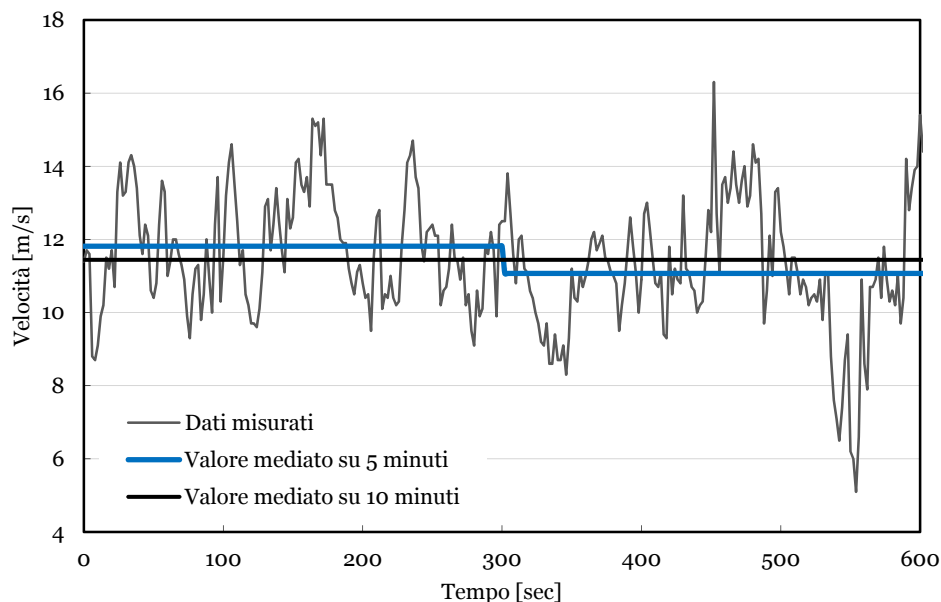


## LA TURBOLENZA

Lo Strato Limite Planetario (o *Planetary Boundary Layer*, PBL) è quella porzione di troposfera a diretto contatto con la superficie terrestre direttamente influenzata dalla superficie terrestre, che risponde all'immissione di energia da essa proveniente con scale temporali dell'ordine dell'ora. L'attrito subito dalle masse d'aria in movimento, le distorsioni indotte al loro flusso dall'orografia, l'evapotraspirazione, il trasferimento di calore dal suolo all'aria rappresenta nel complesso l'influenza determinata dalla superficie terrestre sul PBL. **Il vento nel PBL è sempre turbolento.** Questo significa che il flusso è caotico, con periodi casuali, variabili dalle frazioni di secondo ad alcuni minuti.

Per descrivere il moto turbolento sono applicati metodi statistici. La velocità del vento è così descritta dalla sua *velocità media* e dalle *componenti turbolente*. A titolo di esempio, in **Figura 1** si riporta una registrazione di 600 secondi che raccoglie le misure di intensità del vento (in grigio) acquisite ogni 2 secondi. Risulta evidente una marcata variabilità della risorsa, le cui oscillazioni vanno dai 5 m/s ai 16 m/s circa. Si riportano inoltre i valori medi dei 5 minuti (azzurro) e dei 10 minuti (nero). Tanto più le fluttuazioni di velocità del vento rispetto al valor medio sono marcate e frequenti, tanto più la risorsa eolica è turbolenta.



**Figura 1** – Valori di intensità del vento misurati (in grigio, torre anemometrica 2 presso il Campo Eolico Sperimentale, a 18 m dal suolo, periodo 31 marzo 2008), mediati su 5 minuti (azzurro) e su 10 minuti (nero).

Una misura del livello complessivo di turbolenza è l'**intensità di turbolenza media I**. Essa è definita come il rapporto tra la deviazione standard delle fluttuazioni di velocità del vento ( $\sigma_V$ ) e la velocità media del vento (in questo caso è calcolata sui 10 minuti,  $V_{10}$ ) calcolata su un breve intervallo di tempo (all'interno dello *spectral gap*, come si capirà meglio nel seguito):

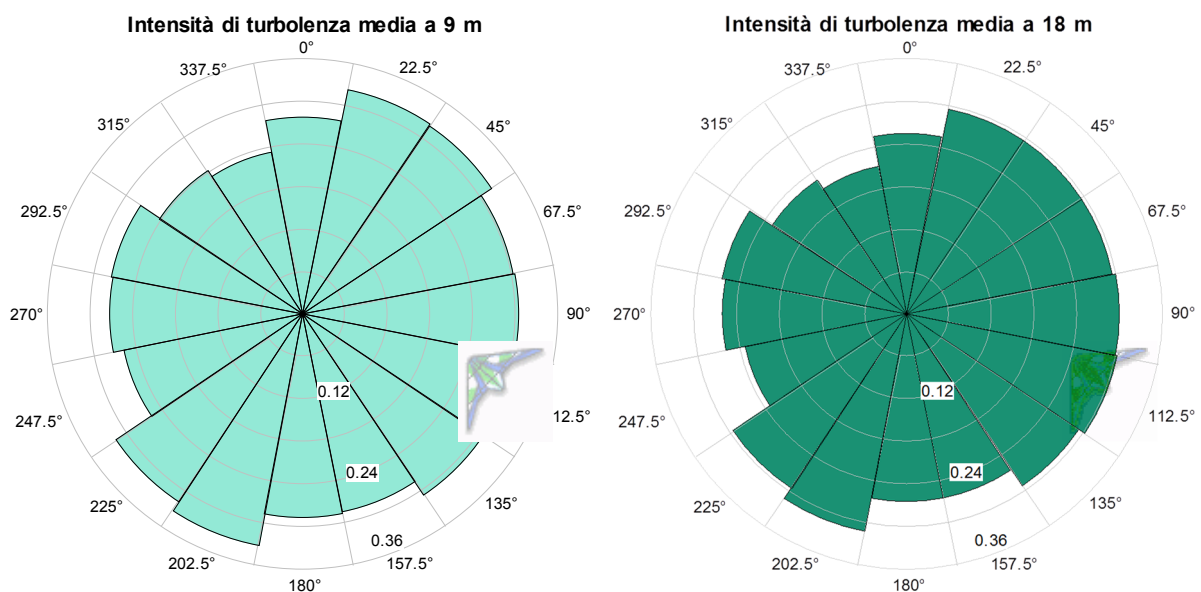
$$I = \frac{\sigma_V}{V_{10}}$$

In **Tabella 1** si riportano i valori di intensità di turbolenza relativi alla risorsa misurata dalle torre anemometriche presenti al Campo Eolico Sperimentale a due differenti altezze dal suolo (9 m e 18 m). Si tratta di valori piuttosto elevati principalmente causati dalla vicinanza di numerosi ostacoli e dal mescolamento delle correnti d'aria provenienti da direzioni diverse (brezza monte-valle con la brezza lago-valle oppure con flussi d'aria incanalati da ostacoli rilevanti).

La **Figura 2** presenta l'intensità di turbolenza media per settore di direzione. Il valore è elevato per tutti i settori. Il settore più importante per la risorsa disponibile (WSW) presenta un valore inferiore rispetto ad altri settori con risorsa scarsa.

**Tabella 1** – Valori di intensità di turbolenza medi relativi alle misure eseguite presso il Campo Eolico Sperimentale di Trento nel periodo 2007-2009.

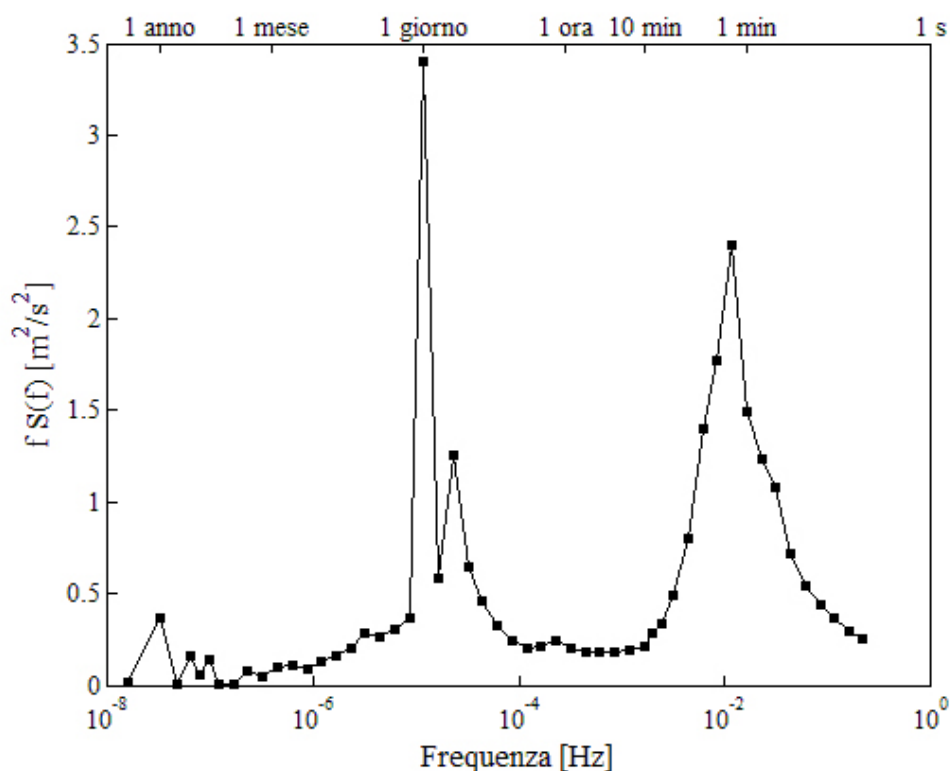
Altezza dell'anemometro dal suolo	9 m	18 m
Torre anemometrica 1 - Intensità di turbolenza media	0.244	0.271
Torre anemometrica 2 - Intensità di turbolenza media	0.220	0.247



**Figura 2** – Intensità di turbolenza, media per settore di direzione (misure eseguite presso il Campo Eolico Sperimentale di Trento nel periodo 2007-2009).

Nel trattare i dati anemologici del Campo Eolico Sperimentale di Trento si è data particolare importanza all'analisi della turbolenza per la caratterizzazione del sito, per la validazione di modelli di turbolenza in terreni complessi, oltre che per la valutazione del suo effetto sulle condizioni funzionali e strutturali delle turbine installate.

Nella successiva analisi delle componenti turbolente, il database analizzato è costituito da un anno di dati acquisiti alla frequenza di 0.5 Hz. In **Figura 3** sono rappresentati esempi di elaborazioni condotte sui dati misurati tra il 2007 e il 2013. Per questo i dati meteorologici presenti nel database per ogni periodo di indagine vengono suddivisi in classi, in funzione delle seguenti grandezze: velocità media del vento, intensità di turbolenza media, direzione, temperatura, irraggiamento.



**Figura 3** – Spettro di potenza delle velocità ottenuto con i dati rilevati al Campo Eolico Sperimentale sui dati acquisiti tra il 2007 e il 2013 [immagine riprodotta da L. Battisti “Gli Impianti Motori Eolici”, Lorenzo Battisti Editore, 2012].

In **Figura 3** si riporta lo **spettro di potenza delle velocità** [Battisti, 2012]. Il picco a frequenza più bassa rappresenta i cicli diurni, cioè le fluttuazioni di velocità del vento aventi un periodo di 24 ore. Queste fluttuazioni sono da imputare all'attività termica dovuta al riscaldamento diurno. In particolare nella valle dell'Adige si sovrappongono l'effetto della brezza di monte-valle e quella di lago-terra proveniente dal lago di Garda, entrambe a periodicità giornaliera.



Nella parte di spettro per periodi che vanno dalle 3 ore a circa 5 minuti il contributo delle fluttuazioni del vento è molto basso, questo intervallo, noto come *spectral-gap*, rappresenta lo strumento attraverso il quale è possibile separare in maniera chiara le variazioni di velocità del vento (stagionali, sinottiche, diurne, semi-diurne) dalle fluttuazioni dovute alla turbolenza presente nello strato limite atmosferico.

La zona turbolenta è caratterizzata dal picco a destra, centrato sulla frequenza di circa 0.01Hz corrispondente ad un periodo di poco più di un minuto. Si noti che per frequenze superiori a 0.1 Hz la densità di potenza assume valori paragonabili a quelli dello *spectral-gap*.