

Vento d'alta quota: i benefici del suo sfruttamento energetico

Massimo Ippolito Eugenio Saraceno Andrea Papini KiteGen®

L'articolo tratta dei recenti sviluppi nel campo delle tecnologie per lo sfruttamento del vento d'alta quota per la produzione di energia elettrica e dei progetti KiteGen® Stem e KiteGen® Carousel sviluppati da KiteGen, l'azienda italiana titolare della tecnologia a livello mondiale.

Vento troposferico: le ragioni fisiche ed economiche della scelta

Per le sue caratteristiche di abbondanza, disponibilità geografica ed alta densità territoriale, il vento d'alta quota rappresenta una risorsa molto interessante. Il vento è energia solare trasformata in energia meccanica dal più grande "pannello solare" a nostra disposizione: l'atmosfera terrestre. Un pannello che può essere definito fotocinetico anziché fotovoltaico, sempre pronto all'uso e mantenuto gratuitamente dalla natura. Il vento d'alta quota, o meglio, il regime stazionario delle correnti d'aria geostrofiche, rappresenta il più grande giacimento energetico da fonte rinnovabile esistente sul pianeta, è perennemente alimentato dalla radiazione solare da cui è derivato.

Tenendo presente che la velocità del vento cresce significativamente con la quota e che la sua potenza cresce con il cubo della velocità, si desume che se il vento raddoppia di velocità la sua potenza specifica cresce di 8 volte. Il vento troposfe-

rico, inoltre, è un fluido in moto laminare: allontanandosi dallo strato limite e dalle asperità della superficie terrestre che ne frenano e condizionano il moto, esso aumenta progressivamente di velocità, persistenza e costanza.

La quantificazione della potenza estraibile, senza apprezzabili modifiche del vento troposferico, è confermata in valori prossimi a 1800 TW, ovvero più di cento (100) volte, in termini di flusso energetico, l'attuale fabbisogno dell'intera umanità (stimato in circa 16-18 TW) [1]. Il valore cento (100) rende l'idea delle potenzialità del vento troposferico non solamente come dato generico di fenomeno fisico dell'atmosfera, ma come chiaro indice di disponibilità e concentrazione locale della risorsa con ricadute immediate sulle valutazioni economiche e di fattibilità (per esempio, le fattorie del vento).

L'eolico troposferico, già a qualche centinaio di metri dal suolo, presenta un fronte vento con densità di potenza media in termini di W/m^2 ben superiori alle densità di potenza presenti a terra (figura 1).

Per questa ragione, nella continua corsa all'altezza cui sono soggette, le turbine più imponenti arrivano a "spazzare" il vento a 120-150 m, quota in cui la torre eolica tradizionale ha già superato il proprio limite di convenienza. Col crescere dell'altezza, infatti, le masse di turbina e fondazioni devono essere aumentate in misura esponenziale anche per resistere alle rare, benché occasionali, forze estreme esercitate dal vento sulla struttura durante il completo ciclo di vita, vanificando in termini di costi sia economici che energetici il vantaggio dimensionale.

I generatori KiteGen, progettualmente concepiti per operare in alta quota con le ali ed a terra con le apparecchiature Stem e Carousel, pos-

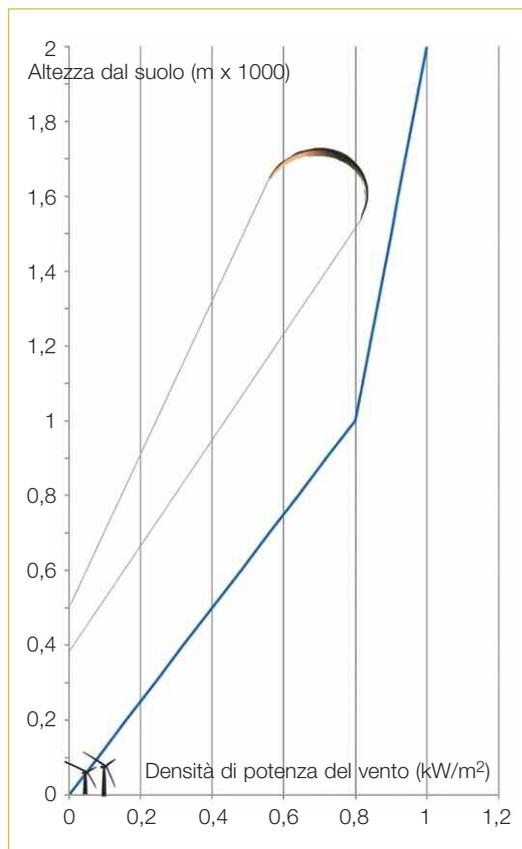


Figura 1 Dati medi 1961–1980 da Stazione meteo KNMI De Bilt (Olanda) [Fonte: TU Delft University].

sono essere soggetti a dimensionamenti progettuali crescenti senza ricadute negative sull'economia degli impianti.

Scalabilità e densità energetica territoriale sono altri rilevanti punti di forza dell'eolico troposferico. I generatori KiteGen possono arrivare a raccogliere energia da enormi superfici di fronte vento con pochi limiti strutturali. A ciò aggiungasi che è previsto che il controllo del volo sia in grado di manovrare in contemporanea numerose ali sino a realizzare e gestire vere e proprie fattorie del vento composte da numerose macchine.

Infine, l'eolico troposferico può contare su un giacimento presente in gran parte del pianeta, non limitato dalle caratteristiche orografiche del territorio ed è, di fatto, una fonte energetica accessibile anche in luoghi solitamente inadatti alle turbine eoliche (per esempio, la pianura padana).

Dai dati contenuti negli atlanti specifici pubblicati di recente [2], si può desumere che l'Italia goda di una posizione fortunata rispetto ai venti: su di essa, infatti, fluisce una potenza totale il cui ordine di grandezza è intorno ai 100 TW. Ipotizzando di riuscire ad estrarre un minimale pari allo 0,1% continuo (100 GW), la potenza ottenibile corrisponderebbe ad oltre 800 TWh all'anno, valore equiva-

lente ad una produzione netta di ricchezza endogena stimabile in 80 miliardi di euro l'anno (cifra analoga alla bolletta energetica italiana). Ne deriva un invito inequivocabile alla riconversione ad una società basata ampiamente sull'energia elettrica con le relative ricadute virtuose in ambito industriale.

Qualche decina di grandi macchine eoliche (KiteGen Farms) distribuite da Nord a Sud, svolgerebbero il loro compito senza aggravamenti di intermittenza e ad un costo nettamente inferiore a quello del termoelettrico, incluso l'elettronucleare.

Scalabilità, principi meccanici di funzionamento, quota massima

Le ragioni tecnologiche, comprovanti la tesi che lo sfruttamento del vento troposferico possa soddisfare il fabbisogno energetico nazionale ed a seguire quello mondiale, sono legate all'agevole scalabilità del concetto senza requisiti stringenti di sovradimensionamento delle macchine.

Scalabilità

Per approfondire la prerogativa di scalabilità con valutazioni estendibili ad altre tecnologie, utilizzeremo alcune comparazioni tra pala eolica e sistemi a profili alari.

Il tentativo di ingrandire una turbina eolica pone severi limiti di fattibilità economica imposti dalla struttura, così riassumibili: il raddoppio delle dimensioni di una torre eolica comporterebbe una produzione quattro volte maggiore implicando però, per sostenerne il carico, un aumento di 10 volte, in termini di materiali e costi.

Il KiteGen Stem segue una diversa legge di scalabilità, infatti, raddoppiando le dimensioni lineari della sua ala, superficie, portanza e tensioni sui cavi aumenteranno di un fattore quattro (di conseguenza, per essere quattro volte più resistente, il cavo avrà un diametro doppio ed un drag circa 2 volte maggiore). Ogni volta che le dimensioni lineari vengono raddoppiate, senza pretese di precisione, ne consegue che il rapporto efficienza/aerodinamica (*lift to drag*) aumenta tendenzialmente di un fattore 2 (se il sistema kite-funi ha un'efficienza aerodinamica di 5, con il raddoppio delle sue dimensioni lineari si verificherebbe un'efficienza aerodinamica di 10). Il raddoppiare dell'efficienza aerodinamica comporta un aumento della produttività quadruplo.

Requisiti di progetto

La struttura di una pala eolica è progettata per resistere agli eventi estremi sulla base di una valutazione statistica dei venti massimi durante la vi-

ta della struttura stessa. Il KiteGen è, invece, progettato per lavorare alla sua potenza nominale in quanto, durante fenomeni di vento estremi, può contare su strategie di regolazione o di interruzione dell'operatività che ne garantiscono la sicurezza (figura 2).

Quote elevate

Per quanto riguarda la possibilità di raggiungere quote significativamente alte (nell'ordine dei chilometri), i modelli di calcolo messi a punto da KiteGen Research confermano il continuo incremento di potenza, nonostante il peso e la resistenza aerodinamica delle funi.

La massima quota tecnicamente raggiungibile con profitto è 9 km a causa del trade off tra densità dell'aria e velocità del vento.

Nell'eolico troposferico, la possibilità di variare la quota di esercizio, per meglio adattarsi alle esigenze di rete, offre l'opportunità della modulazione dell'erogazione, mitigando così i problemi di intermittenza e di necessità di accumulo.

Intermittenza delle rinnovabili

L'analisi di D. Coiante [4] fa il punto sulle rinnovabili e stabilisce la necessità di accumulo sia giornaliero che stagionale.

L'operatività del KiteGen Stem, a differenza del Carousel, introduce una pulsazione dell'ordine dei minuti dovuta al ciclo produttivo a yo-yo, questo viene superato da un accumulo a supercondensatori che assicura la qualità di dispacciamento.

I gestori di rete [5] stanno progettando di inserire sistemi di accumulo mediante batterie elettrochimiche in particolari topologie di rete ove si teme che perturbazioni dovute alla massiccia immissione di energia in forma intermittente e non programmabile si verifichino più frequentemente. Il sistema KiteGen nel suo complesso presenta una soluzione del tutto nuova a tali problematiche. La novità consiste nel fatto che è lo stesso regime stazionario dei venti d'alta quota a costituire un accumulo: infatti, l'energia presente nel moto atmosferico stazionario è immensa (circa 250.000 TWh)¹ e continuamente rinnovata dal sole. Poiché tale flusso non si interrompe mai, ma varia di intensità e latitudine, la disponibilità con cui si può attingere una potenza P da questa riserva si avvicina al 100% se consideriamo due punti di prelievo a distanza opportuna. Ciò consente una scelta tra la configura-

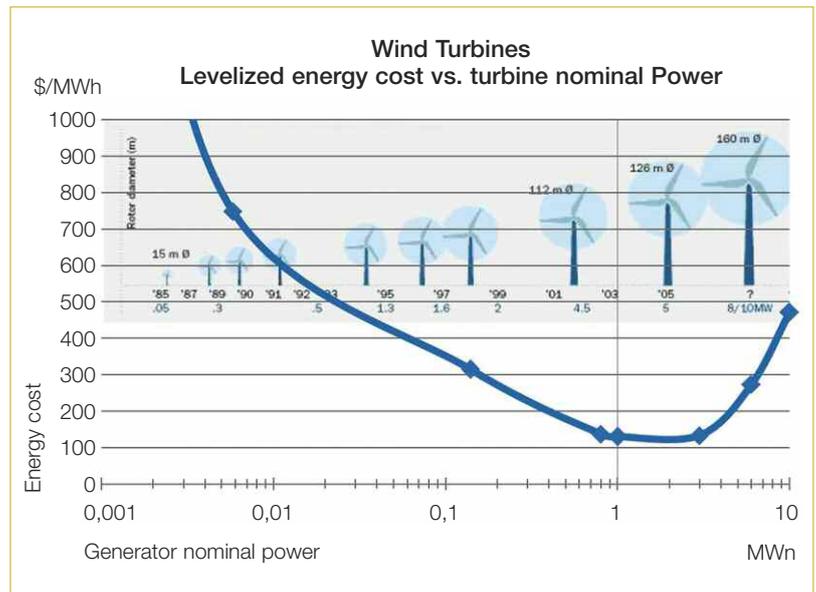


Figura 2 LEC e potenza nominale delle turbine (Fonte: Rielaborazione dati [3] KiteGen Research, 2013).

zione con generatore di potenza P più accumulatore opportunamente dimensionato e la configurazione con due generatori d'alta quota di potenza P opportunamente distanziati. La scelta della configurazione dovrebbe essere mossa da criteri puramente economici considerando da una parte i costi del sistema di accumulo e, dall'altra, i costi per raddoppiare il generatore e per modificare i vincoli di rete, ma anche i benefici del poter disporre per una grande frazione dell'anno di una potenza maggiore di P e poter destinare l'eccedenza a processi energivori interrompibili come la dissalazione di acqua marina, la produzione di idrogeno come materia prima per l'industria chimica (fertilizzanti, carburanti), la lavorazione di minerali ferrosi e non ferrosi o l'accumulo termico ad alta temperatura.

Su uno specifico sito terrestre (cfr. esempio riguardante la zona di New York) (2), il generatore KiteGen può raggiungere e prelevare energia da questo flusso, con la probabilità di trovarlo sufficientemente potente per produrre energia alla potenza nominale per il 68% del tempo, per un equivalente di circa 6.000 h annue (dato che il flusso del vento globalmente non si affievolisce ma cambia ciclicamente ed erraticamente latitudine).

Allora qual è l'idea per spingere l'eolico troposferico fino ad una probabilità del 95% di disponibilità o addirittura ad un 99,9%? Risposta relativamente semplice: sul territorio considerato sono necessari almeno due generatori posizionati ad una distanza sufficiente da averne almeno uno investito dal flusso del vento. I due generatori sarebbero quindi da considerare come un unico sistema che produrrà continuativa-

¹ La massa dell'atmosfera è circa $5E + 18$ kg, il vento medio (compensato per la massa) alla media altitudine è circa 20 m/s. Pertanto l'energia cinetica è $1/2 * 400 * 5E + 18 = 1E + 21J = 270.000$ TWh.

mente una potenza almeno pari al contributo di uno dei due generatori.

Cosa si ricava da queste riflessioni?

1. La ridondanza porterebbe occasionalmente ad un eccesso di produzione potenziale, ma i KiteGen sono facilmente e velocemente modulabili mediante un coordinamento centrale, offrendo un preciso adeguamento alla curva di domanda. Pertanto, in assenza di vincoli di rete, il gestore sarebbe libero di imporre che a fronte di una potenza richiesta P la somma delle potenze erogate dai due generatori sia sempre pari a P .
2. A differenza delle torri eoliche, il bilancio economico di questo ipotetico impianto doppio può farsi carico della ridondanza dei generatori poiché potrà contare su un 95% di disponibilità annua della potenza nominale di un singolo generatore, e, in più, di potenza non necessaria alla rete, ma ipoteticamente utilizzabile a costo 0 al di fuori di essa (per esempio con brevi linee dedicate verso poli industriali limitrofi).
3. In caso di una sufficiente distribuzione territoriale di generatori KiteGen, queste speculazioni sarebbero superate, in quanto l'effetto di ridondanza si ottiene intrinsecamente.
4. L'intermittenza di erogazione, che affligge l'eolico convenzionale ed il fotovoltaico, può essere brillantemente superata con l'eolico troposferico e non sarebbe più necessario attribuire al termoelettrico l'esclusiva sul baseload in tale scenario.
5. Le considerazioni fatte per la zona di New York (2), sono altresì valide per buona parte del globo dato che, con i venti di alta quota, l'influsso orografico di rallentamento si affievolisce.

Le configurazioni KiteGen Stem® e KiteGen Carousel®

Il sistema KiteGen si basa sulla conversione dell'energia cinetica del vento troposferico in energia elettrica mediante un alternatore. A tale fine, Kite-

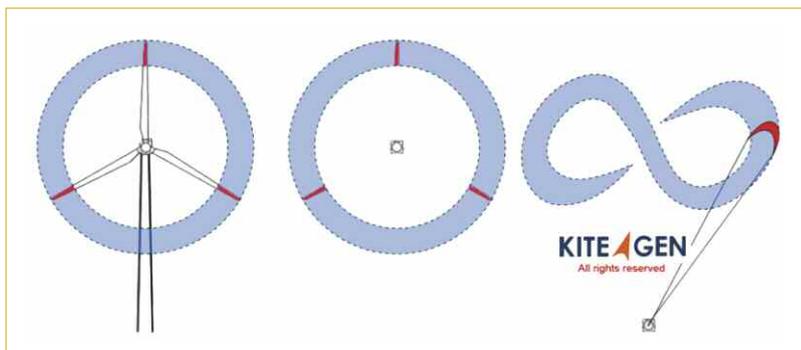


Figura 3 Il concetto KiteGen®.

Gen Research ha elaborato due diverse configurazioni: KiteGen Stem e KiteGen Carousel.

Nelle turbine eoliche tradizionali la parte del rotore che raccoglie la maggior quantità di energia è costituita dalle estremità delle pale (in rosso nella figura 3), poiché intercettano un maggior fronte vento in maniera più efficace.

L'essenza del concetto KiteGen è quindi non paragonabile ad una torre eolica. In KiteGen, infatti, sono presenti i soli componenti veramente necessari: le estremità delle pale ed il generatore, quest'ultimo convenientemente spostato al suolo. La struttura risultante, fondata a terra incluse, è estremamente più leggera.

La quota operativa e le modalità di volo delle ali sono, inoltre, variabili in funzione delle condizioni di vento esistenti, al fine di ottimizzare in modo continuo l'estrazione di energia dal vento.

Il controllo del kite (o ala) avviene principalmente manovrando in maniera differenziale i cavi che provengono dai due assi di stoccaggio attraverso gli alterno-motori che conducono le pulegge di pre-carico. Al cuore del sistema risiede il software che, senza intervento umano, sulla base di dati ricevuti dal generatore da una rete di sensori posizionati a bordo dell'ala e sulla struttura a terra, interviene sulla lunghezza relativa dei cavi: in questa maniera le traiettorie di volo possono essere controllate e normalmente dirette alla massima produzione di energia, nel rispetto delle specifiche di funzionamento della macchina. KiteGen rappresenta da questo punto di vista una sofisticata applicazione meccatronica, resa possibile dai recenti sviluppi nel settore della sensoristica e delle capacità di calcolo dei sistemi informatici.

KiteGen Stem®

Si tratta di un generatore mono-ala, che in una configurazione di potenza nominale 3 MW, ha diametro a terra di 12 m, peso di 6 t per MW nominale (figura 4). Il suo ciclo di produzione si può scomporre in due fasi:

- prima fase di **generazione**: il volo dell'ala nel vento genera una portanza (trazione) sui cavi che mette in moto la rotazione dei tamburi e degli alternatori;
- seconda fase di **recupero**: l'ala viene messa in una posizione in cui perde portanza (procedura cosiddetta di "side-slip"), gli alternatori si comportano da motori coadiuvando il riavvolgimento dei cavi sino alla quota in cui l'assetto di volo dell'ala viene ripristinato e riprende il ciclo di generazione.

La quantità di energia consumata nella fase di recupero è una frazione infinitesimale di quella

prodotta durante la generazione ed è spesa in gran parte per la scelta strategica di accelerare i tempi di recupero del kite, anticipando vantaggiosamente la fase di produzione.

Il kite, come l'ala di un aeroplano, sviluppa una portanza (ovvero la componente della forza aerodinamica nella direzione dei cavi) e, per mezzo degli speciali cavi, mette in rotazione i tamburi su cui sono avvolti e tramite un alternatore, trasforma l'energia meccanica del vento in elettricità.

Il generatore KiteGen Stem è in sostanza un robot progettato per controllare un'ala vincolata al fine di massimizzare la produzione energetica e gestire in modo ottimale i carichi sulla struttura. Quest'ultima è composta dalla base che ha la forma simile ad un "igloo" e dallo "Stem", lo "stelo" di almeno venti metri dal quale fuoriescono i cavi. La struttura è stata progettata per interagire con le forze del vento (naturali e quindi imprevedibili) grazie ad una rete di sensori che rileva in tempo reale i carichi impulsivi e fornisce al sistema di controllo le informazioni necessarie per intervenire sul volo dell'ala e sulla posizione del braccio, nel caso in cui le forze rilevate superino le soglie di sicurezza previste. L'intera struttura è stata concepita per sopportare carichi con un fattore di sicurezza adeguato.

La sensoristica relativa al controllo del volo comprende due equipaggiamenti elettronici mon-

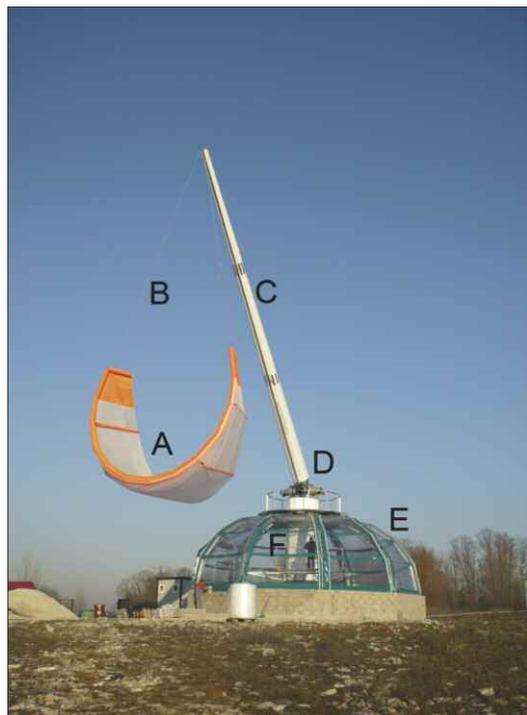


Figura 4 Generatore KiteGen® STEM di Sommariva Perno (CN): A: Ala (Kite); B: Cavi; C: Stem; D: Sistema di Alzo e Rotazione dello Stem; E: "Igloo"; F: Sala Macchine (Moto-Alternatori, Tamburi, Quadri Elettrici).

tati sull'ala (sviluppate dal team KiteGen) ognuno dei quali comprende trasmettitori radio, accelerometri, giroscopio, magnetometro, GPS, barometro, rilevatore di temperatura e di velocità del vento apparente, il tutto ridondante ed alimentato da un sistema che integra micro-turbine e batterie. Le schede trasmettono informazioni a terra, comunicando posizione, velocità, orientamento, accelerazioni ed altri parametri. Il sistema di controllo è in grado di elaborare tali informazioni e di realizzare ipotesi sulle traiettorie dell'ala nell'immediato futuro, scegliendo le manovre ottimali i cui esiti vengono, a loro volta, reinterpretati ed utilizzati per migliorare il modello del controllo: un loop continuo auto-apprendente che avviene decine di volte al secondo, finalizzato ad adattare la macchina alle caratteristiche del sito di installazione e ad ottenere miglioramenti continui e progressivi nelle sue prestazioni.

KiteGen Carousel®

Si tratta di una soluzione tecnologica con percorso ad anello che mette in cooperazione più generatori KiteGen Stem, considerati come "singolo modulo" della configurazione a carosello (**figura 5**).

In questa configurazione la forza trasmessa dai cavi viene mantenuta costante, mentre la lunghezza degli stessi varia limitatamente al controllo delle ali e per la scelta della traiettoria ottimale. I kite trainano la struttura rotorica equipaggiata da alternatori lineari lungo un percorso circolare del diametro di qualche kilometro posto a livello del suolo. Il software interviene sul differenziale di lunghezza dei cavi assicurando che le



Figura 5 KiteGen Carousel® concept drawing.

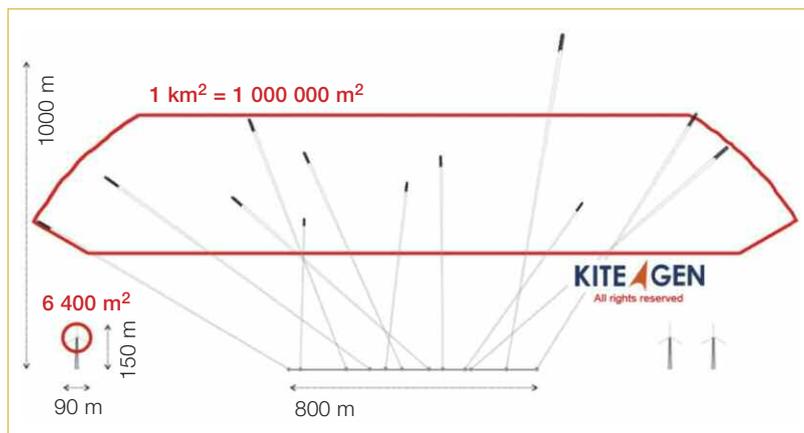


Figura 6 Spazio Utilizzato da un KiteGen Carousel® diametro 800 m.

traiettorie di volo di ogni ala siano controllate, sincronizzate con le altre e funzionali alla massimizzazione produttiva.

Mentre le ali volano in quota, l'intera struttura viene trainata lungo un percorso circolare e l'energia è generata dal relativo movimento roto-statorico. A regime, il volo dell'intero insieme di ali è guidato in maniera da far ruotare il "carosello" alla velocità desiderata, permettendo l'azionamento degli alternatori.

Nella **figura 6** è rappresentato il fronte vento intercettato da un generatore del tipo "Carousel" con un diametro di 800 m; la stessa quantità viene raggiunta con circa 150 torri eoliche di grandi dimensioni. Da notare che le torri eoliche hanno bisogno di essere distanziate l'una dall'altra per evitare che interferiscano fra di loro diminuendo la resa totale e occuperebbero quindi un'area a terra totale di più di 40 km². In questo specifico caso, la centrale KiteGen occuperebbe circa 5 km² comprensivi di una fascia di rispetto posta attorno.

La massima taglia raggiungibile è oggetto di studio, ma dalle valutazioni iniziali appare possibile eccedere i 1.000 MW (1 GW) senza significativi rischi strutturali, con un diametro di circa 1.600 m.

Benché non compatibili con l'attuale sistema elettrico, i limiti teorici di questa configurazione, sono eccezionali e possono essere immaginati sotto forma di un anello di circa 25 km di diametro molto simile ad un viadotto ferroviario con profili alari che volano sino a 10 km di altezza in formazioni controllate generando una potenza che supera i 60 GW con un LEC stimato inferiore ai 10 €/MWh.

Come per lo Stem, il layout Carousel è protetto da brevetti internazionali (granted patents) e l'implementazione sarà conseguente alla industrializzazione dei generatori del tipo Stem monoala, in quanto ne eredita in pieno le tecnologie chiave.

Lo scenario competitivo globale

Il numero di organizzazioni impegnate in progetti sull'eolico di alta quota, anche in seguito all'attività di disseminazione di KiteGen, è in fortissimo aumento. Ad oggi, tra università ed aziende, si contano più di 45 gruppi e molte iniziative sono palesemente ispirate ai concetti contenuti nel progetto di KiteGen. Nella visione di KiteGen ciò dimostra la assoluta supremazia dei concetti scoperti e formalizzati. D'altro canto, il detenere la priorità sui più rilevanti concetti relativi all'eolico d'alta quota comporta una pesante responsabilità in carico a KiteGen stessa e soprattutto al sistema Italia, poiché i brevetti hanno sterilizzato gli investimenti anche di possibili competitori, precludendo il diritto di sfruttamento in quanto esclusiva di KiteGen, e sottraendo al mondo la via maestra per trovare rapidamente la soluzione alla crisi economica globale.

Di seguito si riporta una breve rassegna di due progetti di ricerca con una rilevanza internazionale.

Delft University of Technology

L'ASSET Institute of Delft University of Technology, è stato il primo partner di KiteGen nel 2003 nella presentazione di un progetto europeo alla DG energia. Il concetto originale di Delft, denominato Laddermill, oggi è stato accantonato per seguire l'impostazione KiteGen "pumping kite groundgen" ed ora sta operando su un prototipo con un kite da 25 m² ed un generatore da 20 kW. Il kite è collegato a terra mediante una fune singola ed è controllato da un sistema di attuatori posizionati immediatamente sotto al kite.

NASA

In piena coincidenza con quanto sostenuto da KiteGen Research, David North, ingegnere del Team NASA, si è così espresso [6]:

"La maggior parte delle turbine a torre sono alte approssimativamente tra gli 80 ed i 100 metri, che è pateticamente basso rispetto allo strato limite della terra". Lo strato limite è dove l'attrito dalla superficie terrestre mantiene il vento relativamente lento e turbolento. Il punto debole dell'energia eolica inizia al di sotto dei 2000 piedi (circa 600 m). A quella quota, per utilizzare il vento per produrre energia elettrica, si dovrebbe costruire una torre a turbina più alta dell'Empire State Building. Oppure si può far volare un aquilone".

Il Team della NASA, presso il Langley Research Center - Virginia, sta sperimentando un progetto pi-

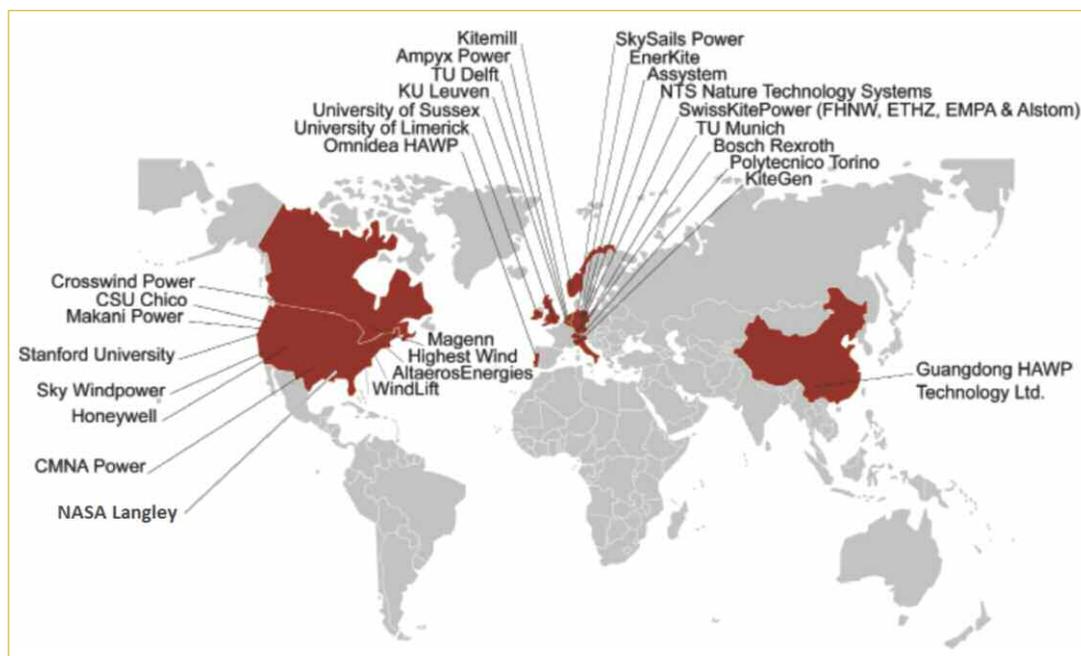


Figura 7 Scenario Globale del settore Eolico di Alta Quota (Fonte: Rielaborazione dati KiteGen da [8]).

lota nell'ambito dell'eolico d'alta quota e, ponendosi in un'ottica fuori dal business, opera a sostegno del settore nascente con un contributo focalizzato su due aspetti: controllo di volo autonomo ed aerodinamica. Attualmente nel Centro NASA è in corso una fase di validazione delle tecnologie dei brevetti KiteGen: in particolare del sistema di controllo a due cavi e di quello della telecamera quale strumento sensore di pilotaggio automatico.

L'agenzia spaziale americana ad oggi ha messo a punto un dimostratore da 10 kW sufficiente alla validazione logica e controllistica. Altri sviluppi sono proiettati per l'utilizzo in ambito spaziale: in particolare, su Marte, dove c'è molto vento [7] e l'approvvigionamento energetico tramite pannelli solari presenta inefficienze di payload e di produttività.

La figura 7 è esplicativa del numero e della localizzazione di organizzazioni pubbliche e private coinvolte nel nuovo settore.

Proiezioni economiche KiteGen FARM® - LCOE (Levelized Cost of Energy)

Se si considera l'attuale congiuntura nonché la situazione delle fonti energetiche - idrocarburi sempre più costosi ed impattanti sull'ambiente, carbone considerato tra le fonti a più alto impatto per emissioni di CO₂, industria nucleare in forte difficoltà e fonti rinnovabili ancora limitate da problematiche di sostenibilità economica e di dispaccia-

mento in rete - l'eolico d'alta quota rappresenta una grande opportunità per superare il grave combinato tra crisi energetica, ambientale ed economica.

KiteGen, sebbene sia una tecnologia "nuova", avendo ottenuto la conferma di "primogenitura" o "grant" dei primi brevetti solamente nel 2009, ha già realizzato e testato la produzione di energia mediante un prototipo in scala ridotta denominato KSU1 (ordine dei 100 kW) e sta ultimando una macchina di preserie industriale da 3 MW di tipologia "Stem" comprendente un sistema di gestione capace di orchestrare decine sino a centinaia di macchine (ciascuna delle quali richiede al più un ettaro di spazio di rispetto dedicato). Si trova, pertanto, in uno stadio di sviluppo tale da poter stimare i costi di produzione facendo alcune ipotesi sul processo di evoluzione tecnologica che, necessariamente, caratterizza ogni tecnologia nella sua fase iniziale (figura 8).

Caratteristica di grande interesse insita nel concetto groundgen è, inoltre, la possibilità di mantenere alto il livello di ottimizzazione delle ali e dei cavi, componenti fondamentali del sistema e soggetti ad un deterioramento proporzionale alla produzione.

Nuove soluzioni più efficienti potranno, infatti, essere adottate anche in installazioni esistenti, senza modifiche d'impianto, durante la manutenzione ordinaria al momento della sostituzione periodica.

Questi aspetti sono di grande importanza per l'analisi di due voci economiche, di seguito riportate, nell'ipotesi di una farm da 150 MW connessa alla rete AT con singolo punto di allaccio:

1. Costo di produzione €/MWh (metodologia IEA);
2. Levelized Cost Of Energy (LCOE) (metodologia NREL).

Il calcolo del **costo di produzione** per un generatore KiteGen Stem da 3 MW è stato effettuato secondo la metodologia IEA semplificata (nessuna spesa per combustibile, costi di ripristino a green-field pari al valore dei componenti dall'impianto recuperati alla dismissione) basato sui seguenti aspetti compatibili con la realtà italiana:

- Costo industriale di installazione Stem (3 MW) in base alle economie di scala dovute al numero cumulativo di macchine installate ed alla curva di apprendimento: da 10.000.000 € a 1.650.000 €
- Diametro a terra di ciascuna macchina: 12 m
- Potenza nominale della farm: 150 MW
- Numero macchine (KiteGen Stem) per FARM (150 MW): 50
- Ipotesi di produttività media annua versione iniziale del sistema MWh/MW: 600

- Ipotesi di produttività media annua ottimizzata MWh/MW: 3400
- Costo annuale O&M: 5% per i primi 5 anni, successivamente 4%
- Costo sostituzione parti consumabili (cavi, ali): da 2 a 1,8 €/MWh
- Costi assicurativi: 3%
- Tasso d'interesse: 6%
- Livello di tassazione: 40%
- Sito di installazione con venti medi di 8 m/s alla quota di esercizio (studio CESI Ricerca ora RSE [10]).

Di seguito esponiamo alcune considerazioni che hanno determinato la scelta dei parametri per questo scenario.

Il lavoro di ricerca e sviluppo sul concetto KiteGen è terminato e rimangono da affrontare problematiche di ottimizzazione e debugging meramente ingegneristiche che, con le risorse già disponibili sul progetto, sono pianificate con tempistiche relativamente brevi.

Allo stato dell'arte il sistema può essere suddiviso in: area dei componenti che non necessitano innovazione ma solo sviluppo, ingegnerizzazione ed economia di scala; area dei componenti che ancora necessitano di innovazione. Del primo gruppo fanno parte:

- i sensori e l'elettronica a larghissima scala di integrazione, indispensabili per l'accurato campionamento delle condizioni di volo, già sviluppati e miniaturizzati in schede leggere e adatte ad essere portate in volo, che devono essere prodotti in larga scala con conseguente guadagno in economia ed affidabilità;
- il software di gestione della macchina e di pilotaggio dell'ala, già disponibile in una prima versione che è stato testato sia in campo sul prototipo in scala ridotta fino a quote di 800 m agl, sia in scala di classe MW (Stem) o GW (Carousel) mediante simulatori fluidodinamici. Tuttavia, come tutti i software, beneficerà del costante aumento delle prestazioni di calcolo e della contestuale riduzione di prezzi che interessa da decenni il settore hardware, rendendo possibili anche a breve termine motori fluidodinamici più potenti ed algoritmi di controllo più sofisticati che possono contribuire fortemente ad ottimizzare le prestazioni di produzione energetica;
- le componenti elettriche e meccaniche, in gran parte reperibili sul mercato o da fornitori specializzati in grado di realizzarli su disegno CAD. Sostanzialmente la complessità tecnologica del KiteGen Stem dal punto di vista di queste componenti è quella tipica della robotica industriale. Le possibili ottimizzazioni comporteranno la ulteriore riduzione dei costi.

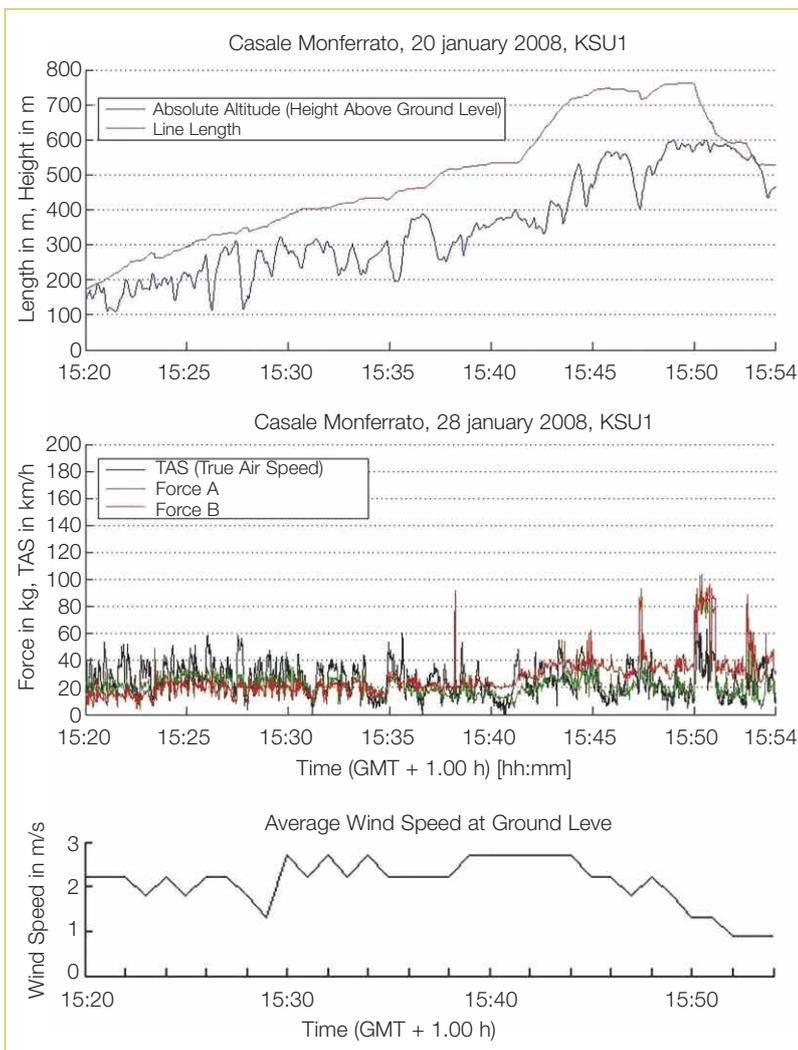


Figura 8 Risultanze da prove prototipo KSU1 (Fonte: KiteGen [9]).

Del secondo insieme delle “innovazioni” fanno parte:

- ali specifiche ad alta efficienza e basso peso, in grado di sopportare tensioni dell'ordine del centinaio di kNewton. Le possibili scelte riguardanti la geometria ed i materiali composti da utilizzare per questi componenti hanno generato una matrice decisionale molto ramificata che, per mancanza di esperienze già consolidate e disponibili sul mercato, dovrà per forza di cose essere rielaborata ed estesa più volte per ottenere prestazioni sempre più elevate;
- pulegge speciali ad alto rendimento, in grado di trasmettere agli alternatori la maggior frazione possibile di energia meccanica evitando frizioni e dispersioni inaccettabili sia dal punto di vista energetico, sia da quello del raggiungimento di alte temperature. La realizzazione di tali dispositivi consente di “accompagnare” le funi evitando lo strisciamento dovuto alla differenza di tensione tra il punto d'ingresso e di uscita della fune. Una normale puleggia dissiperebbe il 5% dell'energia, l'obiettivo del nuovo design è 1%. La massima potenza dissipabile dalle pulegge determina la potenza massima gestibile dalla macchina. Dimezzando l'attrito, a parità di dissipazione, sarà possibile gestire potenze doppie, con drastici vantaggi di produttività.

Sono state considerate, inoltre, alcune favorevoli condizioni al contorno che hanno contribuito alla scelta dei parametri di scenario, in particolare per quanto riguarda la proiezione delle spese di esercizio e manutenzione e la facilità di reperire siti con le caratteristiche anemologiche desiderate:

- sono disponibili sul mercato, ed in progressivo miglioramento, i materiali polimerici speciali (fibre di carbonio, di vetro, Dyneema® e Vectran®), che per i cavi rendono possibili resistenze maggiori dell'acciaio con pesi molto inferiori e, per le ali, performance ed affidabilità tipici delle ali ma senza vincoli di rigidità e con pesi estremamente inferiori;
- presenza di siti con velocità media del vento compatibili con la generazione elettrica dell'ordine del MW già a quote inferiori al km sono diffusissimi anche in Italia come dimostra lo studio CESI Ricerca (ora RSE) [10]. Pertanto, in siti con buone caratteristiche, anche un sistema con disponibilità media annua inferiore al 50% potrebbe lavorare agevolmente per un numero di ore equivalenti posto, come obiettivo del piano di apprendimento tecnologico, pari a 3.400.

Riteniamo dunque possibile uno scenario di apprendimento tecnologico accelerato sulla base delle seguenti considerazioni:

- un programma di apprendimento tecnologico mirato al miglioramento delle prestazioni delle ali e dei cavi può gradualmente abbattere i costi di produzione e migliorare disponibilità ed affidabilità rendendoli sempre più competitivi sui mercati elettrici anche in assenza di sussidi;
- vedendo il processo di apprendimento come paretiano, la maggior parte del miglioramento avverrebbe nei primi anni di sviluppo, pertanto il raggiungimento rapido del 50% della performance teorica massima attesa non è da considerarsi troppo ambizioso.

In **tabella 1** sono riportate le analisi dei costi del MWh in funzione dei principali driver sui quali agirà l'apprendimento tecnologico: economie di scala, aumento delle performance in termini di produttività annua (GWh/MW) e riduzione dei costi di manutenzione/ricambio dei principali componenti tecnologici dell'impianto (cavi, ali, servo driver, elettronica, software, meccanica, sensoristica). L'analisi rivela che una prima versione immatura del sistema, con un numero limitato di macchine e che voli in media solo un giorno a settimana rimanendo in manutenzione per il resto del tempo, può già sostenersi economicamente grazie a forme di incentivazione quali certificati verdi, tariffe feed-in, crediti di carbonio o scambio sul posto, sostenibilità che si evidenzia anche come produttività annuale in termini di energia primaria risparmiata, calcolata utilizzando il coefficiente termoelettrico di 1800 kcal termiche per kWh elettrico.

Una diversa visione della tematica è offerta dal calcolo del **Levelized Cost Of Energy (LCOE)** che non considera le tasse ed è stato effettuato secondo la metodologia NREL semplificata (nessuna spesa per combustibile) basato su assunti compatibili con la realtà internazionale, in cui l'operatore può selezionare le fonti di finanziamento e le aree fiscali più vantaggiose (**tabella 2**).

Tale analisi è alla base di una proposta di utilizzo dei fondi europei per la decarbonizzazione recentemente inviata alle istituzioni italiane, nella quale si suggeriva che gli attuali sussidi a realtà produttive intensamente energivore potevano essere rimpiazzati da iniziative per lo sviluppo di KiteGen Farm dedicate all'autoproduzione di energia elettrica.

L'analisi suggerisce che, nello scenario di apprendimento tecnologico già presentato nella **tabella 1**, se anziché sussidiare le produzioni energivore con lo sconto in bolletta - il che presuppone dover programmare (e difendere in sede

Tabella 1 Analisi Costo di Produzione in base ad ipotesi formulate e curva di apprendimento (metodologia IEA 1991 [11])

NUMERO INSTALLAZIONI CUMULATIVE DA 3 MW	1	2	5	20	200	2.000	20.000	200.000
Costo industriale impianto 3 MW [€]	10.000.000	7.500.000	2.857.143	1.650.000	1.650.000	1.650.000	1.650.000	1.650.000
Ore equivalenti di produzione annuale in MWh/MW [h]	600	1.000	1.400	1.800	2.200	2.600	3.000	3.400
% Tasso di interesse	6%	6%	6%	6%	6%	6%	6%	6%
Numero anni durata ammortamento	25	25	25	25	25	25	25	25
% tasse	40%	40%	40%	40%	40%	40%	40%	40%
Deprezzamento in % costo impianto	30%	40%	50%	60%	70%	80%	90%	90%
Numero anni durata deprezzamento	9	9	9	9	9	9	9	9
Fattore annualità deprezzamento in % costo impianto	15%	14%	13%	12%	11%	10%	10%	10%
Costo fisso in % costo impianto	3%	3%	3%	3%	3%	3%	3%	3%
Costo esercizio e manutenzione in % costo impianto	5%	5%	5%	5%	5%	4%	4%	4%
Costo variabile ricambi [€/MWh]	2,00	2,00	1,90	1,90	1,80	1,80	1,8	1,8
Quota annualità (rata annuale in % costo impianto)	7,82%	7,82%	7,82%	7,82%	7,82%	7,82%	7,82%	7,82%
Quota deprezzamento	0,23%	0,25%	0,26%	0,27%	0,28%	0,29%	0,30%	0,33%
Costo €/MWh	1169,10	527,13	144,78	66,07	54,30	44,11	38,46	34,14

europea) sempre nuovi sussidi alla fine di ogni periodo di incentivazione - si fossero utilizzati i fondi europei per lo sviluppo e l'ottimizzazione della tecnologia eolica d'alta quota, il costo del MWh avrebbe potuto progressivamente e definitivamente posizionarsi, senza ulteriore necessità di sussidi, a livelli ritenuti accettabili dalle grandi realtà multinazionali di produzione metallurgica energivora, valori ben inferiori a quelli di mercato e che si attestano attorno ai 25 €/MWh.

Il costo è quindi uno degli elementi che concorrono a fare di KiteGen una tecnologia di mas-

simo interesse già negli scenari energetici di breve e medio periodo. Riteniamo che le analisi qui esposte in merito alle tematiche di dispacciamento dell'energia prodotta da KiteGen evidenzino che la crescita di installazioni KiteGen presenti problematiche molto più gestibili rispetto a quanto è prevedibile in uno scenario di penetrazione di fotovoltaico ed eolico tradizionale in percentuali critiche per la gestione della rete stessa (figura 9).

Altro aspetto strategico è l'ampia diffusione in tutto il pianeta di aree solcate da venti d'alta quota con le opportune caratteristiche produttive, pre-

Tabella 2 Analisi LCOE in base ad ipotesi formulate e curva di apprendimento della tecnologia (metodologia NREL [12])

ANALISI LCOE (NREL)	1	2	5	20	200	2.000	20.000	200.000
Costo industriale impianto [€/MW]	3.300.000	2.500.000	952.381	550.000	550.000	550.000	550.000	550.000
Ore equivalenti di produzione annuale in MWh/MW [h]	600	1.000	1.400	1.800	2.200	2.600	3.000	3.400
Tasso di interesse	5%	5%	5%	5%	5%	5%	5%	5%
Anni durata ammortamento	25	25	25	25	25	25	25	25
Costo esercizio, manutenzione assicurazione in % dell'investimento	7%	7%	7%	7%	7%	7%	7%	7%
Costo variabile ricambi [€/MWh]	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00
Quota annualità (rata annuale in % dell'investimento)	7,10%	7,10%	7,10%	7,10%	7,10%	7,10%	7,10%	7,10%
LCOE €/MWh (Metodologia NREL)	777,24	354,38	97,89	45,07	37,24	31,82	27,84	24,80

senti in gran numero anche in Italia, come mostrato dal citato studio. Oltre all'ovvio vantaggio di possedere una abbondante fonte energetica domestica disponibile su quasi tutto il territorio nazionale, vi è la possibilità di utilizzare aree di scarso pregio paesaggistico e la relativa libertà di posizionare gli impianti in modo da pesare il meno possibile sui vincoli di trasferimento presenti tra le varie regioni elettriche.

KiteGen® e le politiche energetiche italiane

Riteniamo utile concludere presentando uno scenario italiano ispirato dalla *Strategia Energetica Nazionale* (SEN) adottata dal Ministero dello Sviluppo Economico [14].

Uno dei principali obiettivi della SEN è raddoppiare la produzione di energia rinnovabile rispetto al 2010 per raggiungere la roadmap europea 20-20-20. Obiettivi ambiziosi che contrastano con le ridotte disponibilità di incentivi annui previsti a regime (2,5 mld per le fonti elettriche) e delle problematiche di dispacciamento e programmabilità delle fonti rinnovabili intermittenti, che devono essere risolte con sostanziosi investimenti sulla rete.

Con riferimento alla farm da 150 MW di cui si è analizzato il costo di produzione in tabella 1, considerando un tasso di apprendimento tecnologico annuo che consenta un miglioramento delle performance tale da raggiungere le 3000 h equi-

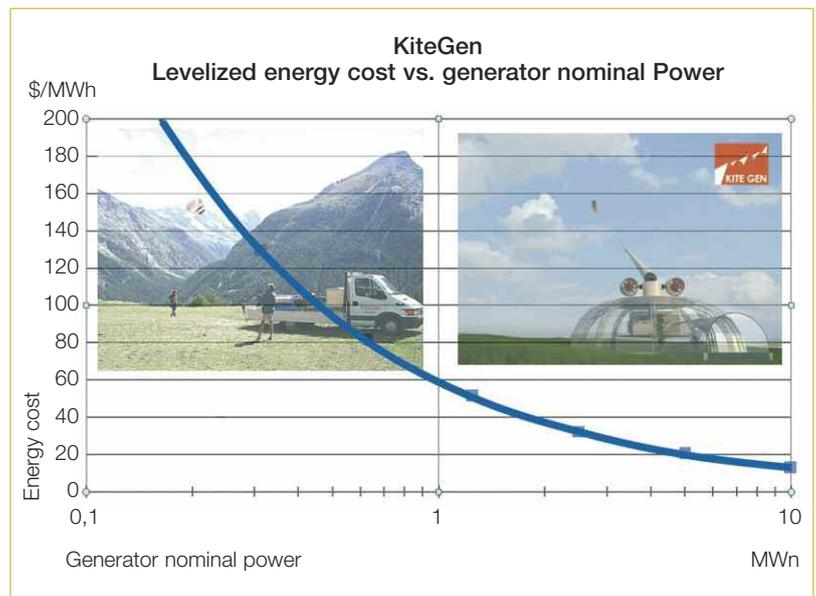


Figura 9 Costo MWh e potenza nominale del generatore (Fonte: Rielaborazione dati [13] KiteGen Research, 2013).

valenti al 2020 e ipotizzando la costruzione di nuove farm con un opportuno tasso di crescita annuo delle installazioni, al 2020 si otterrebbe una produzione di 63 TWh, con ridotta o nulla necessità di incentivi.

Data l'ampia disponibilità di siti dalle risorse eoliche adatte e la flessibilità di posizionamento delle macchine in farm (da poche decine a centinaia di esemplari), il modello di dislocazione degli impianti potrà essere ampiamente discrezionale e pilotato dalle esigenze del gestore di rete in

Tabella 3 Scenario di sviluppo della tecnologia KiteGen basato sugli obiettivi SEN di produzione elettrica da fonti rinnovabili al 2020 riferito all'Italia

SCENARIO/ANNO	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020
Numero installazioni	5	50	200	1000	2000	4000	7000
MW installati	15	150	600	3000	6000	12000	21000
Ore equivalenti di produttività MWh/MW [h]	600	1000	1400	1800	2200	2600	3000
Energia prodotta [GWh]	9	150	840	5400	13200	31200	63000
Energia primaria risparmiata (ktep)	1,63	27,11	151,81	975,93	2386	5639	11386
Costo €/MW	145	66	54	49	44	36	28

base ai vincoli di trasmissione ed alla vicinanza di utenze altamente energivore.

La scelta di uno scenario con crescita esponenziale è ispirata dal modello di rapido sviluppo delle fonti rinnovabili nei paesi in cui sono stati concessi incentivi adeguati (tabella 3). Considerando che un business plan a 20 anni, redatto per l'Italia con le assunzioni di cui a tabella 1 (senza incentivi, ipotesi di un PUN a 80 €/MWh, tasso di inflazione al 2%), riporta un IRR del 24%, paragonabile a quello ottenuto dai progetti fotovoltaici incentivati con le tariffe più generose dei passati conti energia italiani [15].

La realizzazione dello scenario, consentirebbe di superare l'obiettivo SEN dei +40 TWh di energia rinnovabile e raggiungere l'obiettivo 20-20-20 di riduzione delle emissioni di CO₂, i TWh prodotti in eccedenza rispetto all'obiettivo SEN potrebbero essere impiegati per ridurre le importazioni dall'estero decongestionando alcune linee transfrontaliere e liberando capacità di soccorso. La sostituzione con energia elettrica rinnovabile favorisce lo spostamento di quantità di gas, non più utilizzate dal settore termoelettrico, al settore dell'autotrazione, rendendo anche più sostenibili i trasporti e riducendo la necessità di petrolio importato. In termini di energia primaria, utilizzando il coefficiente termoelettrico di 1800 kcal termiche per kWh elettrico, si evidenzia un risparmio di oltre 11 milioni di tonnellate equivalenti di petrolio.

Riflessioni conclusive

L'eolico di alta quota, o troposferico, sempre più spesso viene riconosciuto e correttamente classificato. I dati sulla risorsa naturale sono indiscutibili, ci troviamo di fronte alla risorsa più nobile, abbondante e disponibile che il nostro pianeta ci ha

messo a disposizione. Nella troposfera scorre senza sosta il più grande giacimento di energia mai scoperto che, inoltre, è rinnovabile e facilmente convertibile da energia cinetica delle masse di aria in energia fruibile e commerciabile.

Se sfruttata a fondo si tratterebbe di una fonte di ricchezza endogena ed originaria, un nuovo paradigma economico a disposizione di tutto il pianeta con potenziali ricadute in grado di ripristinare la libertà di autodeterminazione, altrimenti compromessa, delle economie in crisi e delle generazioni future. Questo in ragione di un LEC prevedibilmente molto basso raggiungibile alla fine della curva di apprendimento.

Una analisi del rischio tecnologico permette di affermare che il giacimento senza dubbi esiste ed è facilmente raggiungibile da uno specifico presidio tecnologico. KiteGen ha dimostrato già dal 2006 che il presidio tecnologico è agevolmente implementabile anche a livello artigianale e con investimenti propri, necessariamente molto limitati se paragonati alla importanza dell'argomento.

KiteGen ha completato in autonomia la ricerca e la protezione della proprietà intellettuale sul concetto ed ha iniziato il processo in scala industriale, inizialmente continuando a contare su un supporto basato sulla partecipazione a bandi pubblici focalizzati su energia rinnovabile ed innovazione tecnologica. A causa della particolare situazione italiana, il totale di 78 milioni di euro di supporto, conquistati ed assegnati in una ventina di bandi specifici, non è mai stato erogato.

KiteGen ha, infine, percorso la strada di offrire la tecnologia sul mercato ottenendo dal governo del Regno Arabo-Saudita un adeguato accordo di sviluppo e dispiegamento della tecnologia, regolato da esclusive territoriali e con un serrato programma di sviluppo (vedi riquadro).

Press Release 27 Aug 2013

The KiteGen® Group has been participated in April 2013 by Sabic Ventures – the venture company owned by Saudi Arabian Basic Industries Corporation (SABIC) – and now has been awarded a first contract to power the world's largest Carbon dioxide (CO₂) Capture & Utilization (CCU) plant for Jubail United Petrochemical Company (UNITED), a manufacturing affiliate of SABIC. The plant will be located close to Jubail Industrial City, Saudi Arabia.

KiteGen® technology is the latest evolution of wind energy exploitation. It is a paradigm shift that may be the most practical and effective solution to the world's energy needs. The Kitegen technology is based on a decade of research and development; it has presently reached the stage at which it will be implemented on an industrial scale. The main innovation is given by the fact that KiteGen® can exploit a novel, powerful, endless and almost universally available source of energy: the high altitude wind power. Large wings tethered by strong polymeric ropes, driven by a high-tech control system based on avionic sensors, fly at high altitude, harvesting the energy of powerful winds, much faster and constant than those available near ground.

The Kingdom's plant will be designed to compress and purify around 1,500 t per day of raw carbon dioxide coming from two nearby ethylene glycol plants. The purified gaseous CO₂ will be pipelined through the piping corridor of the Royal Commission of Jubail to SABIC-affiliated companies, including KiteGen, for enhanced methanol and urea production. Methanol is a basic commodity for the chemical industry and urea is used for fertilizer production. Massive quantities of renewable electrical energy at very low cost is needed to drive effectively those processes.

In summary, an estimated 500,000 t of CO₂ emissions, equivalent to the removal of 2,6 millions of cars, will be saved each year, representing the worldwide most advanced, reproducible and promising method to reverse the most harmful forcing over the global climate.

KiteGen® will be responsible for the concept and basic engineering, front end engineering design (FEED) and detailed engineering, procurement, construction (EPC) and future maintenance of the power facility to be completed on a fast-track schedule. Generators machines mass production are set to be achieved in 2015 and the pilot installations in 2016.

The plant is the first carbon capture and utilization (CCU) project of this size to be realized in Saudi Arabia. The reduction of CO₂ emissions is an important aim in SABIC's sustainability strategy and the KiteGen® main mission.

This project will be the renewable energy cornerstone of a Saudi 66 billion \$ program aiming to power the region water desalination, the Saudi approach is to check the suitable RES technologies and KiteGen® is in pole position thanks the unprecedented net energy ratio of the fully owned exclusive concept outperforming, at least, tenfold any other renewable energy technology.

bibliografia

[1] Rivista Nature Climate Change, Settembre 2012. <http://www.nature.com/nclimate/journal/vaop/ncurrent/full/nclimate1683.html>

[2] Archer C.L., Caldeira K.: *Global Assessment of High-Altitude Wind Power*. Energies, Vol. 2, n 2, 2009, p. 307-319: <http://www.mdpi.com/1996-1073/2/2/307>

[3] Si tratta di una elaborazione dell'autore di dati fluidodinamici di simulazione applicati ad un profilo pala Vestas V120 ed un modello di ala KiteGen.

Dati pubblicati su low tech magazine <http://www.lowtechmagazine.com/2009/04/small-windmills-test-results.html> relativi ai progetti Alpha Ventus (http://en.wikipedia.org/wiki/Alpha_Ventus_-_Offshore_Wind_Farm), Beatrice (http://en.wikipedia.org/wiki/Beatrice_Wind_Farm) e London Array (http://en.wikipedia.org/wiki/London_Array), rielaborati dall'autore con il tool RETScreen <http://en.wikipedia.org/wiki/RETScreen>

[4] Coiante D.: *Energie rinnovabili. Salvare l'ambiente accumulando energia*. www.imille.org. 2012. <http://www.imille.org/2012/06/energie-rinnovabili-salvare-lambiente-accumulando-energia/>

salvare-lambiente-accumulando-energia/

[5] Cfr. il recente bando di gara emesso da Terna (<http://appalti.dgmarket.com/tenders/np-noticce.do?noticeld=10097061>).

[6] Silberg R.: *Electricity in the air*. Pphys.org, Jul 03, 2012. <http://phys.org/news/2012-07-electricity-air.html>

[7] <http://www.lpi.usra.edu/publications/slidesets/winds/>

[8] Schmehl R.: *Kiting from wind power*. Wind Systems, July 2012, p. 36-43. http://windssystemsmag.com/media/pdfs/Articles/2012_July/0712_Kite_e.pdf

[9] http://www.inrim.it/events/lib/Maneia_2009.pdf

[10] Casale C., Viani S., Marcacci P.: *Valutazione sistemi "kite wind generator"*. CESI Ricerca, prot. n° 08005694, Febbraio 2009. <http://kitegen.com/pdf/P%2021%202012%2020CESI%20RICERCA%20Valutazioni%20sui%20sistemi%20Kite%20Wind%20Generator%20-%202009.pdf>

[11] IEA 1991: *Guidelines for the economic analysis of Renewable Energy Applications*. OECD/IEA, Paris.

[12] *National Renewable Energy Laboratory, US department of Energy*. LCOE Analysis. http://www.nrel.gov/analysis/tech_lcoe_documentation.html

[13] Si tratta di una elaborazione dell'autore di proiezioni di costo dell'energia riportate dalle seguenti fonti: Kitegen (<http://kitegen.com>), Laddermill (<http://en.wikipedia.org/wiki/Laddermill>), NASA AWE Project (http://climate.nasa.gov/energy_innovations/727) e USAF AWE assessment (http://www.afit.edu/EN/docs/ANT/11%20Theses/Thesis-Cahoon.pdf?PA=88ABW-2011-1636_14Jan13)

[14] *Strategia Energetica Nazionale*: http://www.sviluppoeconomico.gov.it/images/stories/documenti/20121016SEN-Documen-to_di_consultazione.pdf

[15] Cfr. *Risultanze Incentivi Fotovoltaico*: http://www.gse.it/it/Conto%20Energia/GSE_Documenti/Fotovoltaico/05%20Risultati%20incentivazione/Grafici_della_numerosit%C3%A0_e_della_potenza_totale_cumulata.pdf