini di danneggiamento delle attrezzature e di dati persi non trascurabili.

C'è poi una questione relativa ai dati richiesti. Tutta la procedura di determinazione della curva di potenza si basa sulla correlazione tra l'anemometro di riferimento e la turbina eolica della sola velocità del vento all'altezza dell'hub. Parametri significativi come la turbolenza o il wind shear non vengono richiesti. Fortunatamente questo aspetto è stato superato dalla seconda edizione della norma come si è visto nel capitolo secondo.

A sua volta, però, anche la seconda edizione contiene delle richieste che difficilmente possono trovare applicazione in orografie complesse. Analizzando le altezze di installazione dell'anemometro di riferimento, le difficoltà nel calcolo della Rotor Equivalent Wind Speed, l'impossibilità di utilizzare i remote sensing devices, per citarne alcune, è emerso che la norma contiene tanti aspetti innovativi quanto problematici.

Date le difficoltà affrontate durante i lavori ci siamo poi chiesti se tramite l'utilizzo di software fosse possibile supportare le fasi preliminari alla certificazione di una turbina.

Il primo software CFD utilizzato è stato WindSim, un solutore RANS già affermato nella previsione della risorsa eolica, e che ci ha permesso di utilizzare, come modello di turbolenza, il $k-\omega$ di Wilcox, un modello particolarmente adatto alla nostra situazione orografica ed alla previsione dei fenomeni fluidodinamici complessi.

Il secondo software CFD utilizzato è stato OpenFOAM, del tipo open-source. Le simulazioni effettuate con il modello $k-\omega$ SST da noi implementato hanno avuto esito negativo, con la non convergenza delle variabili di flusso calcolate e si è pertanto passati all'implementazione del modello di turbolenza standard $k-\epsilon$.

Lo scopo era quello di capire se tramite questi software, preliminarmente alla site calibration, è possibile stabilire quali punti sono maggiormente indicati per l'installazione delle due torri anemometriche, oppure, in altri termini, verificare se due ipotetici punti individuati tramite studi preliminari sono realmente idonei all'installazione delle torri e rappresentativi l'uno dell'altro. I risultati hanno evidenziato una validità molto forte delle simulazioni effettuate con WindSim, supportata anche dal confronto del profilo di velocità verticale simulato dal software in corrispondenza del punto di controllo anemometro 07699 ed i dati sperimentali acquisiti dall'anemometro stesso (Fig. 87, 88 e 89).

Si può quindi concludere che le simulazioni effettuate con questo software sono rappresentative del flusso di vento del parco eolico di Serrapetrona e che i due punti sono effettivamente validi ai fini dell'installazione delle torri. Dunque l'utilizzo di questo software può essere esteso ad analisi di prefattibilità analoghe in altri siti.

Per quanto riguarda il secondo software OpenFOAM, invece, i risultati delle simulazioni sono apparsi nettamente differenti se confrontati con i medesimi ottenuti da WindSim (Fig. da 75 a 86) e non sono stati validati dal confronto con i dati sperimentali, come è possibile osservare nelle immagini da 87 a 89. Questa discordanza tra i profili simulati ed i profili reali, in particolare, lascia intendere che i profili simulati in corrispondenza delle due torri siano anch'essi molto distanti dalla realtà.

La prima possibile causa è stata imputata al modello di turbolenza scelto per le simulazioni tramite OpenFOAM. La differenza tra simulazioni condotte con due modelli di turbolenza era attesa fin da subito, ma per confermare o smentire l'ipotesi che un così grande scostamento dei risultati fosse dovuto solo a questo aspetto, si è deciso di ricondurre una simulazione in WindSim andando proprio a modificare il modello di turbolenza. I risultati sono riportati nelle immagini a seguire. Ciò che emerso è stato un profilo di velocità differente ovviamente da quello generato dallo stesso software con modello k- ω , ma non tale da avvicinarsi al profilo simulato da OpenFOAM. In particolare il profilo risulta essere più rallentato rispetto a quello ottenuto con il modello k- ω in WindSim in particolare in prossimità del suolo. Quanto ottenuto porta ad una duplice considerazione:

- 1) Il modello di turbolenza non è la causa, o almeno non la sola, delle differenze tra i risultati ottenuti con WindSim e quelli ottenuti da OpenFOAM, perché avendo modificato il modello in WindSim non si è ottenuto un avvicinamento sostanziale dei profili a quelli simulati da OpenFOAM.
- 2) Quando si affrontano simulazioni numeriche del flusso di vento tramite WindSim occorre prestare molta attenzione alla scelta del modello di turbolenza da adottare perché si è visto come il k- ϵ restituisca profili di velocità rallentati rispetto al k- ω . Una differenza di 1-2m/s nella stima della velocità del vento può avere effetti molto pesanti sulla stima della produzione energetica di una turbina eolica, soprattutto nel caso di turbine di piccola taglia la cui installazione rientra proprio nel range di distanze dal terreno a cui si risente maggiormente degli effetti di rallentamento del profilo.

Una seconda ipotesi avanzata era relativa al profilo di velocità del vento in ingresso, input delle simulazioni in OpenFOAM. Si è detto precedentemente che i dati di input relativi al profilo in ingresso fossero una velocità di 10m/s ad un'altezza pari a 1000m al di sopra della superficie del modello in ogni punto. Si è quindi verificato se questa condizione fosse realmente rispettata andando a visualizzare l'andamento dei profili fino alla quota di 2000m, ma anche in questo caso non è emerso nulla che fosse individuabile come causa

degli scostamenti nei risultati ottenuti. La condizione di input è infatti rispettata. Analizzando i profili simulati da OpenFOAM fino alla quota di 2000m emerge un secondo aspetto non del tutto chiaro. Nelle immagini a seguire è possibile vedere tali profili ed i corrispondenti punti di estrazione all'interno del dominio. OpenFOAM "vede" delle situazioni di accelerazione del flusso alle basse quote che per il tipo di orografia in cui rientrano i punti di estrazione del profilo non dovrebbe esserci, soprattutto nel caso di vento proveniente da 210° in cui ci si trova in una zona tipicamente di recupero di pressione, perché oltre una collina rispetto alla direzione di provenienza del vento, per cui non si dovrebbe avere un'accelerazione del flusso.

Si è poi ipotizzato che l'altezza del dominio utilizzato in OpenFOAM non fosse sufficiente e che il problema poteva essere la manifestazione di fenomeni di bloccaggio, ma anche questa ipotesi è stata scartata dopo aver analizzato i profili simulati dopo aver portato a 5000m il limite superiore del dominio. I profili simulati erano perfettamente uguali a quelli ottenuti dal dominio avente altezza 3000m.

Allo stato attuale dunque non è stata ancora trovata la ragione della sostanziale differenza tra i profili simulati da WindSim e quelli ottenuti tramite OpenFOAM e sarà necessario condurre nei mesi a seguire ulteriori test.

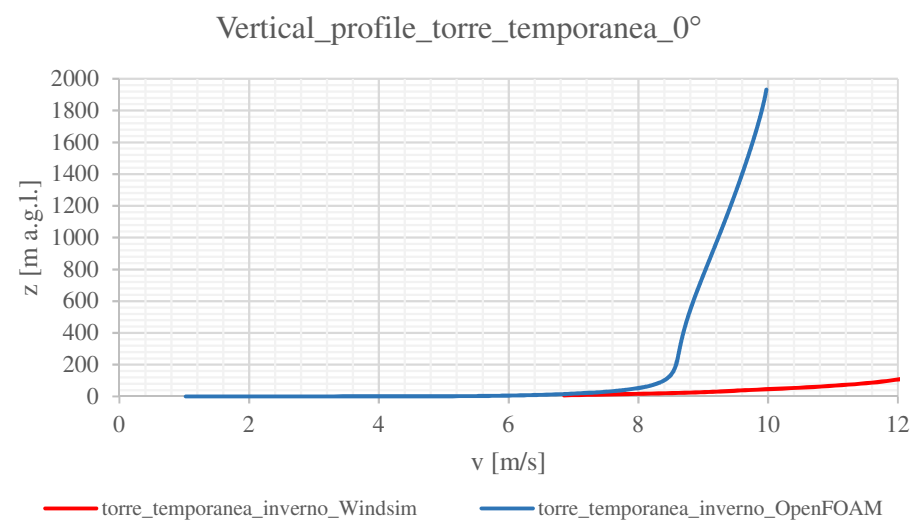
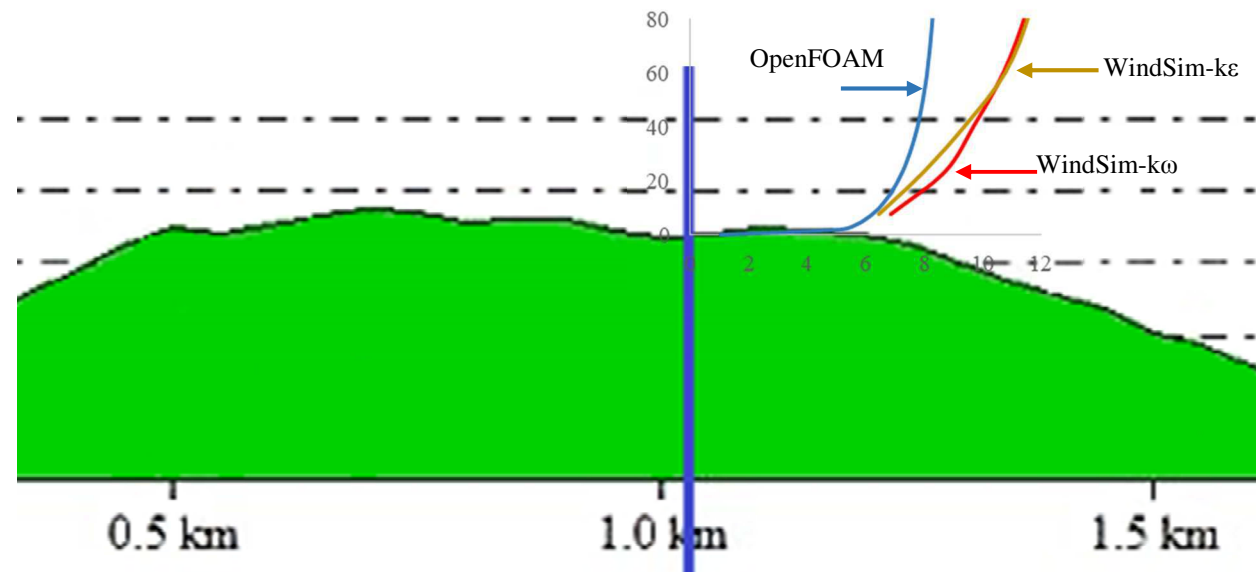
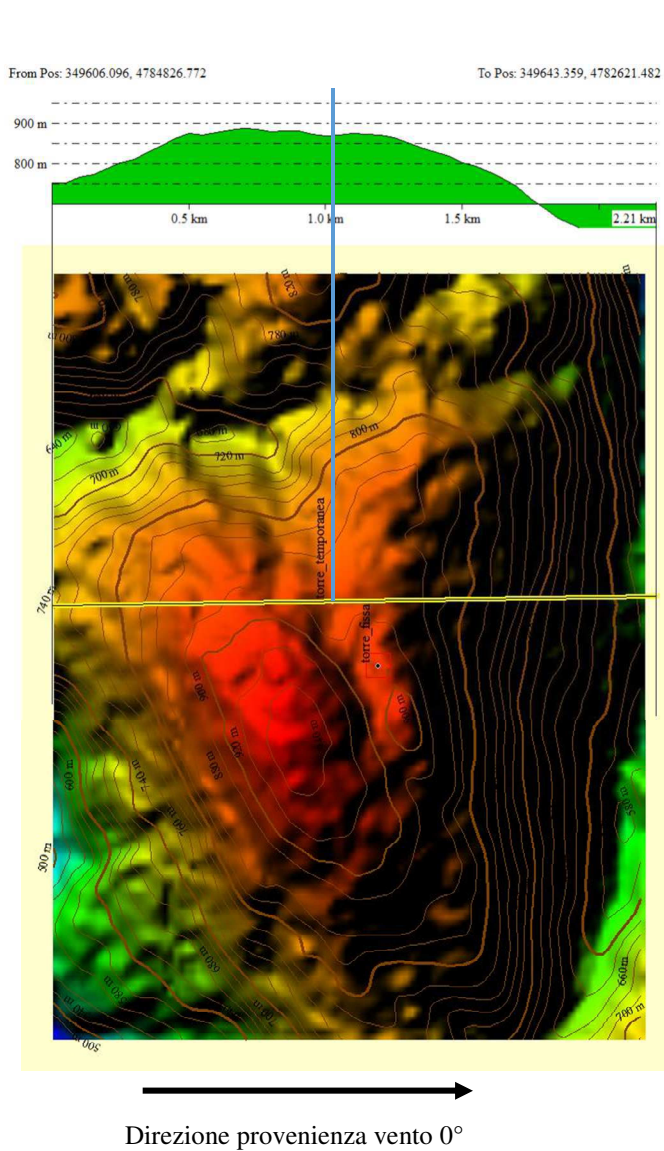
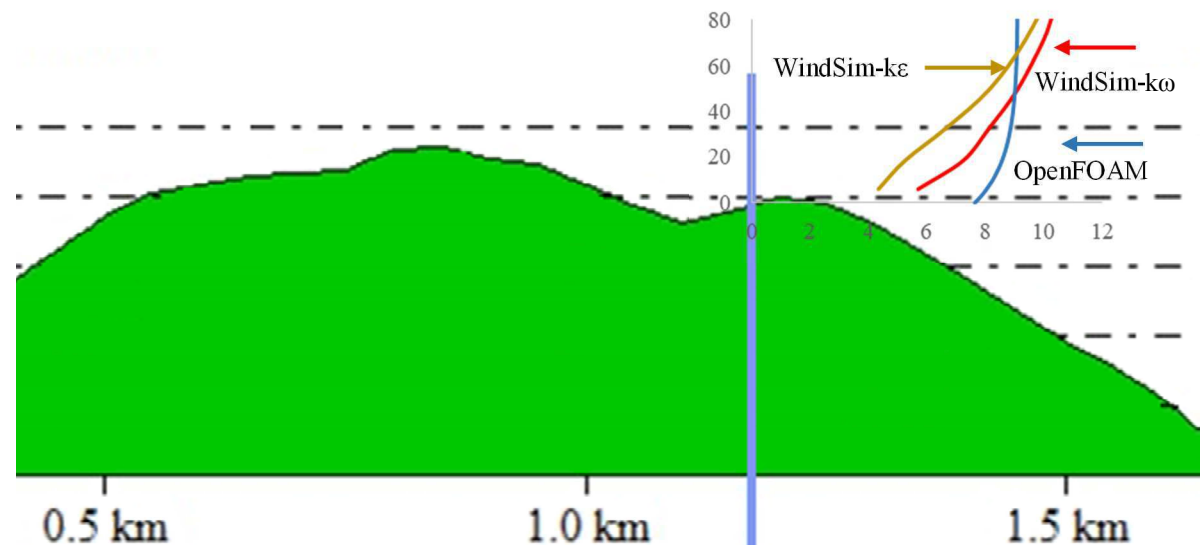
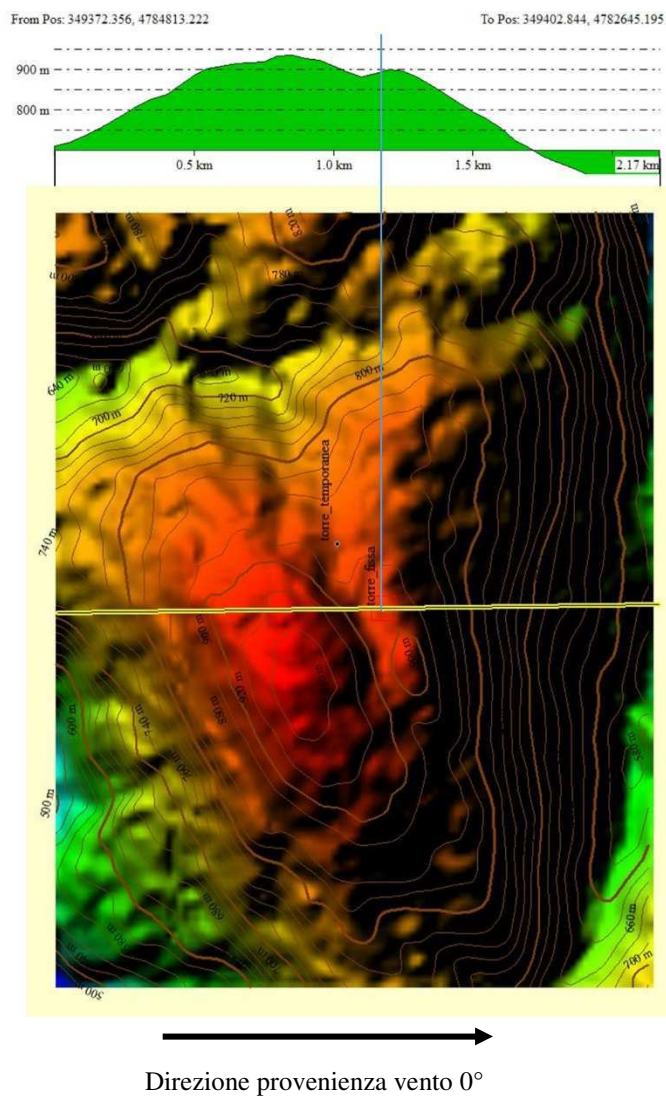


Fig. 91: Analisi dei risultati-torre_temporanea-0°



Vertical_profile_torre_fissa_0°

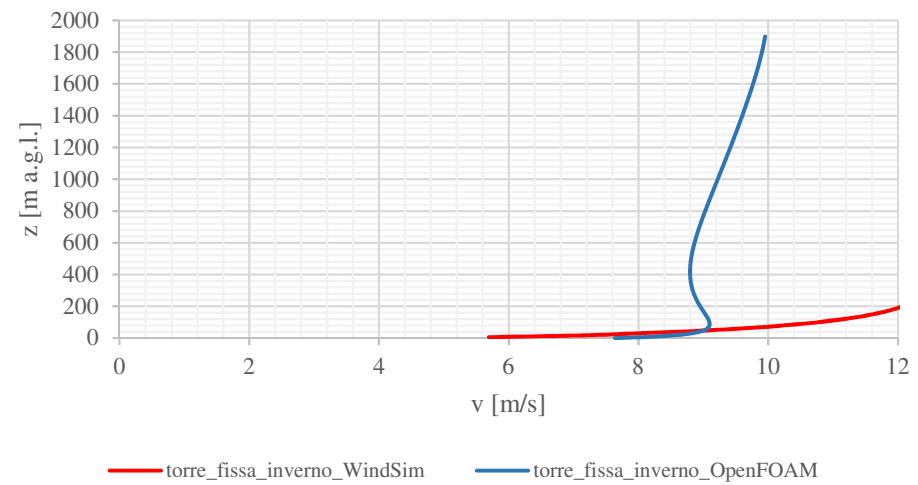


Fig. 92: Analisi dei risultati-torre_fissa-0°

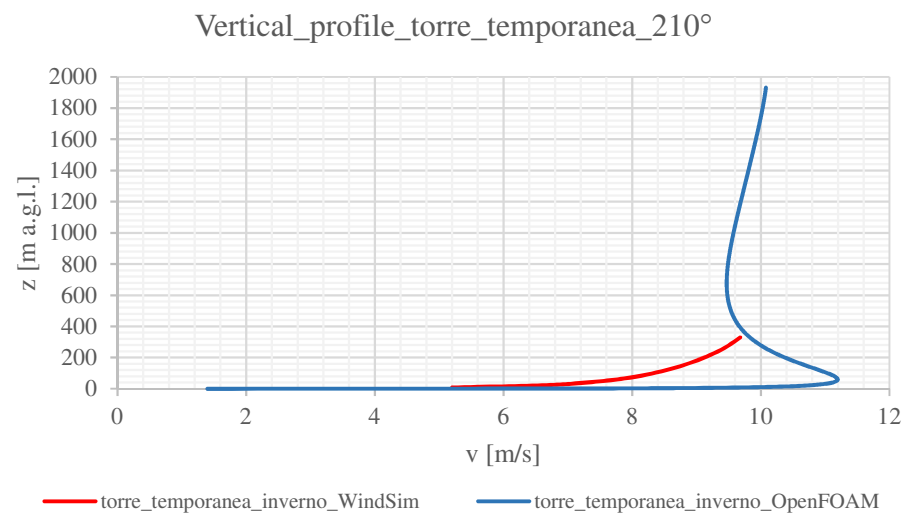
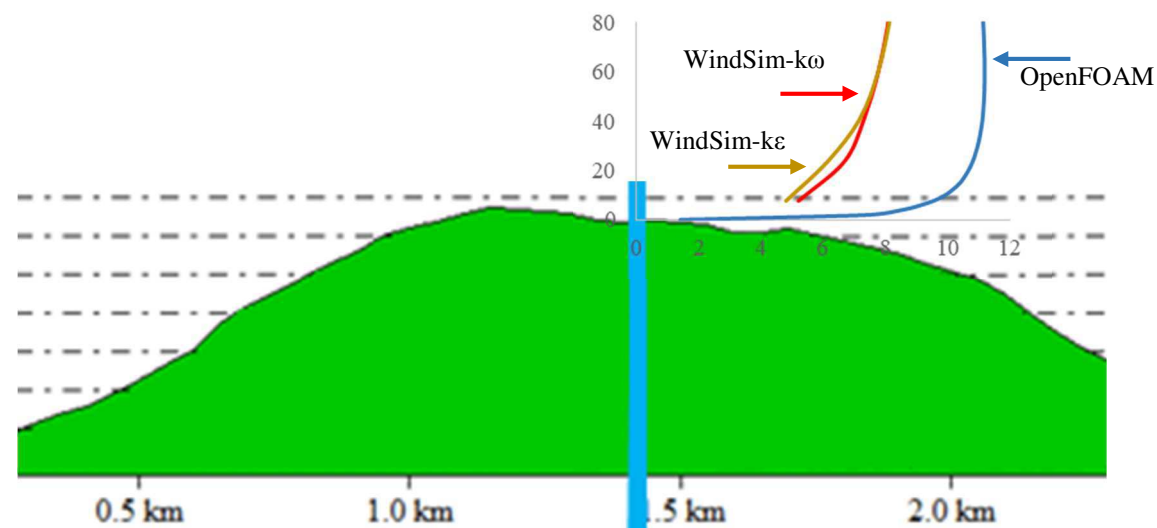
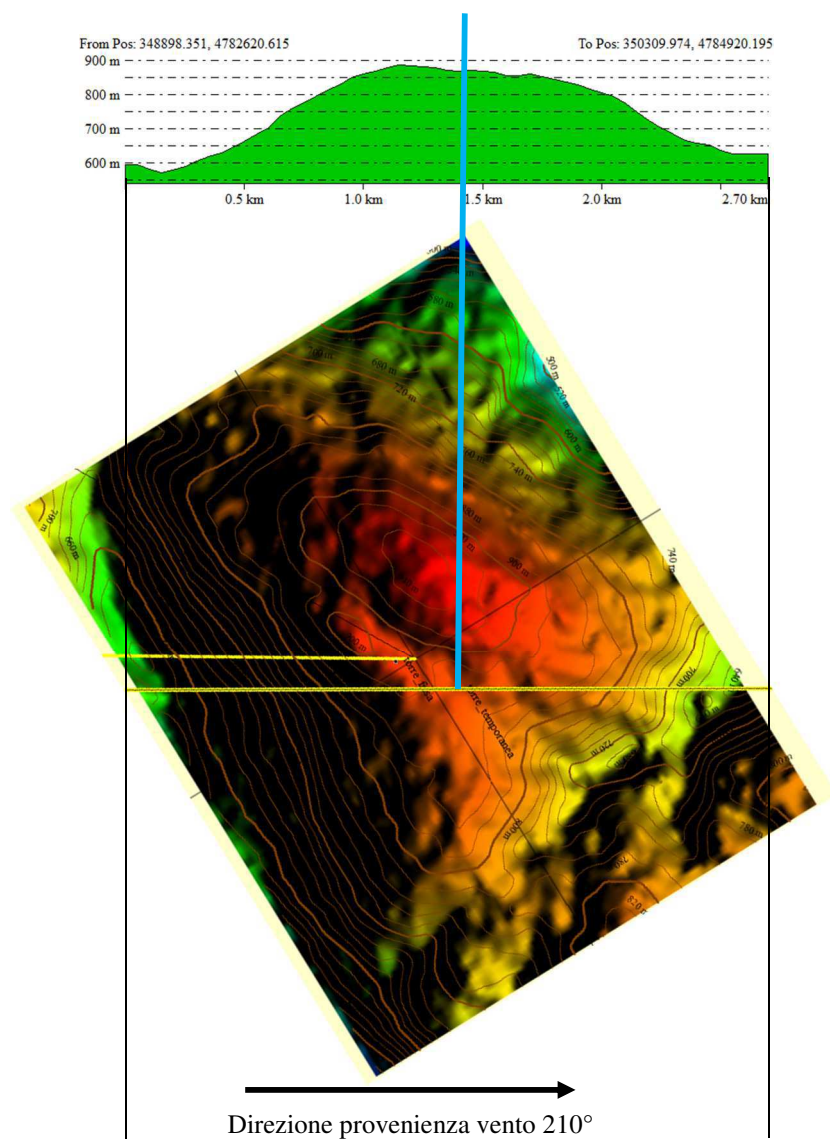
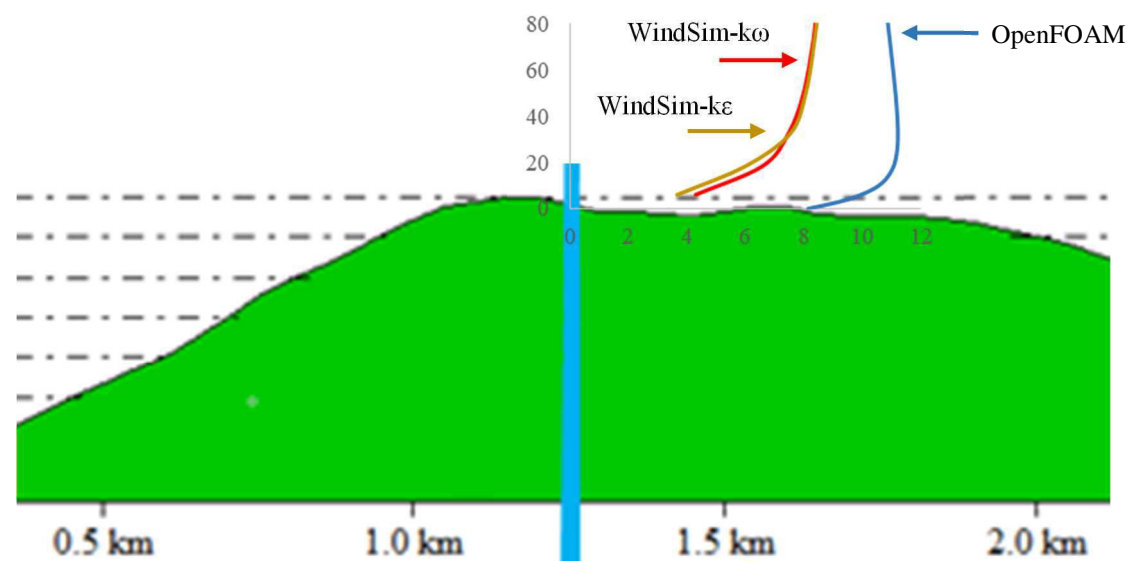
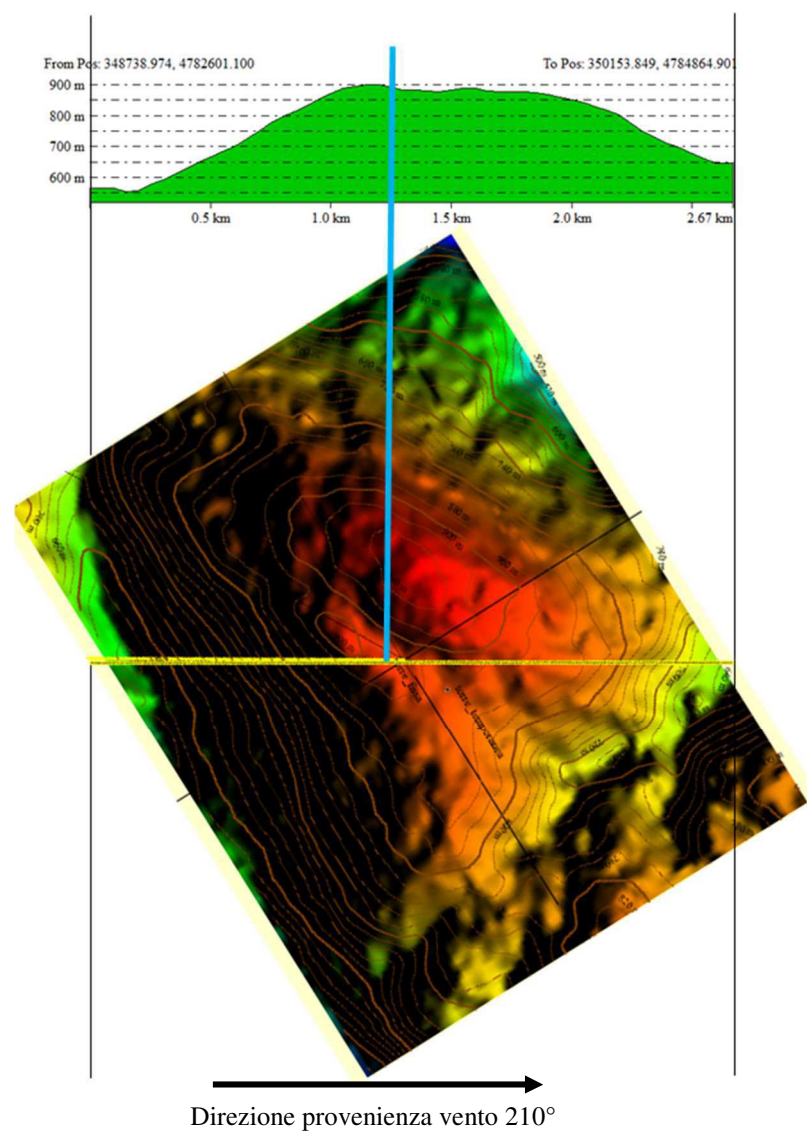


Fig. 93: Analisi dei risultati-torre_temporanea 210°



Vertical_profile_torre_fissa_210°

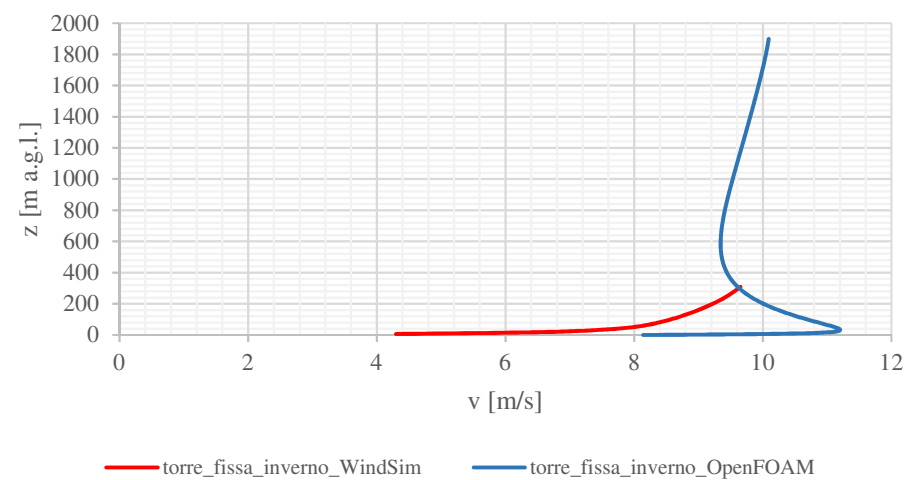


Fig. 94: Analisi dei risultati-torre_fissa-210°

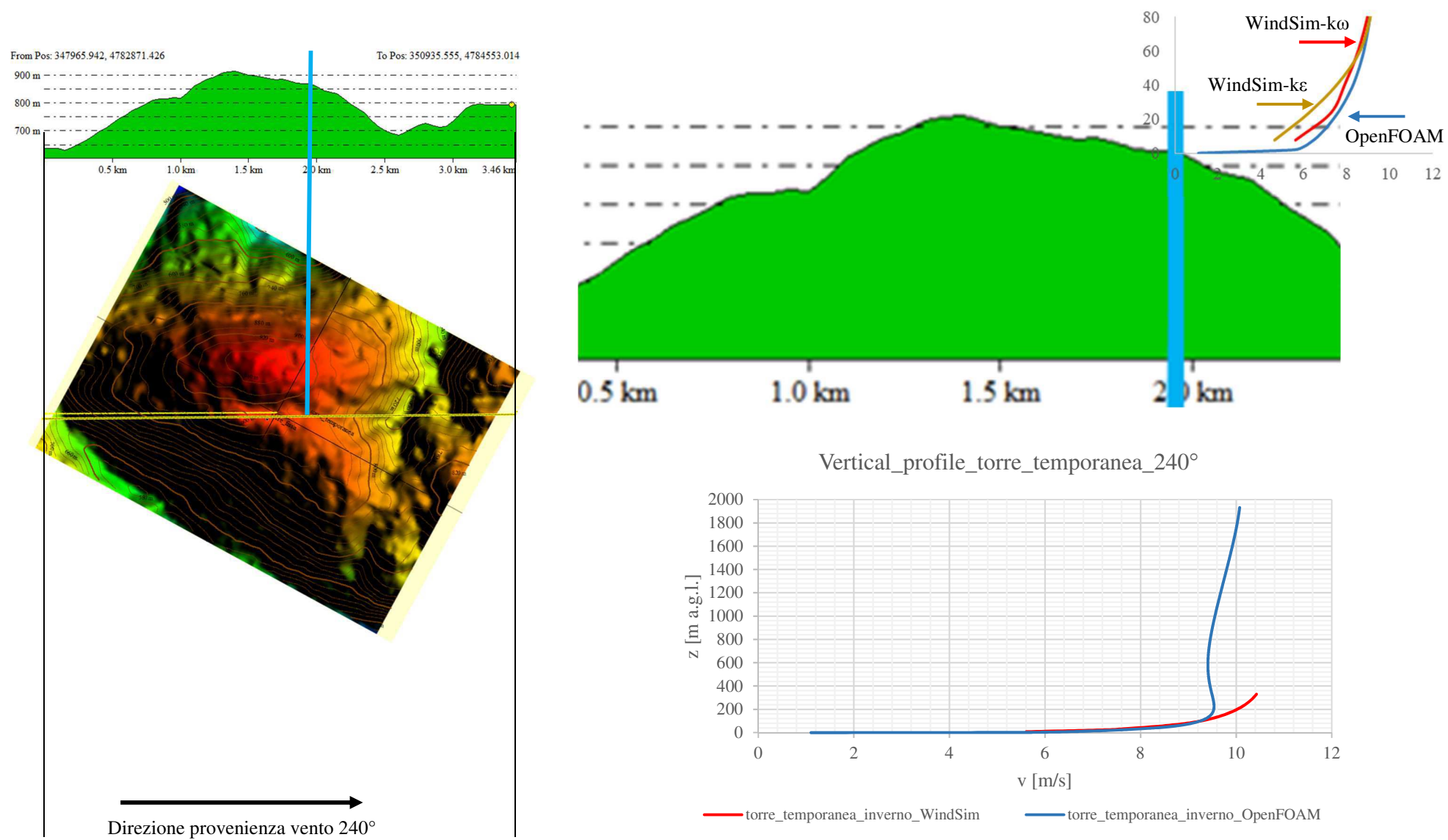
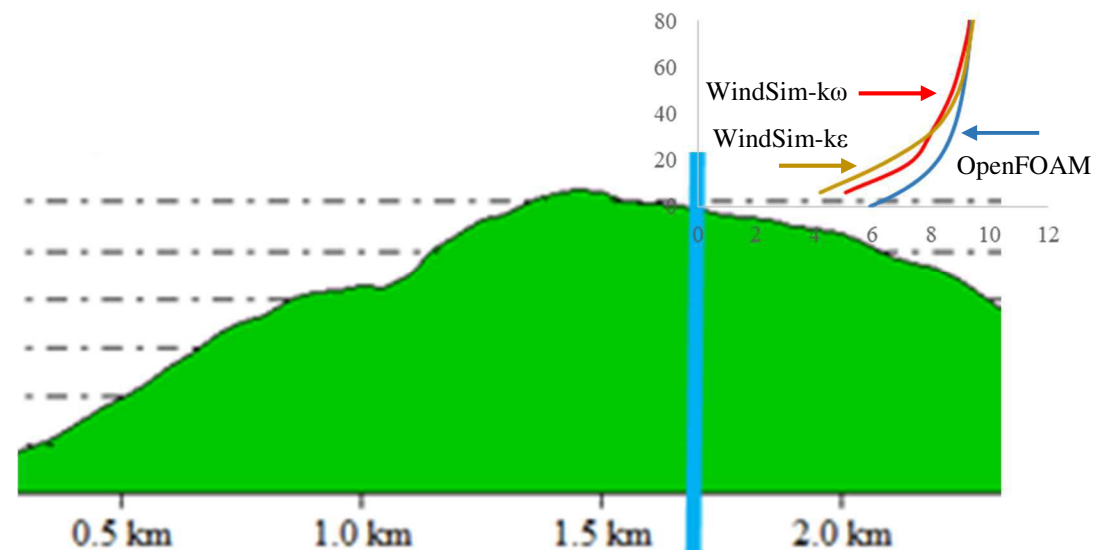
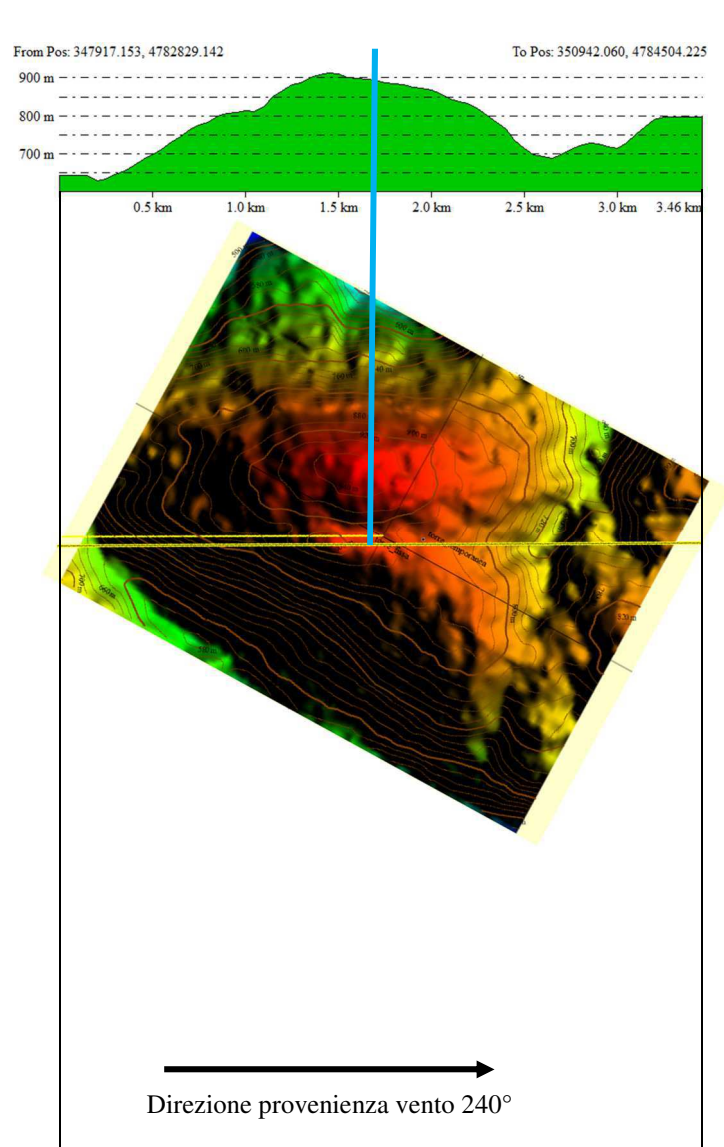


Fig. 95: Analisi dei risultati-torre_temporanea-240°



Vertical_profile_torre_fissa_240°

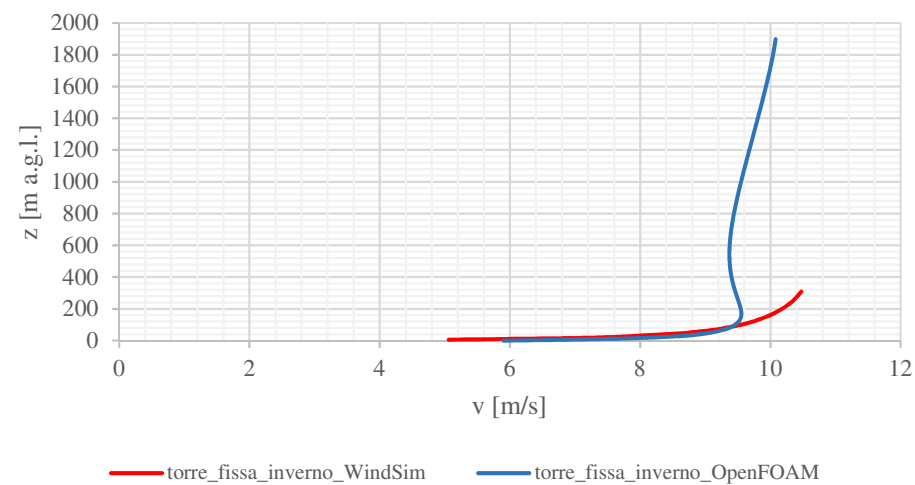


Fig. 96: Analisi dei risultati-torre_fissa-240°

INTRODUZIONE PARTE SECONDA

I droni hanno fatto il loro ingresso su larga scala quasi come giocattoli, come strumento per hobbysti per scopi ludici. Nei parchi si vedevano sempre di più persone che si divertivano a far volare questi splendidi oggetti, a scattare foto, a girare video. È innegabile che guidare un drone sia un'esperienza piacevole, ancor di più costruirsi uno. Col tempo però si è iniziato a capire che le loro potenzialità andavano ben oltre la semplice possibilità di divertimento. Nell'arco di qualche anno, anche meno, la tecnologia che supporta questo mondo è evoluta a tal punto che era ormai chiaro che con questi strumenti si poteva fare molto di più. Oggetti piccolissimi erano diventati in grado di fare cose impressionanti. È così che ha iniziato a diffondersi la cultura dell'uso professionale del drone. I primi sono stati probabilmente i fotografi, dato che il passo tra lo scattare foto per usi ricreativi e farlo per usi professionali è veramente molto breve. Dalle foto si è passati velocemente alla termografia: quale modo più comodo per indagare le dispersioni termiche di un edificio se non quello di far scansionare la facciata da un drone equipaggiato con una macchina termografica? E dagli edifici la termografia si è rapidamente estesa ai parchi fotovoltaici. La tecnologia, poi, è cresciuta ancora, e si sono sviluppati droni più grandi e potenti che hanno ulteriormente ampliato il range delle possibili applicazioni. Era possibile trasportare oggetti, strumenti più pesanti e percorrere distanze maggiori. E dai fini commerciali e professionali è stato possibile passare ad un loro utilizzo con obiettivi di ricerca scientifica. Qui si apre uno scenario pressoché illimitato: secondo quanto riportato dalla rivista *Dronezine* in un articolo di Luca Masali pubblicato il 9 luglio 2018, "Dallo studio di energie alternative per i droni del futuro alla ricerca su come far arrivare i farmaci agricoli alle piante senza che il vento se li porti via, dal consegnare in fretta merci anche per uso medico all'identificazione dei droni in volo, alla manutenzione dei radar del controllo aereo, la ricerca in Italia è più viva che mai, anche nel settore dei droni." Il mondo universitario è quasi impazzito per l'utilizzo dei droni, e poiché nelle università italiane menti brillanti, ingegno, spirito di iniziativa non mancano, i risultati sono stati sorprendenti, straordinari: droni di precisione per l'agricoltura, per il trasporto dei farmaci, prototipi che si ricaricano ad energia solare, i ricercatori italiani hanno esplorato frontiere nuove portando a casa risultati grandiosi.

Anche l'Università Politecnica delle Marche ha voluto seguire questa nuova scia tecnologica, in un'ottica, però leggermente diversa: piuttosto che sviluppare un drone che fosse in grado di compiere un'attività specifica, si è

cercato di creare una realtà in cui con più droni si potessero fare più cose, consentendo a qualsiasi docente e ricercatore fosse interessato, di portare avanti la propria ricerca con l'ausilio di questi strumenti potendo scegliere quello che meglio risponde alle sue esigenze. È così che sono diventate possibili attività come indagini sullo stato di manutenzione delle turbine eoliche, indagini termografiche ad ampio raggio, analisi della qualità dell'aria ed indagini circa lo stato di salute delle vegetazioni. Queste sono le attività attualmente portate avanti, ma non sono certo le uniche possibili. Nei capitoli successivi verrà spiegato più approfonditamente perché si è deciso di portare avanti proprio queste attività e da dove è nata l'idea.

La predisposizione di una simile infrastruttura, che mette l'Ateneo in condizione di poter operare con i droni, è stata possibile tramite il progetto strategico di ateneo A.D.E.L.E. Aerial Drone for Environmental and Energy researches. Tramite i finanziamenti ricevuti per questo progetto è stato possibile creare all'interno del dipartimento DIISM della facoltà di Ingegneria un vero e proprio laboratorio per la costruzione e la manutenzione dei droni, formare una squadra di piloti abilitati ENAC ed acquistare quanto necessario per avviare le ricerche. I piloti fanno parte del personale dell'Ateneo e sono abilitati alla guida di droni fino alla massima categoria consentita dalle normative vigenti in materia ovvero droni che abbiano un peso massimo ad decollo fino a 25kg. Il fatto che i piloti facessero parte del personale interno dell'Ateneo è molto importante perché consente di averne sempre uno disponibile per poter effettuare le missioni.

All'interno di questo scenario si inserisce l'attività portata avanti dalla scrivente, membro del gruppo di ricerca che ha avuto il compito dello sviluppo fisico dei droni.

Nei successivi capitoli verrà descritta l'attività di ricerca, le linee guida del lavoro svolto e le scelte che hanno condotto ai risultati finali. Trattandosi di una tematica molto ampia, si premette che non tutte le attività sono state portate a compimento. Si potrebbe quasi dire, in realtà, che lo sviluppo di un drone potrebbe non avere mai fine perché la continua novità nel campo tecnologico spinge spesso a fare un passo indietro e modificare degli aspetti che possono essere migliorati grazie al sopraggiungere di sistemi che fino a poco tempo prima non erano disponibili. Ad ogni modo la conclusione delle attività non ultimate sarà affidata ai colleghi dottorandi.

CAPITOLO 4

UN DRONE ESACOTTERO CON SISTEMA ANTI-COLLISIONE

INTRODUZIONE

Quando la scrivente ha intrapreso il suo percorso all'interno del dipartimento DIISM della facoltà di Ingegneria in qualità di dottoranda, un precedente gruppo di ricerca si era dedicato allo sviluppo di un drone esacottero finalizzato ad ispezioni su turbine eoliche ed impianti fotovoltaici. Il drone era già pronto e funzionante, pertanto la scrivente, assieme ad un altro gruppo di ricerca, ha concentrato la propria attività sulla prototipazione di un sistema anti-collisione il cui scopo era quello di evitare gli urti contro le pale della turbina durante le normali operazioni di ispezione.

Di seguito si riportano brevemente le considerazioni che ci hanno portato alla decisione di sviluppare tale drone ed il perché del sistema di anti-collisione. Dalle attività svolte tramite il centro WEST-lab presso il sito di Serrapetrona abbiamo potuto constatare personalmente quanto siano difficoltose e pericolose le attività di ispezione di una turbina eolica. In un sito come quello in esame le condizioni atmosferiche possono cambiare in tempi relativamente brevi, anche nell'arco di qualche ora, e questi tempi sono gli stessi che servono ad un operatore per avviare la procedura di ispezione in cima alla torre esternamente alla pala. L'arrampicata in cima alla torre e le ispezioni condotte all'esterno della navicella sono operazioni che richiedono come minimo qualche ora, ed il sopraggiungere di un temporale mentre l'operatore si trova ad espletare le proprie attività è una situazione che può verificarsi facilmente. Le ispezioni però sono fondamentali per garantire il costante mantenimento della massima efficienza e produttività; il deterioramento delle pale può causare riduzioni ingenti nella produzione di energia, nonché, nella peggiore delle situazioni, catastrofici e costosissimi collassi.

Ci siamo quindi chiesti: come poter essere di supporto alle ispezioni su turbine eoliche? Come poter rendere meno lunghe e pericolose queste operazioni?

Da qui la scelta di dedicare un drone a queste attività. Un mezzo aereo a pilotaggio remoto che potesse consentire ispezioni senza il coinvolgimento diretto di personale, e quindi aumento della sicurezza connessa, con tempi associati notevolmente ridotti.

Si poneva poi una seconda questione: la criticità maggiore delle operazioni di ispezione con i droni è il possibile impatto contro gli oggetti stessi da ispezionare. Le cause potrebbero essere un'improvvisa folata di vento, una manovra errata dell'operatore, la perdita di controllo conseguente ad una perdita di segnale o l'avaria di un componente del sistema. Il drone doveva quindi essere in grado di prevenire queste situazioni o quantomeno, nel caso in cui si fossero verificate, di reagire e uscire dalla condizione di pericolo senza provocare danni. Sarebbe infatti assurdo se uno strumento utilizzato per la rilevazione di difetti, danni o cricche, producesse esso stesso un danno. Si è deciso così di sviluppare il sistema di sicurezza anti-urto descritto nei paragrafi successivi, per gestire l'occorrenza dell'impatto.

4.1 IL DRONE ESACOTTERO

Per chiarezza e completezza di trattazione verrà ora brevemente descritta la struttura del drone esacottero che, si precisa, è stata sviluppata prima dell'inizio del dottorato della scrivente. Per questo motivo non è stato dedicato ampio spazio alla trattazione del drone in sé, ma ci si è concentrati sulle fasi successive a cui ha preso parte anche la scrivente.

Poiché questa rappresentava la prima esperienza nel mondo dei droni, la scelta non è stata quella di costruirne uno ex-novo, ma quella di acquistare un telaio già pronto e concentrare l'attenzione sulla comprensione e la scelta degli elementi elettronici necessari a far volare il mezzo, in gergo avionica di bordo. La scelta è stata guidata dalla volontà di procedere per piccoli passi e quindi studiare prima attentamente l'elettronica, poi, in una eventuale seconda fase, concentrarsi anche sul telaio vero e proprio.

Il telaio acquistato è quello di un esacottero DYS 800 V6. Si è scelto un esacottero perché più stabile e sicuro rispetto ad un quadricottero (in caso di avaria ad un motore gli altri cinque riescono comunque a compensare la perdita di spinta continuando a sostenere il drone), ma meno ingombrante rispetto ad un ottocottero.



Fig. 97: Drone esacottero DYS 800 V6: vista generale e dettaglio

Il telaio è formato da due piastre esagonali in carbonio parallele tra loro; su quella inferiore sono stampati i circuiti che distribuiscono la potenza elettrica dalle batterie, collegate alle porte di input dalla scheda, agli ESCs dei motori ed alle porte di output a 12V e 5V integrate sempre nella scheda; la piastra superiore funge invece da base per l'alloggiamento dei vari dispositivi. Le batterie vengono posizionate nelle due piastre più piccole in cima.

Tra le due piastre centrali sono collegati i bracci a "Y" che sostengono i motori, cavi poiché al loro interno trovano sede gli ESC ed i cavi di collegamento ai motori. Questi ultimi sono già integrati nel telaio, non sono stati acquistati separatamente.

CARATTERISTICHE DEL TELAIO

Lunghezza diagonale	800mm
Peso del singolo braccio inclusi ESC, motore ed eliche	750g
Dimensioni del nucleo centrale	255(L)x 230(W)x60(H)mm
Peso del nucleo centrale	950g
Dimensioni carrello	310(L)x430(W)x320(H)mm
Peso complessivo	3.4kg

MOTORI

Dimensioni dello statore	41x14mm
KV	400rpm/V
Potenza massima	500W
Peso	146g

ESC

Tensione di alimentazione	6S LiPo
Massima corrente	40A

ELICHE

Bipala in fibra di carbonio	15x55inch
-----------------------------	-----------

CONFIGURAZIONE DI VOLO

Peso consigliato al decollo	4-10kg
Alimentazione	6S LiPo, 10000-20000mAh
Potenza massima	3000W
Tempo di volo	20min

Tab. 19: Caratteristiche del drone esacottero

I motori sono motori elettrici a corrente continua a magneti permanenti brushless (senza spazzole). Rispetto ai motori con i contatti a spazzole hanno un attrito minore e quindi una maggior efficienza e una vita più lunga in quanto la commutazione è gestita elettricamente e non meccanicamente. Infatti sullo statore sono fissati gli avvolgimenti di induttore, mentre sul rotore ci sono i magneti permanenti e il ponte diodi di conversione corrente alternata/continua; essendo solidali al rotore non è necessario il contatto strisciante tipico dei motori tradizionali. I magneti permanenti si trovano in serie lungo il rotore l'uno ha polarità opposta rispetto a quello adiacente. La corrente di polarizzazione dello statore è fornita dagli ESC (Electronic Speed Controller); questi componenti sono dei regolatori di velocità il cui compito è quello di fornire al motore esattamente il contributo di corrente richiesto dal carico.

Per poter pilotare un drone, esso ha bisogno innanzitutto di un sistema che possa inviare da terra i comandi, una trasmittente o radiocomando, e di un sistema a bordo che possa riceverli, ricevente. Nel caso del drone esacottero si sono scelte una trasmittente Spektrum DX18t a 10 canali ed una ricevente anch'essa Spektrum modello AR12020 a 12 canali. La trasmissione dei comandi dalla trasmittente alla ricevente avviene tramite onde radio con lunghezza d'onda pari a 2.4GHz.

I comandi ricevuti dalla ricevente devono poi essere processati ed inviati ai motori. È qui che entra in gioco il vero e proprio cuore di un drone, il flight controller. È l'elemento che, una volta acquisito il segnale e quindi l'intenzione del pilota di far compiere al mezzo uno specifico movimento, lo rielabora e lo invia ai motori facendogli compiere quella precisa operazione. Senza questo elemento il drone sarebbe praticamente ingovernabile perché risulterebbe guidato esclusivamente dai segnali della ricevente e non riceverebbe tutte quelle micro compensazioni necessarie per reagire ad esempio ad una variazione nella velocità del vento. Il funzionamento è il seguente: se l'operatore vuole effettuare una certa manovra, la ricevente comunica l'informazione al flight controller, e questo per completare l'operazione, al suo interno ha tipicamente:

-
- Accelerometri, che misurano l'accelerazione in ognuna delle tre direzioni
 - Inclinatori, che gli consentono di sapere di quanto è inclinato il mezzo
 - Giroscopi che vanno a correggere le variazioni di inclinazione indesiderate
 - Una bussola che gli permette di conoscere la posizione del NORD geografico e la direzione verso cui sta andando il drone
 - Un sensore di pressione utilizzato per misurare l'altezza dal terreno.

Tutti questi sensori sono inseriti all'interno dell'IMU, Inertial Management Unit, che è il cervello del flight controller.

Il flight controller scelto per il drone esacottero è il NAZA M V2 prodotto dalla DJI, una delle aziende leader nel settore.

Al suo interno è incorporata un'IMU che comprende, nella fattispecie, un accelerometro, un giroscopio a tre assi ed un sensore di pressione barometrica per il controllo della quota.

Un dispositivo di estrema importanza, che garantisce una costante alimentazione a tutti i componenti del multi-rotore e in modo particolare all'unità centrale, è la PMU, Power Management Unit. La PMU regola automaticamente la tensione e la corrente necessaria a far funzionare il flight controller ed il GPS e funge da hub per il trasferimento dei dati dal GPS verso il flight controller.

Per quanto riguarda, infine, la trasmissione dei dati di volo a terra e la comunicazione remota con il flight controller, e quindi il drone, questo compito è affidato al DataLink, un sistema composto da una unità air a bordo drone ed una unità ground a terra costantemente in comunicazione tra loro e tramite le quali è possibile monitorare in maniera continua lo stato del drone, la sua posizione, parametri come lo stato di carica delle batterie ecc. L'unità ground è collegata a sua volta ad un pc a formare quella che viene definita Ground Station, ovvero un sistema di ricezione dei dati telemetrici che, tramite apposito software, possono essere visualizzati a schermo. Non solo, in questo modo è anche possibile programmare il drone soprattutto per quel che riguarda le missioni con punti fissi, ovvero percorsi ben precisi che vengono inviati al flight controller affinché lui li segua durante il volo.

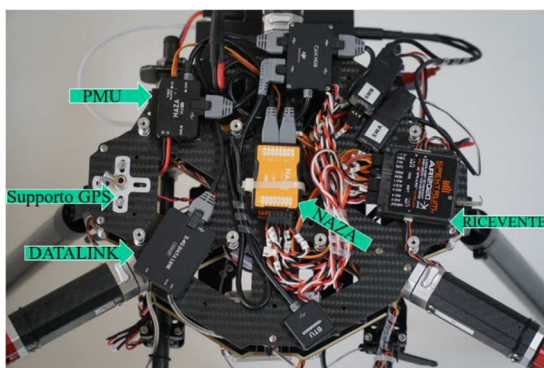


Fig. 98: Nucleo centrale del drone esacottero con i sistemi che compongono l'avionica di bordo

Per quanto riguarda, invece, le attrezzature installate a bordo con cui poter effettuare le ispezioni sulle turbine eoliche, queste comprendono una termocamera Optris PI450 Lightweight della Optris Infrared Thermometers ed una GoPro Hero 3 Black Edition.

Di seguito le principali caratteristiche delle camere.

OPTRIS PI450 LIGHTWEIGHT

Sensore termico	Microbolometrico non raffreddato UFPA
Risoluzione ottica	328 x 288 pixel
Dimensione del pixel	25 x 25µm
Range spettrale	7 – 13µm
Frame rate	80Hz
Ottiche (FOV)	38° x 29° / f = 15mm
Sensibilità termica (NEDT)	0.04K
Accuratezza	± 2°C
Tensione di alimentazione	5 V via USB
Dimensioni	46mm x 56mm x 90mm / IP67
Peso	380g, incluso il mini PC

Tab. 20: Caratteristiche della termocamera Optris PI450

Le termocamera può essere utilizzata come strumento portatile o per l'installazione fissa. È possibile registrare immagini (snapshots) o video sequenze.

L'elemento rivelatore è costituito da sensori termici microbolometrici non raffreddati (UFPA- uncooled focal plane array) da 382 x 288 pixel e dimensioni del pixel di 25 x 25µm. Gli obiettivi intercambiabili consentono l'adattamento alle dimensioni dell'oggetto e a distanze differenti, quello a nostra disposizione ha una lunghezza focale di 15 mm e un angolo di 38°x29°. La termocamera si collega al suo mini PC, installato anch'esso a bordo del drone, tramite il cavo USB in dotazione ed è subito pronta per l'uso.

Il mini PC viene alimentato direttamente dal pacco batterie del drone. L'alimentazione richiesta è di 12V.

Per quanto riguarda la visualizzazione dello streaming video da remoto, questa è resa possibile grazie al collegamento dell'uscita video AV ad un video-trasmettitore Aomway da 5.8GHz e 600mW; a terra un monitor con ricevitore integrato capta automaticamente il segnale e permette di osservare l'inquadratura della termocamera.

GOPRO HERO3 BLACK EDITION

Sensore	CMOS 12Mp
Risoluzione video	4K: 3840x2160p 15fps 2.7K: 2704x1524p 30fps 1440p: 1920x1440p 48fps Full HD: 1920x1080p 60fps HD: 1280x720 120fps
Risoluzione foto massima	12 Megapixel
Connettività	Micro HDMI Wi-Fi Micro SB
Peso	186g compresa custodia protettiva

Tab. 21: Caratteristica telecamera GoPro Hero 3 Black Edition

La GoPro Hero 3 Black Edition è utilizzata per affiancare l'analisi termografica per individuare gli ombreggiamenti o gli eventuali corpi estranei che possono alterare l'interpretazione dell'immagine se non correttamente individuati.

Lo streaming video è reso possibile grazie al DJI Lightbridge, un sistema di trasmissione video ad alta definizione a 2,4 GHz. È composto da un'unità air installata a bordo del drone e collegata alla porta micro HDMI della GoPro, e di un'unità ground che viene collegata ad un monitor con ingresso HDMI.



Fig. 99: Vista del drone completo a sinistra e dettaglio delle attrezzature GoPro Hero 3 e Optris PI450

4.2 IL SISTEMA ANTI-COLLISIONE

Si entra ora più nello specifico del lavoro affrontato. Si è detto che l'applicazione principale per cui è stato sviluppato il drone esacottero è l'ispezione visiva e nell'infrarosso delle turbine eoliche e che uno degli aspetti più critici connessi con questo tipo di attività è il rischio che il mezzo venga ad impattare contro di esse per cause che possono non dipendere dal pilota. Era quindi perentorio che il drone fosse in grado di evitare questo tipo di situazioni.

Si è dovuto così pensare ad un sistema di sicurezza anti-urto per gestire l'occorrenza dell'impatto, sia dal punto di vista hardware che software. Per hardware si intende la sensoristica capace di rilevare l'urto o la possibilità che questo avvenga, per software si intende invece l'acquisitore dei segnali provenienti dai sensori, la loro elaborazione da e infine la logica di programmazione e di gestione dei comandi da inviare all'APR per uscire dallo stato di pericolo.

Innanzitutto ci si è concentrati sull'analisi dei sensori disponibili in mercato, valutando i vantaggi e gli svantaggi per ciascuna tipologia. Le tre categorie individuate sono quelle dei sensori ad ultrasuoni, sensori ottici ad infrarossi e sensori a contatto.

Gli ultrasuoni sfruttano la proprietà secondo la quale un'onda si propaga nel mezzo con una velocità che dipende dal mezzo stesso ed è soggetta a fenomeni di riflessione, trasmissione e assorbimento ogni volta che incontrano un cambiamento del mezzo di propagazione. È proprio il fenomeno fisico della riflessione che viene sfruttato con questi strumenti di misura: viene inviato un impulso ultrasonoro e contando il tempo passato tra

l'emissione dell'impulso e la ricezione dell'eco, nota la velocità di propagazione si ha l'informazione sulla distanza tra il sensore e la superficie di riflessione.

Vantaggi generali di questo tipo di sensore:

- Percepisce l'oggetto da distanze di diversi metri, a seconda del tipo specifico, ed è quindi adatto ad evitare la collisione con l'oggetto rilevato.

Svantaggi:

- Direzionalità: l'angolo di ricezione dell'oggetto è di solito piuttosto ristretto quindi per coprire tutta la superficie laterale del drone occorrerebbe installare più sensori andando a incrementare il carico elettrico complessivo
- Caratteristiche della superficie colpita dall'onda: la superficie non deve essere curva, altrimenti l'onda riflessa non ritorna seguendo il percorso di andata, di conseguenza il sensore non percepisce la presenza della superficie.

I sensori ottici ad infrarossi sfruttano invece la trasmissione di un'onda elettromagnetica nel campo dell'infrarosso. Ne esistono di diverse tipologie: alcuni sono sensibili all'interruzione dell'onda elettromagnetica causata dall'intercettazione del raggio da parte di un oggetto, altri sono invece sensibili alla riflessione dell'onda da parte di un corpo.

In generale i vantaggi di questi sensori sono:

- Evitano la collisione con l'oggetto intercettato
- Non hanno parti meccaniche in movimento
- I tempi di risposta sono brevissimi
- Sono particolarmente semplici da utilizzare

Svantaggi:

- L'angolo di ricezione è nuovamente ristretto
- Grandezza oggetto: se l'oggetto ha una sezione sul piano perpendicolare al raggio piccola può passare inosservato in quanto il LED IR emette un solo fascio centrale verso il ricevitore
- Consumo di potenza e numero di sensori: anche in questo caso servirebbero più sensori andando ad incrementare il carico elettrico delle batterie

La terza tipologia osservata è stata quella dei sensori a contatto. Questi sono più semplici, ma di fronte a questa semplicità sono anche più affidabili e sicuri meccanicamente in occasione di un urto. I sensori a contatto, infatti, non sono in grado di vedere un oggetto a distanza e prevenire l'impatto, ma rilevano invece il contatto, la collisione del drone contro un corpo.

Il loro compito non è quindi quello di evitare l'urto ma quello di limitare il danno nel caso in cui questo avvenga.

Il sensore in sé non è altro che un interruttore che apre un circuito elettrico quando si verifica l'occorrenza di urto.

Vantaggi:

- Semplicità del sistema: non vengono richiesti sensori sofisticati, ma è necessario un semplice interruttore
- Nessun assorbimento di potenza: non essendoci sensori alimentati non viene richiesta alla batteria potenza ulteriore
- Costo: il sistema è anche il più economico
- Sicurezza meccanica: trattandosi di un sistema puramente meccanico non ci sono rischi di failure associati invece all'uso dei sensori.

Svantaggi:

- Non è in grado di evitare l'urto: non si può captare l'oggetto prima che venga toccato
- Affidabilità meccanica: essendoci parti in movimento, l'usura può essere dannosa con il tempo e con l'esercizio del sistema e richiede quindi una adeguata manutenzione.

Alla luce delle descrizioni, fatte, in base all'analisi dei vantaggi e degli svantaggi propri dei sensori individuati ed in base al tipo di applicazione che si aveva in mente di sviluppare, si è deciso di procedere con la soluzione dei sensori a contatto ed accettare la possibilità di una collisione. La scelta è stata dettata principalmente dalla seguente riflessione: sensori elettrici corrono più il rischio di malfunzionamento rispetto a sensori meccanici, quindi si è preferito rischiare che il contatto avvenga ma preparandosi opportunamente all'evenienza piuttosto che rischiare di affidare tutto ad un sistema elettrico che per motivi come un falso contatto, un cortocircuito, una scarsa manutenzione del circuito, possa fallire nel suo scopo di rilevare un oggetto e causare comunque una collisione con potenziali danni ben maggiori.

4.2.1 I SENSORI A CONTATTO

Una volta presa la decisione circa la tipologia di sensori da utilizzare si è passati alla loro ingegnerizzazione. Si è deciso di realizzare il sensore a contatto tramite aste solidali ad ogni braccio motore; alla radice di ogni asta si trovano due piastrine metalliche, una solidale all'asta ed una solidale al supporto dell'asta. Lo scorrimento dell'asta al momento dell'impatto del

drone su una superficie causa la separazione delle due piastrine che, essendo conduttrici, permettono il passaggio di corrente se sono a contatto tra loro o, per l'appunto, l'apertura del circuito elettrico se vengono separate. L'apertura del circuito sarà percepita come segnale da un dispositivo capace di riceverlo e di prendere una decisione conseguente. Di questo aspetto se ne parlerà in seguito.

I parametri guida durante la prototipazione dei sensori sono stati:

- Leggerezza: le aste ed i loro supporti devono aggiungere un peso minimo al carico complessivo del drone
- Resistenza all'usura
- Sicurezza: l'impatto contro l'oggetto non deve causare danni all'oggetto colpito.

Per quanto riguarda il primo punto si è deciso di utilizzare l'alluminio per realizzare le aste poiché è il materiale che unisce meglio leggerezza, resistenza ed economicità. Hanno una sezione tubolare di diametro pari a 6mm e spessore di 1mm. Non seguono la direzione ad Y del braccio che sostiene il motore ma sono state piegate di 30° rispetto ad esso; in questo modo il punto finale dell'asta è in direzione radiale rispetto al cerchio che inviluppa l'esagono del telaio ed ha una distanza angolare di 60° con il punto finale dell'asta adiacente.

Il supporto che sostiene e fa da guida all'asta è stato realizzato in legno. Consiste in una C che si incastra sul braccio del motore con uno scasso centrale in cui si trovano le parti che costituiscono l'interruttore. Quando il drone urta, l'impulso dell'impatto viene trasferito all'asta, questa essendo rigida, ma libera di muoversi lungo la guida a sezione circolare comprime una molla, e la piastrina ad essa solidale si separa dall'altra piastrina, fissata invece al supporto, provocando l'apertura del circuito elettrico.

Trattandosi di parti in movimento, un requisito fondamentale, come già accennato in precedenza, era la resistenza all'usura. Proprio per questo motivo le aste sono state realizzate con tubolari a sezione circolare, poiché era quella che garantiva un miglior scorrimento. La guida e la boccola sono state invece realizzate in teflon, scelto perché ha un bassissimo coefficiente d'attrito e perché inerte all'acqua, quindi all'umidità.

Le sei aste sono poi collegate tra di loro con un filo ben teso. Lo scopo è quello di aggiungere un ulteriore grado di sicurezza proteggendo il drone da oggetti che possono attraversare lo spazio tra due aste adiacenti ed impattare contro le eliche. Il filo è parte integrante del sistema di anti-collisione perché essendo ben teso, provoca lo scorrimento delle aste se colpito da un oggetto.



Fig. 100: Vista del sistema anti-collisione assemblato e dettaglio dall'alto e dal basso dei supporti/sensori di contatto

4.2.2 SVILUPPO LATO HARDWARE

Dopo aver descritto i sensori si può passare a descrivere l'elemento il cui compito è quello di recepire il segnale dell'avvenuto urto e far compiere al drone una azione conseguente a quanto accaduto. Si è detto in precedenza che il cuore, il nucleo principale del drone è rappresentato dal flight controller, il Naza. Ci siamo chiesti: poiché è lui che gestisce il volo del mezzo, decidendo di fatto i movimenti da fare in relazione ai comandi ricevuti, non potrebbe essere sempre lui a leggere il segnale dell'avvenuto urto ed agire di conseguenza? Ebbene questo non è possibile. Dopo diversi tentativi ci siamo dovuti arrendere di fronte la natura chiusa del flight controller che non permette alcun tipo di programmazione se non nelle impostazioni di base accessibili tramite software dedicati e proprietari. Era quindi necessario ricorrere ad un'altra soluzione programmabile che potesse essere al tempo stessa riconosciuta dal Naza e che potesse in qualche modo interagire con esso. Da qui la scelta di utilizzare Arduino.

Arduino è una piattaforma elettronica hardware contenente circuiti stampati, un microcontrollore, un regolatore di tensione e le porte per l'ingresso dei connettori dei pin input/output. A questo hardware è associato anche un sistema software, Arduino IDE, Integrated Development Environment, disponibile per sistemi Windows, Linux e Mac, con il quale si possono scrivere programmi e progetti usando un linguaggio derivante dai più complessi linguaggi C e C++, ma più semplice e intuitivo, il linguaggio Wiring. Questo tipo di linguaggio risulta accessibile anche a chi è alle prime armi con l'informatica e non ha mai programmato precedentemente.

In questo lavoro è stato inizialmente utilizzato un Arduino Uno e successivamente Arduino Mega che appunto avendo un maggior numero di porte e un processore più potente ha permesso lo sviluppo del progetto nel suo completo.

Nonostante, la sua semplicità, Arduino è riuscito ad affermarsi brillantemente nel mercato ed è molto usato da studenti, programmatori, professionisti e non. Questo grazie ai suoi molti vantaggi rispetto ad altre piattaforme più costose:

- Economicità: il software è scaricabile gratuitamente e anche la scheda hardware ha un prezzo sicuramente accessibile
- Semplicità: Arduino nasce proprio con l'intento di avvicinare chi non è pratico né esperto di programmazione, studenti e/o professionisti che non si sono mai cimentati troppo in informatica ed un linguaggio meno difficile favorisce questo intento senza inficiare tuttavia sulle potenzialità della scheda e sulla possibilità di fare progetti complessi
- Open source ed estensibilità: l'essere open è un notevole punto di forza

Di contro si devono, per un'analisi oggettiva, considerare gli svantaggi, o perlomeno i punti deboli di questo ambiente di sviluppo:

- Arduino è subordinato ad un'elettronica di consumo, non si tratta di dispositivi, sensori, progettati e costruiti appositamente, non è dedicato ad una specifica applicazione, e mentre la sua vasta possibilità di utilizzo può essere vista come pregio, può essere vista altresì come un difetto, in quanto in qualche applicazione speciale, con specifiche più restrittive in termini di complessità e affidabilità potrebbe non risultare adeguato.

Ad ogni modo Arduino rispondeva perfettamente alle esigenze del progetto che stavamo affrontando.

Di seguito le caratteristiche principali della scheda Arduino Mega2560 utilizzata

Microcontrollore	ATmega2560
Voltaggio operativo	5V
Voltaggio input	7-12V
Digital I/O pin	54
PWM digital I/O pin	14
Analog input pin	16
Lunghezza	101.52mm
Larghezza	53.3mm
Peso	37g



Tab. 22: Caratteristiche del microcontrollore Arduino Mega2560

4.2.2.1 ACQUISIZIONE SEGNALI SERVO

La prima grande difficoltà riscontrata nel programmare un sistema di misura capace di recepire i comandi che vengono trasmessi dal radiocomando e i comandi con cui il flight controller comunica con i motori, è stata quella di capire la natura del segnale da leggere e quindi scrivere in Arduino.

Il microcontrollore è stato inserito tra la ricevente ed il Naza pertanto ha come ingresso il segnale che la ricevente invierebbe al Naza e come output il segnale che deve arrivare al Naza. Arduino quindi doveva essere in grado di leggere il segnale in ingresso, elaborarlo ed inviarlo nella sua forma corretta al flight controller. Si tratta essenzialmente di segnali che possono essere di due tipologie: PWM o PPM.

Il segnale PWM, dall'inglese Pulse Width Modulation ovvero modulazione della larghezza dell'impulso, è un segnale formato da un'onda quadra di ampiezza fissa e larghezza variabile. La sua principale caratteristica è il duty-cycle, ovvero il rapporto tra il tempo in cui l'onda quadra assume il valore alto ed il periodo T . Può assumere valori compresi tra 0 e 100%: un duty-cycle del 50% corrisponde a un'onda quadra che assume valore alto per il 50% del tempo e assume nel restante 50% un valore basso, un duty-cycle del 100% corrisponde a un segnale sempre alto, un duty-cycle dello 0% corrisponde a un segnale sempre basso quindi assenza di segnale.

In altre parole il duty-cycle è determinato dallo stato attivo del segnale PWM e viene espresso in percentuale (%) sul periodo totale.

Il segnale di tipo PPM (Pulse Position Modulation) prevede invece una modulazione in base alla posizione dell'impulso. Anche questo consiste in un treno di impulsi di lunghezza fissa e ampiezza che varia tra 2.5 e 5V a seconda dell'applicazione, mentre alle pause tra un impulso e il successivo è associato un voltaggio tra 0 e 0.5V.

Il segnale PPM è usato spesso dalle riceventi per comunicare con il flight controller, mentre il segnale servo è usato dal flight controller. Non può essere però definito un vero e proprio segnale PWM perché mentre il PWM ha un duty-cycle 0-100%, il segnale servo non ha un duty-cycle che copre tutto il periodo ma ha degli impulsi che variano da un minimo di 1 ms ad un massimo di 20ms con un periodo di 20ms.

Una volta decodificato il segnale dalla trasmittente, la ricevente invia segnali servo, uno per ogni canale al Naza, il quale poi attraverso una sua logica e programmazione agirà sui motori in modo da mettere in atto il comando richiesto a monte dal pilota.

Nell'immagine sotto si può vedere un esempio: nella prima riga la decodifica da parte della ricevente del segnale proveniente dalla trasmittente e nelle righe inferiori i segnali servo per ogni canale.

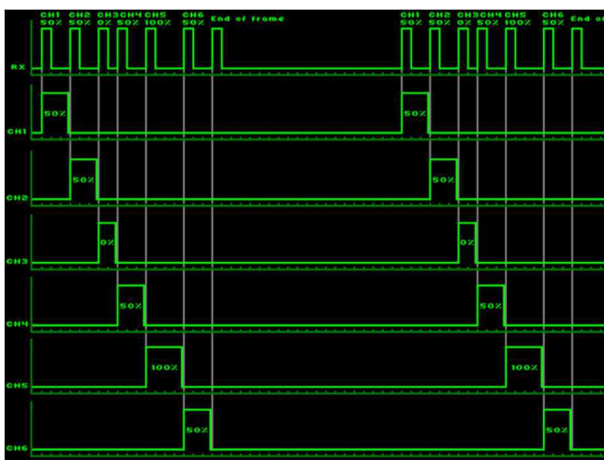


Fig. 101: Esempio di acquisizione segnali servo dalla ricevente al flight controller e dal flight controller verso i motori

Una volta capito cosa si deve acquisire ed interpretare, si è passati al mettere in pratica queste conoscenze. Per farlo ci si è avvalsi dell'utilizzo di alcune librerie, ovvero parti di codice già precompilate, che al momento opportuno vengono richiamate all'interno del programma che si sta sviluppando.

Per il lavoro che si sta descrivendo è stata usata la libreria RC, utile per analizzare i segnali verso e dalla ricevente.

Con Arduino, quindi, si è voluto leggere i segnali provenienti da due parti distinte del drone: lo stato dei motori, come questi vengono comandati dal

Naza, ed i comandi di volo di rollio e pitch che giungono invece dalla ricevente. Si è deciso di prendere solo i valori dei comandi di roll e pitch poiché sono quelli che determinano uno spostamento sul piano orizzontale di volo e sono quindi quelli che si intende manipolare nel caso di un eventuale urto. Se infatti viene dato solo il comando di rudder, il drone ruota mantenendo la quota e soprattutto la posizione in cui si trova, se invece viene imposto il solo comando di throttle, tutti i motori aumentano la velocità in modo uguale tra di loro, quindi il mezzo si alza o si abbassa a seconda del comando. Se, infine, viene dato un comando sia di rudder che di throttle, il drone gira su se stesso con una velocità che dipende dal comando di throttle. I valori dei segnali inviati dal Naza sono i seguenti:

- roll = 1115ms: rollio a destra
- roll = 1915ms: rollio a sinistra
- pitch = 1115ms: pitch verso il retro del drone
- pitch = 1195ms: pitch verso avanti del drone

4.2.2.2 MODULO MEMORIA SD

La shield SD per Arduino permette di salvare i dati letti in una scheda di memoria SD o micro SD; la lettura dei dati in ingresso sarebbe infatti inutile se fosse solo real time e non avesse la possibilità di essere salvata. La shield assicura questo salvataggio grazie alla comunicazione seriale SPI, Serial Peripheral Interface, un protocollo di comunicazione basato su un'architettura master/slave.

L'interfaccia hardware della comunicazione SPI è composta da quattro linee di collegamento (da cui anche il nome di 4 Wire Interface):

- SCLK (Serial CLock): questo canale passa il segnale di clock che serve per sincronizzare la trasmissione dei dati. È generato dal Master il cui compito è quello di avviare la comunicazione e fornire il clock allo Slave
- MISO (Master Input Slave Output): linea attraverso cui il dispositivo master riceve il dato seriale emesso dalla controparte slave
- MOSI (Master Output Slave Input): linea di comunicazione attraverso cui il dispositivo slave riceve il dato seriale emesso dal master
- SS (Slave Select): segnale viene emesso dal master per scegliere con quale dispositivo slave comunicare.

È possibile sia trasmettere che ricevere dati in contemporanea così come è possibile comunicare con più slave.

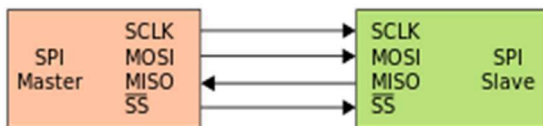


Fig. 102: Protocollo di comunicazione SPI

I pin MOSI, MISO e SCLK hanno ingressi fissati, che in Arduino Mega sono rispettivamente 51, 50, 52; il pin SS, invece, di default è il 53 ma può essere anche un altro pin purché debitamente dichiarato.

Anche in questo caso ci si è avvalsi dell'uso di alcune librerie, la libreria SPI e la libreria SD. La prima serve per avviare il protocollo SPI e permette la comunicazione tra microcontrollore principale e periferica slave, la seconda è quella tramite cui Arduino è in grado di aprire una determinata cartella, aprire un file se esistente o crearlo dal nuovo, scrivere i dati voluti e chiudere il file.

4.2.2.3 LETTURA DATI GPS

Al fine di avere una telemetria affidabile, veritiera e completa si è optato per estrarre dal Naza anche i valori di GPS. La lettura dei dati GPS comporta infatti i seguenti vantaggi:

- I dati acquisiti dal microcontrollore sono riferiti ad un preciso luogo e ad un preciso tempo
- Rende disponibile ed analizzabile la storia del volo dell'APR anche successivamente al volo stesso e senza la costrizione di utilizzare il programma delle missioni della DJI.

La lettura del GPS è stata resa possibile, nonostante il Naza fosse un sistema chiuso, grazie alla libreria NazaDecoder. Dal punto di vista hardware basta derivare dalla linea GPS-PMU il canale GND e il canale del segnale verso Arduino. Il canale del segnale andrà collegato ad una delle porte seriali rx. A livello software è poi la libreria NazaDecoder che una volta riconosciuto il flusso di dati lo analizza e lo decodifica estrapolando il valore dei dati che si vuole prendere. Di tutti i dati disponibili vengono rilevate le informazioni circa data e ora, latitudine, longitudine, velocità istantanea, numero di satelliti agganciati e altezza sul livello del mare.

4.2.2.4 REALIZZAZIONE DELL'HARDWARE

A questo punto si è passati alla realizzazione vera e propria dell'hardware. Per collegare tra loro tutti gli elementi sono state utilizzate delle schede forate su cui sono stati saldati i connettori ed i contatti per i vari segnali verso il microcontrollore. Ai terminali dei cavi sono stati poi collegati i cavi che dalle schede vanno verso i componenti del drone o verso Arduino. Ogni scheda ha perciò doppi cavi per i segnali, uno che arriva alla scheda e uno cortocircuitato che va verso Arduino portando l'informazione. In questo modo la scheda è un elemento fisso, ma se si vuole annullare una determinata lettura o una determinata funzione è sufficiente scollegare il connettore.

Tutti i dispositivi sono stati dunque organizzati nel seguente modo:

- Un supporto in cui si fissano le schede forate per i contatti, la board Arduino Mega2560 e la shield SD. Il supporto, in compensato, quindi molto leggero, è ancorato al telaio del drone tramite tondini in carbonio e una staffa. Il tutto viene poi chiuso da un coperchio nero di plastica per riparare i circuiti dagli agenti esterni e mantenere in posizione i cavi
- Una schedina dedicata ai sensori degli urti direttamente collegata al microcontrollore: si tratta di un circuito con una resistenza di pull-up di 220kΩ per leggere lo stato dell'interruttore; un capo dell'interruttore è collegato al GND della scheda, l'altro capo a monte della resistenza, è equipotenziale con il segnale inviato al pin. Così quando il circuito è chiuso, assenza di urto, il punto di derivazione ad Arduino sente una caduta di tensione pari a $V=RI$, generata dalla presenza della resistenza tra alimentazione della scheda e pin, se il circuito è aperto, evento di urto, il collegamento viene tagliato e si legge un segnale alto perché non passando corrente il pin è equipotenziale all'alimentazione
- Una scheda dove arrivano i segnali servo dalla ricevente (roll e pitch). Dalla scheda i segnali vengono portati ad Arduino e da Arduino tornano alla scheda dopo essere stati elaborati. I segnali in uscita poi vengono trasmessi al NAZA. È presente anche un interruttore che permette di non elaborare il segnale in ingresso con Arduino, ma portarlo direttamente al NAZA; in questo modo la scheda funge solo da prolunga mantenendo tuttavia attiva la lettura del segnale servo in ingresso. Da questa stessa scheda, infine, viene prelevata l'alimentazione per lo shield SD i cui pin sono, invece, direttamente collegati ad Arduino.

- Per quanto riguarda i motori, invece, questi sono stati portati direttamente ad Arduino senza passare per alcuna scheda forata in modo da non creare disturbi e rischiare che si vengano a creare interferenze tra i segnali del circuito.

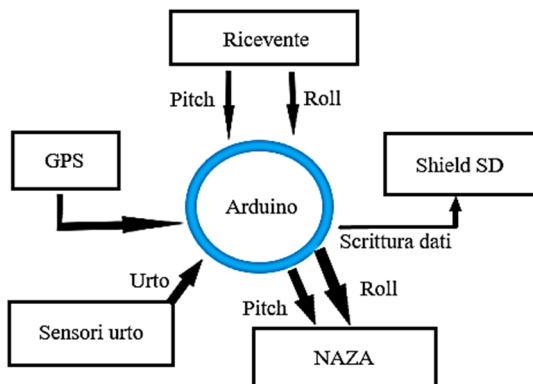


Fig. 103: Schema della logica di comunicazione del sistema anti-collisione

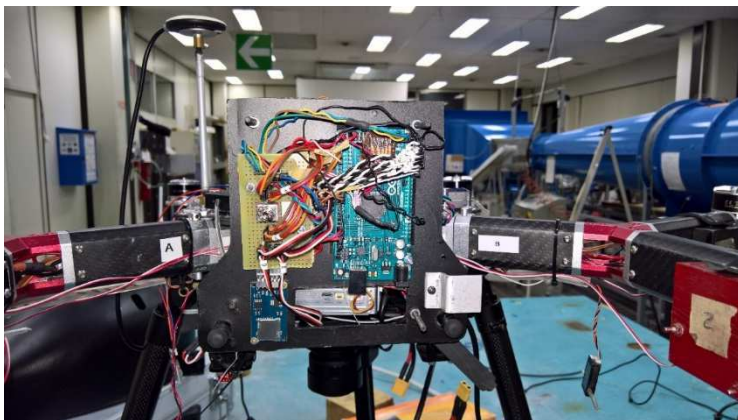


Fig. 104: Vista del sistema anti-collisione assemblato

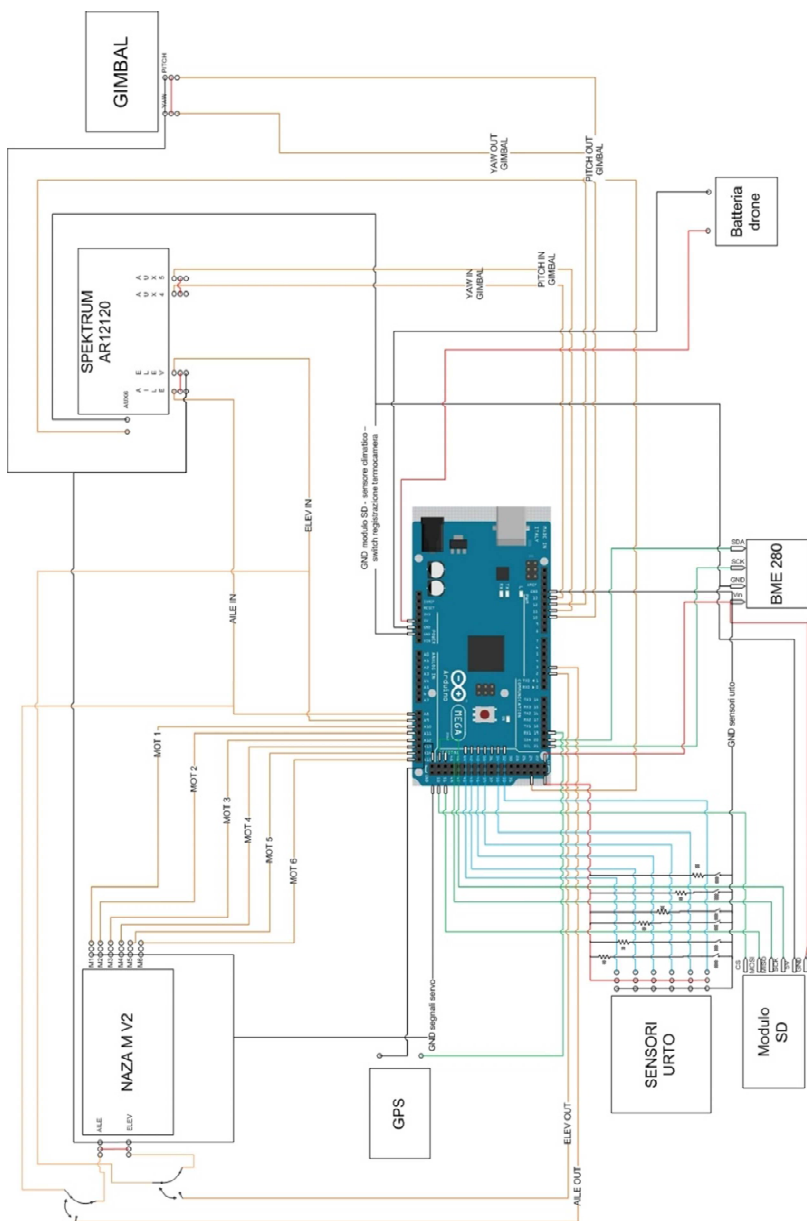


Fig. 105: Schema definitivo delle connessioni del sistema anti-collisione

4.2.3 SVILUPPO LATO SOFTWARE

L'obiettivo di questa parte del lavoro era quello di sviluppare un sistema software capace di riconoscere l'evento dell'avvenuto urto ed escludere temporaneamente i comandi del pilota per decidere autonomamente come reagire alla situazione. La soluzione più logica sarebbe stata quella di far prendere il controllo direttamente al flight controller Naza e programmare al suo interno una porzione di codice dedicata alla risposta all'urto, ma come già spiegato in precedenza questo non è possibile a causa della natura chiusa dell'elemento. Ecco quindi che la soluzione viene offerta da Arduino. Si ribadisce che Arduino non sostituisce il NAZA ma è parte integrante della strumentazione di bordo inserendosi nella comunicazione tra ricevente e flight controller per quanto riguarda i segnali di roll e pitch. Di conseguenza i due segnali non passano diretti dalla ricevente al NAZA, ma vengono intercettati da Arduino che, a seconda dell'evento che si sta verificando, scrive i segnali così come letti oppure li elabora.

La logica è la seguente. Con il circuito descritto in precedenza, quindi sensori di contatto collegati singolarmente ai pin di Arduino a mezzo di una resistenza da 220kΩ, il microcontrollore è in grado di individuare dove è avvenuto l'impatto e confrontando la posizione con la direzione di volo, entra in modalità di guida autonoma dal momento che impone lui stesso le procedure di volo da eseguire. Si è deciso di far stazionare il drone in hovering per un secondo dopo l'urto e rimandarlo in seguito nella direzione opposta a quella in cui è stata percepita la collisione. La direzione di avanzamento del mezzo è determinata da un'analisi esclusivamente geometrica dei comandi: si considera il drone libero di muoversi su un piano 2D, il vettore spostamento è dato dai comandi di roll e pitch (se il pitch è al valore massimo il drone si muove in avanti, se il roll è al valore massimo verso sinistra e viceversa). La formula è tanto semplice quanto utile:

$$h = \frac{\mu s_{segnaleroll} - 1515}{400} \quad \text{Eq. 68}$$

$$v = \frac{\mu s_{segnalepitch} - 1515}{400} \quad \text{Eq. 69}$$

Il valore 1515 è quello che viene assunto dai comandi, sia roll che pitch, quando non viene imposta alcuna azione e rappresenta quindi il valore mediano, di riposo; il valore 400 è invece la distanza tra il valore mediano e l'estremo inferiore o superiore del fondoscala. Infatti i segnali servo hanno un range che va da 1115us a 1915us.

Si rapportano così i valori di roll e pitch in una scala tra -1 e 1, in questo modo con le funzioni inverse di seno, coseno e tangente otteniamo immediatamente le componenti h e v e l'angolo del vettore spostamento (h=horizontal; v=vertical). Nel caso di urto, essendo nota la posizione di urto e di conseguenza da che parte deve allontanarsi il drone, si impone un vettore spostamento di componenti $h=-h_u$ e $v=-v_u$ dove h_u e v_u sono le componenti all'istante dell'urto; in tal modo si danno al drone quei determinati comandi che verificano l'angolo e le componenti di spostamento voluto:

$$\mu s_{segnaleimposto} = (-h_u(v_u) * 400) + 1515 \quad \text{Eq. 70}$$

La posizione dell'impatto viene sempre correlata con lo spostamento del mezzo: se il mezzo si muove verso una certa direzione e l'urto avviene entro un certo intervallo angolare, pari a $\pi/2$, allora dopo una prima fase di stazionamento in hovering il drone torna nella direzione opposta a quella di urto, altrimenti, se la differenza angolare tra direzione di moto e la posizione dell'urto è maggiore di $\pi/2$, il controllore decide solo di far stazionare il drone in hovering senza imporgli di allontanarsi e tornare indietro. Questo è stato deciso perché si è ipotizzato che se la differenza angolare fosse stata maggiore di $\pi/2$, allora l'oggetto non era situato lungo la direzione di avanzamento del drone e tornare quindi indietro avrebbe potuto significare andare nuovamente contro l'ostacolo.

4.2.3.1 CODICE SOFTWARE

In questo paragrafo si vuole descrivere in maniera schematica, ma comunque chiara ed esaustiva, la logica e la struttura del programma.

Nella parte iniziale del codice si introducono le librerie. Nel programma sviluppato, come già spiegato, si sono rivelate necessarie numerose librerie, utili perché operando una sintassi propria attivano funzioni più complesse la cui programmazione è già presente all'interno delle librerie stesse perciò l'utente deve solo richiamarle in modo opportuno. Il comando per fare ciò è `#include <NomeDellaLibreria.h>` e viene inserito come primo comando dello sketch.

Subito dopo vanno dichiarate le variabili che verranno elaborate all'interno delle funzioni setup e loop. Esistono diversi modi per dichiarare una variabile poiché è possibile specificare e far capire ad Arduino che tipo ben preciso di variabile stiamo dichiarando. Nello sketch, in particolare, sono stati utilizzati diversi tipi di variabili definite ognuna con un comando specifico basato, però, sempre sulla struttura tipo nome =valore. La parte =valore non è

obbligatoria. Quello delle dichiarazioni utilizzate è un aspetto a cui occorre prestare molta attenzione perché capire esattamente il tipo di variabile, o costante, che andremo ad utilizzare è condizione necessaria per la correttezza dello sketch.

Il passo successivo consiste nel definire il void setup(). È quella parte di codice chiamata una volta sola, prima che il programma venga fatto funzionare ed è usata per inizializzare i pin di input/output, le seriali, le librerie, e deve essere sempre inclusa nel programma, anche se non ci sono istruzioni da eseguire.

Infine si entra nel void loop (), la parte centrale dove si programmano le azioni e la logica che deve seguire il microcontrollore. Le funzioni e i comandi qui immessi vengono svolti in continuità fino allo spegnimento del controllore o al reset.

Questa parte è stata programmata per far sì che il microcontrollore Arduino acquisisca contemporaneamente i dati da più sorgenti:

- Segnali servo dalla ricevente
 - Roll
 - Pitch
- Segnali servo dei motori dal flight control
- Segnale di urto dai sensori posti sui bracci
- Dati GPS dal flight control

Avendo questi dati di input, il microcontrollore li elabora e rimanda in uscita verso il flight controller i segnali di Roll e Pitch. Fintanto che nessun urto viene rilevato, il microcontrollore replica in modo identico quello che rileva, quindi i valori di output sono uguali a quelli di input. Se invece viene rilevato un contatto il microcontrollore entra nel programma di gestione di risposta ad un urto secondo la logica descritta poc'anzi.

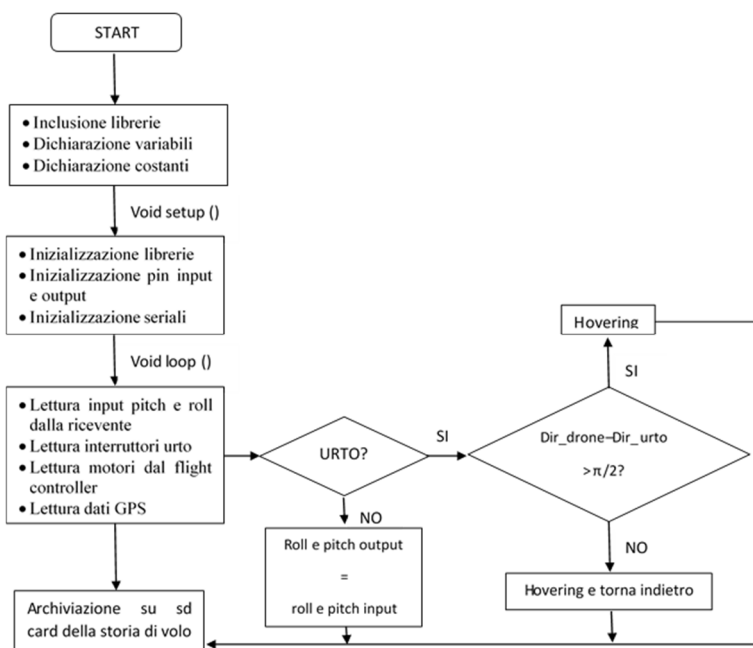


Fig. 106: Logica di funzionamento dello sketch Arduino

4.2.4 TEST FUNZIONALI

Una volta ultimato lo sketch definitivo si è passati ai test di verifica finali. Prima di affrontare qualsiasi volo, qualunque sia il test o la prova da effettuare, si deve seguire punto per punto la seguente sequenza di verifica e controllo del sistema elettronico ed ispezionare attentamente tutte le connessioni tra:

- Ricevente – scheda forata
- Flight controller – scheda forata
- Scheda forata – Arduino
- Motori – Arduino
- Sensori di contatto – Arduino
- GPS – Arduino
- Modulo SD – scheda forata
- Batteria drone – alimentazione Arduino

Il test di volo è stato condotto all'interno della facoltà di Ingegneria, in uno dei piazzali antistanti i capannoni dei laboratori pesanti, in tarda serata quando ormai non c'erano più studenti nella zona.



Fig. 107: Vista satellitare dell'area di test

Si è deciso di far urtare il drone contro un pannello di neoprene montato su un palo fissato a terra e vedere la sua risposta. Si è deciso inoltre di allestire il drone nella sua configurazione completa, quindi installando a bordo anche la termocamera e la GoPro. Questa scelta trova la sua motivazione nel fatto che si è preferito testare il sistema di anti-collisione avendo installato a bordo del drone tutti i pesi previsti per una reale missione, in modo da simulare una situazione quanto più possibile vicina alla realtà e non rischiare che i risultati dei test e la risposta offerta dal drone in caso di impatto durante una missione fossero diversi. Si è voluto in altre parole scongiurare il rischio di testare il drone con un peso inferiore a quello realmente previsto che potrebbe condurre a risultati diversi da quelli che potrebbero emergere con una configurazione a pieno carico.

Si è ragionato poi sul fatto che le ispezioni di turbine avvengono mantenendo il drone pressoché in hovering, o comunque facendogli compiere movimenti piuttosto lenti per consentire una nitida acquisizione delle immagini, pertanto non si è ritenuto necessario testare il drone a velocità elevate, almeno in questa prima fase.

Detto questo, il test è stato condotto facendo avvicinare il drone al pannello fino a provocare il contatto con esso.

La risposta offerta non è stata pienamente soddisfacente. Il drone ha percepito che l'urto è avvenuto frontalmente rispetto alla direzione di marcia ed ha, come da protocollo, stazionato in hovering per poi tornare indietro, ma i tempi di risposta offerti dal sistema sono stati più lunghi di quanto atteso.

I test sono stati condotti più di una volta ma il risultato è stato sempre il medesimo: il sistema funziona, fa ciò per cui era stato programmato, ma i tempi richiesti per reagire sono un po' troppo lunghi.

Occorre a questo punto fare una riflessione: il mondo dei droni è in continua evoluzione, dall'inizio del progetto ad oggi le tecnologie disponibili sono cambiate enormemente e si sono migliorate seguendo ritmi impressionanti. Nell'arco di pochi mesi hanno fatto ingresso nel mercato sistemi sempre più sofisticati e performanti, molti dei quali a prezzi più che competitivi.

Anche nella sezione dedicata ai sensori anti-urto la tecnologia disponibile ha subito un notevole progresso. Ad esempio negli ultimi tempi sta iniziando a diffondersi la tecnica della stereovisione, che consente di acquisire informazioni sulla profondità degli oggetti combinando le immagini bidimensionali di due telecamere aventi punti di vista leggermente diversi; oppure ancora è subentrato l'utilizzo di lidar o addirittura dei radar.

Alla luce di questa evoluzione ci siamo posti una domanda: vale la pena continuare sulla linea di un sistema di anti-collisione basato sui sensori a contatto, alla luce, peraltro, dei risultati ottenuti dai test di volo? Ha senso continuare ad investire lavoro ed energie nel tentativo di ottimizzare tale sistema? La risposta è stata negativa. O meglio, il sistema si è rivelato funzionante, anche se con alcune latenze, pertanto verrà lasciato installato a bordo del drone così com'è, ma sulla base delle importantissime conoscenze acquisite tramite questo progetto si svilupperà, in futuro, un nuovo sistema anti-collisione che sfrutterà le nuove tecnologie non presenti quando è stato intrapreso il lavoro descritto in questo capitolo.

4.2.5 CONSIDERAZIONI FINALI SUL DRONE ESACOTTERO

Per poter vedere un difetto come piccole cricche o il danneggiamento del bordo d'entrata delle pale, la GoPro non si è rivelata sufficiente. Essa può andar bene per fare un'indagine dei filmati, ma l'ottica è fortemente deformata, quindi si è deciso di optare per un'indagine fotografica ad alta risoluzione che consentisse di vedere piccoli i piccoli danneggiamenti che ci sono sulle strutture delle pale potendo rimanere a distanze non troppo ravvicinate. Si è ritenuto opportuno, quindi, che a bordo ci fosse non una

telecamera ma una fotocamera, e così la GoPro è stata sostituita con una più performante Sony α6000, una fotocamera digitale a ottiche intercambiabili caratterizzata da un autofocus ultraveloce, un sensore APS-C Exmor HD da 24,3 megapixel di risoluzione effettiva, gamma ISO estremamente elevata (25600 ISO) che consente di realizzare immagini naturali e ricche di sfumature senza flash in condizioni di scarsa illuminazione o in ambienti interni e molto altro.

Di seguito un'immagine del nuovo allestimento: termocamera Optris PI450 Lightweight e Sony α6000.



Fig. 108: Nuova configurazione dell'equipaggiamento del drone: Optris PI450 a sinistra e Sony α6000 a destra

Paga però un peso maggiore, 777g della Sony contro i 186g della GoPro. Oltre a questa modifica, nell'ultima fase del progetto è stato aggiunto un sistema di accensione/spegnimento del drone che bypassasse il fatto di dover ogni volta collegare e scollegare fisicamente la batteria per alimentare il tutto. Il sistema ha un peso di 420g.

Tutte queste aggiunte hanno portato al manifestarsi di problemi di sottodimensionamento della struttura emerso durante una delle ultime missioni di volo: il peso aggiuntivo ha implicato inerzie aggiuntive che il drone, durante una manovra, non è stato in grado di gestire, ribaltandosi e cadendo a terra. L'altezza da terra era fortunatamente tale da non aver provocato danni.

Dopo aver cambiato i motori con dei nuovi più potenti, il drone esacottero è tornato perfettamente funzionante.

CAPITOLO 5

PROGETTO A.D.E.L.E. PROGETTO E COSTRUZIONE DEL MULTIROTORE DEDICATO

INTRODUZIONE

Contemporaneamente ai lavori di sviluppo del drone esacottero, il gruppo di ricerca di cui la scrivente ha fatto parte ha intrapreso un nuovo progetto, il progetto strategico di ateneo A.D.E.L.E., Aerial Drone for Environmental and energy Researches.

A.D.E.L.E. è un progetto molto ambizioso perché si prefigge lo scopo di creare una infrastruttura all'interno dell'ateneo che possa offrire la possibilità di avviare un'ampia serie di progetti di ricerca avvalendosi dell'utilizzo dei droni.

I partner del progetto appartengono a diversi dipartimenti, non solo della facoltà di Ingegneria:

- DIISM - Ingegneria - UNIVPM
- DII - Ingegneria - UNIVPM
- DISVA - Scienze - UNIVPM
- DM - Economia - UNIVPM
- D3A - Agraria - UNIVPM

Il responsabile scientifico del progetto è il Prof. Ing. Renato Ricci.

Questa interdisciplinarietà è un grandissimo punto di forza a favore del progetto, perché consente di attivare dei canali di ricerca in tantissimi settori scientifici e di esplorare altri settori di applicazione dei droni.

Lo scopo di A.D.E.L.E. quindi non è quello di costruire un drone, ma è quello di predisporre l'insieme di tutta una serie di attività di ricerca il cui strumento di esecuzione sarà un mezzo aereo a pilotaggio remoto che opererà come piattaforma di supporto per gli apparati di misura.

Per poter fare tutto ciò, il progetto ha ricevuto un finanziamento di 182000 euro.

I primi settori di ricerca individuati dai vari partner sono stati i seguenti:

- Rilevazione 3D del terreno.

Questa esigenza è stata espressa dai partner appartenenti alla facoltà di Agraria che sono risultati interessati all'utilizzo di un multirobot che, equipaggiato con un lidar, potesse consentire:

- Mappature del terreno
- Monitoraggio di usi impropri del territorio
- Monitoraggio di sistemi infrastrutturali
- Censimento di cave e discariche
- Analisi attraverso una camera multispettrale.
Questo settore era di interesse di alcuni dei partner del dipartimento DIISM ma anche dei partner di scienze e di agraria, perché attraverso un drone equipaggiato con una camera multispettrale è possibile fare analisi come:
 - Analisi della temperatura dei corpi d'acqua
 - Rilevazione termica e colorimetrica di agenti inquinanti
 - Monitoraggio fluviale e delle coste
 - Valutazione dello stato fisiologico delle colture
- Analisi della qualità dell'aria.
Questo tipo di attività era di particolare interesse per i partner della facoltà di scienze, il cui intento era quello di dotare il multirobot di uno strumento capace di:
 - Prelevare ed analizzare campioni d'aria
 - Prelevare ed analizzare campioni d'acqua

Questi sono solo alcuni dei settori disciplinari e delle attività che si intendono esplorare attraverso il progetto A.D.E.L.E., i primi, ma si potrebbe dire che i potenziali campi di applicazione sono vastissimi.

Ora, per poter soddisfare tutte queste esigenze è subito emerso che un solo mezzo a pilotaggio remoto non era sufficiente. Alcune esigenze, come quelle legate all'attività di mappatura 3D del terreno, possono essere soddisfatte con un'ala volante, capace di coprire distanze ben maggiori rispetto ad un multirobot tradizionale e di fornire autonomie di volo anch'esse superiori poiché il sostentamento del mezzo è puramente aerodinamico e non elettronico. D'altro canto un tutt'ala non è indicato per fare ad esempio analisi della qualità dell'aria, perché questa attività implica la necessità di raggiungere un determinato punto, sostare per tutto il tempo necessario affinché lo strumento possa campionare la sostanza e tornare indietro, quindi non sono necessarie autonomie di volo tanto elevate, quanto piuttosto la possibilità di effettuare l'hovering in un punto fisso.

Per poter soddisfare tutte queste richieste si è optato per la realizzazione di una serie di droni; il compito è stato affidato al gruppo di ricerca di cui la scrivente è stata parte.

Uno di questi droni è il quadricottero che verrà descritto in questo capitolo e della cui progettazione e costruzione si è occupata anche la scrivente. Contemporaneamente un secondo gruppo ha sviluppato il prototipo del tutt'ala del quale, però, non si parlerà nel presente lavoro di tesi.

Di seguito si andrà a descrivere tutto il processo di progettazione, costruzione, e collaudo della struttura del drone.

5.1 DESCRIZIONE GENERALE DELLA STRUTTURA

La prima decisione riguardava il tipo di struttura su cui basare il multirottore: quadricottero, esacottero od ottocottero. L'esacottero, e l'ottocottero ancor di più, hanno sicuramente il vantaggio di essere particolarmente stabili ed in caso di avaria ad un motore consentono comunque un bilanciamento delle spinte tale da non far schiantare il mezzo. Sono d'altro canto, più ingombranti e le dimensioni che sarebbero scaturite per realizzare una struttura capace di trasportare le attrezzature acquistate dai vari partner del progetto, avrebbero reso difficoltosa la gestione del mezzo. Pertanto si è deciso di optare per un quadricottero, anche e soprattutto in previsione di un secondo scenario: le attività di ricerca intraprese da alcuni dei partner, come già spiegato, non vedono nel multirottore un possibile mezzo di attuazione, poiché richiedono la copertura di elevate distanze ed al tempo stesso elevate autonomie di volo; queste richieste trovano risposta tramite l'utilizzo di un drone tutt'ala. Ci si è allora posti una domanda: il tutt'ala per decollare ed atterrare ha bisogno di una pista attrezzata, che ovviamente non sempre è disponibile. Come fare quindi? Da qui l'ulteriore supporto verso la scelta del quadricottero: basando l'intero progetto su una struttura simmetrica, è possibile prevederne una sua divisione in due, quindi la struttura potrebbe essere letteralmente spaccata a metà per poter agganciare le ali del tutt'ala, trasportarlo nel luogo in cui la missione deve partire, sganciarlo e lasciare che il tutt'ala compia la sua missione in autonomia.

Alla luce di queste considerazioni, i partner del progetto hanno deciso di comune accordo di far costruire al gruppo di ricerca di cui la scrivente è stata parte, un drone quadricottero.

Il progetto presentava vincoli funzionali non banali in quanto il drone avrebbe dovuto poter operare con carichi molto elevati (l'equipaggiamento acquistato

dai partner della facoltà di scienze, per esempio, ha un peso superiore ai 3kg) e contemporaneamente garantire l'operatività nelle altre missioni operative. L'approccio è stato quello di cercare di mantenere una struttura il più semplice e versatile possibile.

Essa sarà composta da un telaio misto in alluminio anodizzato e fibra di carbonio. Due piani centrali in fibra di carbonio costituiranno il nucleo della struttura e saranno dedicati all'alloggiamento del pacco batteria e degli elementi ausiliari alla distribuzione della potenza. Quattro bracci in alluminio serviranno da sostegno per i motori.

Verranno installati quattro carrelli retrattili.

Tutte le componenti in alluminio e fibra di carbonio sono state progettate ad hoc e realizzate su misura.

Le attrezzature verranno installate su dei binari anch'essi in fibra di carbonio e saranno sorretti da supporti in alluminio progettati e realizzati su misura.

5.2 IL TELAIO

Il telaio, come detto in precedenza, avrà la configurazione classica di un quadricottero.

Il nucleo centrale sarà costituito dalle piastre. Nella fase di dimensionamento uno dei principi cardine seguiti è stato quello prevedere una disposizione degli elementi più ottimale possibile consentendo un facile raggiungimento di ogni oggetto. La costruzione di un drone ex novo comporta, infatti, continue modifiche in termini di strumenti e sensori installati, pertanto si è cercato di prevedere un posizionamento il più ordinato possibile che consentisse facilmente di individuare un oggetto e sostituirlo/rimuoverlo o di aggiungerne di nuovi. Allo stesso tempo un nucleo ben organizzato e disposto consente di svolgere le normali operazioni di manutenzione con più agilità. Il concetto potrebbe sembrare banale, ma in un drone gli elementi sono tanti e soprattutto i cavi si presentano in numero considerevole; organizzare il tutto nella maniera più ordinata possibile è fondamentale per l'accessibilità di ogni elemento e di questo si deve necessariamente tener conto in fase di dimensionamento, altrimenti si corre il rischio di non avere spazio sufficiente a posizionare tutto o comunque di dover ricorrere a rimedi grossolani. Si capisce dunque come il dimensionamento abbia avuto luogo dopo aver individuato tutti, o quasi, gli elementi che dovevano essere installati a bordo. Le piastre che costituiranno il nucleo centrale verranno ricavate da fogli in fibra di carbonio dello spessore di 3 mm e saranno collegate tra loro mediante

distanziali in alluminio realizzati in parte all'interno dell'officina della facoltà. In particolare si avranno tre piastre che andranno a formare due piani. Quella inferiore di dimensioni 370 x 370mm sarà dedicata all'alloggiamento della power distribution board principale e dei relè che costituiranno il sistema di accensione/spegnimento del drone (paragrafi successivi); sarà scavata dove possibile per alleggerirla e consentire il passaggio dei cavi di potenza e di segnale. Il piano superiore sarà formato da due piastre sovrapposte e sagomate, aventi anche loro dimensioni massime 370 x 370mm, dedicate una all'alloggiamento del pacco batteria, l'altra, di forma ottagonale cava, al serraggio dei bracci dei motori e al loro mantenimento in posizione durante le ordinarie operazioni di manutenzione sul mezzo. Sulla piastra dedicata al pacco batteria verrà inoltre montato il supporto per il GPS. Per quanto riguarda i bracci di supporto per i motori, inizialmente si era deciso di realizzarli tramite tubolari in carbonio; l'idea è stata successivamente scartata perché i motori devono essere posizionati parallelamente al terreno, ed un supporto circolare avrebbe sicuramente comportato difficoltà in tal senso. Inoltre, il carbonio è un materiale che in caso di cricca manifesta una rottura di tipo fragile. Pertanto il progetto è stato modificato e si è scelto di utilizzare un profilato in alluminio 6060 della sezione 60 x 40 x 2mm che sarà lavorato mediante taglio ad acqua per realizzare una struttura a traliccio della lunghezza di circa 50cm. La scelta di svuotare il profilato è stata dettata da ragioni strutturali unite ad esigenze di leggerezza.

I motori verranno posizionati nella parte d'estremità dei bracci, in un alloggiamento appositamente ricavato, mentre al loro interno verranno inseriti gli ESC, che in questa maniera beneficeranno del naturale raffreddamento dovuto al flusso delle eliche.

I carrelli andranno a completare il telaio del drone. Verranno realizzati quattro carrelli in fibra di carbonio in tubolari di diametro esterno 25mm per circa 400mm di lunghezza. Agli estremi superiori verrà collegata la centralina per la loro movimentazione. Questo avverrà, però, in una fase successiva, poiché inizialmente il telaio verrà equipaggiato con carrelli fissi.

Infine occorrerà realizzare un sistema di supporto per le strumentazioni da alloggiare sul drone. Tale supporto, come detto in precedenza, sarà composto da due binari in fibra di carbonio del diametro esterno di 12mm, sospesi attraverso dei supporti ad hoc, ottenuti per fresatura e tornitura di blocchetti in alluminio.

È possibile notare come tutti gli elementi che compongono il frame del drone siano stati progettati e realizzati su misura.



Fig. 109: Vista renderizzata del progetto

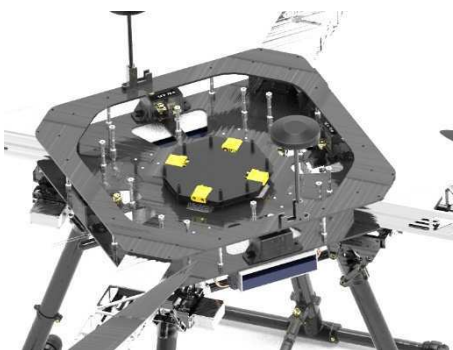


Fig. 110: Dettaglio del nucleo centrale.

5.2.1 ANALISI STRUTTURALI BRACCETTI MOTORI

Il materiale scelto per la realizzazione dei braccetti, la loro forma e le sollecitazioni a cui verranno sottoposti in fase di esercizio non destano particolari preoccupazioni in relazione alla risposta strutturale offerta. Ad ogni modo si è deciso di effettuare dei rapidi calcoli tramite software Ansys per dissipare qualsiasi forma di perplessità. Sono state implementate due differenti analisi, una statica ed una a simulare un potenziale urto del braccetto. Per entrambe le simulazioni è stato assegnato alla geometria il materiale Aluminium Alloy avente le seguenti caratteristiche.

Aluminium Alloy		
Proprietà	Valore	Unità di misura
Densità	2770	Kg/m ³
Modulo di Young	71000	MPa
Modulo di Poisson	0.33	
Tensione di snervamento a trazione	280	MPa
Tensione di snervamento a compressione	280	MPa
Resistenza ultima a trazione	310	MPa

Tab. 23: Caratteristiche meccaniche del materiale Alluminium Alloy

5.2.1.1 ANALISI STATICA

Il braccetto è stato modellato come insieme di superfici piane per alleggerire il carico computazionale. Lo spessore, pari a 2mm, viene assegnato in fase di definizione della mesh. La mesh è del tipo adattivo ed ha una griglia variabile da 2 a 0.5mm. Il maggiore refinement è stato applicato nell’intorno dei fori per l’attacco del braccetto al nucleo centrale.

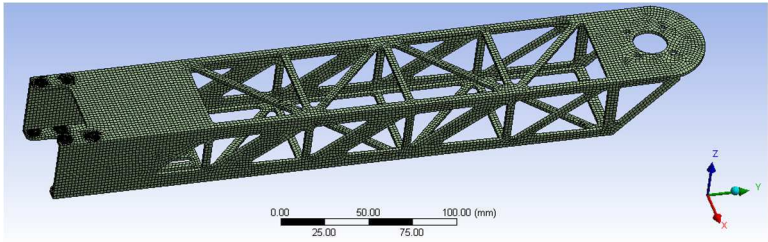


Fig. 111: Geometria del braccetto

Di seguito il numero di nodi ed elementi derivati dalla creazione delle mesh.

Nodi	12855
Elementi	11335

Tab. 24: Numero di nodi ed elementi della mesh simulazione statica

Nella scelta dei vincoli si è deciso di considerare un incastro perché è la tipologia che più si avvicina alla situazione reale. Questo tipo di struttura infatti è del tutto simile ad una mensola incastrata con carico concentrato all'estremo libero.

Il vincolo di incastro è stato assegnato agli otto fori per le viti sul lato sinistro del braccetto, mentre il carico è stato applicato all'estremo opposto ripartito tra i quattro fori per avvitare il motore. Il valore del carico è pari a 174N, ovvero la spinta massima generata dal motore moltiplicata per un fattore di sicurezza pari ad 1.5.

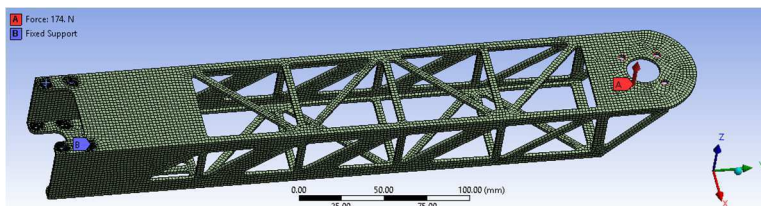


Fig. 112: Carichi e vincoli applicati al modello

Di seguito i risultati ottenuti.

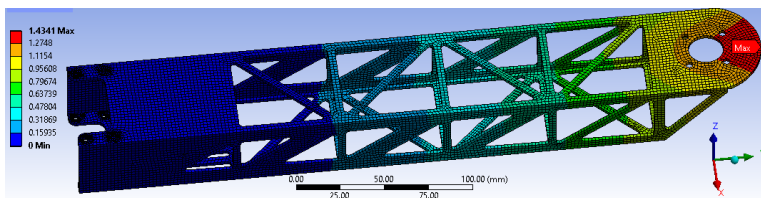


Fig. 113: Andamento delle deformazioni

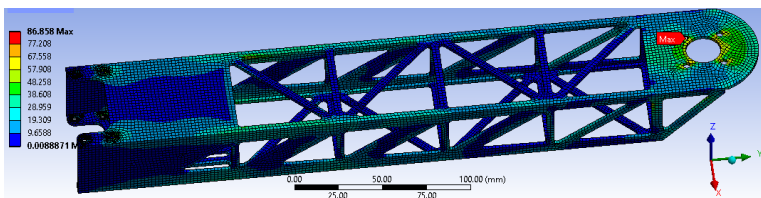


Fig. 114: Andamento delle tensioni

Come ci si aspettava i valori delle tensioni sono di gran lunga inferiori ai limiti del materiale ed anche le deformazioni sono estremamente basse con valori massimi nelle immediate vicinanze del punto di applicazione del carico

inferiori ad 1.5mm. Viene quindi confermata, almeno dal punto di vista statico, la bontà delle scelte progettuali relative a forma, spessore e scasso dei braccetti.

5.2.1.2 ANALISI DINAMICA A SIMULAZIONE DI UN URTO

Successivamente è stata condotta l’analisi dinamica. Si è scelto di effettuare questo tipo di analisi con lo scopo di indagare la risposta offerta dall’elemento quando è soggetto ad un urto conseguente ad un atterraggio di emergenza. La velocità di caduta è stata stimata pari a 10m/s, situazione che verosimilmente si verifica quando, in situazioni critiche, il drone viene fatto atterrare con il paracadute aperto (il paracadute verrà progettato in un secondo momento). Il modello geometrico di base ed i materiali assegnati sono gli stessi utilizzati per l’analisi statica. Ciò che cambia è il grado di definizione della mesh e l’aggiunta di due elementi, uno rappresentativo del motore, modellato come solido equivalente, ed uno rappresentativo del piano di contatto tra il braccetto e la piastra inferiore e quindi della superficie di contatto su cui avviene l’urto. La mesh è variabile da un valore massimo di 2mm ad uno minimo di 0.25mm.

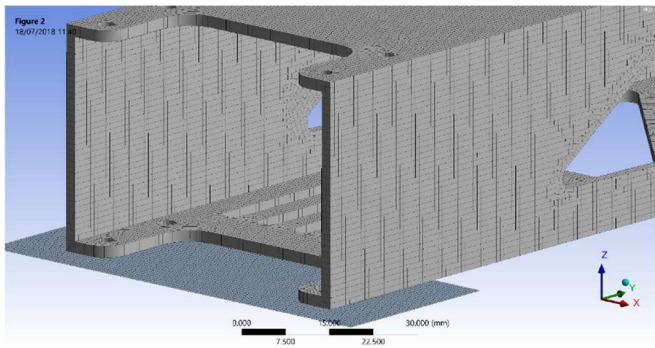


Fig. 115: Dettaglio della mesh

Di seguito il numero di nodi ed elementi derivati dalla creazione delle mesh.

Nodi	46390
Elementi	42986

Tab. 25: Numero di nodi e di elementi della mesh simulazione dinamica

Per quel che riguarda i vincoli sono stati applicati dei Remote Displacement e sono stati assegnati agli otto fori per il collegamento del braccetto al nucleo centrale. I Remote Displacement non sono altro che spostamenti e rotazioni imposti.

Tipo di vincolo	Remote Displacement
Componente lungo x	0mm
Componente lungo y	0mm
Componente lungo z	Free
Rotazione in x	0°
Rotazione in y	0°
Rotazione in z	0°

Tab. 26: Tipologia di vincolo e corrispondente valore assegnato

L’unico spostamento consentito è lungo l’asse z per simulare la caduta. Il tempo impostato per la simulazione è pari a $1 \cdot 10^{-4}$ secondi. Non è necessario impostare un tempo di calcolo elevato poiché il braccetto è già a contatto con la superficie con cui simulare l’urto. Di seguito i risultati ottenuti.

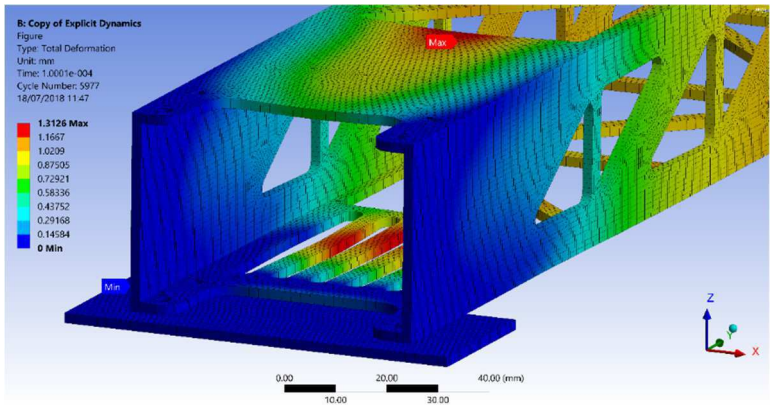


Fig. 116: Andamento delle deformazioni

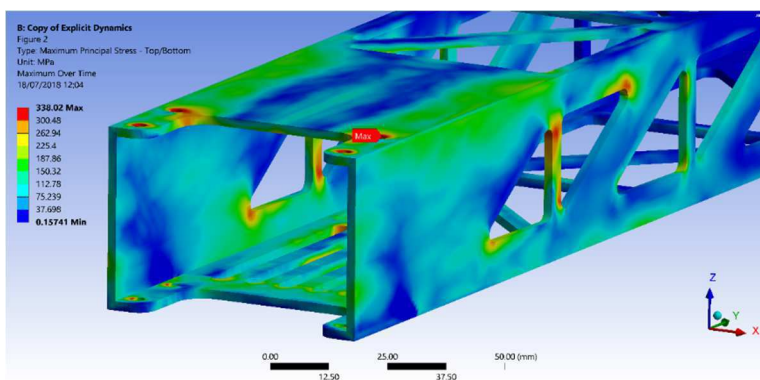


Fig. 117: Andamento delle tensioni principali

Dall'andamento delle tensioni si nota come in alcuni punti, seppur localizzati, il valore limite di 280MPa venga superato. Sarà pertanto opportuno in fase di progettazione del paracadute, prevedere una velocità di caduta inferiore ai 10m/s.

5.3 PROPULSIONE ED ELETTRONICA DI POTENZA

La definizione dell'apparato propulsivo e di alimentazione è risultata piuttosto complessa. L'obiettivo era quello di selezionare elementi che fossero in grado di sollevare il peso massimo consentito dalla normativa pari a 25Kg ed allo stesso tempo garantire un'elevata autonomia di volo ed una buona manovrabilità del mezzo.

Il primo elemento individuato sono stati i motori. Il criterio di scelta è stato quello di un sistema propulsivo capace di sollevare 1.5 volte il peso massimo di 25Kg.

Analizzando le diverse soluzioni, la scelta è ricaduta sulla ditta americana KDEDirect, nello specifico sul modello KDE6213XF-185 Brushless Motor For Heavy-Lift Electric Multi-Rotor (Uas) Series ovvero motori elettrici brushless a corrente continua a magneti permanenti. Le specifiche tecniche vengono riportate a seguire.

Gli ESC, selezionati presso la stessa ditta, sono il modello KDEXF-UAS75HVC 75A+HV Electronic Speed Controller (ESC) For Electric Multi-Rotor (Uas) Series.

La configurazione scelta è quella che prevede l’installazione di eliche tripala modello 24.5’’x8.1 KDE-CF245-TP Triple Blade.

MOTORI KDE6213XF-185

KV (Costante di velocità del motore)	185 RPM/V
Corrente massima continua	62A (180 s)
Potenza massima continua	2755+ W (180 s)
Efficienza massima	> 93%
Range tensione alimentazione	6S-12S LiPo
Poli di statore	24 (24S28P, HE)
Poli magnetici	28 (24S28P, HE)
Diametro motore	ϕ70mm
Peso motore con cavi e connettori	415g

ELICHE KDE-CF245-TP 24.5"X 8.1

Taglia	24.5’’ x 8.1’’ (pala tripla)
Peso	34.9g

Tab. 27: Caratteristiche eliche e motori

Di seguito le caratteristiche che si ottengono combinando motore ed eliche da 24.5’’.

Alimentazione	Throttle Range	Assorbimento	Spinta Generata
[V]	[%]	[A]	[g]
40	50	13.8	4440
	62.5	21.5	5910
	75	34.3	7600
	87.5	50.0	9700
	100	69.9	11610

Tab. 28: Spinte ed assorbimenti caratteristici dei motori

ESC KDEXF-UAS75HVC

Refresh Rate	600Hz (50 - 600Hz Adaptive)
Corrente massima di picco	130A (5 s)
Potenza massima di picco	5,770W (5 s)
Corrente massima continua	75+ A (180 s)
Potenza massima continua	3,330+ W (180 s)
Efficienza massima	> 98%
Range di alimentazione	11.1V (3S LiPo) - 52.2V (12S LiHV)
BEC interno	Nessuno (Opto-Isolation)
RPM massimi	360,000rpm (2-Pole)

Dimensioni	37mm (W) x 82mm (L)
Peso	78g (114 g con cavi/connettori)
Cavi di potenza	12 AWG, 200°C
Cavi motore	13 AWG, 200°C
Cavi di segnale	22 AWG, 3-Wire JR (W-R-B)
Cavi per programmazione	22 AWG, 3-Wire JR (O-R-B)

Tab. 29: Caratteristiche degli ESC

Il pacco batteria necessario per alimentare tali motori è stato realizzato dalla ditta inglese Alien Power System e consiste in una batteria LiPo modello ALIEN-10S-22000mAh-30C-LiPo

BATTERIA ALIEN POWER SYSTEM 10S 22000mAh

Dimensioni	200 x 180 x 55mm
Peso	4270g
Capacità	22Ah
Voltaggio	37V (10S)
Scarica massima	30 C

Tab. 30: Caratteristiche del pacco batterie



Fig. 118: Apparato propulsivo: motori, eliche, ESC, batteria

Sulla base dei dati forniti dai produttori è possibile fare una prima stima delle autonomie di volo e del rapporto spinta/peso, considerando un peso iniziale del solo drone pari a 15kg. Tali stime verranno successivamente riprese considerando il reale peso del drone completamente assemblato.

Throttle %	Ah	Thrust [g]	Ah tot	Thrust tot [g]	Autonomia [min]	Rapporto spinta/peso
50	13.8	4400	55.2	17760	23.9	1.2
75	34.3	7600	137.2	30400	9.6	2.0
100	69.9	11610	279.6	46440	4.7	3.1

Tab. 31: Stima preliminare delle autonomie di volo

Il passo successivo è stato quello di affrontare la questione di come distribuire l'alimentazione a tutti gli elementi che compongono il sistema.

Si è deciso di fare ricorso ad un sistema costituito da tre power distribution board: una principale che collegherà direttamente gli ESC alla batteria e due nuclei secondari uguali che serviranno ad alimentare l'avionica e gli strumenti di misura.

Non è stato possibile utilizzare una sola unità dato l'elevato numero di elementi che richiedono alimentazioni diverse tra loro, variabili dai 40V per i motori ai 5V per le riceventi o la centralina di volo.

La power board principale è una Tarot High Current Heavy Lift Quad Hexa PDB Signal Hub 12S 480A, progettata per UAV di grandi dimensioni; supporta tensioni in ingresso fino a 12S e correnti fino a 480A. Un elemento particolarmente interessante di questa board è il connettore posto al centro con cui è possibile collegare direttamente i cavi di segnale degli ESC al controllore di volo.

Le power board secondarie hanno la funzione di alimentare l'avionica di bordo e gli strumenti di misura. Poiché tali sistemi richiedono tensioni in ingresso variabili dai 5V ai 24V, è stato necessario optare per dei convertitori step down capaci di accettare in ingresso una tensione pari a quella del pacco batteria 10S e ridurla, attraverso dei partitori, in uscite di tensione inferiore. Il modello selezionato è un LM2596HVS DC-DC Step Down Voltage Regulator Board con input massimo pari a 60V ed output regolabile da 3V a 30V. Le board sono in tutto 10, nell'ottica di riservare ad ogni sensore o strumento una alimentazione propria, non condivisa.

A gruppi da 5, verranno inserite all'interno di contenitori realizzati internamente alla facoltà mediante stampante 3D e per disperdere il calore generato durante il normale utilizzo, vi verranno applicati dei dissipatori alettati. Di seguito lo schema dei collegamenti elettrici

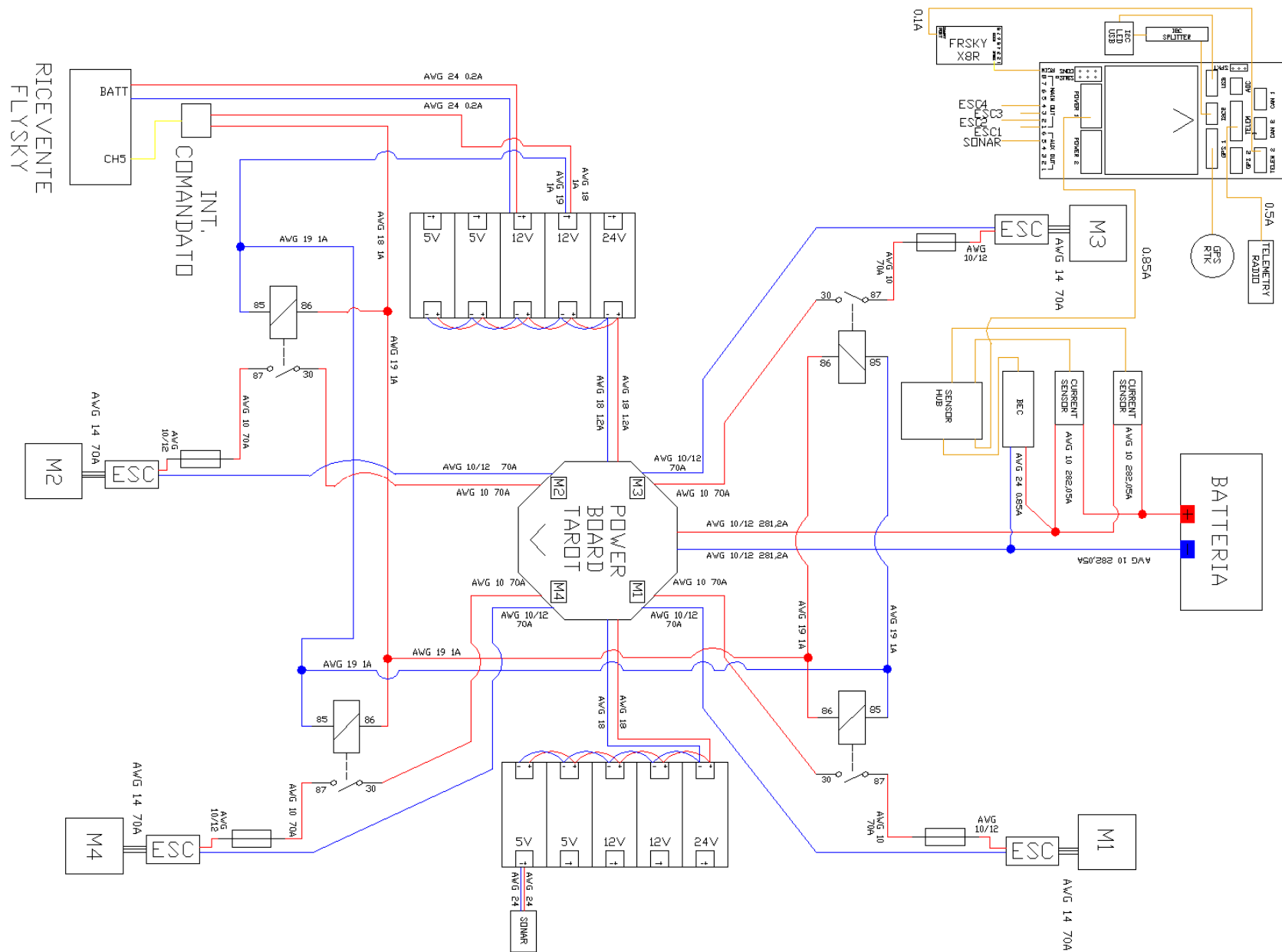


Fig. 119: Schema dei collegamenti elettrici del drone quadricottero

Dallo schema elettrico è possibile osservare l'inserimento di quattro relè, uno per ogni motore, quattro fusibili, anch'essi uno per ogni motore, ed un interruttore radiocomandato.

La normativa ENAC richiede che a bordo di qualsiasi drone che dovrà operare in aree critiche sia installato un terminatore di volo, uno strumento che andrà attivato nel momento in cui, per un qualsiasi motivo indipendente dalla volontà del pilota, si dovesse perdere il controllo del drone.

In commercio esistono diversi terminatori di volo certificati ENAC, ma la maggior parte di essi va ad intervenire sulla centralina di volo. Il nostro gruppo di ricerca ha invece deciso di optare per un sistema che vada ad agire esclusivamente sui motori, e che possa fungere allo stesso tempo da misura di sicurezza contro l'armamento accidentale. La dimensione delle eliche e la loro pericolosità, infatti, non consentono di bypassare questo livello di sicurezza e si è ritenuta perentoria la protoripazione di uno strumento capace di accendere i motori senza doversi avvicinare fisicamente.

Il risultato è stato un sistema di accensione/spengimento dei motori, nonché terminatore di volo, che consentirà di fare tutto ciò. Sarà composto dai quattro relè e dall'interruttore radiocomandato. Il funzionamento è il seguente.

Il relè è formato da un interruttore normalmente aperto e da una bobina; sull'interruttore normalmente aperto passa l'alta tensione, quella che va ad alimentare in questo caso i motori, mentre sulla bobina passa la bassa tensione a 12V. La tensione arriva alla bobina tramite l'interruttore radiocomandato, anch'esso normalmente aperto, e, quando questo avviene, la bobina si attiva e chiude il circuito. Disalimentandola, l'interruttore del relè si apre ed interrompe il passaggio di tensione ai motori che si spengono. Dunque l'accensione/spengimento dei motori è governato dall'insieme relè-interruttore radiocomandato.

Gli elementi scelti per formare il terminatore di volo sono un interruttore radiocomandato Turnigy Receiver controlled on/off switch in grado di gestire 30V e 10A in input, e quattro Power Relè BOSCH 12V, 75A, 0 332 002 168.

Sempre dallo schema elettrico, è possibile osservare l'inserimento di alcuni elementi subito a valle della batteria. Si tratta di due sensori di corrente che sono necessari per poter visualizzare da terra le informazioni circa lo stato di carica della batteria, tensione e capacità residua. I sensori sono dei Mauch 076 – HS Current Sensor HV 200A 4-14S, in grado di accettare in input tensioni fino a 14S e correnti fino a 200A. Per quest'ultimo motivo è stato necessario inserirne due. Hanno bisogno anch'essi di alimentazione, pertanto è stato inserito un bec Mauch 084 – HYB-BEC 4-14s 5.30v. Gli elementi si ricongiungono nel Mauch 080 – HS Sensor Hub X2, un hub necessario per

collegare i sensori in parallelo, all'interno del quale la corrente viene sommata ed inviata come informazione al flight controller, anch'esso collegato all'hub e dal quale riceve a sua volta l'alimentazione.

5.4 AVIONICA DI BORDO

L'elemento principale e cuore della struttura è il flight controller Pixhawk 2 Cube. La scelta è ricaduta su questo elemento per una serie di motivi. Innanzitutto è un controllore di volo interamente programmabile poiché basato su un firmware open-source ed è perfettamente compatibile con tutti i sistemi che tipicamente costituiscono l'avionica di bordo e la trasmissione dei segnali a terra.

Inoltre presenta un aspetto fortemente innovativo in questa specifica versione rappresentato dal Cube, una Inertial Management Unit (IMU) con tripla ridondanza, quindi tre accelerometri, tre giroscopi, tre magnetometri e due barometri, isolata e smorzata, nonché dotata di un sistema di riscaldamento che la rende adatta a operare in climi estremi.

PIXHAWK 2 CUBE

IMU:

- 3 x accelerometri
- 3 x giroscopi
- 3 x magnetometri
- 2 x barometri

Slot per l'eventuale inserimento di Intel Edison

SD card slot

Interfaccia micro USB

Conessioni:

- 5 porte seriali
- 2 porte CAN
- 2 porte I2C
- 2 porte power
- 1 porta ADC
- 8 porte output PWM
- 6 porte GPIO che possono essere utilizzate per i segnali PWM
- Una porta dedicata alle riceveti Spektrum
- Input e output S.BUS, input PPM

Peso: 75gr

Dimensioni (L x W): 94 x 43 mm

Altezza (Cube incluso): 31 mm

Tab. 32: Caratteristiche principali del flight controller

Al flight controller verrà collegato un GPS Here + RTK GNSS. La sigla RTK sta per Real Time Kinematic ed implica la possibilità di conoscere la posizione di un punto istantaneamente. Questa tecnica di posizionamento prevede l'utilizzo di due moduli: un ricevitore fermo a terra comunemente definito Base, ed un altro in movimento definito Rover. Conoscendo la posizione sempre fissa della Base, il software di bordo del Rover ne determina la posizione. Grazie a questo tipo di sistema di posizionamento è possibile conoscere la posizione del drone avendo una precisione centimetrica. Nell'immagine è possibile vedere il flight controller, il modulo Rover circolare al centro della confezione, ed il secondo GPS (Base) con la relativa antenna.



(a)



(b)

Fig. 120: Pixhawk 2 Cube (a) e GPS Here + RTK (b)

Un aspetto fondamentale riguardo il flight controller è la sua installazione. Occorre valutare attentamente dove viene installato e se attorno sono presenti elementi che possono indurre interferenze elettromagnetiche.

In riferimento alla posizione di installazione si raccomanda di installare la board all'interno di un involucro o contenitore, con la freccia bianca sul dorso del Cube puntata verso il naso del drone e quanto più possibile vicina al centro di gravità del mezzo. È inoltre importante installarla su appositi supporti smorzatori per evitare che vibrazioni indotte alterino i parametri di volo.

Per quanto riguarda, invece, potenziali interferenze elettromagnetiche, queste possono avere serie conseguenze sulla navigazione del mezzo andando a disturbare la bussola interna.

Diverse sono state le scelte progettuali attuate per ovviare questi problemi:

1. Il centro di gravità del drone è risultato essere piuttosto basso a causa del peso degli strumenti di misura, pertanto si è deciso di posizionare la batteria nella parte più alta del mezzo, in modo da non abbassare ulteriormente il baricentro, e di installare l'avionica nella parte inferiore appena sotto la power distribution board principale. In questo modo è stato possibile rispettare il requisito di vicinanza con il centro di gravità.
2. Le interferenze elettromagnetiche che possono indursi sono dovute nella maggior parte dei casi alla vicinanza di ESC e power board, situazione che si viene a presentare anche nel nostro caso. La soluzione è stata duplice: da un lato l'inserimento del flight controller all'interno di una scatola in ABS schermato, dall'altro il GPS verrà montato su sostegni nel piano superiore del drone il più lontano possibile dalle fonti di interferenza.
3. Sarà inoltre buona prassi mantenere i cavi tra ESC e power board più corti possibile.

Per quanto riguarda il software di controllo a terra si è scelta la Ground Station Mission Planner Home, anch'essa parte della famiglia Ardupilot.

Con questa ground station è possibile, tra le diverse cose:

- Inserire waypoint point e dirigere il drone sul posto, utilizzando Google Maps
- Selezionare i comandi missione
- Scaricare i file di log delle missioni e analizzarli
- Configurare le impostazioni APM
- Interfacciarsi con un simulatore di volo PC per pianificare una missione completa
- Vedere l'uscita dal terminale seriale dell'APM.

L'intero sistema comunica a terra attraverso la ricevente e la trasmittente, la prima installata a bordo dedicata alla ricezione dei comandi da far eseguire al drone, la seconda a terra gestita dall'operatore. La ricevente scelta è una FrSky 2.4GHz ACCST X8R 8 ch. Grazie alla tecnologia ACCST a salto di gamma che sfrutta l'intera banda a 2.4 GHz risulta essere una delle più affidabili e sicure.

Un secondo motivo per cui si è scelto di utilizzare questa particolare ricevente è il fatto che Ardupilot ha installato un driver dedicato che permette di sfruttare quella che viene chiamata FrSky Telemetry, ovvero la possibilità di

visualizzare le informazioni della centralina senza la necessità di installare dei moduli telemetrici dedicati. Le informazioni vengono visualizzate direttamente a schermo sul radiocomando (purché questo abbia installato al suo interno il firmware open-source OpenTX) e quest'ultimo aspetto è potenzialmente molto utile perché consentirebbe di effettuare missioni senza l'ausilio della ground control station.

La comunicazione avviene tramite protocollo di telemetria passthrough, l'ultimo protocollo disponibile in ArduPilot, che consente la trasmissione di dati grezzi direttamente al firmware open source della trasmittente.

Per poter abilitare questa modalità di trasmissione dei dati telemetrici sono necessari:

- Un flight controller compatibile con ArduPilot;
- Una trasmittente (radiocomando) che abbia al suo interno il firmware open-source OpenTX per poter accettare la FrSky Telemetry;
- Una ricevente abilitata all'invio di dati telemetrici FrSky (nel caso specifico la X8R risulta essere quella più indicata);
- Un telemetry cable con cui collegare la ricevente alla Pixhawk.



Fig. 121: Hardware richiesti ed acquistati per poter abilitare la FrSky Telemetry

La trasmittente è una FrSky TARANIS X9D Plus 2.4GHz, perfettamente compatibile con la FrSky Telemetry.

Le informazioni visualizzabili sullo schermo del radiocomando possono essere ulteriormente ampliate tramite l'installazione di FlightDeck, un'app a pagamento OpenTX per Taranis che utilizza la telemetria passthrough. L'installazione di questa app rende davvero possibili missioni senza ground control station perché tutte le informazioni di volo vengono visualizzate sullo schermo del radiocomando.

5.5 EQUIPAGGIAMENTO

5.5.1 TELECAMERA NEL VISIBILE E TERMOCAMERA



Fig. 122: Sony FCB EV-7520 sulla destra e Flir A655sc

Si è ritenuto fondamentale che nell'equipaggiamento del drone fossero incluse una telecamera nel visibile ed una macchina termografica ad alte prestazioni.

Per quanto riguarda la telecamera nel visibile, la scelta è ricaduta sulla Sony FCB EV-7520. Questa camera include al suo interno:

- Sensore Exmor R™ CMOS 1/2.8-type che fornisce video ed immagini con risoluzione FULL-HD (1920 x 1080)
- 2.13 megapixel effettivi
- Zoom ottico 30x
- Sistema di stabilizzazione delle immagini per limitare la sfocatura delle immagini provocata da vibrazioni a bassa frequenza
- Tecnologia di riduzione del rumore
- Ampia gamma dinamica, per ottenere immagini dettagliate anche in ambienti scarsamente illuminati
- Funzione anti-nebbia
- Tecnologia HLC (High Light Compensation) che aiuta a migliorare l'immagine in caso di elevato contrasto o in condizioni di scarsa illuminazione. Le parti luminose dell'immagine vengono mascherate e compensate automaticamente per ottenere una migliore visibilità
- Auto ICR, ovvero in condizioni di scarsa illuminazione, la fotocamera passa automaticamente dalla modalità diurna a quella notturna, rimuovendo il filtro IR per incrementare la sensibilità alle immagini in semioscurità

Tramite una apposita scheda di interfaccia sono possibili:

- Streaming tramite ethernet o WiFi

-
- Comunicazione seriale tramite protocolli I2C, USB, CAN, GPIO, UART TTL
 - Memorizzazione dei dati all'interno di una scheda micro sd.

Si è deciso in realtà di acquistare due Sony perché fosse possibile utilizzarle anche come sistema di anti-collisione basato su stereovisione.

La stereovisione permette di determinare la profondità di un oggetto combinando due immagini prese da due camere differenti da due punti di vista leggermente diversi tra loro. È fondamentale che le camere abbiano le stesse caratteristiche, quindi che siano uguali. La tecnica consiste nell'acquisire due immagini della stessa scena da due punti di vista; l'immagine viene poi discretizzata ottenendo una matrice di pixel. Si identificano i pixel corrispondenti allo stesso target o punto fisico presente in entrambe le immagini e tramite triangolazione è possibile determinare la posizione nello spazio di quel target. Più pixel identificati corrispondono, più punti 3D possono essere determinati con un singolo set di immagini.

Le informazioni di posizione determinate possono poi essere utilizzate come input per programmare il drone affinché compia determinate azioni a seconda della vicinanza dell'oggetto percepita e ad esempio tornare indietro se la distanza misurata è al di sotto di una certa soglia.

Lo sviluppo di questo sistema sarà ad opera dei dottorandi colleghi della scrivente.

Per quel che riguarda la termocamera è stata scelta una Flir A655sc al cui interno si trova un sensore microbolometrico agli Ossidi di Vanadio non raffreddato che produce immagini termiche a 640 x 480 pixel ed in grado di rilevare differenze di temperatura tra un pixel e l'altro di soli 30mK. Di seguito le principali caratteristiche della camera.

Tipologia di sensore	Microbolometrico non raffreddato
Range spettrale	7.5 – 14μm
Risoluzione	640 x 480
NEDT	< 30mK
Frame rate	50Hz
Accuratezza	± 2°C
Ottiche	15°x11° e 25°x19°
Peso	0.9kg

Tab. 33: Caratteristiche della termocamera Flir A655sc

Poiché non si tratta di una tecnologia nata per applicazioni su drone bensì industriali, è stato necessario richiedere delle soluzioni custom per quanto riguarda la geolocalizzazione delle immagini termiche e dei video tramite il

GPS di bordo, la memorizzazione dei dati su memoria sd, non prevista poiché nelle applicazioni comuni la camera è collegata direttamente al pc, e la possibilità di controllarla da remoto. Tutto questo è reso possibile collegando la termocamera ad un Raspberry e quest’ultimo alla Pixhawk.

5.5.2 ANALIZZATORE GAS DR1000

Lo Scentroid DR1000 è un laboratorio portatile utilizzato per campionare ed analizzare gas e liquidi. Questo strumento è in grado di misurare contaminanti come idrogeno solforato, ammoniaca, composti organici volatili (VOC) e altri ancora a seconda della configurazione scelta dal cliente in fase di acquisto.

Tramite il suo utilizzo indagini come la mappatura della qualità dell’aria, analisi di siti potenzialmente pericolosi, od ancora, l’analisi delle emissioni generate dagli impianti, trovano un più ampio range di applicazione.

Le principali caratteristiche tecniche sono:

Dimensioni	24 x 16 x 18cm (L x W x H)
Peso	3.415kg
Sensori Installati	6 sensori
Batteria	LiPo 10000 mAh Input DC 9V-15V/A
Autonomia	1.5 ore
Trasmissione Dati	RF tra l’unità aerea e la ground station GPRS al server cloud
Data Storage	4 Gb
Temperatura Operativa	Da 0°C a 45°C
Umidità relativa	Da 0% a 90%

Tab. 34: Caratteristiche Scentroid DR1000

La procedura di analisi è piuttosto semplice: lo strumento, installato a bordo del drone, viene portato nel punto in cui si intende effettuare la misura, attraverso quella che viene definita “sampling probe” aspira il gas, lo analizza al suo interno e lo espelle. Contemporaneamente le letture vengono inviate alla stazione di terra tramite radio-frequenze e ad un cloud server DRIMS (Drone Information Management System) tramite il quale è possibile gestire i dati raccolti e configurare il DR1000. Tutti i dati vengono anche salvati su una scheda SD inserita all’interno dello strumento



Fig. 123: Il flying laboratory DR1000

Le sostanze che si è deciso di analizzare attraverso questo strumento sono:

- Biossido di carbonio CO_2
- Metano CH_4
- Formaldeide CH_2O
- Biossido nitrico NO_2
- Ossido nitrico NO
- Ozono O_3 .

5.5.3 TETRACAM MACAW

La macchina multispettrale Tetracam Macaw è uno strumento di ultima generazione composto da sei telecamere uguali ma ognuna con un diverso filtro calibrato che gli consente di operare ed acquisire immagini in diverse lunghezze d'onda.



Fig. 124: Tetracam Macaw

Caratteristiche tecniche:

Alimentazione	12V
Peso	1.4 kg compreso il gimbal
Filtri multispettrali	6 (490, 550, 680, 720, 800, 900 nm)
Sensitività	380-1000 nm
Dimensione pixel	4.8 μ m
Lunghezza focale	9.6 mm
Apertura	f/3.2
Acquisizione immagini	shutter manuale auto-timer trigger da computer via wireless offset gps trigger esterno seriale RS232
Dimensione immagini	1280 X 1024 pixels

Tab. 35: Caratteristiche Tetracam Macaw

A seconda della lunghezza d'onda è possibile ottenere informazioni differenti

BANDA	TIPO DI INDAGINE
490nm	Blu. Fornisce indicazioni sulla presenza di specchi d'acqua ed è utile nel differenziare superfici rocciose e terreni aridi dalla vegetazione.
550nm	Verde. Fornisce indicazioni sulla torbidità dell'acqua e sul contenuto di clorofilla.
680nm	Rosso. Permette il calcolo dell'indice di vegetazione NDVI, Normalized Difference Vegetation Index.
720nm	Rosso estremo. Banda sensibile allo stress della vegetazione, fornisce ulteriori informazioni sullo stato della clorofilla e dell'azoto nelle piante.
800nm	Vicino infrarosso. Permette il calcolo dell'indice NDVI ed è utile per il calcolo di vari rapporti di pigmenti vegetali che cambiano spesso a seconda delle condizioni di stress della vegetazione.
900nm	Vicino infrarosso. Picco o massima regione di riflettanza per determinati tipi di vegetazione. Quando le colture sono sotto stress o in fase di invecchiamento, c'è un cambiamento significativo della riflettanza.

Tab. 36: Esempi di indagini possibili grazie all'uso di camera multispettrale

5.6 COSTRUZIONE DEL DRONE

Dopo aver ultimato e validato il progetto del drone si è passati alla sua costruzione.

Il primo step ha riguardato l'assemblaggio del telaio.

Le piastre in carbonio che costituiscono il nucleo centrale sono state realizzate tramite taglio ad acqua dalla ditta ASG Srl, Ancona, mentre i bracci per il sostegno dei motori sono stati realizzati dalla ditta EMMEDI Srl, Porto Potenza (MC), tramite fresatura a controllo numerico.

Il passo successivo è stato il posizionamento dell'elettronica di potenza.

La power board principale Tarot è stata collocata in posizione centrale rispetto alle piastre ed a testa in giù per consentire un più facile collegamento degli ESC al flight controller.

Ai lati della board principale, inferiormente rispetto alla piastra centrale, sono stati posizionati i contenitori con le board secondarie. Il collegamento tra la board principale e quelle secondarie avviene per via diretta tramite due dei connettori XT90 presenti nella Tarot.

Infine, per completare il circuito elettrico sono stati posizionati i relè.

Una volta ultimato il posizionamento degli elementi strutturali e di alimentazione sono stati realizzati i primi cablaggi.

La board Tarot viene alimentata direttamente dalla batteria e smista l'alimentazione alle board secondarie. Ad una delle uscite regolate a 12V di queste ultime viene prelevata l'alimentazione per i relè; il cavo positivo viene però interrotto dall'interposizione dell'interruttore radiocomandato. Da qui poi esce e si collega al pin 86 positivo del primo relè. Il cavo negativo viene invece collegato per via diretta dall'uscita 12V al pin 85. Successivamente, a partire dal primo, vengono collegati in parallelo tutti gli altri relè fino a chiudere il circuito sull'ultimo.

A questo punto sono stati posizionati i carrelli. Le quattro gambe, in tubi di carbonio da 1 pollice e 46cm di lunghezza, sono state fissate in corrispondenza dell'attacco dei bracci del telaio e sono tra loro collegate a due a due da altri tubi in carbonio a formare i piedi.

In ultimo ESC e motori.

L'ESC ha bisogno di alimentazione, che prende direttamente dalla power board Tarot a cui è collegato tramite connettori XT90; il cavo positivo, però, viene fatto passare prima nei relè, mentre il negativo viene collegato direttamente.

In ultimo sono stati collegati i quattro supporti in alluminio ed i binari in carbonio necessari al sostegno dei dispositivi da agganciare al drone.

Il risultato finale è una struttura avente il peso di 13kg al netto delle attrezzature, altezza del piano delle eliche pari a 53cm, distanza diagonale tra i motori pari a 114cm.



Fig. 125: Fasi di costruzione del drone: assemblaggio del frame e dell'elettronica di potenza

Dopo aver ultimato la costruzione del telaio ed il posizionamento degli elementi necessari alla distribuzione dell'alimentazione, si è passati all'installazione dell'avionica di bordo.

La scelta, come già spiegato, è stata quella di posizionare ogni componente all'interno di una scatola in ABS schermato, in primo luogo per proteggere il flight controller da possibili interferenze elettromagnetiche ed in secondo luogo per raggruppare il tutto in un'unica sede per facilitare le operazioni di manutenzione/sostituzione. In questo modo si ottiene una soluzione ordinata e senza cavi in vista perché vengono fatti passare tutti attraverso una piccola asola praticata nella parte superiore della scatola.

Per prima è stata posizionata la Pixhawk. Il suo orientamento ha determinato l'orientamento dell'intero drone in quanto è fondamentale e necessario che il naso della Pixhawk punti nella stessa direzione del naso del drone. Poiché è necessario ridurre il più possibile le vibrazioni trasmesse, il flight controller è stato collegato tramite apposita schiuma antivibrante biadesiva e del velcro per non rendere definitivo il collegamento alla base della scatola. Vengono smorzate le vibrazioni ma è possibile rimuoverlo per qualsiasi ragione.

All'interno della stessa scatola vengono posizionate le due riceventi, la FrSky X8R dedicata al collegamento del drone al radiocomando, e la Fly Sky dedicata all'attivazione dell'interruttore radiocomandato che alimenta i relè; saranno quindi presenti a terra due radiocomandi. L'interruttore radiocomandato viene collegato al canale 5 della ricevente Fly Sky.

La ricevente FrSky è invece collegata alla Pixhawk tramite due cavi: uno è il cavo necessario per far comunicare il radiocomando a terra con il flight controller ed è collegato per un capo alla porta SBUS della ricevente e per l'altro alla porta RCIN della Pixhawk. Attraverso questo collegamento la ricevente viene anche alimentata.

Il secondo è il telemetry cable descritto nel paragrafo 5.4 che consente di inviare i dati telemetrici dal flight controller alla ricevente e quindi al radiocomando; è collegato per un capo alla porta Smart Port della ricevente e per l'altro alla porta Telem2 della Pixhawk.

Alla Pixhawk vengono poi collegati il GPS RTK alla porta GPS1, una telemetry radio alla porta TELEM1 ed un sonar al connettore pwm AUX OUT 5.

La telemetry radio è un sistema che consente di collegarsi al flight controller tramite ground station e visualizzare in tempo reale i dati di volo. È un sistema analogo alla telemetria FrSky descritta nel paragrafo 5.4 con la differenza che in questo caso i dati telemetrici non vengono inviati al radiocomando ma al dispositivo su cui è installata la ground station. In questo modo i dati di volo del drone possono essere visualizzati da più postazioni e da più operatori

contemporaneamente. Il sistema di telemetria radio è composto da due elementi uguali definiti transceiver: i modelli precedenti prevedevano una unità Air da installare a bordo drone ed una Ground da installare a terra. I moduli di queste nuove radio, invece, sono ricetrasmittenti ed utilizzano le connessioni UART o USB. Il collegamento al flight controller avviene tramite protocollo MAVlink, lo stesso che si utilizza quando ci si collega tramite cavo USB.

Infine è stato collegato un sonar LV-MaxSonar-EZ modello MB1000 che utilizza un suono ad alta frequenza per rilevare e localizzare gli oggetti. Con un'alimentazione di 5V è in grado di captare oggetti fino ad una distanza di 6.45 m. L'output può essere di tre tipi: analogico, pwm o seriale RS232. L'uno o l'altro vengono attivati a seconda dei collegamenti realizzati sul sonar. Nel caso specifico si è scelto di utilizzare il segnale pwm quindi oltre al pin dell'alimentazione ed al ground è stato collegato il pin 2. Il valore della distanza dell'oggetto intercettato viene calcolato sulla base del parametro Time of Flight ToF, espresso in microsecondi, attraverso la relazione

$$R_i = \text{ToF}/147 \quad \text{Eq. 71}$$

dove R_i è la distanza espressa in pollici che andrà poi riconvertita in centimetri.

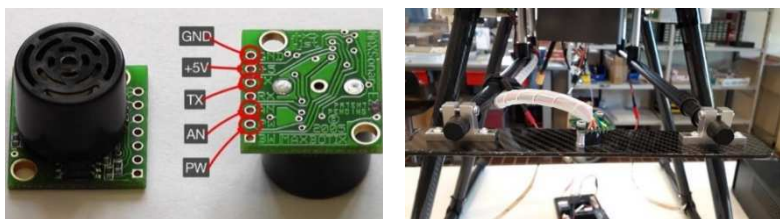


Fig. 126: Sonar LV-MaxSonar-EZ. Vista del sensore e dell'installazione a bordo

A questo punto la costruzione del drone si avvia verso la sua fase conclusiva. Rimane da programmare il flight controller.

5.7 PROGRAMMAZIONE PIXHAWK 2 CUBE

La programmazione del flight controller avviene secondo due step consecutivi: il primo consiste nella programmazione di quelli che vengono definiti mandatory hardware, il secondo riguarda la programmazione di quelli che sono invece chiamati optional hardware.

I mandatory hardware sono i componenti di base necessari a far volare correttamente il mezzo. Senza una adeguata impostazione di questi elementi potrebbe avere seri problemi di governabilità e la Pixhawk troverebbe delle difficoltà nel guidarlo.

Gli optional hardware sono invece, come si capisce già dal nome, tutti quegli elementi non necessari ai fini della buona riuscita del volo, ma che ne incrementano le prestazioni. Tramite questa sezione è possibile impostare elementi che rendono il volo più agevole e che assistono il pilota come monitor per le batterie, sonar, moduli OSD, gimbal, tutti elementi non strettamente necessari ma, per l'appunto, ausiliari.

5.7.1 MANDATORY HARDWARE

Frame Type

Il primo dei mandatory hardware è sicuramente quello relativo alla definizione della tipologia di multirottore con cui abbiamo a che fare. Deve essere definita la classe del mezzo, quindi se si tratta di quadricottero, esacottero od octacottero, ed il tipo ovvero la configurazione, quindi se si tratta di una struttura ad X, ad Y e così via. A seconda della combinazione di classe e tipo, Pixhawk assegnerà automaticamente una numerazione ai motori ed un verso di rotazione specifico per ognuno di essi.

Nel nostro caso la configurazione scelta sarà una classe quadricottero di tipo X e la numerazione partendo dal motore anteriore destro e muovendosi in senso orario sarà 1 – 4 – 2 – 3; i versi di rotazione saranno rispettivamente antiorario, orario, antiorario, orario.



Fig. 127: Vista del drone ultimato, numerazione e verso di rotazione dei motori

Calibrazione Bussola Ed Accelerometro

Come già spiegato in precedenza questi sensori hanno il compito di mantenere il drone stabile durante il volo, per cui calibrarli periodicamente aiuta a mantenere elevati i livelli di prestazione offerti dal mezzo. In particolare è opportuno calibrare la bussola e gli accelerometri ogni qual volta ci si sposti in un luogo differente o quando vengono apportate modifiche significative alla struttura.

Calibrazione Del Radiocomando

Anche in questo caso lo scopo della calibrazione è quello di ottenere un volo preciso e sicuro. La calibrazione permette alla Pixhawk di memorizzare correttamente i valori pwm associati alle diverse posizioni degli stick e degli interruttori della radio ed associarvi correttamente il movimento del drone desiderato. Prima di eseguire la calibrazione è necessario aver programmato il radiocomando poiché l'operazione riguarderà solo i canali attivi. La procedura è piuttosto semplice e consiste nel muovere prima gli stick in tutte le posizioni consentite, poi interruttori, potenziometri e qualsiasi altro canale attivo. Terminata la calibrazione sarà possibile visualizzare i dati di calibrazione ed i valori pwm effettivamente associati ai singoli canali.

Flight Mode

Pixhawk offre la possibilità di scegliere tra oltre 20 modalità di volo. È possibile selezionare fino ad un massimo di sei modalità di volo ed il passaggio da una modalità all'altra viene gestita tramite radiocomando.

Nel nostro caso sono state assegnate sei diverse flight mode:

- **Stabilize:** la modalità di volo Stabilize consente di far volare il velivolo manualmente, ma autolivella gli assi di rollio e beccheggio. Questo significa che se il pilota lascia lo stick che regola rollio e beccheggio, il mezzo si autolivella da solo.
- **AltHold:** la modalità AltHold mantiene costante la quota di volo. Il controllo di yaw, pitch e roll rimane invariato, ma viene controllato automaticamente il throttle per mantenere costante la quota: se lo stick si trova tra il 40 ed il 60% il velivolo manterrà la quota attuale, al di fuori di questo range sarà il pilota a far alzare od abbassare manualmente il mezzo. Occorre però prestare attenzione ad un dettaglio: per il mantenimento della quota, Pixhawk fa affidamento sui barometri interni, che sfruttano la pressione atmosferica come misura dell'altezza. Se la pressione varia all'interno dell'area di volo, il mezzo seguirà queste variazioni. Per questo motivo si è

-
- ritenuto opportuno installare il sonar LV-MaxSonar, descritto in precedenza, a garanzia di una corretta lettura dell'altezza da terra.
- Loiter: la modalità Loiter tenta automaticamente di mantenere posizione corrente, direzione ed altezza. Una volta lasciati gli stick del radiocomando il drone rallenta e mantiene fissa la posizione in cui si trova. È fondamentale per questa flight mode che si abbia un ottimo segnale GPS, minime interferenze elettromagnetiche e minime vibrazioni.
 - Return To Launch RTL: attivando la modalità di volo RTL il drone ritornerà nel punto da cui è partito. Si porterà prima alla quota di 20m o si fermerà alla quota attuale se questa fosse superiore. Come la modalità Loiter, anche RTL è dipendente dal segnale GPS, quindi per ottenere buone prestazioni è fondamentale avere un buon segnale prima di entrare in questa flight mode. Non solo, è anch'essa basata sull'uso del barometro per la misura dell'altezza, quindi anche in questo caso variazioni di pressione dovute ad esempio a variazioni meteo saranno interpretate come variazioni di quota.
 - Autotune: l'Autotune è la modalità di volo che consente di fare l'autocalibrazione dei parametri PID, Proporzionale-Integrale-Derivato. I PID sono parametri che caratterizzano le modalità con cui il drone, o meglio il flight controller, reagisce ai disturbi esterni.
 - P, proporzionale, ha lo scopo di regolare la potenza con cui il flight controller reagisce al disturbo; più è elevato, più l'assetto del drone risulterà stabile, ma se è troppo elevato inizieranno fenomeni di oscillazione. In genere per la sua regolazione ci si muove con incrementi di 0.5 unità ogni volta.
 - D, derivato, è il parametro che regola la velocità di risposta al disturbo. La corretta o meno impostazione di questo parametro si nota soprattutto quando al mezzo viene richiesto di compiere movimenti relativamente bruschi come il passaggio da un volo veloce all'hovering o manovre particolari come quelle acrobatiche. I valori di D devono essere sufficientemente alti per consentire movimenti fluidi e non rigidi.
 - I, integrale, gestisce, infine, la durata della correzione. Più è alto, più il drone tende a mantenere la traiettoria impartitagli. Incrementi di I dovrebbero avvenire con step di 0.05 unità.

L'impostazione manuale di questi parametri non è semplice, poiché prevede che il valore impostato vada di volta in volta testato e modificato fino ad ottenere la risposta al disturbo desiderata; per questo alcuni flight controller più evoluti, come appunto Pixhawk 2 Cube, è stata implementata sotto forma di flight mode vera e propria, l'Autotune. Attivando questa flight mode il drone entrerà in modalità auto-calibrazione dei PID ed inizierà ad eseguire dei movimenti e delle traslazioni causali, ovviamente lenti, fino ad autodeterminare i valori ottimali. Durante l'autotuning sarà comunque possibile riprendere il controllo del mezzo se per esempio dovesse avvicinarsi troppo ad un ostacolo.

- Auto: è la modalità di volo utilizzata per far eseguire al drone missioni basate su waypoint pre-caricati.

Il passaggio da una modalità di volo all'altra avviene a mezzo del radiocomando su cui sono stati programmati due switch a tre posizioni (SG ed SE) ed uno a due posizioni (SF). Lo switch SF abilita SG od SE a seconda che sia rispettivamente basso o alto. Sullo switch SG sono impostate le modalità Stabilize, AltHold e Loiter, sullo switch SE sono impostate le modalità RTL, Autotune ed Auto.



Fig. 128: Switch dedicati alle flight mode

In aggiunta all'assegnazione dei flight mode è possibile impostare altri due parametri: Modo Simple e Modo Super Simple. Sono i diversi sistemi di riferimento che possono essere assegnati al drone per ogni flight mode.

- **Modo Simple:** il sistema di riferimento è solidale con l'orientamento che ha il drone al momento dell'armamento dei motori. Significa che quella che per lui era la direzione avanti al momento dell'armamento lo sarà sempre, anche se l'orientamento dovesse cambiare. Quindi non importa in che verso si trova il drone, se punta con il naso in avanti o indietro, se il comando dello stick dice di andare a destra (la destra rispetto al punto di home) lui andrà a destra, se gli dice di tornare indietro lui torna indietro verso il punto di home anche se ha il naso puntato verso questo punto. Quando si vola con questo sistema di riferimento è consigliabile che il pilota tenga sempre il drone avanti a sé poiché se dovesse finire alle sue spalle, tutti i comandi risulterebbero invertiti. Facciamo un rapido esempio: supponiamo che il pilota si trovi dietro al drone al momento dell'armamento e che il drone abbia la coda rivolta verso il pilota. L'avanti del drone coincide con quello del pilota così come la sinistra, la destra e il dietro. Durante il volo in simple mode questo riferimento verrà mantenuto, quindi ad una posizione dello stick del pitch in avanti, il drone andrà sempre avanti. Se il drone si trovasse alle spalle del pilota, andrebbe sì in avanti, secondo il sistema di riferimento, ma verso il pilota, perché per lui le direzioni sono sempre le stesse indipendentemente da dove o con che orientamento si trova. Questo sistema di riferimento risulta particolarmente utile quando il mezzo è lontano dal punto di home ed è difficile capire come è orientato.
- **Modo Super simple:** il sistema di riferimento super simple è molto simile al simple con la differenza che è solidale al punto di home e non all'orientamento del drone al momento dell'armamento dei motori. Questo significa che se il drone si trova alle spalle del pilota, ad una posizione dello stick indietro corrisponderà un avvicinamento del mezzo al punto di home e quindi al pilota. In altre parole, mentre con la simple mode il drone si sarebbe ulteriormente allontanato come risposta al comando "vai indietro", in questo caso lui si riavvicina al punto di home tornando appunto indietro rispetto al suo sistema di riferimento.

Nel nostro caso specifico, però, nessuno dei due modi risulta selezionato. In questo caso viene automaticamente abilitato il Normal Mode, ovvero il sistema di riferimento solidale al drone stesso ed all'orientamento del flight

controller. Di conseguenza se il drone si trova alle spalle del pilota ed è orientato in verso opposto, al comando del pilota “vai a destra” il drone si muoverà alla sua destra, ovvero alla sinistra del pilota.

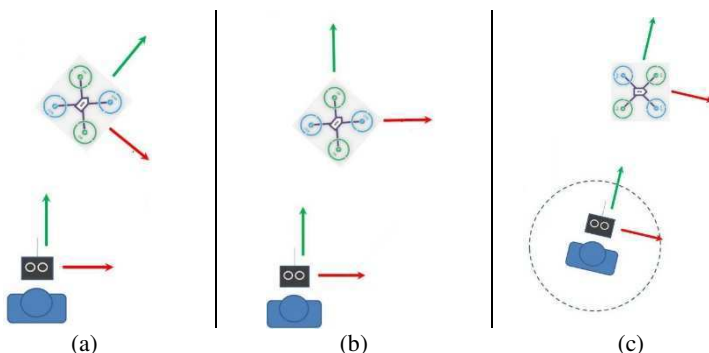


Fig. 129: Sistemi di riferimento Normal (a), Simple (b), Super Simple (c)

Failsafe

Il failsafe è una procedura di sicurezza importantissima e consiste nel programmare una determinata risposta del drone a particolari eventi pericolosi. Tramite Mission Planner è possibile impostare diversi meccanismi di failsafe a seconda dell'accadimento: perdita del segnale proveniente dal radiocomando, livello di tensione delle batterie troppo basso, perdita di collegamento con la Ground Control Station. Ad ognuno di questi eventi può essere associata una diversa risposta da parte del drone. Di seguito le impostazioni del caso specifico.

- **Radio-failsafe.** La perdita del segnale tra radiocomando e ricevente è una situazione che va in ogni modo evitata. Per questo è stata abilitato il meccanismo di radio-failsafe: se viene a mancare il segnale, al drone viene imposto di tornare al punto di home. È stata programmata la procedura di radio-failsafe in modo tale che una volta attivato il Return-to-launch il drone si porterà ad un'altezza di 20m sopra il punto di home, se si trova ad un'altezza inferiore, altrimenti si manterrà alla quota attuale, attenderà un tempo pari a 5000ms prima di iniziare la manovra di discesa verticale ed atterrerà. Durante questa procedura cercherà di mantenere una velocità traslazionale pari a 5m/s ed una velocità di discesa durante l'atterraggio pari a 0.5m/s.
- **Battery-failsafe.** Il battery-failsafe entra in azione quando il voltaggio della batteria o la sua capacità residua scendono al di sotto

di un valore soglia impostato dall'utente per più di 10 secondi. Come evento consequenziale all'attivazione del battery-failsafe si può scegliere tra il RTL o l'atterraggio immediato. Noi abbiamo preferito impostare anche in questo caso il return-to-launch che avverrà secondo le modalità descritte appena sopra per il radio-failsafe.

5.7.2 OPTIONAL HARDWARE

Here+ RTK GPS

Il gps Here+RTK viene interpretato dalla Pixhawk come optional hardware, pertanto è necessario abilitarlo.

Geofence

Il geofence è una barriera virtuale che viene spesso impostata come misura di sicurezza per non lasciare che drone si allontani oltre una certa distanza dal punto di home. In pratica si assegna al drone uno spazio aereo ben preciso e lo si lascia volare solo al suo interno. Se la barriera viene superata la Pixhawk può attuare tre diverse azioni: mandare un messaggio di avviso, atterrare o tornare al punto di home. È stata quindi impostata una barriera virtuale di forma cilindrica, avente altezza massima da terra di 150m e raggio pari a 500m. Se la barriera verrà superata verrà inviato un messaggio.

Sonar LV-MAXBOTIC-EZ

Il sonar rientra tra gli optional hardware definiti Rangefinder. Sono tutti quei sistemi utilizzati per misurare la distanza del drone dagli oggetti che lo circondano e sono spesso utilizzati per definire la “obstacle avoidance”. Nel nostro caso il motivo della scelta della sua installazione risiede nel fatto che alcune flight mode impostate sono basate sull'uso del barometro per la lettura dell'altezza, quindi si è deciso di inserire un ulteriore elemento a supporto. In particolare il sonar risulta utile nelle ultime fasi di atterraggio.

Telemetria

Anche i parametri relativi alla telemetria vengono inseriti all'interno della famiglia degli optional hardware, pur trattandosi di un aspetto fondamentale senza il quale non sarebbe possibile connettersi da remoto con il flight controller e visualizzare in tempo reale i dati di volo. Ciò che si richiede di definire è il tipo di protocollo di comunicazione che deve essere abilitato per

la porta utilizzata per trasmettere i dati telemetrici. Nel nostro caso abbiamo una doppia trasmissione telemetrica, una a mezzo del telemetry cable che collega la Pixhawk alla ricevente X8R e che invia i dati al radiocomando Taranis, ed un'altra connessa solo alla Pixhawk che tramite ricetrasmittente invia i dati alla Ground Station. Di conseguenza andranno specificate due porte.

5.8 STIME FINALI DELLE AUTONOMIE DI VOLO

La struttura del drone è stata completata ed è risultata avere un peso complessivo di 13kg. Per determinare le nuove autonomie di volo sono stati valutati gli assorbimenti in corrente di tutti i dispositivi attualmente installati a bordo. La capacità della batteria, si ricorda, è di 22Ah.

DISPOSITIVO	ASSORBIMENTO IN CORRENTE
Motori al 100% di spinta	280A
Termocamera Flir A655sc	2A
Fotocamera Sony FCB EV-7520	0.6A
Relè	1A
Modulo telemetrico	0.5A
Pixhawk	0.250A
Ricevente FlySky	0.2
Ricevente FrSky X8R	0.1
TOT	284.65A
Autonomia al 100% di spinta	4.6min
Motori al 75% di spinta	137.2A
Termocamera Flir A655sc	2A
Fotocamera Sony FCB EV-7520	0.6A
Relè	1A
Modulo telemetrico	0.5A
Pixhawk	0.250A
Ricevente FlySky	0.2A
Ricevente FrSky X8R	0.1A
TOT	141.85A
Autonomia al 75% di spinta	9.3min
Motori al 50% di spinta	55.2A
TOT	59.85A
Autonomia al 50% di spinta	22.4min

Tab. 37: Stime finali delle autonomie di volo

Considerando che al 50% di spinta il drone è in grado di sollevare complessivamente 17.6kg, il risultato è soddisfacente. Se si volesse incrementare ulteriormente l'autonomia di volo una soluzione potrebbe essere quella di alimentare le camere e la termocamera tramite una batteria secondaria dedicata, ma questa decisione è vincolata all'analisi dell'incremento del peso dovuto a questa eventuale seconda batteria ed al conseguente aumento dell'assorbimento dei motori. Non è detto, infatti, che un'alimentazione separata possa effettivamente comportare un aumento dell'autonomia apprezzabile.

5.9 TEST DI VOLO

In data 3 ottobre 2018 è stato condotto il primo test di volo.

La località scelta come area di test è la frazione Morichella, appartenente al territorio del Comune di San Ginesio (MC). Il luogo in cui è stato fatto volare il drone, un vasto campo pianeggiante con fondo in erba piuttosto bassa, ha coordinate geografiche 43° 4' 18.33" Nord 13°16' 5.36" Est, coordinate UTM zona 33T 359003.07 Est 4770239.02 Nord, elevazione sul livello del mare circa 488 m.



Fig. 130: Vista dell'area di prova nella frazione Morichella, San Ginesio (MC)

Come prima operazione sono stati calibrati bussole ed accelerometri. Questa operazione va ripetuta prima di ogni volo e consiste nel far ruotare il drone in tutte le posizioni affinché possa acquisire correttamente l'orientamento negli assi x, y e z. La calibrazione non è stata affatto semplice perché il drone è pesante ed ingombrante, pertanto è stato necessario l'intervento di tre persone per farlo ruotare in tutte le direzioni più una quarta che gestiva il pc

su cui era in esecuzione la ground station Mission Planner. Si è deciso che verrà costruita una piattaforma girevole che possa essere di sussidio per le prossime calibrazioni.

Successivamente, dopo aver verificato la bontà del segnale GPS, si è passati alla procedura di armamento dei motori che consiste nel tenere premuto il pulsante dedicato posto sul modulo GPS a bordo del drone finché il led rosso lampeggiante non diventa rosso fisso e poi portare gli stick del radiocomando contemporaneamente verso l'interno ed in basso. Alzando lo stick del throttle i motori iniziano a girare. Immediatamente si è manifestata la loro elevata potenza attraverso un decollo brusco e conseguente ad uno spostamento minimo dello stick. La potenza raggiunta in un così breve lasso di tempo implica che gli ESC non hanno il tempo di assestare e sincronizzare i giri al minuto dei motori, le coppie generate non sono tutte uguali ed il decollo, oltre ad essere estremamente rapido, avviene anche con parziale instabilità del mezzo che si solleva in posizione inclinata. Dalle registrazioni video si è potuto constatare che il tutto è avvenuto nel giro di appena un secondo dall'inizio della rotazione delle eliche. Il pilota ha continuato ad aumentare il throttle ed il drone ha ripreso un assetto regolare e si è alzato di quota. Sono stati condotti tre test ed il decollo è avvenuto sempre secondo le stesse modalità pertanto sarà necessario programmare il radiocomando affinché all'armamento dei motori corrisponda una loro immediata accensione ad un minimo numero di giri per consentire agli ESC di sincronizzarsi.



Fig. 131: Frame catturati durante il primo volo del drone quadricottero

Nelle immagini è possibile vedere alcuni dei frame catturati dalla fotocamera in cui si hanno rispettivamente il drone in posizione appena prima del decollo, la fase di decollo in cui è evidente l'inclinazione del mezzo, la fase immediatamente successiva in cui gli ESC hanno sincronizzato i giri dei motori riportando il mezzo ad un assetto orizzontale ed in ultimo un frame del volo.

Per quanto riguarda il volo vero e proprio il pilota ha dichiarato di non aver avuto particolari difficoltà nel guidare il drone.

Ad ogni modo il flight controller deve avere il tempo di auto-addestrarsi e di auto-regolare i parametri di volo, pertanto sarà necessario ripetere più missioni, possibilmente più lunghe, in modo che gli venga consentita questa auto-regolazione

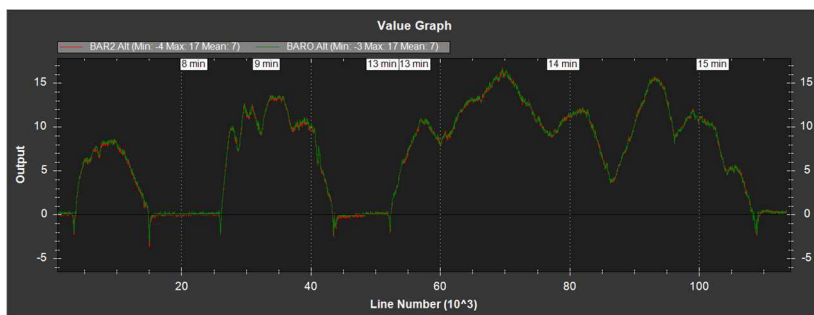
Nei prossimi test dovrà anche essere utilizzata una zavorra a simulare il peso delle attrezzature per riportare il baricentro nella posizione ottimale vicina al flight controller. Nella configurazione testata, infatti, il baricentro si trova molto vicino al piano delle eliche, di poco inferiore ad esso.

Di rientro dalla missione si è passati all'analisi dei dati memorizzati dal flight controller.

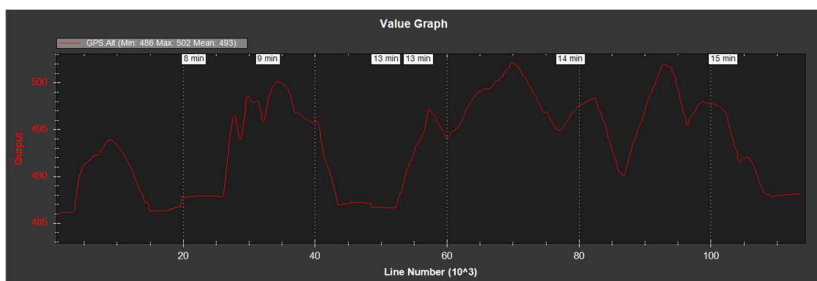
La Pixhawk memorizza tutto all'interno della propria scheda micro SD sotto forma di file di estensione .log che è possibile scaricare ed analizzare direttamente tramite Mission Planner. In alternativa i dati possono essere riconvertiti in altri formati, come .csv, per ulteriori trattamenti.

Immediatamente sono state analizzate le informazioni di base come la quota di volo, l'assorbimento della batteria, le velocità raggiunte dal mezzo.

Per quanto riguarda la quota vengono registrate due diverse informazioni: l'altezza dal piano campagna misurata dai barometri interni agli IMU (Fig. 132-(a)), e la quota rispetto al livello del mare misurata dal GPS (Fig. 132-(b)).



(a)



(b)

Fig. 132: Quota misurata dal flight controller rispetto al piano di campagna (a) e rispetto al livello del mare (b)

Le misure risultano coerenti tra loro.

Per quanto riguarda l'assorbimento della batteria, non è chiara la spiegazione, ma risultano memorizzati solo i valori dell'andamento della tensione, perfettamente regolari, ma non gli andamenti degli assorbimenti in corrente. Il problema potrebbe risiedere nei sensori stessi posti a valle della batteria, ma saranno necessari ulteriori test per accertarne la causa reale.

Per quanto riguarda la velocità di volo, questo valore viene restituito come stima del GPS ed è espresso in m/s.

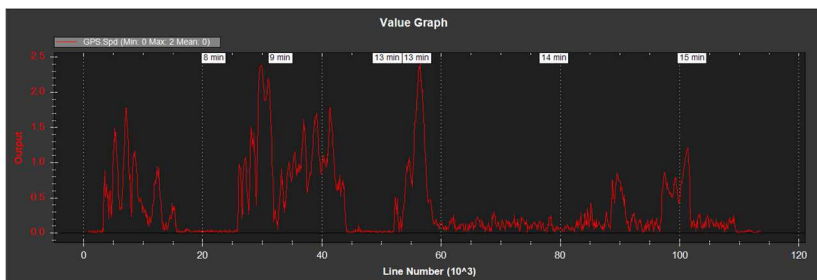
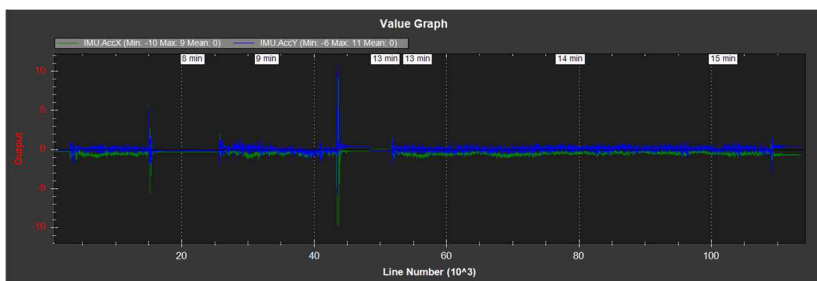
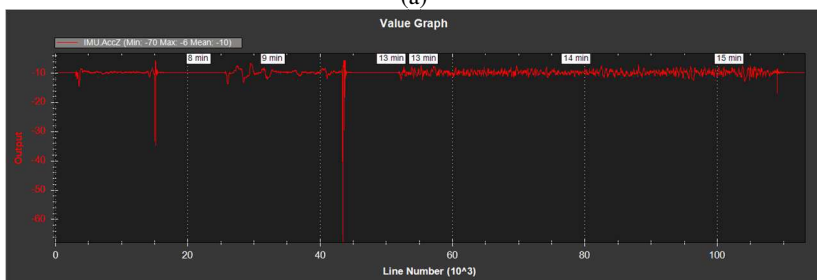


Fig. 133: Velocità di volo stimata dal GPS

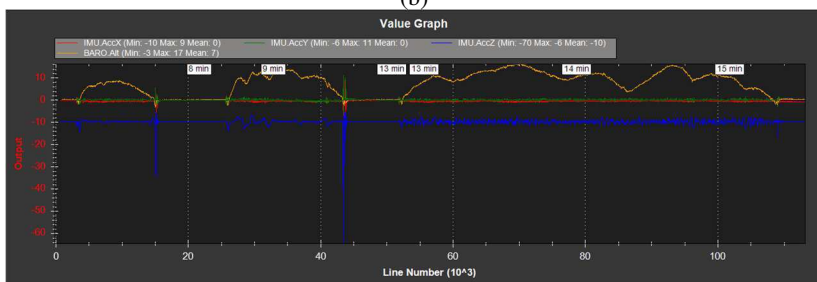
Successivamente sono state verificate le vibrazioni indotte sulla Pixhawk durante il volo. Si era detto che questo è uno degli aspetti cruciali del volo perché vibrazioni anomale possono falsare le letture dei sensori installati nell'IMU. Secondo letteratura questi valori devono essere contenuti tra i $\pm 3\text{m/s}^2$ per quanto riguarda le accelerazioni lungo gli assi X ed Y, e $\pm 15\text{m/s}^2$ per quanto riguarda le accelerazioni lungo l'asse Z. Di seguito i valori misurati.



(a)



(b)



(c)

Fig. 134: Verifica delle vibrazioni lungo gli assi X, Y (a) e Z (b) e confronto dei valori con la quota da terra (c)

Nell'immagine 134-(a) vengono riportati i valori delle accelerazioni lungo l'asse X, in verde, ed Y, in blu, mentre nel grafico 134-(b) si possono vedere in rosso le accelerazioni lungo l'asse Z.

Non si hanno valori anomali nelle vibrazioni percepite dal flight controller che rientrano tutte nei range indicati. Gli unici spike sono provocati dalle fasi di atterraggio che non sono state delicatissime poiché avvenute con una serie di rimbalzi, dunque i picchi sono contemporanei ai momenti in cui i carrelli toccano terra. Questa deduzione è stata possibile andando ad analizzare

l'andamento delle accelerazioni in relazione alla quota di crociera del drone rispetto al piano campagna come mostrato nell'immagine 134-(c). La linea gialla è relativa alla quota misurata dal barometro interno all'IMU.

Un'analisi molto interessante è quella dei parametri RCOUT. Da questa sezione è possibile vedere gli output che vengono emessi dal flight controller verso ESC e motori. Trattandosi di un quadricottero i valori che ci interessano sono quelli che vanno dal C1 al C4.



Fig. 135: Parametri RCOUT emessi dal flight controller verso i motori

Quelli che vediamo diagrammati sono i valori di pwm inviati ai motori. Ovviamente non sono tutti uguali perché ogni motore dovrà effettuare delle compensazioni per tenere l'assetto richiesto, ma quello che è interessante è vedere come tutti tendano ad allinearsi quando viene attivata la modalità di volo Loiter e viene quindi richiesto al flight controller di mantenere il drone in una posizione fissa. Questo grafico è molto importante perché aiuterebbe ad individuare un malfunzionamento dei motori qualora uno degli andamenti, o più di uno, si discostasse notevolmente dagli altri.

Un'altra sezione molto interessante è quella che si trova sotto la sigla ATT (Attitude information) attraverso la quale è possibile capire se i movimenti che noi diamo in input sono quelli che realmente il drone fa. In genere questo menù viene confrontato dopo aver effettuato una correzione, manuale o tramite l'Autotuning, dei valori dei PID, ma rimane sempre un buon indicatore della risposta del drone ai comandi. I valori che si possono verificare sono quelli relativi a roll, pitch e yaw, desiderati (DesRoll, DesPitch e DesYaw) e reali (Roll, Pitch e Yaw). Se i valori desiderati e quelli reali si sovrappongono, o quasi, allora la risposta del drone è soddisfacente. Nel caso in esame, come ci si aspettava, i valori sono sì molto simili ma presentano degli scostamenti. In prima battuta i PID vengono, infatti, lasciati ai valori di default ma è decisamente consigliabile far eseguire al mezzo un

volo in modalità AutoTune affinché possa essere esso stesso ad auto-regolarli. Sarà questo uno degli obiettivi del prossimo test.

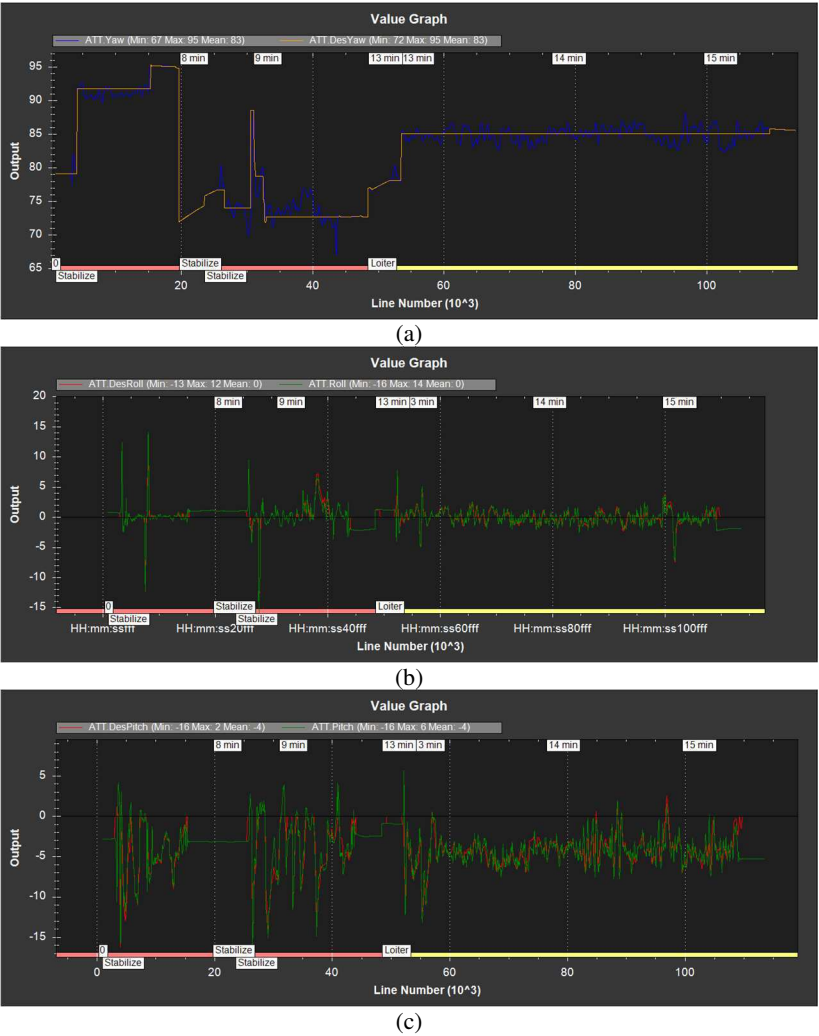


Fig. 136: Yaw vs DesYaw (a), Roll vs DesRoll (b), Pitch vs DesPitch (c)

Oltre ai file .log, Pixhawk memorizza un file .kmz con cui è possibile rivedere in formato grafico e video i punti percorsi dal drone durante i suoi voli in Google Earth.

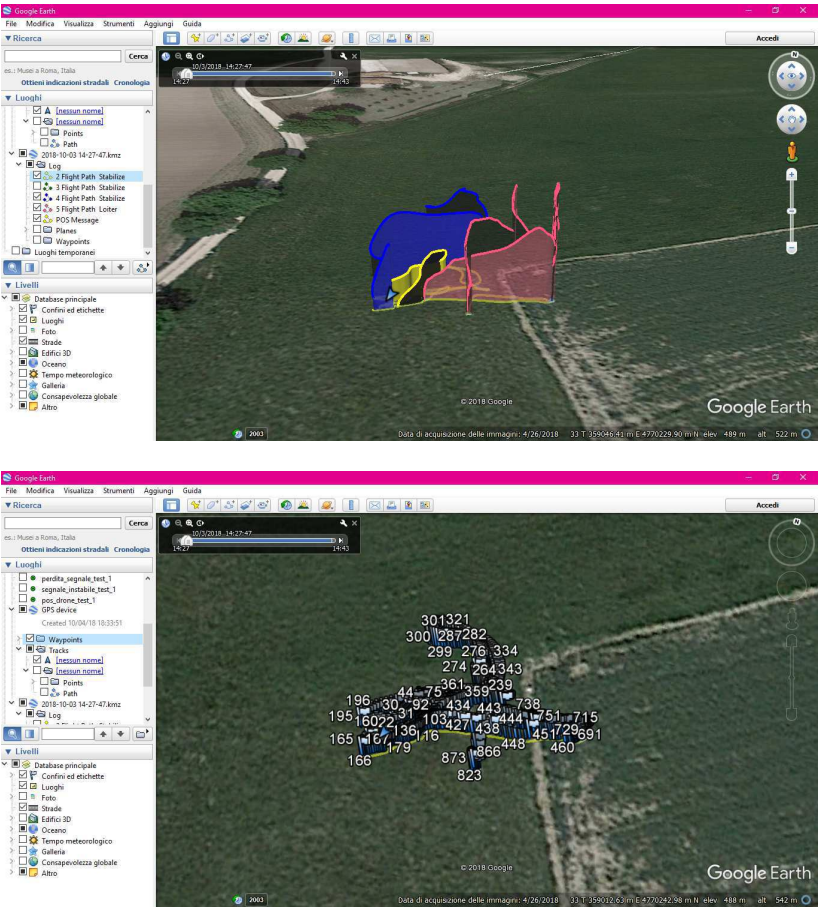


Fig. 137: Contenuto del file .kmz registrato dal flight controller

CONCLUSIONI PARTE SECONDA

Le attuali tecniche di indagine con cui avvengono le ispezioni sulle turbine eoliche si svolgono per mano di tecnici specializzati a cui viene richiesto di arrampicarsi su fune. Date le aumentate dimensioni dei rotori ed i rischi intrinsecamente connessi a questa attività, si è ritenuto di dover sviluppare un sistema che potesse essere d'aiuto e che fosse in grado al contempo di ridurre i tempi associati alle ispezioni aumentandone il livello di sicurezza con cui si svolgono. Il tutto è nato dalle attività svolte presso l'area montana di Serrapetrona, in cui in diverse occasioni è stato richiesto ai tecnici di arrampicarsi in cima alla torre anemometrica fino ad 80m per verificare lo stato di manutenzione dei sensori. Il nostro gruppo di ricerca si occupava della torre di misura ma il concetto è lo stesso se applicato alla turbina. Si è visto come spesso le condizioni climatiche non erano favorevoli ad un'arrampicata, ma poiché si era resa necessaria non si poteva procedere in altro modo. Se si avesse avuto già allora uno strumento come un drone, si sarebbe quantomeno potuto effettuare una prima indagine per verificare quale fosse il problema e successivamente far arrampicare il tecnico che a quel punto, però, avrebbe avuto già chiara la situazione ed il da farsi.

Da qui si è deciso quindi di sviluppare un mezzo aereo a pilotaggio remoto equipaggiato con fotocamera e termocamera, come descritto nel capitolo 4. Uno degli aspetti più importanti era che il mezzo avrebbe dovuto operare mantenendo alti i livelli di sicurezza. Per soddisfare questa esigenza è stato sviluppato un sistema anti-collisione. Le soluzioni a disposizione erano tante: sensori ad infrarossi, sonar, sensori a contatto. Per le motivazioni descritte sempre nel capitolo 4 si è optato per i sensori a contatto.

I test sul campo hanno permesso di determinare il funzionamento del sensore, seppur con tempi di risposta più lunghi di quanto atteso.

Le attività svolte con il primo drone hanno poi avuto un ruolo chiave nello sviluppo del secondo drone presentato in questo lavoro di tesi, resosi necessario quando il gruppo di ricerca di cui la scrivente è stata parte è stato coinvolto nel progetto strategico di Ateneo A.D.E.L.E.

Si può dire che i multirobot descritti nei capitoli 4 e 5 sono strettamente correlati tra loro, perché le conoscenze apprese durante lo sviluppo del primo, i limiti riscontrati, le difficoltà realizzative, sono stati la base per lo sviluppo del drone del progetto A.D.E.L.E. Tutti gli aspetti critici rilevati lavorando con l'esacottero è stato possibile superarli con il quadricottero, partendo dallo stesso sensore anti-urto, che sarà sviluppato secondo una logica completamente differente, passando per il limite della centralina di volo

NAZA basata su un protocollo non programmabile mentre quella del quadricottero è open source, oppure ancora incrementando la trasmissione dei dati telemetrici e video a terra, per cui un operatore potrà dedicarsi tranquillamente alla guida del drone mentre un altro potrà gestire tutta la parte video e l'inquadratura delle immagini.

Un risultato così performante come quello rappresentato dal quadricottero non sarebbe stato possibile raggiungerlo se prima non avessimo affrontato l'allestimento dell'esacottero.

Ed ovviamente non sarebbe stato possibile raggiungerlo senza gli enormi progressi compiuti dalla tecnologia disponibile nel corso di questi pochi anni. In conclusione, lo scopo del lavoro che ha coinvolto la scrivente per la seconda metà della sua esperienza da dottoranda era quello di creare un'infrastruttura che potesse mettere l'Ateneo in condizioni di operare con i droni per poter eseguire un'ampia serie di attività e ricerche scientifiche.

Il laboratorio è stato istituito, i piloti sono formati, i droni sono pronti.

Non rimane che lasciare libera l'ingegnosità di docenti e ricercatori.

BIBLIOGRAFIA

- 1) IEC 61400-12-1 “Wind turbines – Part 12-1: Power performance measurements of electricity producing wind turbines”, edizione 1 emanata nel 2005 ed edizione 2 emanata nel 2017.
- 2) Albers, T. Jakobi, R. Rohden, J. Stoltenjohannes *Influence of Meteorological Variables on Measured Wind Turbine Power Curves*, Proceedings of European Wind Energy Conference, EWEC, Milan 2007.
- 3) L. Morten Bardala, L. Roar Sætrana, E. Wangsnessa, *Performance test of a 3MW wind turbine – effects of shear and turbulence*, 12th Deep Sea Offshore Wind R&D Conference, EERA DeepWind'2015, Energy Procedia 80 (2015) 83-91.
- 4) Clifton, R. Wagner, *Accounting for the effect of turbulence on wind turbine power curves*, Journal of Physics: Conference Series 524, IOP Publishing 2014 p. 012109.
- 5) L. Morten Bardala, L. Roar Sætrana, *Influence of turbulence intensity on wind turbine power curves*, 14th Deep Sea Offshore Wind R&D Conference, EERA DeepWind'2017, 18-20 January 2017, Trondheim, Norway.
- 6) C. M. St. Martin, J. K. Lundquist, A. Clifton, G. S. Poulos, S. J. Schreck, *Wind turbine power production and annual energy production depend on atmospheric stability and turbulence*, Wind Energy. Science, 1, 221–236, 2016.
- 7) U. Bunse, H. Mellinghoff, *Assessment of Wind Profile Effects for a Set of Site Calibration Measurements following IEC 61400-12-1*, Dewi Magazin No. 32, February 2008.
- 8) T. Mikkelsen, *Remote Sensing of Wind*
- 9) M. Giannì, L. Imperato, *Workshop: Tecnologia SODAR: utilizzo nelle misurazioni del vento e servizi offerti*, Zero Emission Rome 2011, Energie Rinnovabili per il Mediterraneo, Roma, 14-16 Settembre 2016.

-
- 10) D. Bernadett, H.Mellinghoff, Webinar: *IEC61400-12-1 EDITION 2, How the new standard will affect you*, 11 Settembre 2017
 - 11) Measnet, *Power performance measurement procedure*, version 5, Dicembre 2009
 - 12) Slide Corso di Energetica A.A. 2017/2018 Prof. Ing. Renato Ricci
 - 13) D. Fry, Adjusting and calibrating out offset and gain error in a precision DAC, Tutorial 4602, www.maximintegrated.com
 - 14) *Utilizzo della Norma IEC 61400-12-1 (2005) Power Performance measurements of electricity producing wind turbines*, documento interno WEST-lab
 - 15) WindSim manual *Getting Started WindSim 5*.
 - 16) The Phoenix Encyclopaedia, *The Wilcox (1988) k - ω turbulence model*, http://www.cham.co.uk/phoenics/d_polis/d_enc/encindex.htm
 - 17) Next foam open source CFD consulting, *Boundary Conditions - OpenFOAM-2.3.0*, Febbraio 2014
 - 18) D. Di Benedetto, *Analisi di microscala della risorsa eolica: dall'approccio sperimentale alla modellazione numerica*, tesi di Dottorato, UNIVPM
 - 19) Arduino, guide e tutorial, <https://www.arduino.cc/>
 - 20) ENAC 2017, *Regolamento Mezzi Aerei a Pilotaggio Remoto*.
 - 21) Ardupilot documentation, <http://ardupilot.org/copter/>
 - 22) Designing Purpose-Built Drones for Ardupilot Pixhawk 2.1, Published by Puckt Publishing Ltd, 2017
 - 23) KDEdirect brushless motor documentation, ESC documentation, <https://www.kdedirect.com/>