Repubblica e Cantone Ticino
Dipartimeno delle finanze e dell'economia
Divisione delle risorse

Ufficio di statistica

QUALI POTENZIALI EOLICI CI SONO IN TICINO PER PICCOLI IMPIANTI?

17

QUALI POTENZIALI EOLICI CI SONO IN TICINO PER PICCOLI IMPIANTI?

Dalla carta dei venti al possibile sfruttamento energetico

Linda Soma e Nerio Cereghetti, Istituto sostenibilità applicata all'ambiente costruito, DACD, SUPSI
Ulrich Joss e Marco Andretta, Dipartimento del Territorio, Osservatorio Ambientale della Svizzera Italiana - UMAM, SPAAS

INDICE

4		**SINTESI**
6	**1.**	**INTRODUZIONE**
9	**2.**	**COSA SONO GLI IMPIANTI EOLICI**
10	2.1	Definizione e funzionamento di un impianto eolico
11	2.2	Classificazione e tipologie di impianti
12	2.3	Quanto possiamo estrarre dal vento?
15	**3.**	**EOLICO IN SVIZZERA**
16	3.1	Gli impianti eolici in Svizzera
16	3.2	L'eolico nella strategia energetica federale
16	3.3	La carta dei venti e il potenziale eolico a livello nazionale
18	**4.**	**DALLA MAPPATURA EOLICA AL POSSIBILE SFRUTTAMENTO**
19	4.1	La mappatura del potenziale eolico in Ticino
19	4.1.1	Come è stata realizzata
21	4.1.2	La pagina OASI: velocità del vento, tempo disponibile e produzione energetica
25	4.1.3	Confronto fra i risultati del modello e i dati misurati dalle stazioni meteo
27	4.1.4	Confronto fra la mappatura cantonale e federale
28	4.2	Il microeolico
28	4.2.1	In ambiente urbanizzato
29	4.2.2	In ambiente alpino
33	4.3	Possibili sviluppi in Ticino
36	**5.**	**CONCLUSIONI**
38		**BIBLIOGRAFIA E SITOGRAFIA**

SINTESI

Il vento è una fonte che può essere utilizzata per la produzione di energia elettrica rinnovabile. Il suo sfruttamento avviene grazie all'impiego di aerogeneratori che tramutano l'energia cinetica in energia elettrica. Nonostante l'eolico abbia un semplice principio di funzionamento, un suo sfruttamento efficace e sostenibile deve considerare molteplici aspetti.

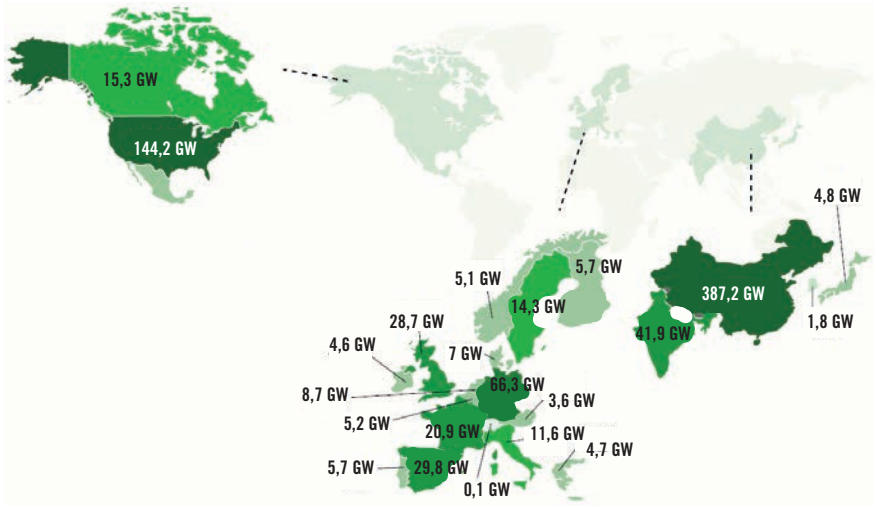
L'articolo presenta da un lato la mappatura eolica ticinese, che costituisce un provvedimento voluto dal Piano energetico cantonale (PEC) con lo scopo di dare *"indicazioni delle condizioni di vento su scala generale, tale da permettere una prima valutazione delle potenzialità per installazione di impianti eolici"*. Dall'altro, l'articolo fornisce un quadro generale su questa risorsa: evoluzione nel tempo, classificazioni esistenti, tipologie di impianti e dati reali per un piccolo impianto.

La mappatura, basata su modelli di calcolo, fornisce indicazioni sulla direzione e intensità del vento, in Ticino ad altezze minori rispetto a quella federale e offre quindi prime indicazioni sulla caratterizzazione del sito che si vuole approfondire per l'installazione di un possibile impianto di piccole dimensioni. Infatti, il vento oltre ad essere estremamente variabile, è altamente sito-specifico e quindi solo una buona conoscenza delle sue caratteristiche in un preciso punto e del suo andamento nel tempo (giornaliero, stagionale e pluriannuale) possono permettere di scegliere se l'eolico possa essere conveniente e quale tipologia di impianto possa adattarsi maggiormente al caso in una determinata situazione.

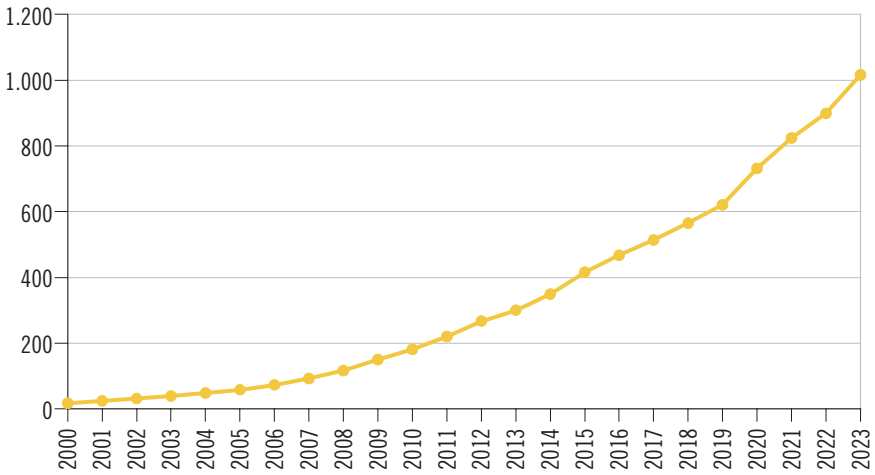
I. INTRODUZIONE

Il vento, se da un lato ha rappresentato una forza costruttiva, capace di aiutare l'uomo a sopravvivere, facendogli valicare i mari alla ricerca di terre più fertili o fornendo l'energia necessaria per macinare il grano e pompare l'acqua, indispensabili alla sopravvivenza; dall'altra parte è stato un elemento naturale da cui proteggersi, da cui mettersi al riparo, in un certo senso di ostacolo alla vita. La possibilità di produrre energia elettrica grazie al movimento del vento è diventata però realtà solo a fine Ottocento, grazie a Charles Brush, ingegnere e inventore americano, che costruì la prima turbina eolica al mondo a Cleveland (Stati Uniti). Molto diversa dagli aerogeneratori odierni aveva 144 pale realizzate in legno di cedro e una potenza di 12 kW (*S. 1*). Negli anni e nei decenni successivi vennero apportate modifiche e alcune scoperte permisero poi di arrivare alla tecnologia oggi conosciuta dei moderni aerogeneratori.
Oggigiorno, l'eolico è una fonte di energia che vanta di una tecnologia matura e collaudata dalle vaste potenzialità. Infatti, occupa spazio al suolo ridotto, ha uno sviluppo prevalentemente verticale e richiede una contenuta manutenzione, con la possibilità di essere smantellato nel caso di necessità e di riciclarne successivamente le diverse componenti. Per quanto il principio di funzionamento sia semplice sono molteplici gli aspetti da considerare nello sfruttamento dell'energia eolica. Il soffio del vento permette infatti solo a certe velocità di mettere in moto le pale dell'aerogeneratore: queste azionano così il movimento del rotore, che attraverso diversi processi permette di produrre energia elettrica. Quindi, la velocità del vento è ovviamente il fattore chiave. Quanto è forte e per quanto tempo mantiene questa forza nel corso di un anno? In che direzione spira maggiormente? Quali sono i fattori che influiscono negativamente sull'andamento del vento, che possono causare scostamenti significativi dai modelli applicati per stimarne il potenziale di produzione? Quali tipologie di aerogeneratori e che grandezza devono avere per sfruttare al meglio le caratteristiche locali che abbiamo monitorato? A livello ecologico la presenza di questi impianti può interferire negativamente con la biologia di alcune specie e possiamo nel caso mitigare e compensare questi fattori? Queste sono alcune domande a cui bisogna rispondere per pensare di poter trasformare la forza del vento in energia elettrica, considerando al contempo che il progetto sia sostenibile dal punto di vista ambientale ed economico.
Parlando di numeri a livello globale [F. 1]: negli anni l'eolico si è diffuso, la tecnologia è migliorata, la produzione aggiunta nel solo 2022, grazie ai nuovi impianti, ha permesso di raggiungere un nuovo record (265 TWh), portando così la produzione totale a 2.100 TWh (*S. 2*) e la potenza totale installata prossima al Terawatt [F. 2].

F. 1
Capacità eolica installata nelle diverse nazioni (in GW)
Fonte: (*B. 1*), adattato da ISAAC



F. 2
Potenza installata a livello mondiale (in GW)
Fonte: i dati provengono da (*S. 3*) e (*S. 4*)



A livello mondiale lo scenario al 2050, denominato "Net Zero Emissions", mira a raggiungere 7.400 TWh di produzione eolica al 2030. Affinché questa possa però essere raggiunta è necessario un incremento annuo di capacità da 75 GW (2022) a 350 GW (2030) (*S. 2*).
Ma come possiamo sapere in prima analisi se c'è abbastanza vento sfruttabile per produrre energia eolica?
Per rispondere a questa domanda il primo passo è quello di consultare delle mappe della velocità del vento. Queste solitamente rappresentano le velocità medie del vento a quote differenti sopra il suolo, andando ad evidenziare zone dove sono presenti velocità maggiori, favorevoli, a livello teorico, per la produzione di energia. A livello federale esiste il sito wind-data.ch dove è possibile vedere la carta dei venti svizzera (*S. 5*).

Nel 2017 il Cantone, per rispondere a uno dei provvedimenti del Piano d'Azione del PEC del 2013, ha dato mandato a Meteotest (*B. 9*) di realizzare una mappatura del potenziale di produzione di energia eolica tramite parchi eolici e impianti mini- o microeolici per il Cantone Ticino.
Ora è possibile accedere a questi dati dal sito OASI e scoprire quali sono le zone più ventose del Ticino. In questo articolo presentiamo il modello di calcolo, le mappe eoliche risultanti e alcuni confronti tra le simulazioni e i dati misurati. Presentiamo inoltre il nuovo sito internet per consultare la mappatura, corredato da riflessioni sull'impiego pratico.

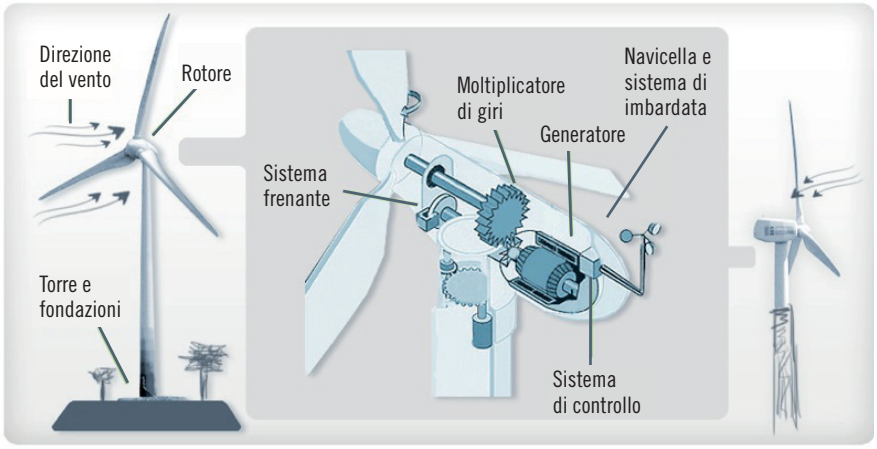
2.
COSA SONO GLI IMPIANTI EOLICI

2.1 Definizione e funzionamento di un impianto eolico

Ancora oggi possiamo fare una distinzione in queste due categorie: gli aeromotori, attualmente poco utilizzati, che convertono l'energia cinetica in meccanica e gli aerogeneratori, ad oggi i sistemi più diffusi, che convertono l'energia cinetica in elettrica.
Prendendo ad esempio un aerogeneratore ad asse orizzontale con tre pale possiamo individuare le seguenti componenti [F. 3]:

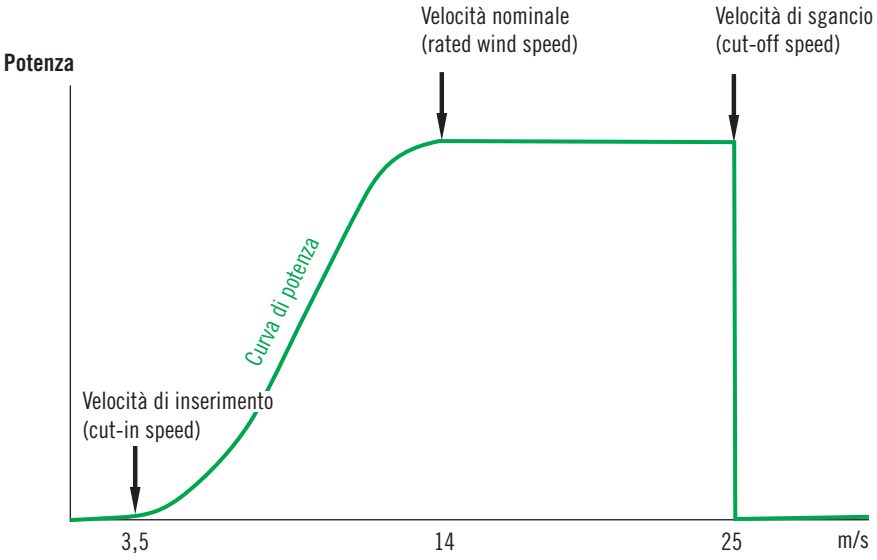
– il rotore (o turbina eolica): composto da pale che sono collegate ad un mozzo,
– la navicella o gondola: che contiene i sistemi di trasformazione (moltiplicatore di giri e generatore elettrico) e di controllo della macchina e
– la torre: che deve sostenere rotore, navicella e resistere alle sollecitazioni.

F. 3
Schema del funzionamento di una turbina eolica
Fonte: ISAAC, modificato sulla base di (*S. 6*)



Le pale iniziano a ruotare, sotto la forza del vento, solo quando viene raggiunta la velocità minima di inserimento (variabile dai 2-3 m/s per impianti di piccola taglia a 5-6 m/s per impianti più grandi). La rotazione viene poi trasferita grazie a un moltiplicatore di giri a un generatore elettrico. I generatori hanno però una soglia massima di velocità del vento che possono sostenere, oltre questa il generatore deve smettere di produrre energia mettendosi in sicurezza per evitare danni meccanici.

F. 4
Curva di potenza in funzione della velocità d'inserimento, della velocità nominale e della velocità di sgancio
Fonte: ISAAC



Ogni aerogeneratore è caratterizzato da precisi valori di velocità in base alle diverse fasi di funzionamento [F. 4]. In primo luogo, deve azionarsi e questo avviene solo se vengono raggiunte delle velocità minime (velocità di

inserimento) alle quali il rotore inizia a girare e l'alternatore produce una tensione, successivamente inizia ad essere prodotta energia, quando la turbina raggiunge la velocità nominale (10-14 m/s), si ha la potenza nominale. Infine, oltre la velocità di sgancio (20-25 m/s), il rotore deve essere fermato per evitare danni alla macchina, dovuti all'eccessiva potenza del vento.

2.2 Classificazione e tipologie di impianti

Dato l'elevato numero di tipologie esistenti (verticali e orizzontali), di posizionamento possibile (onshore e offshore), grandezza dell'impianto (potenza del generatore o dimensione dell'aerogeneratore), l'eolico può essere classificato in svariati modi. Di seguito ne vengono sintetizzati alcuni per dare un'idea al lettore delle casistiche esistenti.
La Concezione eolica svizzera (*S. 7*) distingue le seguenti categorie di turbine eoliche in base alla potenza:

- micro: potenza inferiore ai 20 kW: destinati principalmente all'alimentazione di utenze domestiche;
- piccola: potenza fra 20 e 100 kW: destinati per lo più alla produzione e vendita di energia elettrica;
- media: potenza tra 100 e 1.000 kW;
- grande: potenza oltre 1.000 kW.

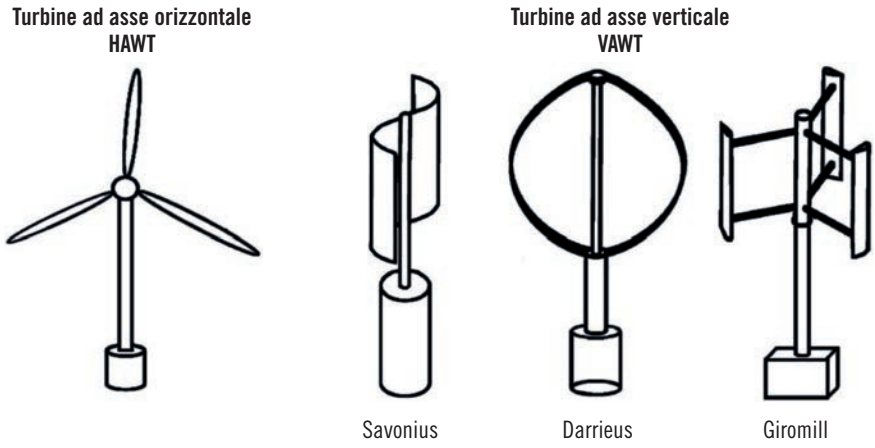
Discostandoci leggermente da questa classificazione possiamo parlare di impianti di piccola taglia fino ai 200 kW: all'interno di questa categoria vengono distinti i microeolici (potenza inferiore ai 20 kW) e i minieolici (potenza fra 20 e 200 kW).
Inoltre, con il termine di parco eolico si intende un insieme di turbine eoliche, medie o grandi, gestite in comune e allacciate assieme alla rete elettrica (es. per il Ticino il parco eolico del San Gottardo).
Un'altra suddivisione si basa sulla "taglia": questa include sia la classe di potenza che la dimensione dell'aerogeneratore.
Un'altra classificazione ancora può essere basata sull'asse di rotazione [F. 5]:

- orizzontale (Horizontal Axis Wind Turbine-HAWT): ha l'asse di rotazione orizzontale rispetto al suolo (v. anche [F. 3]). Per sfruttare al meglio il vento il rotore ha un sistema di rotazione che gli permette di allinearsi con la direzione del vento. Le turbine eoliche a tre pale sono le più diffuse e le più efficaci, esistono anche però a due pale o monopala con contrappeso e multipala, queste ultime usate per lo più nel microeolico. Mentre gli HAWT di minori dimensioni si allineano passivamente al vento, grazie al timone (visibile p. es. in [F. 18] A), gli aerogeneratori di dimensioni maggiori sono orientati in modo attivo e non hanno la "coda".
- verticale (Vertical Axis Wind Turbine-VAWT): la pala presenta l'asse di rotazione verticale rispetto al suolo, hanno il vantaggio di poter sfruttare qualsiasi direzione del vento, lo svantaggio è che l'efficienza può essere minore a causa del moto turbolento intorno al rotore. Fra queste troviamo rotori di tre tipi secondo la conformazione della superficie esposta al vento:
  - Savonius: sono turbine "a resistenza", semplici, si compongono di due o quattro lamiere verticali, sono lente, con bassa efficienza, possono essere utilizzate a basse velocità del vento e in range limitati e sono contraddistinte da una bassa rumorosità.
  - Darrieus: sono turbine "a portanza", con superfici con profilo alare in grado di distribuire la pressione lungo la pala. Sono turbine a bassa rumorosità, con il pregio di non risentire dei cambiamenti di direzione del vento; grazie alla capacità di sfruttare venti non orizzontali si prestano per il montaggio su edifici e nel costruito.

– Giromill: sono turbine "a portanza", che si stabilizzano grazie al fatto che la pala sopravento limita la velocità fungendo da freno e stabilizzandola. Per l'avvio servono venti di una certa entità.

Per altre considerazioni, diverse da quelle energetiche o tecniche, sono in uso anche altre classificazioni, basate sulla dimensione dei rotori, sull'altezza dei pali, sulle emissioni foniche, o altri effetti ambientali.
In generale le turbine ad asse orizzontale sono utilizzate negli impianti di grande taglia (superiori al MW), mentre quelle verticali nelle taglie più piccole (inferiori ai 20 kW). Nelle taglie intermedie esistono entrambe le categorie. Le HAWT moderne con 3 pale sono generalmente le più efficienti, soprattutto su pali alti e in condizioni di vento stabile. In prossimità del suolo il vento invece si affievolisce e diventa più turbolento: qui possono risultare più convenienti le turbine ad asse verticale, che non devono riallinearsi continuamente nel vento.

F. 5
Tipologie di impianti eolici, secondo gli assi di rotazione
Fonte: ISAAC, modificato sulla base di (*B. 4*)



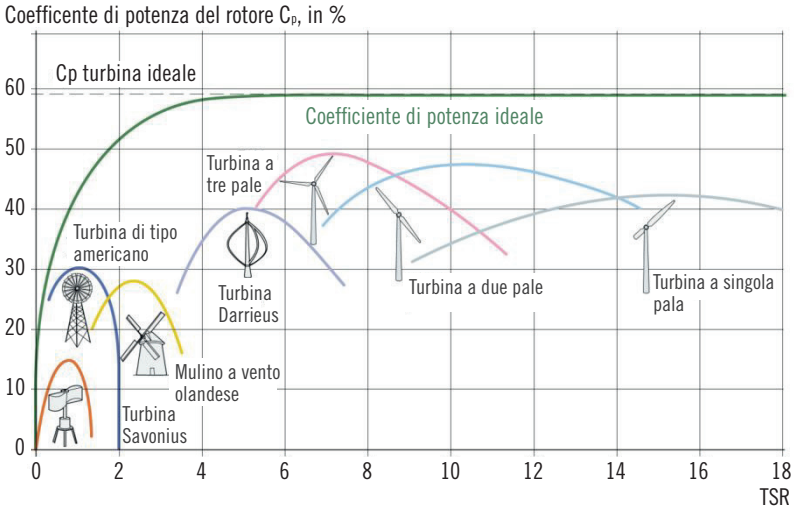
2.3 Quanto possiamo estrarre dal vento?

Non tutta l'energia del vento può essere sfruttata a scopi energetici. La potenza di flusso (Pf, espressa in Watt) è in generale descritta da una formula che considera: la densità dell'aria ρ (rho) in kg/m^3, l'area (m^2) spazzata dal vento (A) e la velocità (m/s) del vento (v), secondo la seguente relazione

$$Pf = \frac{1}{2}\rho A v^3$$

La Legge di Betz definisce la massima quantità di energia che possiamo estrarre dal vento attraverso una dimostrazione che giunge a dire che il coefficiente massimo di prestazione viene raggiunto ed è pari a 0,593 quando il rapporto fra la velocità del vento in ingresso e la velocità del vento in uscita è pari a 1/3. Quindi un generatore eolico può estrarre a livello teorico non più del 59,3% della potenza di flusso che ha a disposizione, moltiplicando la potenza del flusso per questo valore si ha quindi un valore teorico. A seconda della turbina, cambia però l'efficienza massima, rappresentata dal coefficiente di potenza (Cp) illustrato in [F. 6]. Il Cp viene rappresentata in relazione alla *Tip Speed Ratio* (TSR) indicata con λ, che esprime il rapporto fra la velocità periferica delle pale e la velocità del vento: maggiore è questo valore, maggiore è l'efficienza a discapito della rumorosità.
Ogni tipologia di impianto ha quindi delle curve caratteristiche che la descrivono mettendo in relazione il coefficiente di prestazione Cp con il TSR.

F. 6
Coefficiente di potenza del rotore, per diverse tipologie di turbine eoliche
Fonte: ISAAC, modificato sulla base di (*B. 5*)

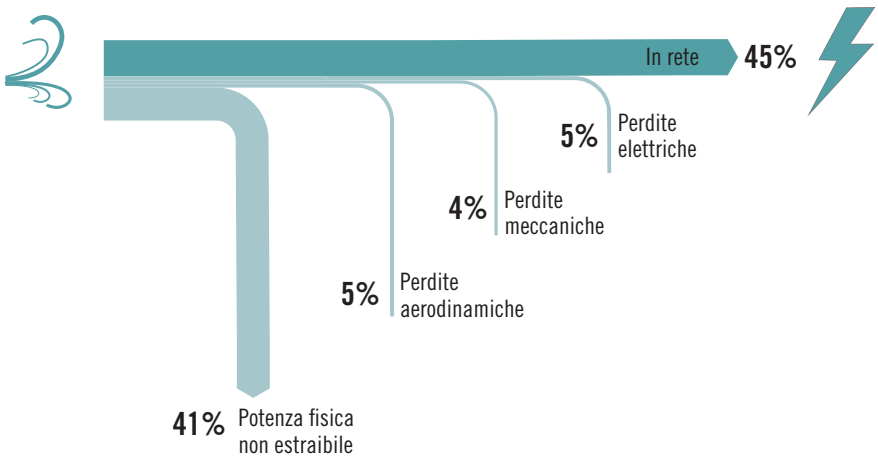


Dell'energia cinetica che transita in una moderna turbina a 3 pale si potrà immettere in rete al massimo il 45% di energia elettrica [F. 7].
La trasformazione quella cinetica di una massa in movimento in energia elettrica presuppone che l'energia cinetica sia raccolta e convertita in energia (meccanica) di rotazione, per poterla successivamente trasformare in elettricità per mezzo di un generatore. Questo processo accomuna la produzione di elettricità idroelettrica e quella eolica. Tra le due forme di produzione vi sono però delle differenze sostanziali, dovute alla natura del fluido da cui raccogliere l'energia cinetica:

– l'aria (al livello del mare) è circa 800 volte meno densa dell'acqua e la densità dell'aria cala sensibilmente salendo di altitudine;
– l'aria, in quanto gas, è comprimibile mentre l'acqua è un liquido, incomprimibile;
– l'aria scorre liberamente, mentre l'acqua è raccolta e forzata nelle condotte;
– il dislivello permette di aumentare considerevolmente la pressione dell'acqua nella condotta sulle pale delle turbine.

La combinazione di queste differenze comporta la maggiore efficacia (grazie alla massa incomprimibile) e efficienza (massa in condotta) della produzione idroelettrica rispetto a quella eolica. I generatori eolici nel caso ideale possono infatti estrarre al massimo il 59% della potenza del vento secondo la legge di Betz. Ulteriori perdite dipendono dalla conformazione della turbina, come visibile in [F. 6], e possono ridurre l'efficienza al 14% nel caso delle turbine "Savonius", mentre negli impianti idroelettrici circa il 90% dell'energia cinetica può essere trasformata in elettricità.

F. 7
Efficienza e perdite delle turbine eoliche
Fonte: ISAAC, dati percentuali provenienti da (*S. 9*)



La potenza realmente sfruttabile dal generatore è quindi inferiore al valore massimo teorico per diverse ragioni:

– le perdite meccaniche, dovute principalmente agli attriti della trasmissione e alla massa della girante;
– il rendimento del generatore è ottimale in condizioni di potenza nominale;
– nel caso degli HAWT la variabilità della direzione del vento comporta un continuo riallineamento della girante;
– la turbolenza aumenta vicino al suolo e attorno a ostacoli.

Per questi ed altri motivi bisogna tenere conto che il rendimento reale sarà inferiore al valore teorico massimo.

3.
EOLICO IN SVIZZERA

3.1 Gli impianti eolici in Svizzera

Il primo impianto a energia eolica allacciato alla rete elettrica è stato messo in funzione nel 1986 a Soolhof (Langenbruck), e aveva una potenza di 28 kW. Nel 2023, quasi 40 anni dopo, in Svizzera vi sono 67 impianti di cui 44 con potenza installata sopra i 30 kW e 23 sotto ai 30 kW, per una potenza totale di 88,3 MW che nel medesimo anno hanno permesso una produzione complessiva di circa 169 GWh (*B. 6*).
Il più grande parco eolico si trova sul Mont Crosin, nel Giura bernese presso St. Imier, dove sono installate 16 turbine eoliche, con una potenza complessiva di 37,2 MW (*S. 10*).
Altri grandi impianti sono ubicati nella Valle del Rodano (VS), nei pressi di Entlebuch (LU) e sul Gütsch, sopra Andermatt (UR).

3.2 L'eolico nella strategia energetica federale

Con l'adeguamento nel 2020 della Concezione energia eolica la Confederazione ha definito il modo in cui bisogna prendere in considerazione gli interessi federali in sede di pianificazione degli impianti eolici e individua zone dotate di un possibile potenziale di sfruttamento dell'energia eolica (*S. 7, S. 8, B. 3*). I Cantoni hanno il compito di determinare in che modo sviluppare le energie rinnovabili e l'obbligo fondamentale di delimitare nei loro piani direttori i comprensori idonei allo sfruttamento della forza eolica. L'Atlante eolico svizzero e la Concezione energia eolica rappresentano insieme le fondamenta della Confederazione per le attività di pianificazione dei Cantoni in ambito eolico.
La menzionata Concezione definisce 8 principi per la pianificazione di impianti eolici, tra cui il principio di pianificazione P6 specifica che i piccoli impianti, con un'altezza complessiva inferiore a 30 m "possono essere realizzati in linea di principio solo in situazioni particolari" (p.es. capanne alpine senza allacciamento alla rete). Poiché di dimensioni troppo ridotte per un interesse pubblico. Si intende così applicare il principio di concentrare le produzioni di interesse pubblico e di limitare le situazioni di conflitto con altri interessi di protezione. In alcuni casi l'allestimento di piccoli impianti, che non superino però un'altezza di 10 metri nei pressi di edifici o costruzioni, potrebbe essere opportuno, in relazione al miglioramento tecnologico.

3.3 La carta dei venti e il potenziale eolico a livello nazionale

L'atlante eolico svizzero illustra le condizioni di vento a diverse altezze sopra il suolo (50, 75, 100, 125 e 150 m). Pubblicato una prima volta nel 2012, i dati si basano su un modello del territorio nazionale che si avvale di una griglia con punti distanti 100 m orizzontali. Per ogni punto della griglia e ciascun livello di calcolo sopra il suolo viene associato un valore medio annuo della velocità del vento, determinato attraverso la modellizzazione, che mira a riprodurre i processi alla base delle correnti tramite metodi fisici e statistici.
Per le carte relative ad altezze che partono dai 100 m sopra il livello del terreno, la presenza di un numero molto inferiore di misurazioni necessarie alla modellizzazione genera un maggiore grado di incertezza nel risultato. Dato che si tratta di un modello e specialmente per la criticità dei dati a quote più elevate (*S. 11*), la mappatura deve essere considerata solo come un'indicazione e non si può sostituire in alcun modo a un monitoraggio di dettaglio in un sito specifico.
L'ultimo studio pubblicato dall'Ufficio federale dell'energia (UFE) nel 2022 (*B. 2*) ha aggiornato i potenziali eolici per la Svizzera che risalivano al 2012 in virtù del fatto che sia la tecnologia che le condizioni quadro sono cambiate dall'ultimo aggiornamento.

Partendo dal potenziale tecnico, che tiene conto di tutte le superfici edificabili (escludendo comprensori abitati e non urbanizzati), è stata eseguita un'analisi GIS in quattro fasi che sono andate a:

1. escludere le zone protette secondo la Concezione energia eolica della Confederazione (paludi e zone palustri, riserve di uccelli acquatici e migratori, biotopi di importanza nazionale, zone centrali dei parchi nazionali, zone nucleo del Gipeto barbuto e del Gallo cedrone, siti iscritti nel patrimonio mondiale dell'UNESCO, ecc.);
2. escludere tutti i comprensori abitati con una zona cuscinetto supplementare di 300 metri per tenere conto della protezione dal rumore;
3. escludere tutti i comprensori che secondo l'Atlante eolico hanno una produzione di energia eolica troppo bassa. I comprensori dell'Inventario federale dei paesaggi, siti e monumenti naturali d'importanza nazionale (IFP) non sono stati esclusi, ma sottostanno a requisiti più elevati per la produzione di energia eolica;
4. introdurre una riduzione pari al 15% per potenziale totale per considerare le restrizioni dovute a impianti segreti del Dipartimento Federale della Difesa della protezione della popolazione e dello sport o interferenze causate dagli impianti di sicurezza aerea, che non possono essere rappresentate cartograficamente in modo esaustivo.

Questo aggiornamento ha portato la stima a 29,5 (TWh) all'anno (di cui 19 TWh nel solo semestre invernale). Sfruttando il 30% di tale potenziale, corrispondente a circa 1.000 impianti, si avrebbe una produzione stimata di 8,9 TWh (di cui 5,7 TWh in inverno), paragonabile alla produzione media della centrale nucleare di Gösgen di ca. 8 TWh.
La produzione da eolico a livello nazionale nel 2023 si è assestata a 169 GWh. Confrontando questo dato con l'ipotesi di sfruttamento del 30% del potenziale (8,9 TWh), attualmente siamo a circa il 2%.

4.
DALLA MAPPATURA EOLICA AL POSSIBILE SFRUTTAMENTO

4.1 La mappatura del potenziale eolico in Ticino

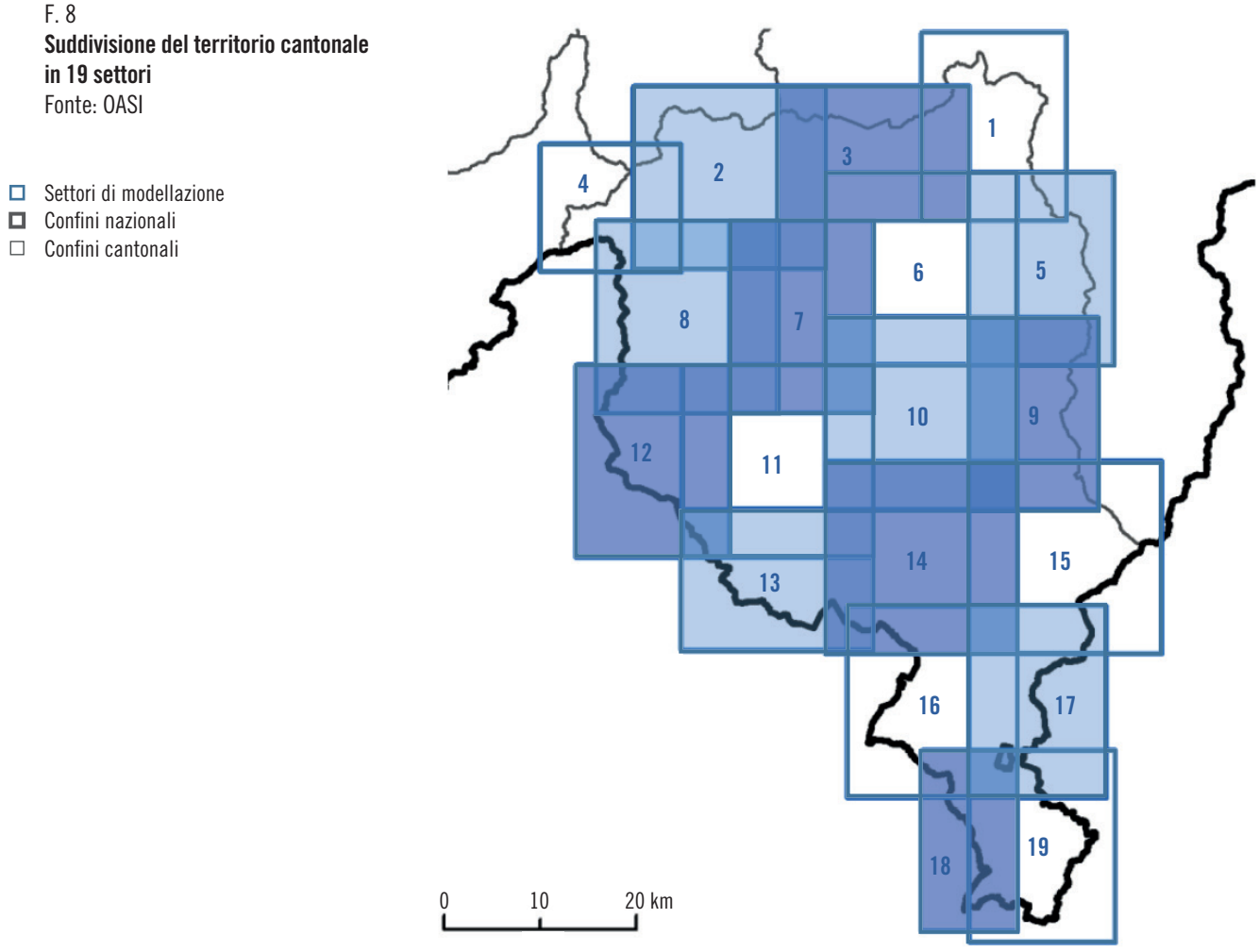
Come accennato nell'introduzione, la mappatura eolica ticinese costituisce un provvedimento voluto dal Piano energetico cantonale (PEC), con lo scopo di dare *"indicazioni delle condizioni di vento su scala generale, tale da permettere una prima valutazione delle potenzialità per installazione di impianti eolici"* (misura P.2.2 del PEC 2013, p. 138).
La mappatura nazionale (*B. 2*) è orientata principalmente alle turbine medie e grandi, di interesse nazionale: il livello di calcolo più basso si trova a 50 m dal suolo e la griglia che descrive la topografia ha una risoluzione di 100 m.
Per permettere agli interessati di procedere con valutazioni più dettagliate e prime analisi di fattibilità, anche per turbine eoliche piccole e medie, il Dipartimento del territorio del Cantone Ticino ha fatto elaborare una mappatura che descrive più finemente la topografia, con la medesima metodologia della mappatura federale (*B. 7*).

4.1.1 Come è stata realizzata

La mappatura eolica ticinese presenta solo i 5 livelli di calcolo più prossimi al suolo (10, 20, 50, 70 e 100 m). In realtà la simulazione si estende fino a 12 km di quota e comprende 31 livelli di calcolo. La risoluzione spaziale orizzontale è di 25 m, per un totale di ca. 4,5 milioni di punti di calcolo nel territorio ticinese. Per ognuna delle singole celle di calcolo di 25x25 m^2 il modello ha dunque fornito stime indicando:

1. la velocità media annua (in m/s);
2. la velocità media (in m/s) e la frequenza (in %) della direzione di provenienza del vento suddivisa in 12 settori di 30° ciascuno;
3. i parametri della distribuzione di frequenza delle velocità calcolate per ogni settore, utili per derivare una stima del tempo durante il quale la velocità supera una determinata soglia (v. p. 23).

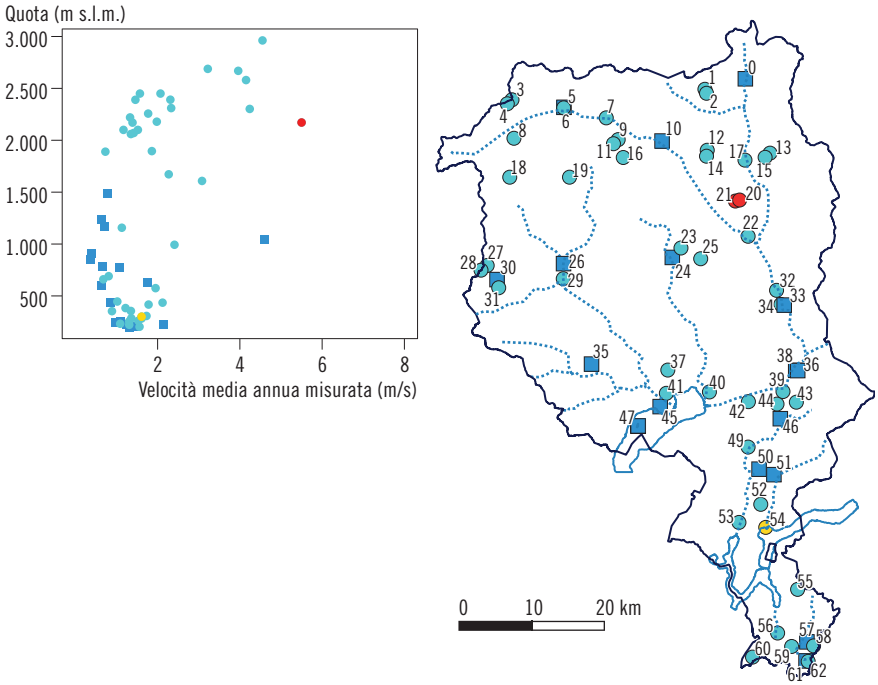
F. 8
Suddivisione del territorio cantonale in 19 settori
Fonte: OASI



La modellizzazione ha previsto una suddivisione del Cantone Ticino in 19 settori, parzialmente sovrapposti ai bordi [F. 8]. Dopo aver modellizzato i singoli settori alle medesime condizioni iniziali, queste, sono state ricomposte smussando ai bordi delle zone sovrapposte e interpolando individualmente i dodici campi di vento settoriali.
I campi di vento sono stati calcolati con il modello di simulazione WindSim (*S. 13*), facente capo alla tecnica della fluidodinamica computazionale (*Computational fluid dynamics*, CFD (*S. 14*)). Si tratta del medesimo modello già usato per le mappature nazionali, l'ultima delle quali, pubblicata nel 2020, disponibile online (*S. 5*).
I campi di vento locali sono fortemente influenzati dalla topografia locale, per questo motivo un modello digitale del terreno deve essere configurato in scala adeguata ai fenomeni in esame. Per ottimizzare i campi calcolati, la griglia di calcolo diventa più fine in prossimità del suolo.
Oltre alla topografia, la rugosità del terreno deve essere quantificata per tutte le celle di calcolo della griglia orizzontale, perché influisce sulla diminuzione del vento all'avvicinarsi al suolo (o sull'aumento allontanandosene).
Infine, WindSim necessita di dati meteorologici all'interno dell'area modellata: nel caso della mappatura ticinese sono stati utilizzati i dati del vento misurati in continuo in Ticino. Si tratta di dati anemometrici degli anni 2015-2018 provenienti da 47 località[1]: l'insieme di questi valori rappresenta oltre 107 anni di dati orari per velocità e direzione, distribuite tra 200 e 3.000 m s.l.m. [F. 9]. La figura mostra che parecchie stazioni di misura si trovano in situazioni con velocità medie annue inferiori a 3 m/s, e che la velocità tendenzialmente aumenta a quote superiori.

[1] Si tratta dei dati registrati da MeteoSvizzera, dal Cantone Ticino e in alta montagna dall'Istituto per lo studio della neve e delle valanghe SLF. Dati di altre reti di misura (Meteogroup-dtn, URANET, IAP) sono stati usati come controllo (v. [F. 9]). Maggiori dettagli sui confronti tra le misure e le simulazioni sono descritti in (*B.10*), ottenibile su richiesta.

F. 9
Velocità medie pluriennali (a sinistra), presso 62 stazioni di misura in Ticino, secondo la quota (in m)*
Fonte: OASI



* Il grafico mostra sia le stazioni contemplate nella modellazione CFD (simboli rotondi azzurri ●) sia stazioni non contemplate (simboli quadrati blu ■). 2 luoghi, menzionati nel testo, sono evidenziati con altri colori (rosso: Pizzo Matro, giallo: Lugano).

La modellazione fornisce campi di vento statici e indipendenti dal tempo. Ciò significa che molti fenomeni meteorologici, come i venti termici con ciclo diurno, o "brezze termiche", non possono essere rappresentati. Questi venti termici scorrono canalizzati nelle valli, e possono soffiare regolarmente con velocità ragguardevoli soprattutto in corrispondenza di presenza di strettoie dove, grazie all'"effetto ugello", possono rinforzarsi localmente lasciando talvolta traccia del loro passaggio sotto forma di alberi con chiome deformate. Un esempio di queste manifestazioni naturali è visibile in Riviera, tra Bellinzona e Biasca.

4.1.2 La pagina OASI: velocità del vento, tempo disponibile e produzione energetica

I risultati ottenuti dal modello sono stati ulteriormente elaborati in modo da permettere di presentare i dati e le informazioni sotto ulteriori punti di vista. In particolare, la pagina OASI *https://www.oasi.ti.ch/web/energia/mappatura-eolica.html* (*S. 12*), dedicata alla mappatura per il Cantone Ticino, fornisce le mappe delle velocità medie ai livelli menzionati, e fornisce una tabella con la durata del vento sopra a 3 o 5 m/s, come pure la produzione teorica per alcuni tipi di microimpianti e i parametri di calcolo necessari, che trattiamo più avanti.
Le mappe on-line sono disponibili per ogni livello di calcolo a 10, 20, 50, 70 e 100 m sopra il suolo, mentre nel presente articolo sono raffigurate solamente alcune mappe, ad esempio la mappa delle velocità medie [F. 10] o il numero di mesi annui con velocità superiori a 3 m/s o superiori a 5 m/s a 20 metri sopra il livello del suolo [F. 13].

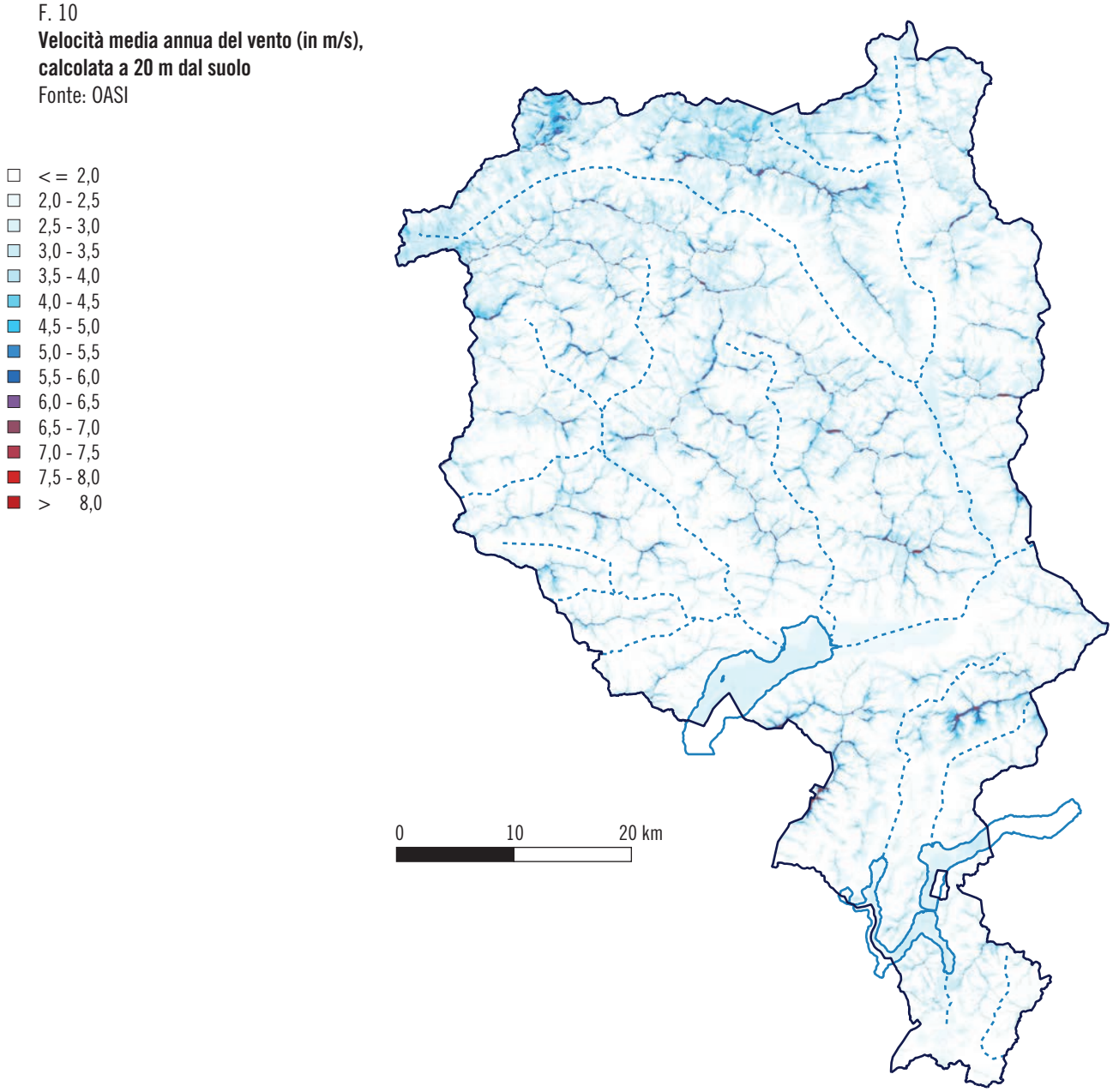
Velocità del vento

Grazie a una prima analisi generale possiamo menzionare che dalle mappe emerge che le zone più ventilate si trovano principalmente sulle creste delle Alpi e delle Prealpi. Molte zone sono mediamente poco ventilate, soprattutto le zone corrugate collinari o montane. I laghi Verbano e Ceresio, e il fondovalle della Riviera appaiono invece essere le zone più ventose presenti a basse quote, con velocità medie comprese tra 2 e 3 m/s a 20 m dal suolo. Tra i rilievi spiccano invece alcune zone:

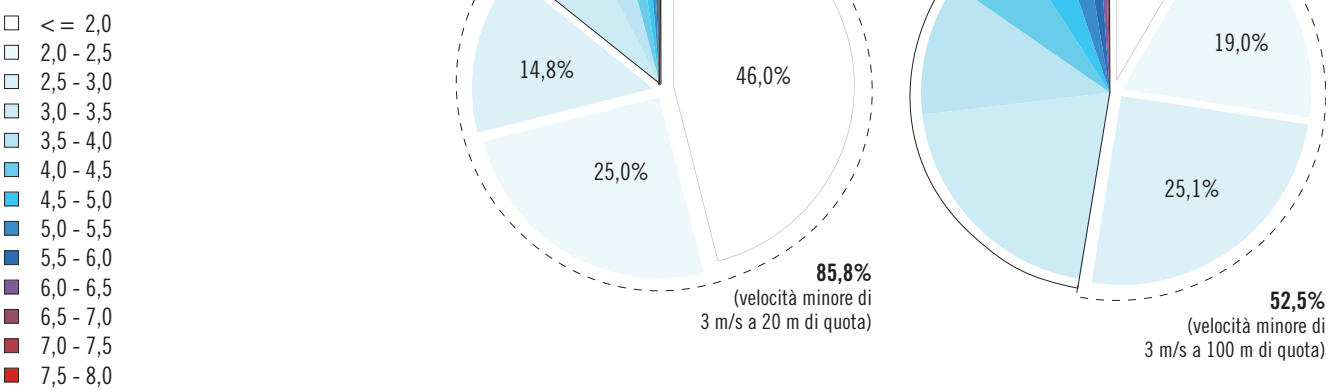
- il Passo del San Gottardo, dove nel 2020 AET ha realizzato il primo e finora unico parco eolico in Ticino con 5 aerogeneratori di 11,75 MW di potenza nominale complessivi,
- le creste dei rilievi nell'Alto Ticino, segnatamente il versante sinistro dell'Alta Leventina,
- la zona del Ceneri con le creste attorno alla Val d'Isone, il Monte Lema e il Gambarogno.

Volendo fornire un'indicazione percentuale relativa al vento che spira nel territorio ticinese possiamo dire invece che, considerando come riferimento il livello di 20 m dal suolo [F. 10], la velocità media annua calcolata dal modello supera i 3 m/s per il 14,2% del territorio cantonale (400 km^2) e supera invece i 5 m/s per l'1,3% (36 km^2), come visibile in [F. 11] a sinistra. Il restante 86% della superficie cantonale ha una velocità media inferiore a 3 m/s. Diversamente, a 100 m dal suolo, quota presa come riferimento per i grandi parchi eolici e visibile in [F. 11], a destra, si prospettano oltre 3 m/s di vento sul 47,5% della superficie cantonale (1.338 km^2), e il 9,1% (258 km^2) oltre i 5 m/s. Il restante 52% del territorio ha una velocità media inferiore ai 3 m/s. La mappa in [F. 10] mostra dove si trovano queste superfici, perlopiù in luoghi lontani da infrastrutture umane e a quote elevate.
Per questo motivo diventa interessante ampliare l'analisi sulla durata dei periodi nei quali, secondo la distribuzione calcolata, la velocità del vento potrebbe comunque superare una soglia, per esempio quella necessaria per l'inserimento del generatore di un determinato impianto – anche se nella media annua per un sito il vento si prospetta inferiore a questa velocità minima. Infatti, se portiamo all'estremo questo ragionamento: un impianto con venti stabili, ma sotto alla velocità d'ingaggio non produrrà mai, mentre un altro impianto in condizioni di calma alternata a momenti ventosi sarà produttivo nei periodi in cui il vento soffierà tra la velocità d'inserimento e quella di sgancio. Nonostante, quindi, le medie annuali possano essere uguali, in questo ultimo caso, l'impianto potrà essere produttivo nei periodi indicati. Successivamente affronteremo quindi la mappatura del tempo stimato con vento di velocità superiore a 3 o 5 m/s.

F. 10
Velocità media annua del vento (in m/s), calcolata a 20 m dal suolo
Fonte: OASI



F. 11
Suddivisione del territorio cantonale (in %), secondo la velocità media calcolata, all'altezza di 20 e 100 m dal suolo
Fonte: OASI, ISAAC



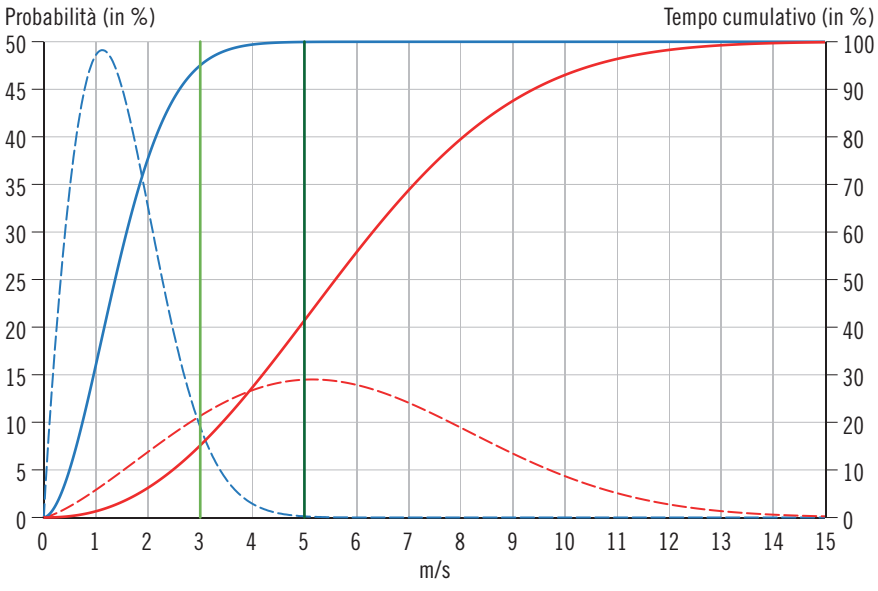
Per quanto tempo la velocità del vento supera una certa soglia?

Nel campo dell'eolico, per descrivere quanto o come la velocità del vento in un posto possa variare statisticamente attorno alla media, si ricorre sovente alla distribuzione di Weibull, con i suoi parametri A e k:

$$f(v) = \frac{k}{A} * \left(\frac{v}{A}\right)^{k-1} * \exp\left(-\left(\frac{v}{A}\right)^{k}\right)$$

f indica la frequenza del vento secondo la velocità *v*, mentre il parametro A riprende approssimativamente la velocità media, e il parametro k la "dispersività" nella caratteristica forma asimmetrica rappresentata dalle curve tratteggiate visibili in [F. 12].
La distribuzione delle velocità del vento può essere quindi rappresentata con una certa approssimazione attraverso la distribuzione di Weibull che si basa su due parametri: appena citati che sono anche noti come parametro di scala (A) e di forma (k). La rosa dei venti mostra invece la frequenza relativa delle direzioni del vento ricavate sulla base della modellizzazione. Per ogni settore sono visibili le velocità medie e la durata (v. [F. 15]).
Diverse situazioni locali possono essere paragonate e il tempo utile può essere stimato: nel grafico in [F. 12] lo facciamo con le due ubicazioni che confronteremo nelle mappe in [F. 16] e [F. 17], e nel grafico in [F. 15].
Dai parametri della distribuzione [F. 12] si può desumere la frazione del tempo durante il quale la velocità supera una soglia a scelta (ad esempio 3 m/s o 5 m/s). Le curve tratteggiate rappresentano la distribuzione di Weibull per la probabilità che il vento soffi a una certa velocità. Sul Pizzo Matro i venti soffiano più frequentemente tra 2 e 8 m/s, mentre i momenti senza vento sono rari. A Lugano invece il vento supera 3 m/s solo durante pochi periodi dell'anno.
La superficie sotto le curve tratteggiate racchiude tutti i dati e può essere cumulata: la percentuale cumulata dei momenti sopra una certa soglia di vento è così mostrata dalle linee continue. Nell'esempio per il Matro, in rosso, l'85% dei momenti saranno a destra della linea verticale verde chiaro, equivalente ad almeno 3 m/s; mentre venti sopra a 5 m/s (a destra della linea verde scuro) dovrebbero soffiare durante il 58% circa dell'anno. Espresso in giorni dell'anno, ciò equivale a 310 giorni con almeno 3 m/s (rispettivamente 213 sopra 5 m/s).

F. 12
Distribuzione della velocità del vento e calcolo del tempo di superamento di una soglia di vento, sul Pizzo Matro e a Lugano*
Fonte: OASI

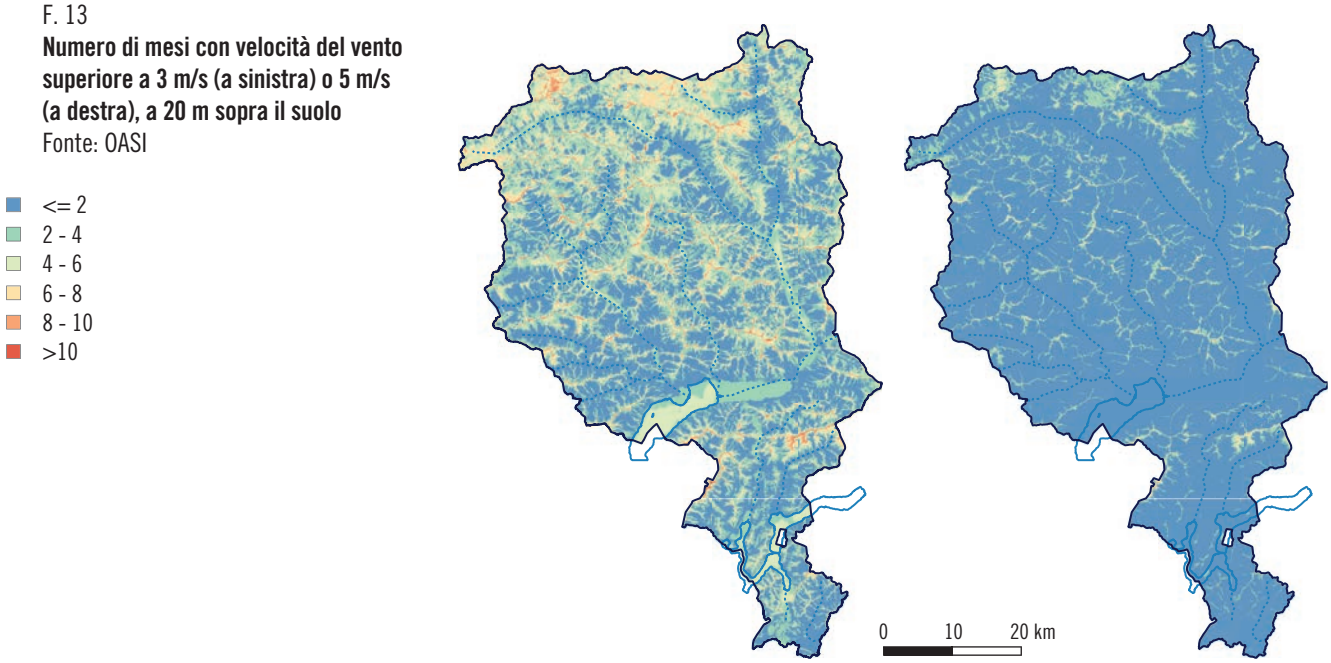


- Lugano: parametri di Weibull: k=1,88, A=1,68
- Lugano: % dell'anno sopra una certa soglia
- Matro: parametri di Weibull: k=2,32, A=6,57
- Matro: % dell'anno sopra una certa soglia
- Soglia 5 m/s
- Soglia 3 m/s

* Mentre sul Pizzo Matro la velocità supera 3 m/s durante quasi l'85% dell'anno (e supera 5 m/s durante il 58% dell'anno), a Lugano vi sarebbe meno del 5% dell'anno con oltre 3 m/s (venti con oltre 5 m/s interessano lo 0% dell'anno).

Applicando il metodo a tutti i punti del modello, ne risultano mappe che rappresentano il periodo annuo durante il quale il vento spirerebbe a una determinata velocità superiore a una soglia scelta: per esempio superiore a 3 m/s, nel caso in cui questa sia la velocità di ingaggio di un ipotetico impianto.
Il tempo durante il quale la velocità è stimata superiore a 3 m/s a 20 m sopra il suolo è così rappresentato in mesi a sinistra in [F. 13], mentre sulla destra sono raffigurati i periodi con vento prospettato superiore a 5 m/s: le zone solitamente più ventilate sono sovente le medesime dove le velocità medie sono più elevate [F. 10].

F. 13
Numero di mesi con velocità del vento superiore a 3 m/s (a sinistra) o 5 m/s (a destra), a 20 m sopra il suolo
Fonte: OASI



Per questa ragione è fondamentale conoscere, non solo le caratteristiche del vento nel sito dove si vuole installare l'impianto, ma anche il funzionamento dell'impianto stesso: quale è la velocità minima del vento per l'ingaggio? Quali condizioni permettono di ottenere una potenza sufficiente per coprire un determinato fabbisogno?

Quanta energia stimiamo di poter produrre con microimpianti eolici?

I parametri di Weibull (A e k) definiti precedentemente sono usati per una prima stima della produzione energetica di un impianto eolico ubicato in un certo punto, di cui conosciamo le caratteristiche di produzione (potenza nominale, velocità d'innesto, ecc.). La tabella 1 presenta la stima per i siti di Lugano e Pizzo Matro, con 6 diversi impianti microeolici.

T. 1
Stima delle produzioni energetiche annue, utilizzando i parametri di Weibull, per i due siti di Lugano e Matro e ipotizzando l'installazione di alcuni aerogeneratori a 20 metri di altezza

Aerogeneratore	Asse	Potenza nominale (kW)	Produzione stimata a Lugano (kWh)	Produzione stimata al Pizzo Matro (kWh)
RW100	verticale	0,5	4	317
Halbes 1kW	orizzontale	1,0	35	2.619
Aeolos-V 1kW	verticale	1,5	26	2.918
Ryse E-3	orizzontale	2,5	22	6.483
Aventa AV-7	orizzontale	6,2	1.194	33.906
QR6	verticale	7,0	4.101	32.252

Fonte: SPAAS

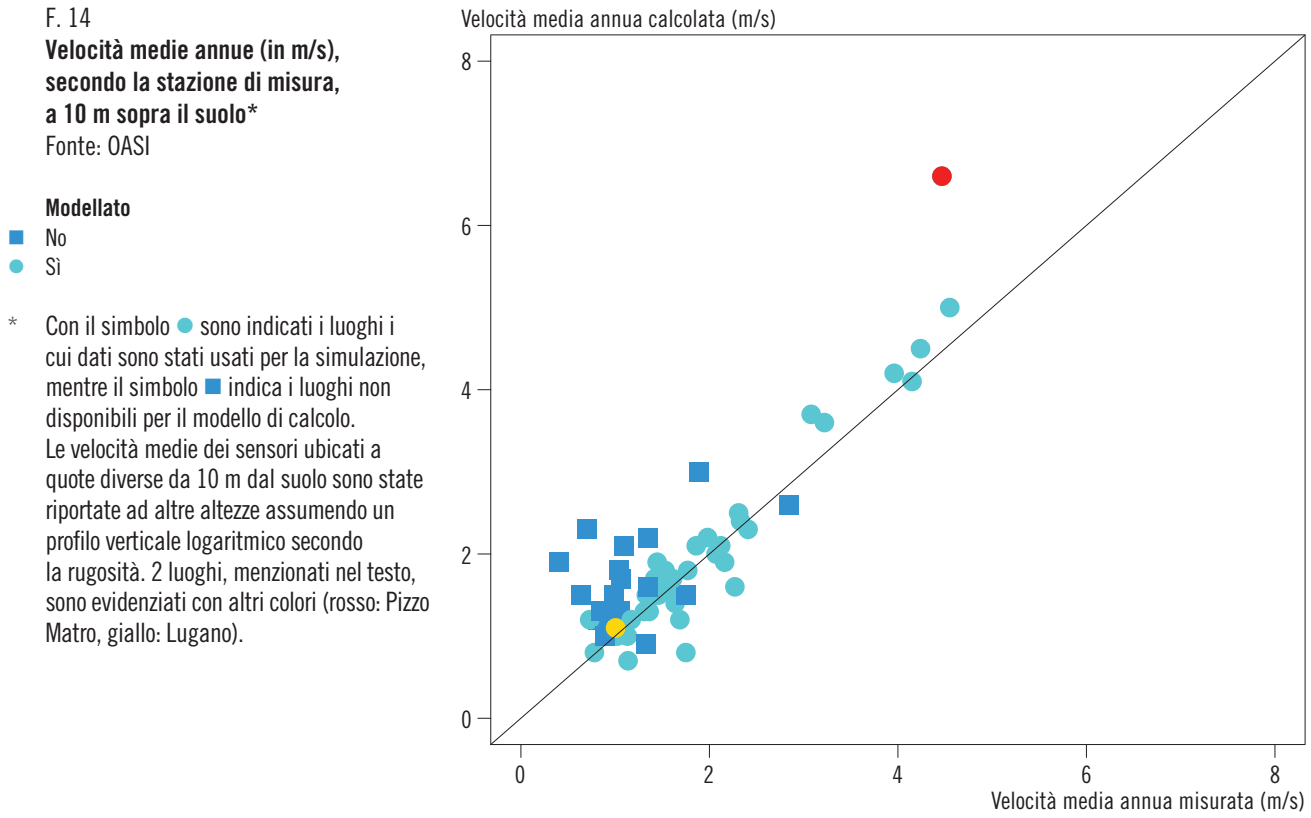
Va sottolineato che la stima della resa energetica si basa sulla potenza erogata secondo la velocità del vento. Solitamente è specificata dal fornitore ed è sovente basata su dati teorici. Nella pratica diversi effetti riducono la resa effettiva. Oltre a quelli tecnici già menzionati [F. 7] vi sono le turbolenze locali, fasi di riallineamento, e altro per cui la resa effettiva si situa al 50-90% di quella stimata secondo le specifiche tecniche.

4.1.3 Confronto fra i risultati del modello e i dati misurati dalle stazioni meteo

Le velocità medie calcolate possono essere confrontate con i dati corrispondenti misurati al suolo per le diverse stazioni meteo presenti in Ticino, che registrano dati del vento grazie alla presenza di anemometri. Tali stazioni sono rappresentate in [F. 9]. Vogliamo riassumere i confronti in alcuni grafici. Nello specifico è possibile confrontare le velocità medie annue calcolate dal modello, rispetto a quelle misurate, principalmente nel periodo 2015-2018 in diverse stazioni[2]. Il grafico in [F. 14] mostra il confronto per il livello a 10 m dal suolo.

[2] Normalmente gli anemometri sono installati a un'altezza di 10 m sopra il suolo. Le velocità per altre quote possono essere stimate applicando alla velocità una correzione logaritmica con l'aumento dell'altezza, in funzione della rugosità del suolo.

F. 14
Velocità medie annue (in m/s), secondo la stazione di misura, a 10 m sopra il suolo*
Fonte: OASI



* Con il simbolo ● sono indicati i luoghi i cui dati sono stati usati per la simulazione, mentre il simbolo ■ indica i luoghi non disponibili per il modello di calcolo. Le velocità medie dei sensori ubicati a quote diverse da 10 m dal suolo sono state riportate ad altre altezze assumendo un profilo verticale logaritmico secondo la rugosità. 2 luoghi, menzionati nel testo, sono evidenziati con altri colori (rosso: Pizzo Matro, giallo: Lugano).

Dal grafico possiamo concludere che nell'insieme le velocità medie misurate sono ben riprodotte soprattutto per le stazioni incluse nel modello. Le velocità medie calcolate per le stazioni non disponibili per la simulazione sono tendenzialmente sovrastimate, in media di 0,5 m/s (mediana 0,4 m/s). Si tratta di stazioni gestite da privati in località bene accessibili e forse per questo poco esposte ai venti.
Un altro tipo di confronto proposto utilizza la rosa dei venti, che permette di visualizzare, in un punto selezionato, la distribuzione della direzione del vento e della sua velocità (da dove proviene e con quale intensità) [F. 15].
La forma circolare della rosa dei venti permette di mostrare la direzione da cui soffiano i venti, con suddivisioni in settori di 30° (dove: 0° = N = Nord, 90°= E = Est, 180° = S = Sud e 270° = O = Ovest), mentre la distanza dal centro indica una proprietà che dipende dalla direzione: nel nostro caso la velocità media (in m/s) del vento in funzione della provenienza, in [F. 15] a sinistra, e la durata (in giorni/anno) a destra.

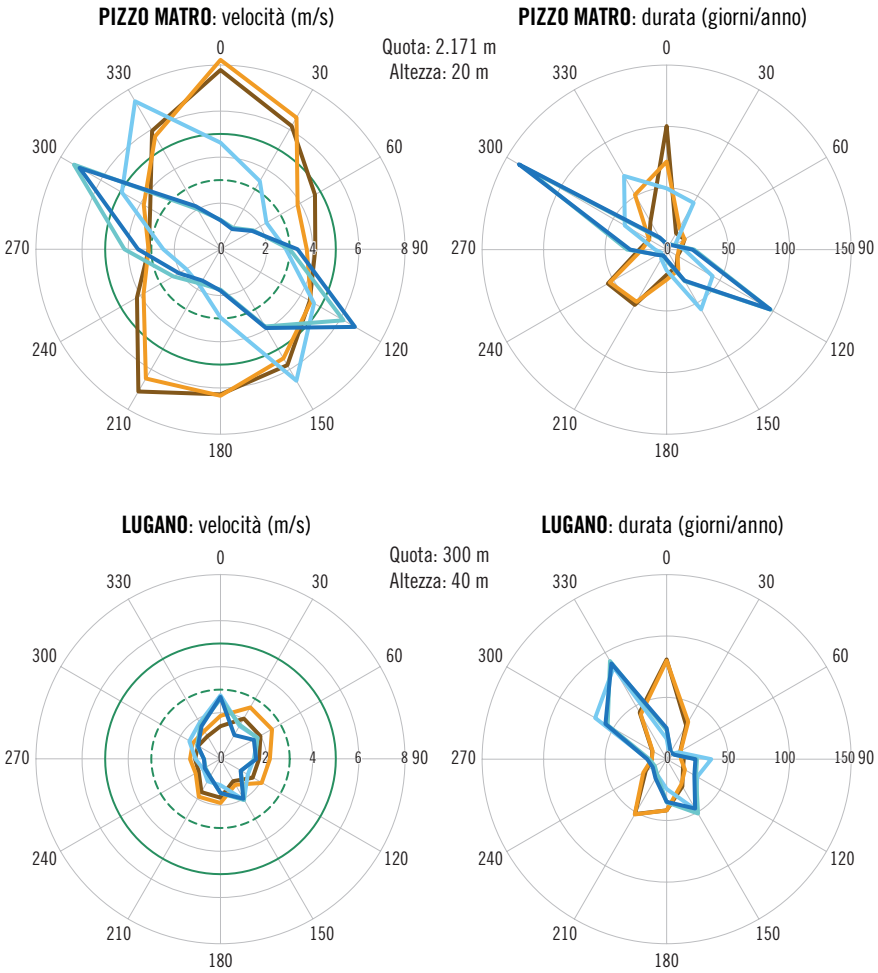
Utilizzando questo tipo di rappresentazione si possono dunque confrontare le informazioni generate dal modello (velocità media e durata in funzione della direzione) con quelle misurate nella stazione meteo ubicata nello stesso luogo. Nell'esempio [F. 15] i dati misurati sono rappresentati in colori celesti-blu (ogni grafico a rosa sintetizza un anno di dati utilizzati per la modellazione), mentre le rose arancio-marroni rappresentano le relative rose calcolate dal modello CFD.

F. 15
Velocità media (in m/s) del vento e durata (in giorni/anno), secondo la direzione di provenienza del vento per 2 località esemplari (Pizzo Matro e Lugano)*
Fonte: OASI

Anno delle misure
- 2006
- 2015
- 2016

Livelli modello
- 50 m
- 20 m

* Confronto delle rose dei venti con dati osservati (colori celesti, secondo l'anno) e calcolati (colori marroni, secondo il livello sopra il suolo, a 50 e 20 m). A sinistra sono evidenziate le soglie di velocità a 3 m/s (cerchio verde tratteggiato) e 5 m/s (cerchio verde continuo), menzionate nel testo.



Riprendendo il confronto fra Matro e Lugano già usato in [F. 12] possiamo dire che:

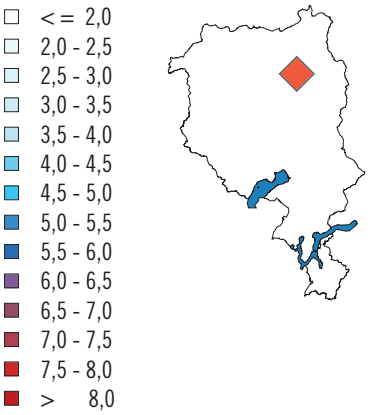
- le rose da modello riproducono a grosse linee quelle calcolate delle osservazioni strumentali ma presentano delle differenze (ovviamente, giacché i dati osservati variano di anno in anno);
- secondo le misure sul Pizzo Matro il vento supera regolarmente le soglie di 3 e 5 m/s specie con venti da NO o da SE, mentre a Lugano anche a 40 m sopra il suolo il vento medio raggiunge difficilmente velocità superiori a 3 m/s, utili per impianti eolici;
- le rose dei venti sul Pizzo Matro in alto in [F. 15] provengono da una posizione di cresta alpina, dove i venti soffiano frequentemente con velocità sopra a 5 m/s, in modo allineato con la dorsale del Pizzo Matro (a 300° e 120°). Nei risultati di calcolo del modello le direzioni più frequenti sono ruotate di circa 60°;
- nel caso di Lugano in basso in [F. 15] si vede una relativa dominanza delle direzioni da N e S sia nei dati misurati sia in quelli modellati, con velocità simili.

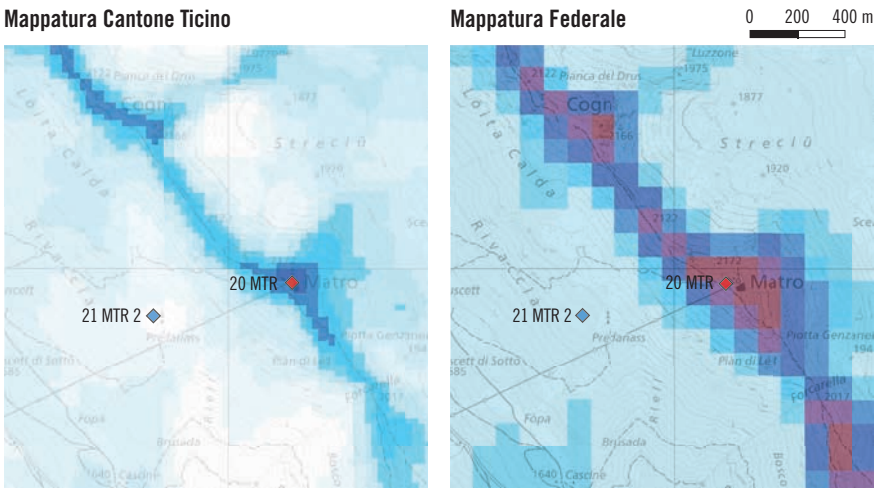
In prima approssimazione gli impianti mini- e microeolici hanno bisogno di almeno 3 m/s di vento. Riferito alle rose dei venti, le superfici all'interno dei cerchi tratteggiati, in [F. 15] sopra, corrispondono a situazioni poco interessanti rispetto alla velocità media prospettata.
Come abbiamo visto a p. 23, ciò non significa però che un aerogeneratore con una media sotto 3 m/s non sarà produttivo in nessun momento: lo sarà nei periodi durante i quali la velocità supera comunque la soglia che permette l'innesto del generatore. Se la posizione offre condizioni di ventilazione piuttosto costanti, i momenti con vento superiore alla media saranno pochi; se invece la posizione è caratterizzata da periodi senza vento e altri ventosi, con la stessa velocità media un impianto avrà più periodi produttivi.

4.1.4 Confronto fra la mappatura cantonale e federale

Vogliamo riprendere queste due località, viste sopra, anche per confrontare le due mappature disponibili: quella federale e quella cantonale. Nel confronto occorre tenere conto del fatto che la mappatura federale, a destra in [F. 16] e [F. 17], al di sotto di 4 m/s non distingue ulteriormente in classi. Per questo motivo, le zone più riparate dal vento appaiono in tinta più chiara (es. bianco) nella mappatura cantonale, a sinistra.

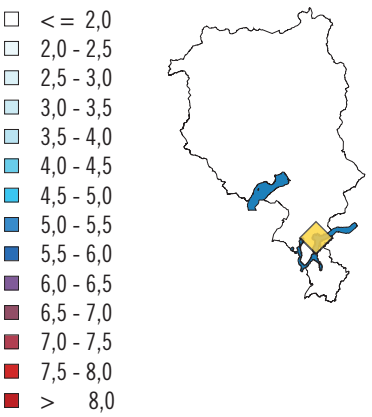
F. 16
Velocità medie del vento (in m/s), calcolate attorno al Pizzo Matro, a 50 m dal suolo
Fonte: OASI, ISAAC

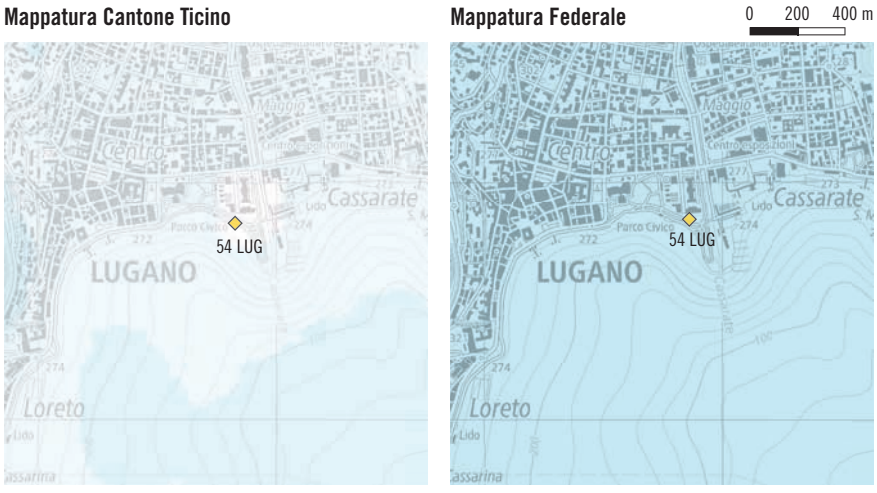




La velocità media misurata alla stessa altezza ammonta a 5,5 m/s (20 MTR).

F. 17
Velocità medie del vento (in m/s), calcolate attorno alla Foce di Lugano, a 50 m dal suolo
Fonte: OASI, ISAAC





La velocità media misurata alla stessa altezza ammonta a 1,61 m/s.

Sia che si tratti della mappatura eolica a livello federale, che cantonale, lo scopo finale è quello di fornire prime indicazioni all'interno di un determinato territorio. Mentre quella federale si rivolge ai grandi impianti HAWT, la mappatura cantonale è intesa principalmente per impianti minori. L'altezza dal suolo, il principio della rotante, il dimensionamento e il posizionamento andranno scelti anche in base ad altri criteri di praticità e di economicità rispetto ai grandi aerogeneratori. Spesso ne deriva la necessità di effettuare misure specifiche in loco per:

– conoscere quantitativamente condizioni locali, come la variabilità della direzione e della velocità del vento,
– eventualmente confrontarle con l'inerzia di un impianto ad asse orizzontale, per riallineare di volta in volta le pale,
– conoscere il possibile effetto di ostacoli vicini o poter eventualmente sfruttare incanalamenti locali,
– stimare la durata effettiva delle fasi produttive,
– prevenire vibrazioni, rumori o altri impatti molesti.

4.2 Il microeolico

Quali sono le applicazioni più promettenti per piccoli aerogeneratori? Prima di dare una risposta a questa domanda, al capitolo 4.3, vogliamo vedere un po' più da vicino il contesto urbanizzato distinguendolo da situazioni in alta montagna.

4.2.1 In ambiente urbanizzato

In ambienti urbani è possibile installare piccole turbine eoliche, solitamente con potenze comprese fra 0,5 e 2 kW, studiate appositamente per essere installate sugli edifici, sfruttando l'altezza dell'edificio come torre di sostegno. In ambiente urbano abbiamo diverse tipologie di impianti: alcuni possono essere installati vicino agli edifici, in altri sopra agli edifici oppure integrati direttamente nelle strutture come "Building Mounted/Integrated Wind Turbines" (BUWT). Esistono degli accentratori, particolarmente utili se la direzione del vento è molto decisa specialmente nel caso in cui provenga sempre dalla stessa direzione. Questi sono costituiti da pale fisse esterne che concentrano il flusso della corrente del vento aumentandone la velocità e mantenendo sicura la struttura. Questa tecnologia si avvicina agli impianti idroelettrici ad acqua fluente, dove il flusso della massa in movimento è similmente concentrato sulle turbine – con la differenza che impianti eolici di questo tipo sfruttano comunque aria: gassosa, comprimibile e meno densa (v. cap. 2.3).

F. 18
Esempi di impianti micro-eolici: a) Piccola turbina ad asse orizzontale (HAWT), b) Impianto Aeromine (5 kW) VAWT, c) Impianto della NewGreenTec installato a Urdorf (CH) che associa l'eolico al fotovoltaico in un'unica installazione. La combinazione di rotanti Darrieus e Savonius facilita l'avvio e migliora l'efficienza.
Fonte: Aeromine, NewGreenTec

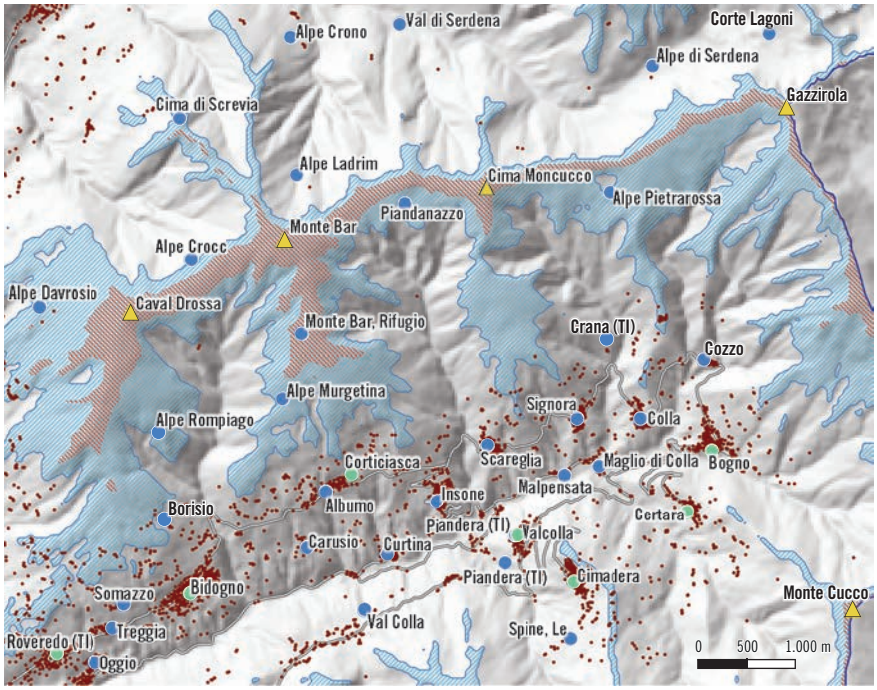






Un esempio di utilizzo in ambiente urbano riguarda la copertura dei consumi dell'illuminazione pubblica a led o per impianti della sicurezza stradale. Le macchine ad asse verticale non richiedono sistemi di orientamento e possono avviarsi a velocità del vento di pochi m/s, un vantaggio importante in prossimità del suolo, dove il vento è turbolento e cambia continuamente direzione. Diversamente, le macchine ad asse orizzontale girano meglio a venti più sostenuti, sono più leggere e hanno costi minori, ma l'installazione sul tetto è più delicato perché le sollecitazioni delle fondazioni possono essere critiche. Le vibrazioni possono rivelarsi inopportune se assorbite dagli edifici, anche le emissioni foniche possono infastidire. I costi sono generalmente più elevati di altre tecnologie.
In passato gli edifici venivano solitamente costruiti nei luoghi riparati dalle intemperie. Conseguentemente le zone edificabili si trovano in posizioni solitamente sfavorevoli allo sfruttamento del vento. La [F. 19], dove le aree con oltre 3 m/s a 20 m dal suolo sono raffigurate con aree tratteggiate, mostra come le costruzioni, soprattutto quelle residenziali, sembrano evitare le zone ventose, con oltre 3 m/s di velocità media calcolata. I pochi edifici in luoghi ventosi hanno perlopiù funzioni agricole segnatamente nel Sopraceneri. Pertanto, nelle zone urbanizzate la presenza di reti elettriche e la scarsa ventosità naturale relega i piccoli aerogeneratori a funzioni di nicchia e a scopi non-commerciali: gli edifici, abitativi o non (indicati con i simboli), si trovano perlopiù all'esterno delle stesse.

F. 19
Aree con velocità media a 20 m dal suolo di 3 m/s o più (risp. 5 m/s) nella zona del Monte Bar*
Fonte: OASI



- Paesi
- Nomi locali
- Cime
- Edifici
- Confine nazionale
- Strade secondarie
- Zone con almeno 3 m/s a 20 metri di altezza
- Zone con almeno 5 m/s a 20 metri di altezza

* Gli edifici si trovano generalmente nelle zone riparate dal vento.

4.2.2 In ambiente alpino

In ambiente alpino è necessaria una valutazione differente rispetto a spazi aperti pianeggianti, tipicamente idonei all'energia eolica: la presenza di turbolenze, i fulmini, la frequente formazione di ghiaccio, e spazi ristretti sono aspetti da includere in una valutazione preliminare.
In uno studio commissionato dal Club Alpino Svizzero (CAS) già nel 2012, l'autore Martin Märki aveva raccolto numerose esperienze pratiche utili da seguire per i rifugi alpini nel caso dell'installazione e utilizzo dell'energia eolica (*B. 8*). Gli impianti considerati nello studio sono turbine di piccole dimensioni con diametro del rotore inferiore ai 7 m e una potenza del generatore inferiore ai 10 kW.

Lo studio raccoglie numerose raccomandazioni e consigli pratici. Oltre alle buone condizioni di vento, con velocità media annua di almeno 5 m/s, l'impianto deve essere posizionato in un punto in cui la topografia non presenti forti turbolenze e non deve distare più di 150 metri dalla capanna, così da limitare i costi e le perdite, inoltre non dovrebbe essere posizionato in un sito caratterizzato dalla caduta regolare di fulmini o altri fenomeni naturali.
I possibili danni a cui va incontro un impianto sono dovuti alle tempeste, all'usura provocata dalle continue vibrazioni e alla formazione di ghiaccio. Fondamentale si rivela la corretta manutenzione dell'impianto, con verifiche visuali da parte degli operatori.
I presupposti favorevoli all'installazione di un impianto eolico in capanne alpine sono:
– fabbisogno energetico in inverno,
– situazioni in cui l'ombreggiamento limiti fortemente la produzione di un impianto fotovoltaico,
– impossibilità di utilizzare l'acqua come fonte energetica.

In presenza di questi prerequisiti si raccomanda di stimare l'entità dei dati mensili di consumo, di vento e di irraggiamento, così da determinare la dimensione ottimale degli impianti.
L'autore sottolinea che il fattore decisivo nella scelta dell'installazione di un impianto eolico non si basa solo sull'efficienza, ma soprattutto sull'affidabilità del sistema.

L'esempio del rifugio Lötschenpass

Nell'ambito del presente studio sulla mappatura ticinese, in assenza di impianti operazionali con dati di produzione, abbiamo scelto di riferire del Lötschenpass per confrontare velocità del vento e produzione elettrica di un impianto funzionante da otto anni. La prima turbina è rimasta in funzione fino al 2021, dopodiché un nuovo apparecchio, di cui riportiamo in seguito i dati, ha affiancato e sostituito quello originario.
Nel 2007-2008 questo rifugio, ubicato fra il Vallese e l'Oberland Bernese a 2.690 m, è stato il primo rifugio alpino a soddisfare gli standard Minergie (*S. 15*). Il calore (riscaldamento, cucina, acqua calda e acqua calda per le bevande) è fornito da un impianto solare termico di 25 m², dalla legna (cucina e stufa) e in parte minore dal gas (esclusivamente per la cucina), con il 90% del fabbisogno termico coperto da rinnovabili.

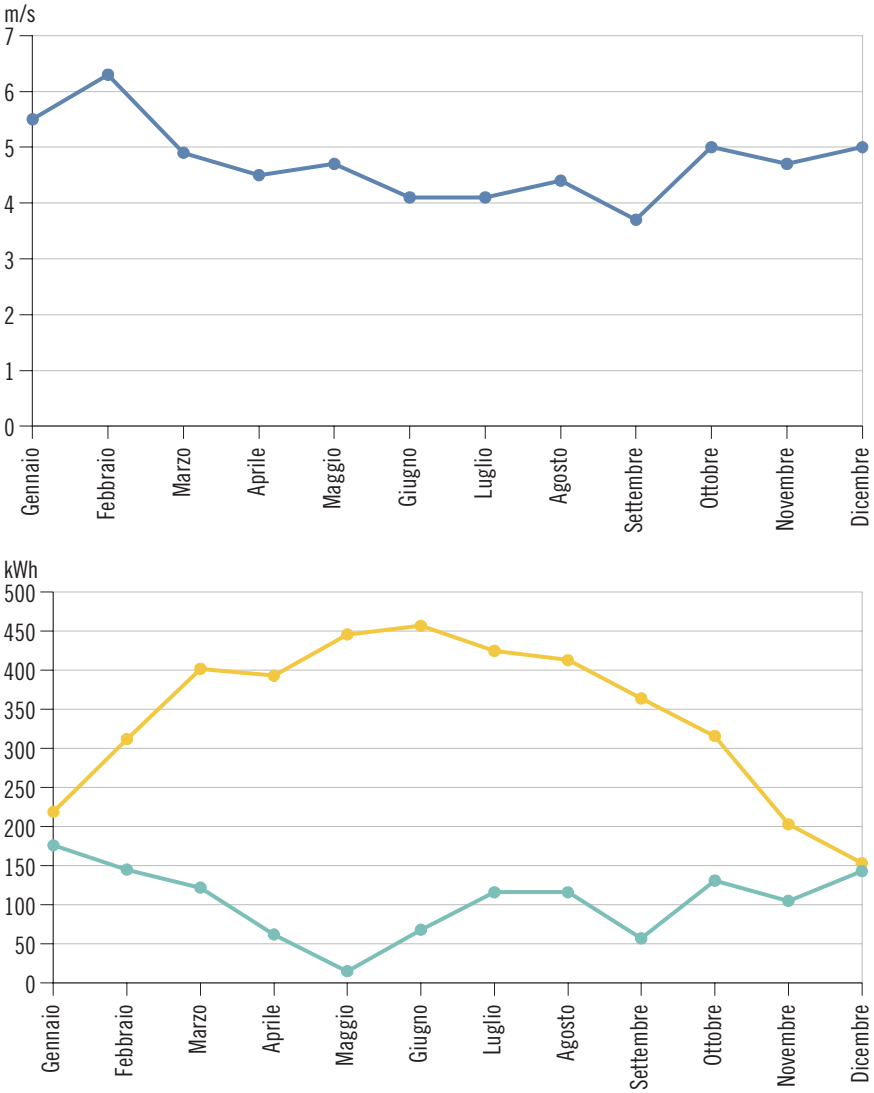
F. 20
Impianto mini-eolico e pannelli fotovoltaici al Lötschenpass
Fonte: (*S. 16*)



L'energia elettrica (consumo giornalieri di circa 16 kWh), è prodotta da un impianto fotovoltaico (3,5 kWp) e due turbine eoliche di potenza massima di 2 e 3 kW (a 2.000 m di quota) e accumulata tramite batterie al piombo. Durante l'arco dell'anno la maggior parte dell'elettricità proviene dall'impianto fotovoltaico (ca. 3.900 kWh) mentre il restante dall'eolico (ca. 2.000 kWh). In inverno il rapporto fra questi passa dal 65%-35% al 50%-50%, dato che l'apporto dal vento aumenta. Nei periodi di carenza viene utilizzato un piccolo generatore a diesel, che fornisce un apporto annuale di circa il 5% (*B. 8*).
La [F. 21] mostra velocità mensile media del vento (2021-2023), in turchese la produzione mensile della turbina maggiore[3] e in giallo la produzione dell'impianto fotovoltaico.

[3] La rotante ha un diametro di 3,8 m e l'asse si trova a 12 m dal suolo. La potenza nominale è di 2,5 kW, mentre la massima potenza osservata è di 1,9 kW.

F. 21
Dati mensili pluriennali relativi all'aerogeneratore del Lötschenpass, secondo la fonte*
Fonte: OASI, Martin Märki



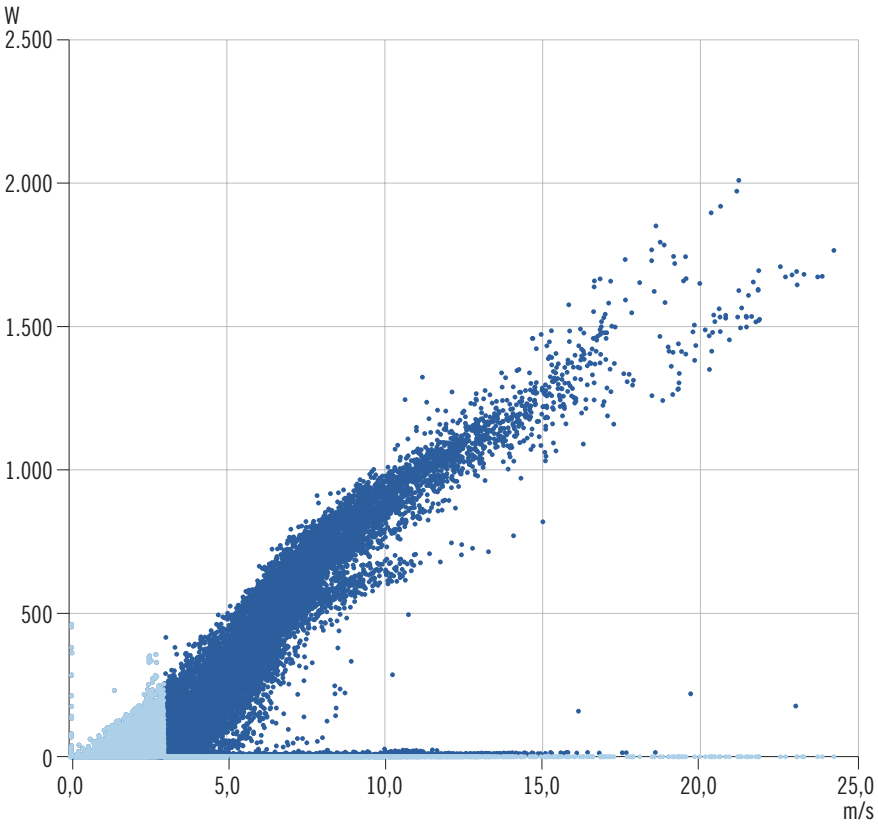
- Velocità media (m/s)
- Produzione fotovoltaica (kWh/anno)
- Produzione eolica (kWh/anno)

* Velocità medie (sopra, media annua 4,7 m/s) e produzioni medie (sotto, in kWh): produzione fotovoltaica (ca. 4.100 kWh/anno) e eolica (ca. 1.260 kWh/anno).

La [F. 21] mostra in alto che la velocità del vento tende a diminuire nei mesi estivi, un calo estivo noto anche nelle Alpi ticinesi. La minore produzione eolica sul Lötschenpass durante l'estate è dovuta solo parzialmente alla minore ventosità: l'impianto viene infatti spento quando basta la produzione fotovoltaica. In dicembre-gennaio l'energia eolica prodotta dalla seconda turbina arriva a 190 kWh/mese per coprire quasi metà del fabbisogno.
La [F. 22] mostra la produzione (in W) della seconda turbina denominata P2, in funzione della velocità del vento (in m/s) durante l'anno 2022, quando la media annua della velocità era pari a 4,0 m/s. La potenza erogata è rappresentata secondo la velocità del vento. Ogni punto sul grafico rappresenta una velocità media di 10 minuti, per più di 52.000 valori totali.

La figura evidenzia in colore più chiaro i punti con vento debole (meno di 3 m/s), per mostrare che sotto a questo valore la potenza non si spinge oltre 0,14 kW. I periodi a meno di 3 m/s, che includono quasi la metà (46,7%) dell'anno, contribuiscono alla produzione annua nella misura del 3,0%.

F. 22
Produzione elettrica (in W), secondo la velocità del vento (in m/s) della turbina P2 sul Lötschenpass, nel 2022*
Fonte: OASI, Martin Märki



- Produzione eolica
- Produzione eolica (a meno di 3 m/s)

* In colore chiaro sono evidenziati i momenti in cui il vento soffiava a meno di 3 m/s. Si possono notare, in basso, la presenza di punti con velocità rilevanti a cui non corrisponde una produzione: si tratta dei momenti in cui la rotante gira a vuoto in mancanza di fabbisogno di energia.

I più produttivi sono i periodi con velocità superiori, per i motivi menzionati sopra, al punto 2.3 "Quanto possiamo estrarre dal vento?". Infatti, a 5 m/s la potenza raggiunge 300 W; a 6 m/s sono 490 W, contribuendo per il 36,8% dell'energia nel 2022. Una potenza di oltre 1 kW si verifica quando il vento supera i 10 m/s e continua ad aumentare fino ai venti burrascosi. Complessivamente, nel 2022, il secondo aerogeneratore erogava tra 500 e 1.100 W per circa il 10% del tempo, mentre i venti spiravano in media[4] a 9,1 m/s. Durante questo 10% dell'anno, caratterizzato da venti ottimali, l'aerogeneratore ha prodotto 562 kWh, equivalenti al 58% dell'energia prodotta nel 2022.

Le esperienze acquisite sul Lötschenpass sottolineano l'importanza della solidità dell'aerogeneratore e la sua manutenzione. Le pale del primo generatore hanno infatti dovuto essere sostituite 2 volte nel corso degli anni per usura (abrasione all'impatto con i cristalli di ghiaccio) o eventi tempestosi. L'impianto ora in uso (Ryse E-3, [T. 1]) dimostra una migliore durevolezza e solidità.

Cosa insegna l'esempio del Lötschenpass per la mappatura eolica ticinese? Innanzitutto, che il generatore eroga energia a partire da circa 3 m/s di vento [F. 22]. Sotto tale soglia la produzione è impossibile o marginale. La potenza aumenta con la forza del vento senza raggiungere la potenza nominale teorica di 2.500 W. Normalmente l'impianto "lavora" a regimi parziali, inferiori alla potenza nominale.

Condizioni così ventose non sono frequenti in Ticino, come mostra la mappatura: ad eccezione delle creste alpine, la rugosità topografica delle Alpi e fattori climatici non sostengono la produzione eolica.

[4] Il primo e il terzo quartile della produzione ammontano a 7,2 e 10,4 m/s.

I venti termici alimentati dal ciclo diurno, ben percepiti dalla popolazione alle basse quote, richiedono aerogeneratori più sensibili, con una velocità di innesto inferiore a un apparecchio idoneo per l'ambiente alpino.
L'esempio del Lötschenpass [F. 21] illustra bene anche come la stagione fredda sia la più ventilata, come nella maggior parte delle zone alpine, comprese le Alpi ticinesi, come mostra [F. 24].

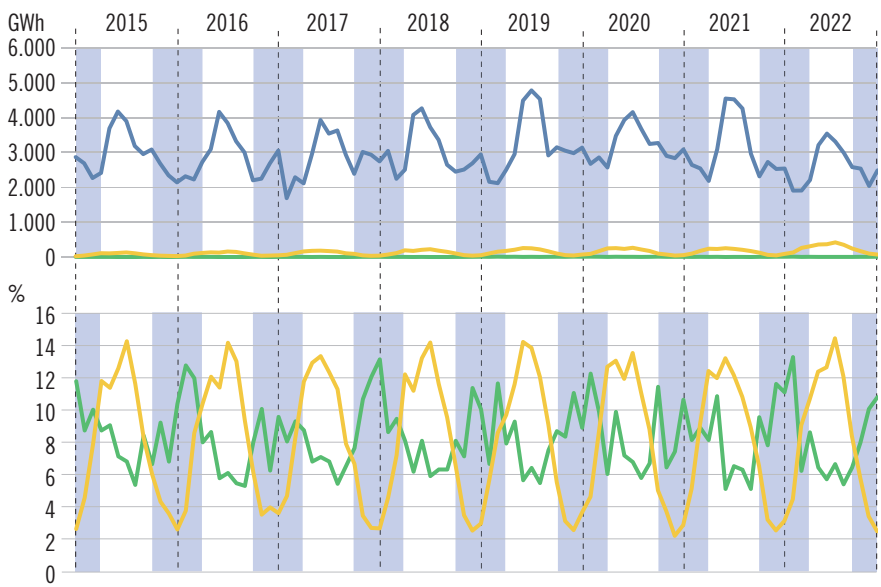
4.3 Possibili sviluppi in Ticino

Per il momento non sono previsti nuovi grandi impianti o parchi eolici allacciati alla rete elettrica, in Ticino. La scarsità di vento nella maggior parte del Cantone, l'accessibilità e la distanza dall'allacciamento alla rete elettrica sulle creste alpine ne limita la diffusione. La possibilità di potenziamento più realistica, per grandi impianti, sembra risiedere pertanto nell'ampliamento del Parco eolico del San Gottardo, dove sono in corso accertamenti per due nuovi aerogeneratori. Per impianti di dimensioni minori la tecnologia non si è finora insediata né in contesti urbani, né in contesti alpini. Il caso della capanna sul Lötschenpass, presentato in precedenza, rappresenta però un caso svizzero esemplare sia per l'integrazione delle energie rinnovabili, sia per l'efficientamento dell'edificio. Attualmente nel contesto ticinese l'interesse per impianti mini- o microeolici appare decisamente contenuto, sia a basse quote in contesto edificato, sia in zone discoste (non allacciate alla rete elettrica, a complemento di pannelli fotovoltaici, ...). Dal profilo edilizio, per questi impianti, valgono le usuali norme edilizie e ambientali. Nel contesto edificato, i piccoli aerogeneratori sono considerati alla pari di altri impianti tecnici, il Cantone Ticino non ha finora emanato norme o pubblicato direttive in merito.
Nonostante la generale scarsità di vento, l'utilità del suo sfruttamento potrebbe comunque essere data in situazioni particolari, come per esempio:

- per edifici lontani dalla rete elettrica e sfavoriti dal sole: rifugi alpini, alpeggi;
- per mantenere attivi piccoli consumi elettrici indipendenti dalla rete pubblica;
- dove il vento si rafforza localmente in modo sistematico, ad esempio in corrispondenza di incanalamenti all'entrata o all'uscita di una valle, per l'effetto ugello.

È significativo, inoltre, il fatto che la produzione degli impianti eolici svizzeri di grandi dimensioni avviene circa per due terzi durante il semestre invernale, quando se ne ha più bisogno per il riscaldamento e l'illuminazione, come evidenziato in [F. 23, sotto].

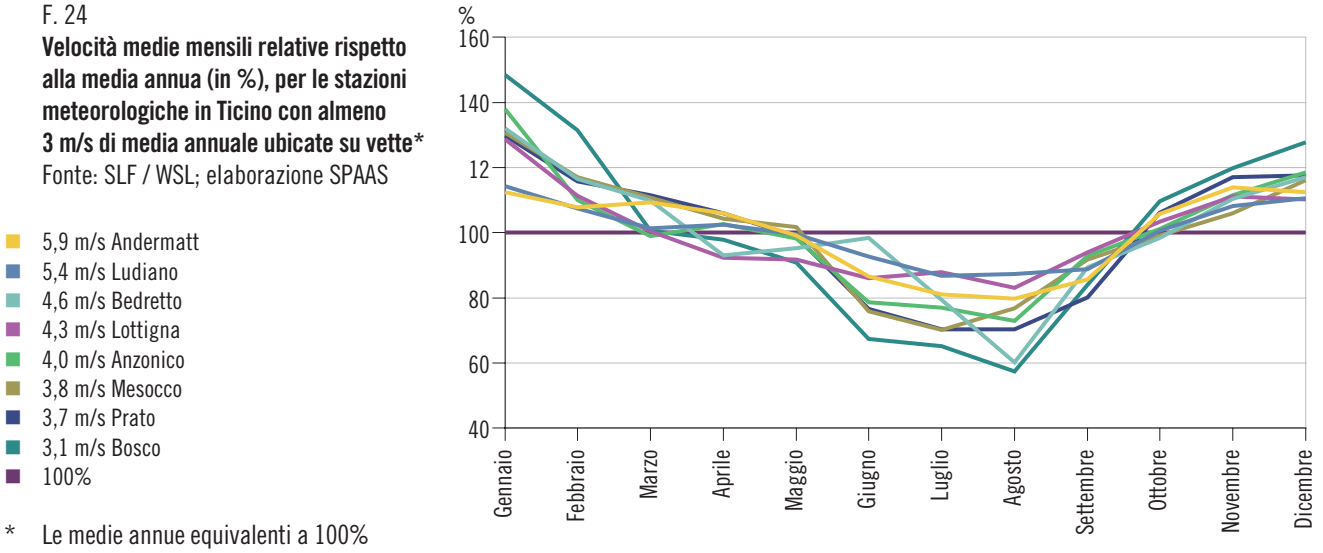
F. 23
Produzione mensile di idroelettrico, eolico e fotovoltaico (in GWh, sopra); produzione dell'eolico rispetto al fotovoltaico (in %, sotto), in Svizzera, 2015-2022*
Fonte: ISAAC, dati da BFE



* Il grafico mostra la percentuale prodotta mensilmente in Svizzera da ogni tecnologia rispetto alla propria produzione totale annua (nel periodo 2015-2022). Viene evidenziata in particolare la complementarità del fotovoltaico e dell'eolico. Il semestre invernale è evidenziato con lo sfondo celeste.

La maggiore ventosità invernale risulta anche dalle misure disponibili sulle stazioni meteorologiche presenti sulle vette in Ticino. La [F. 24] raffigura questo fatto: la velocità media mensile di otto siti in montagna con almeno 3 m/s di media pluriennale è rappresentata come percentuale della media annuale e mostra come la stagione fredda sia più ventilata, mentre il mese più calmo è agosto.

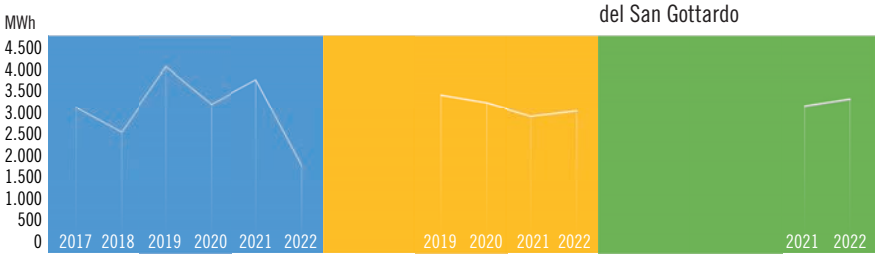
F. 24
Velocità medie mensili relative rispetto alla media annua (in %), per le stazioni meteorologiche in Ticino con almeno 3 m/s di media annuale ubicate su vette*
Fonte: SLF / WSL; elaborazione SPAAS



* Le medie annue equivalenti a 100% sono specificate nella legenda.

L'energia eolica rappresenta quindi un'integrazione, in prima analisi promettente, alle centrali idroelettriche e agli impianti fotovoltaici che producono la maggior parte della loro energia elettrica in estate. Ciò nonostante, la produzione di origine eolica è attualmente molto limitata, come visibile in [F. 23, sopra]. Difficilmente l'energia eolica potrà dunque fornire un contributo sostanziale all'approvvigionamento elettrico ticinese. In particolare ciò è dovuto agli elevati consumi attuali e prevedibili di energia elettrica, alle poche zone ventilate, e alle sfide logistiche presenti nelle zone idonee.
Per un confronto fra le tre tecnologie, abbiamo scelto tre impianti a energie rinnovabili presenti in Ticino paragonabili per energia annua prodotta (circa 3 GWh) [F. 25]. Nel primo caso (idroelettrico, [F. 25], a sinistra), la diga posta sul lago Sella crea uno sbarramento artificiale di circa 400 mila m^2 che può contenere fino a 9 milioni di metri cubi di acqua; questa, dopo essere stata forzata nelle condotte, mette in movimento la turbina, che si trova nella centrale più a valle, producendo energia elettrica. Nel paesaggio si notano quindi soprattutto il bacino e la tratta fluviale a deflusso residuale. Nel secondo caso (fotovoltaico, [F. 25] al centro) l'impianto considerato racchiude tutti i moduli fotovoltaici presenti sui quattro tetti dei magazzini delle FFS a Balerna, coprendo una superficie di 17 mila m^2. Nel terzo caso (eolico, [F. 25] a destra) l'impianto è un aerogeneratore del parco eolico del San Gottardo, di un'altezza di 144 m e un diametro della rotante di 92 m, che occupa alcune decine di metri quadrati, ma necessita di svariati ettari, su cui il vento deve poter spirare liberamente. Interessante è notare come, a seconda della tecnologia utilizzata, cambino l'utilizzo degli spazi o la possibile localizzazione (ambiente urbano o naturale) e l'impatto visivo. Altro elemento di interesse è la variabilità nella produzione: più stagionale per l'idroelettrico poiché dipendente dalle condizioni idrologiche, e per l'eolico perché intermittente secondo la meteo. Più costante si presenta infine il fotovoltaico, caratteristica intrinseca alla fonte stessa utilizzata.

F. 25
Confronto fra tre impianti installati in Ticino: impianto idroelettrico sul lago Sella, impianto fotovoltaico a Balerna e un aerogeneratore del Parco eolico del San Gottardo
Fonte: ISAAC



Idroelettrico
Diga al lago Sella

Potenza installata:
1,9 MW

Produzione media annuale:
3,0 GWh



Il lago Sella raccoglie le acque del bacino imbrifero del fiume Ticino.

È sbarrato da una diga alta 32 m e lunga 220 m che puo' contenere fino a 9 milioni di m³ di acqua.

Fotovoltaico
Impianto FFS Balerna

Potenza installata:
3 MW

Produzione media annuale:
3,1 GWh



L'impianto è posto su dei tetti dei magazzini FFS a Balerna.

Ogni tetto ha una dimensione di circa 4.255 m², per un totale di 17 mila m².

Eolico
Aerogeneratore del Parco del San Gottardo

Potenza installata:
2,35 MW

Prdouzione media annuale:
3,2 GWh



L'aerogeneratore si trova sul passo del Gottardo. Insieme ad altre 4 turbine forma il Parco eolico del San Gottardo.

L'impianto raggiunte 144 m di altezza e ogni pale è lunga 43,8 m.

5. CONCLUSIONI

L'elaborazione della mappatura eolica ticinese per impianti mini- e microeolici, costituisce il provvedimento P.2.2 del Piano energetico cantonale (PEC 2013). Realizzata con il medesimo modello di quella a scala nazionale e consegnata nel 2019, offre prime informazioni circa le potenzialità del mini- e microeolico, per tutto il territorio cantonale, a diverse altezze, ma tendenzialmente più prossime al suolo rispetto alla mappatura nazionale. Grazie a una risoluzione spaziale più fine (celle di 25 m) mostra la distribuzione del vento in maniera più dettagliata. Sulla base della mappatura si possono effettuare prime valutazioni sul potenziale di insediamento di singoli impianti fino all'installazione di parchi eolici, con il focus sul mini- e il microeolico.
La mappatura mostra dove si trovano le zone più promettenti in relazione alle velocità medie, alla durata della presenza di venti di almeno 3 o 5 m/s e alla resa energetica teorica: sui rilievi e in particolare sulle creste alpine. Le zone urbanizzate non offrono in generale condizioni idonee per una produzione di energia che sia economicamente redditizia alle condizioni attuali. La scarsa ventosità e la presenza di condotte elettriche sembrano relegare a ruoli di nicchia o a scopi non-commerciali i piccoli aerogeneratori installati fra 10 e 30 m sopra il suolo, su costruzioni esistenti o strutture apposite.
Al di sopra dei 20 metri di altezza dal suolo, un vento di 3 m/s soffierebbe infatti per almeno 3 mesi all'anno soltanto sul 28% del territorio ticinese – in aree morfologicamente perlopiù impegnative –, mentre a 100 m di altezza dal suolo il 53% del territorio sarebbe interessato da venti al di sopra dei 3 m/s per 3 mesi all'anno.
Aumentando la soglia a 5 m/s, a 20 metri di altezza dal suolo essa è superata per almeno tre mesi all'anno solo sul 3% del territorio nei luoghi più esposti, percentuale che sale al 7% a 100 metri sopra il suolo.
Ciononostante, l'energia del vento, trasformata in energia elettrica tramite piccoli aerogeneratori con valenza locale, può risultare utile nelle seguenti casistiche:

– per edifici lontani dalla rete elettrica e con esposizione al sole sfavorevole: rifugi alpini, alpeggi;
– per mantenere attivi piccoli consumi elettrici indipendenti dalla rete pubblica;
– dove il vento si rafforza localmente in modo sistematico, ad esempio in corrispondenza di incanalamenti all'entrata o all'uscita di una valle, per l'effetto ugello.

La mappatura può quindi fornire prime informazioni per questi casi e aiutare a comprendere quale sia il tipo di generatore che meglio potrebbe soddisfare un certo fabbisogno.

BIBLIOGRAFIA E SITOGRAFIA

Bibliografia

B. 1 IEA (2023). Wind TCP Annual Report 2022

B. 2 Bundesamt für Energie BFE: Windpotenzial Schweiz 2022. Schlussbericht zum Windpotenzial Schweiz 2022 (Bern, 24.08.2022)

B. 3 Bundesamt für Energie BFE: Windpotentialanalyse für Windatlas.ch. Jahresmittelwerte der modellierten Windgeschwindigkeit und Windrichtung. Bericht zur Aktualisierung des Windatlas von 2016 (Bern, 03.06.2019)

B. 4 Kozak, Peter. (2014). Effects of Unsteady Aerodynamics on Vertical-Axis Wind Turbine Performance.

B. 5 ABB (2011) Impianti eolici. Quaderni di applicazione tecnica N.13 (Figura 3.13)

B. 6 BFE (2024). Schweizerische Statistik der erneuerbaren Energien 2023

B. 7 BFE (2022). Windpotenzial Schweiz 2022. Schlussbericht zum Windpotenzial Schweiz 2022

B. 8 Märki Martin (2012) Ratgeber Windenergie Zur Nutzung von Windenergie bei SAC-Hütten. Schweizer Alpen-Club SAC, Bern.

B. 9 Meteotest AG: Windatlas Kanton Tessin Jahresmittelwerte der modellierten Windgeschwindigkeit und Windrichtung (Bern, 18.06.2019)

B. 10 Ufficio del monitoraggio ambientale UMAM: La mappatura eolica ticinese. Rapporto interno (Bellinzona, 05.01.2021)

Sitografia

S. 1 https://windmillstech.com/the-worlds-first-automatic-wind-turbine/

S. 2 https://www.iea.org/energy-system/renewables/wind/

S. 3 https://ourworldindata.org/grapher/cumulative-installed-wind-energy-capacity-gigawatts?country=DEU~IND~ESP~ITA~AUS~JPN~OWID_WRL

S. 4 https://gwec.net/global-wind-report-2024/ (visitato autunno 2024)

S. 5 https://wind-data.ch/windkarte

S. 6 https://www.educazionetecnicaonline.com/wp-content/uploads/2015/12/EolicoSchema.jpg

S. 7 https://www.are.admin.ch/are/it/home/sviluppo-e-pianificazione-del-territorio/strategia-e-pianificazione/concezioni-e-piani-settoriali/concezioni/concezione-energia-eolica.html

S. 8 https://www.uvek-gis.admin.ch/BFE/storymaps/EE_Windatlas/?lang=it

S. 9 https://www.wind-energie.de/themen/anlagentechnik/funktionsweise/energiewandlung/

S. 10 https://www.bfe.admin.ch/bfe/it/home/approvvigionamento/energie-rinnovabili/energia-eolica.html

S. 11 https://opendata.swiss/it/dataset/windatlas-schweiz-jahresmittel-der-modellierten-windgeschwindigkeit-und-windrichtung-in-125-m-h

S. 12 https://www.oasi.ti.ch/web/energia/mappatura-eolica.html

S. 13 https://windsim.com/

S. 14 https://it.wikipedia.org/wiki/Fluidodinamica_computazionale

S. 15 https://www.minergie.ch/it/edifici/dettagli/?gid=VS-537

S. 16 https://www.loetschenpass.ch/ (visitato autunno 2024)

Revisione:
Mauro Stanga

Impaginazione:
Sharon Fogliani

Ufficio di statistica

Repubblica e Cantone Ticino
Dipartimento delle finanze e dell'economia
Divisione delle risorse

Giugno 2025

**La riproduzione è autorizzata
con la citazione della fonte**

Ufficio di statistica
Via Bellinzona 31
6512 Giubiasco

+41 (0)91 814 50 11
dfe-ustat@ti.ch
www.ti.ch/ustat