

Quaderni tecnici n°2
Marzo 2016 – Rev 01

QUADERNI TECNICI

Il SODAR e l'energia eolica Oltre le torri meteorologiche

Il SODAR e l'energia eolica. Oltre le torri meteorologiche.

Turbine e campi eolici costituiscono una delle fonti di energia rinnovabile più promettenti per il futuro. Come tutti gli impianti di produzione di energia, però, sono caratterizzate da costi di investimento e manutenzione relativamente elevati, da valutare attentamente in fase di verifica economica a medio-lungo termine.

Nel caso particolare degli impianti eolici la fonte di energia - il vento - ha una certa componente di variabilità e di imprevedibilità che rende le valutazioni economiche meno semplici.

Una parte importante della variabilità del vento riguarda l'intensità della turbolenza e la mancanza di uniformità nell'intervallo di quote interessate dal disco battuto dalle pale. Valutare questa variabilità, importantissima per prevedere i costi di manutenzione, riesce difficile se non impossibile utilizzando le torri meteorologiche.

Il SODAR, misuratore di profili verticali di vento, permette di colmare la lacuna informativa intrinseca delle misure compiute con una torre meteorologica e per questo sta trovando impiego crescente nell'industria della produzione di energia eolica.

In questo quaderno si presenta il SODAR e lo si confronta alle torri meteorologiche nel contesto dell'energia eolica. Si mostrano inoltre le opportunità aperte da questo strumento e si analizzano i problemi pratici.

Premessa

Le turbine eoliche hanno costi rilevanti.

Il problema è sia nel prezzo di acquisto, in quanto le macchine di taglia medio-grande, da 1 MW in su, hanno un prezzo dell'ordine di molte centinaia di migliaia di Euro, sia anche nel costo di esercizio e nei costi finanziari.

Alcune delle voci di bilancio, per esempio le tariffe elettriche, o i costi di manutenzione, non sono noti a priori o sono variabili nel tempo.

Riuscirà mai una turbina a ripagarsi tramite l'energia prodotta? Se sì, in quanto tempo?

Se vogliamo almeno tentare di dare una risposta a queste domande dobbiamo ridurre i gradi di libertà del sistema.

Una delle riduzioni di incertezza più importante viene dalla caratterizzazione meteorologica del sito di installazione. Di norma si compiono misure per un periodo di tempo limitato prima della messa in esercizio della turbina, solitamente due mesi e sulla loro base si cerca di fare qualche previsione.

Il metodo "standard" per caratterizzare la meteorologia del sito utilizza una *torre meteorologica*, un traliccio alto di regola intorno ai 60 metri, attrezzato con 2 o più anemometri meccanici, del tipo a coppe e banderuola.

Le torri meteorologiche, ad oggi unico metodo appoggiato dalla normativa, presentano però alcuni difetti:

- hanno un costo relativamente elevato,
- La loro altezza pone dei problemi di sicurezza, sia per le persone impegnate nell'esercizio e manutenzione della torre, che nei riguardi di chi lavora immediatamente al di sotto.
- In cambio di tutta questa fatica, la torre meteorologica dà poche informazioni: il vento orizzontale in due o tre punti, sino ad una quota (60 m) che potrebbe essere anche più bassa rispetto all'asse turbina.

In questo breve quaderno vedremo una possibile alternativa alle torri meteorologiche: il SODAR e ne analizzeremo insieme possibili vantaggi e svantaggi.



Il SODAR

Il SODAR (acronimo di *SOund Detection And Ranging*) è un sistema di "remote sensing" per la misura del vento in quota.

Il funzionamento del SODAR si basa sulla constatazione che l'aria, se interessata da moti turbolenti, è in grado di deflettere un impulso acustico in direzione contraria alla propagazione.

L'equazione che descrive la sezione d'urto dello *scattering* acustico in direzione che forma angolo θ con quella di emissione è

$$\beta(\theta) = 2\pi k^4 \cos^2(\theta) \left[\Theta_T(K)(2T)^2 + \cos\left(\frac{\theta}{2}\right) \Theta_v(K) c^{-2} \right]$$

dove $k=0.4$ è la costante di von Karman, $K=2p/l_t$, $\Theta_T(K)=0.033 C_{T^2} K^{-11/3}$

e $\Theta_v(K)=0.061 C_{v^2} K^{-11/3}$. I due coefficienti C_{T^2} e C_{v^2} rappresentano rispettivamente le cross-correlazioni spaziali della temperatura e della velocità del vento lungo la direzione di propagazione, entrambe funzioni crescenti del livello di turbolenza.

Se consideriamo la direzione contraria alla propagazione dell'impulso sonoro, $\theta=\pi$, e la precedente relazione precedente si semplifica nell'equazione di *back-scattering*,

Il segnale retro-diffuso è molto più basso di quello alla partenza (di molti ordini di grandezza), e ciò richiede ai costruttori di SODAR di rimediare con una potente circuiteria di amplificazione.

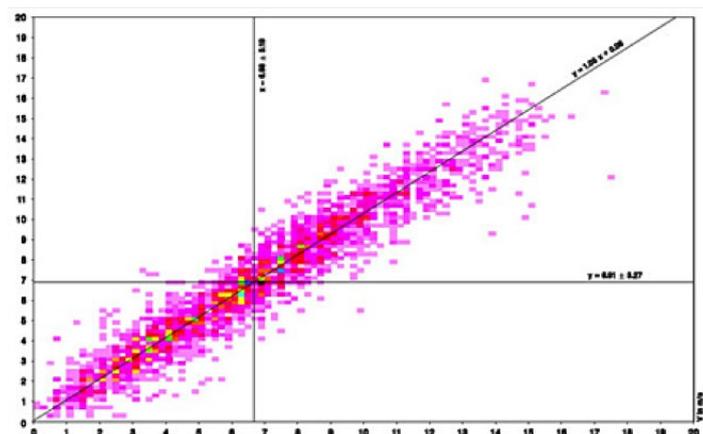
$$\beta(\pi) = 2\pi k^4 \Theta_T(K)(2T)^2$$

Il segnale retro-diffuso porta anche impressa in sé una serie di informazioni utili. Emesso ad una frequenza precisa, per effetto della velocità del vento lungo la direzione di propagazione del suono, subisce uno spostamento Doppler dalla cui entità è possibile risalire con precisione al valore di v .

Da un punto di vista pratico, il SODAR equivale ad una schiera di anemometri convenzionali posti lungo la direzione verticale. Numero e spaziatura tra gli anemometri virtuali si possono programmare con una certa libertà; nel caso del SODAR PCS-2000, prodotto da Metek GmbH e distribuito da Servizi Territorio srl, il numero di anemometri virtuali (quote di misura del vento) può andare da 1 a 44, con una spaziatura minima di 5 metri. Per ottenere una analoga fittezza di misura sarebbe necessaria una torre meteorologica alta 220 metri, con 44 anemometri meccanici – una realizzazione decisamente al di là delle possibilità della tecnologia corrente.

Quali considerazioni si possono fare circa la precisione di ogni singolo anemometro virtuale / quota di misura? Esperimenti compiuti in campo, con contemporanee misure eseguite da un sistema SODAR serie PCS-2000 e da una torre dotata di anemometri tradizionali, mostrano che precisione ed accuratezza del SODAR sono comparabili con quelle di un anemometro meccanico. La figura seguente mostra la correlazione delle misure.

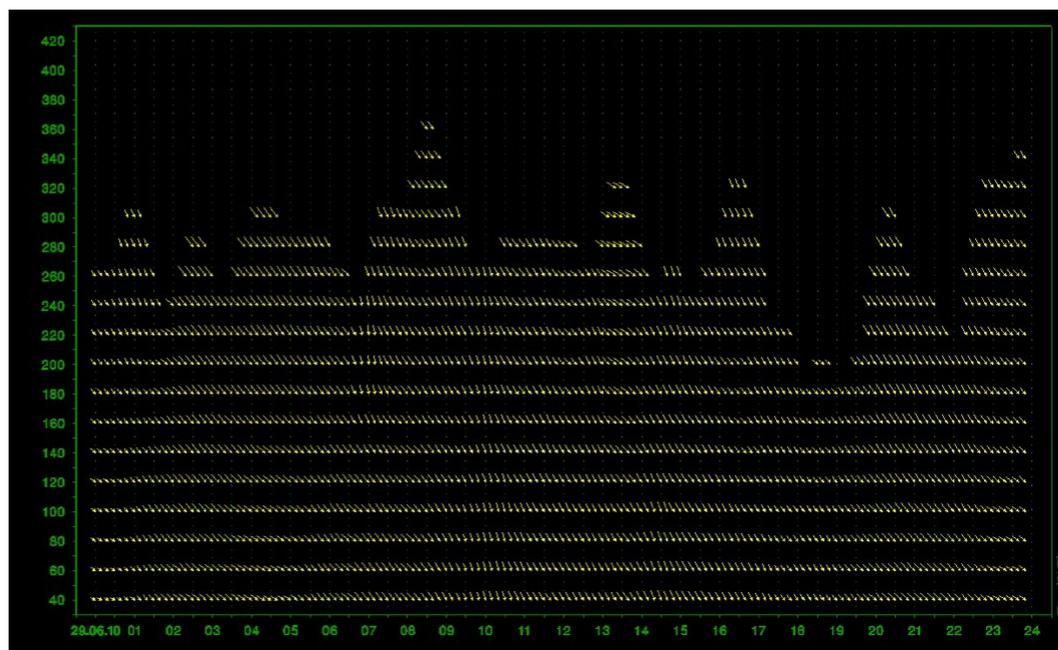




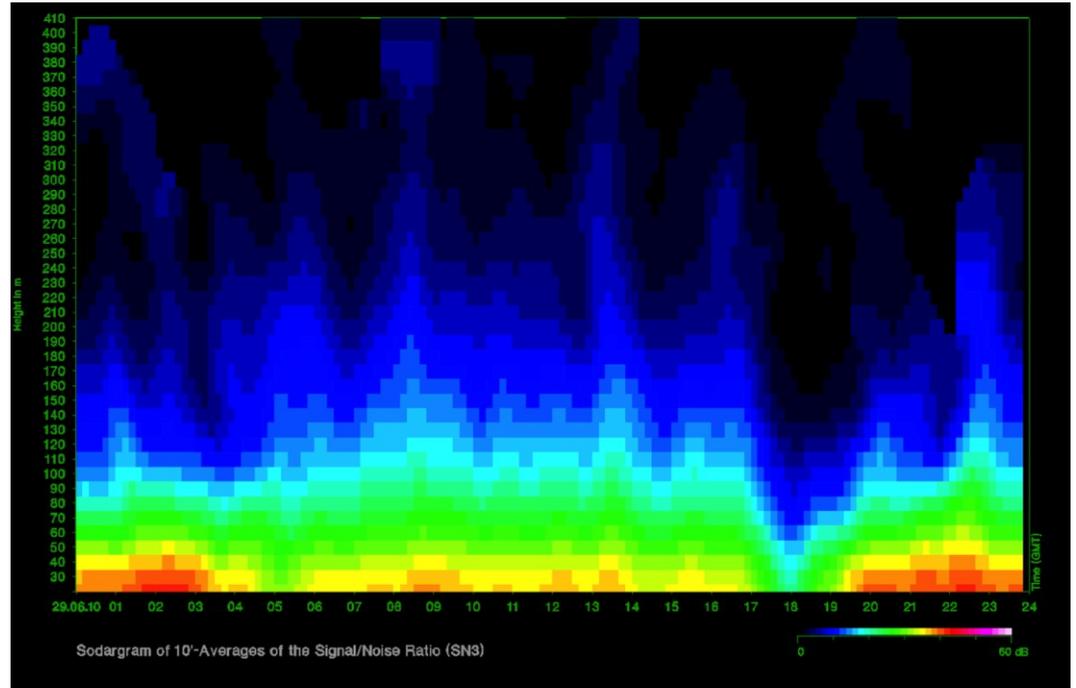
Quali dati produce un SODAR? Certamente dati di velocità e direzione del vento alle quote di misura ma in realtà molti altri tipi di dati quali componenti verticali del vento, fattore di turbolenza e altri. I dati, che nel caso del PCS-2000 sono disponibili in formato testo numerico, vengono archiviati con un tempo di mediazione tipico di 10 minuti, per essere poi elaborati in seguito, per ricavarne i dati di caratterizzazione del sito eolico. DA sottolineare che un sistema PCS-2000 ha sempre disponibili sia i dati mediati che tutti i dati che hanno contribuito a generare le medie, per offrire, in qualsiasi momento, la possibilità di completa rielaborazione dei dati.

Gli stessi dati inoltre possono anche essere rappresentati in forma grafica, molto utile per sviluppare consapevolezza sulla situazione istantanea, o per comprendere l'evoluzione della meteorologia. Nelle due figure di seguito vediamo appunto due diverse rappresentazioni grafiche, rese possibili dal software specifico Grafik sviluppato da Metek per la famiglia di sistemi SODAR PCS-2000.

La prima immagine a fianco presenta l'andamento del vento col tempo ed in quota.



La seconda immagine a destra presenta il rapporto segnale-rumore.



Come possiamo vedere dalla prima delle due immagini, la massima quota di misura effettivamente raggiungibile dal SODAR può cambiare nel tempo. Abbiamo visto dalle equazioni che il *back-scattering* dipende (attraverso il valore di C_{T^2}) dalla turbolenza atmosferica. Minore è il valore di questa, minore in proporzione l'ampiezza del segnale retro-diffuso. Se la turbolenza è "troppo poca", cosa che può accadere a quote molto elevate, il segnale del SODAR "si perde", e non abbiamo misure. Possiamo però vedere che l'intervallo tra 100 e 180m, utile per le turbine eoliche, è sempre ben coperto.

Abbiamo visto, in conclusione, che un SODAR è analogo ad una torre meteorologica molto alta, e con molti anemometri.

Il suo prezzo è certamente molto inferiore rispetto a una torre eolica, senza considerare i minori costi di locazione e le minori problematiche legate alla sicurezza.

Il numero elevato di misure lungo la verticale permette inoltre di apprezzare in modo immediato il *wind shear*, che se eccessivo interferisce con il funzionamento delle turbine. Con una torre meteorologica normale, dotata di solo due/tre misure, il *wind shear* può essere solo stimato, con un forte grado di incertezza.

Ci sono altre ragioni di interesse nel SODAR che le torri meteorologiche normali non possono eguagliare?

La risposta è sì e le passiamo in rassegna nelle prossime pagine.

Angolo del vento rispetto al piano orizzontale

In natura, il vento non ha solo componenti orizzontali ma anche componenti verticali, che solitamente sono di ordine minore rispetto alle altre componenti. A titolo di esempio la componente verticale può essere il 10% della velocità orizzontale.

Esistono però situazioni, che in uno specifico sito potrebbero essere anche piuttosto frequenti, in cui la velocità verticale assume un valore più elevato. Questo è un problema, dal momento che le turbine sono affette in modo avverso dalla velocità verticale. Al punto che alcuni costruttori considerano non valida la garanzia, se l'angolo medio del vento rispetto alla verticale assume un valore superiore ad un limite prescritto – per esempio, 7.5°.

Gli anemometri usati normalmente sulle torri meteorologiche, progettati per misurare il vento orizzontale, sono completamente ciechi rispetto al vento lungo la direzione verticale.

Il SODAR, al contrario, non lo è. Il vento verticale è misurato ad ogni quota di misura con ottima precisione. La componente verticale del vento, che dipende dalle irregolarità delle ostruzioni a scala molto fine (metri – decine di metri), se non misurata, non può essere simulata in modo affidabile per via modellistica.

Fattore di turbolenza

Un altro fattore che affligge l'affidabilità delle turbine e incide sui costi di manutenzione è la tendenza delle pale, delle flange di attacco e del rotore a vibrare per effetto della turbolenza atmosferica.

La vibrazione può essere prevista, o studiata statisticamente, utilizzando come guida il *fattore di turbolenza*, definito come il quoziente tra la deviazione standard del vento orizzontale, e la velocità del vento:

$$f_t = \frac{\sigma_v}{v}$$

La velocità orizzontale del vento può essere misurata facilmente con un anemometro meccanico del tipo di quelli installati sulle torri meteorologiche ma tale anemometro non è in grado di misurare la deviazione standard della velocità orizzontale.

Il SODAR, al contrario, misura la deviazione standard lungo le tre direzioni degli assi coordinati anche meglio della velocità.

Il parametro C_{T^2} , fondamentale dell'equazione di *back-scattering*, e σ_v sono tra loro correlate, e il SODAR non ha alcuna difficoltà ad ottenere quest'ultima.

Il SODAR permette quindi di determinare direttamente, senza ricorrere a stime, il fattore di turbolenza. Le stime basate su modelli semplificati forniscono valori anche molto lontani da quelli riscontrabili con le reali misure.

Variazione del vento tra le quote del disco turbina

Per operare in condizioni ideali, una turbina eolica dovrebbe essere immersa in un campo di vento perfettamente costante nel tempo ed uniforme nello spazio.

In natura però il vento varia con la quota in base ad una relazione del tipo:

$$v(z) = \frac{u_*}{k} \left[\log \frac{z}{z_0} - \Psi_m \left(\frac{z}{L} \right) \right]$$

dove z rappresenta l'altezza rispetto al piano di campagna, z_0 la rugosità aerodinamica superficiale, u_* la velocità di frizione (un indicatore dell'intensità della turbolenza meccanica), $k=0.4$ è la costante di von Karman, L è la lunghezza di Obukhov, e Ψ_m una funzione universale di similarità dipendente dal grado di stabilità statica dell'atmosfera.

Al di là della sua apparenza, la formula che precede ci dice che la velocità del vento *varia* con la quota, e che in prima approssimazione questa variazione avviene seguendo una legge di tipo logaritmico, sotto il controllo di parametri fortemente sito-dipendenti.

L'esperienza mostra però che la formula indicata vale solo come approssimazione *statistica*, su velocità mediate e su tempi molto lunghi. In natura il reale profilo di variazione del vento può anche essere molto diverso e non ci sono modelli in grado di simularlo. L'unica strada realmente percorribile passa dalle misure.

Più le misure sono fitte, meglio si riesce a risolvere la variazione. Il SODAR ci consente di eseguire queste misure mentre una torre anemologica non può farlo.

Altri vantaggi pratici

Alcune versioni del SODAR PCS-2000 sono carrellate, e dispongono di alimentazione autonoma a celle fotovoltaiche. Per metterle in funzione basta trasportarle in sito, con il carrello appendicolare fornito, ancorarle al suolo, avviarle ed eseguire un minimo di ottimizzazione dei parametri di funzionamento. Personale formato esegue un'installazione in meno di un'ora.

Per chiudere la campagna basta recarsi in sito, scaricare i dati via rete, spegnere il SODAR e portarlo via. Sempre con due persone.

Nel caso di una torre meteorologica è necessario installare un traliccio ingombrante, magari con scavo di plinti (anche per i controventi). Cosa che richiede molte ore ad una squadra di una certa dimensione. E che a campagna finita lascia comunque delle "ferite" nell'ambiente, oltre ai costi materiali.

I problemi del SODAR

Sin qui abbiamo veduto i vantaggi. Ma nel mondo reale questi si accompagnano sempre a svantaggi, conoscere i quali in anticipo è la sola condizione per decidere su basi razionali.

Il SODAR funziona emettendo impulsi acustici. Nonostante la spessa schermatura, persone a distanza possono avvertire in modo distinto le emissioni acustiche. Questo problema non è di solito grave nei siti – relativamente remoti – in cui sono installate turbine eoliche di dimensioni medie e grandi, ma non può essere trascurato a priori.

Una possibile mitigazione è comunque ottenibile, orientando lo strumento in modo opportuno e riducendo la potenza di emissione.

Un altro problema di natura completamente diversa è rappresentato dal fatto che ad oggi il SODAR non è ancora “conosciuto” dalla normativa e ciò potrebbe ostacolare l'approvazione di piani di finanziamento da parte delle Banche. La misura mitigativa possibile, nel caso, è di chiedere opportuni “certificati” che di solito attestano la somiglianza tra le misure eseguite da un SODAR e quelle ottenibili da un anemometro meccanico di tipo “approvato” alla stessa quota.

Per ulteriori informazioni

Servizi Territorio srl distribuisce i SODAR della linea PCS-2000 di Metek GmbH per l'Italia, e ne cura la manutenzione.

Servizi Territorio srl fornisce inoltre servizi di consulenza per l'interpretazione dei dati relativamente all'energia eolica, ed altre applicazioni.