

# METODOLOGIE INNOVATIVE PER IL SUPPORTO ALLA PROGETTAZIONE E ALL'ANALISI DELLE PRESTAZIONI DI IMPIANTI AD ENERGIA SOLARE A CONCENTRAZIONE ED EOLICI OFF-SHORE UTILIZZANDO IMMAGINI SATELLITARI OTTICHE E SAR

## *INNOVATIVE METHODOLOGIES TO SUPPORT THE DESIGN AND PERFORMANCE ANALYSIS OF CONCENTRATED SOLAR POWER PLANTS AND OFF-SHORE WIND POWER PLANTS USING OPTICAL AND SAR SATELLITE IMAGERY*

**Marco Morelli\*, Andrea Masini\*\*, Marco Alberto Carlo Potenza\***

### **Riassunto**

In questo lavoro presentiamo delle nuove metodologie, sviluppate nell'ambito del progetto SATE-  
NERG (Servizi sATEllitari per le ENergie Rinnovabili di nuova Generazione) finanziato dall'Agenzia  
Spaziale Italiana, sia per il supporto alla progettazione/pianificazione che per il monitoraggio  
quasi in tempo reale e l'analisi delle prestazioni degli impianti ad energia rinnovabile di nuova  
generazione (CSP, CPV ed eolici *off-shore*) utilizzando immagini satellitari.

In particolare per quanto riguarda gli impianti solari a concentrazione (CSP e CPV), abbiamo  
sviluppato un metodo per ricavare l'irradianza solare incidente al suolo (in particolare la sua  
componente diretta normale rispetto ai raggi solari, fondamentale per questo tipo di impianti) da  
immagini ottiche satellitari. Ciò, unito ad un modello di funzionamento di tali impianti e degli  
inverter, ci ha resi in grado di poter sviluppare un servizio di supporto nella progettazione e piani-  
ficazione di nuove costruzioni di impianti CSP e CPV (analizzando serie storiche di dati satellitari)  
ed anche un servizio di monitoraggio e analisi delle prestazioni per quelli già esistenti (usando  
invece immagini satellitari quasi in tempo reale).

In maniera simile, usando immagini SAR (*Synthetic Aperture Radar*), abbiamo sviluppato un me-  
todo per ricavare l'intensità e la direzione del vento in aree marine da remoto che ci ha permesso,  
utilizzando anche un modello di impianto eolico *off-shore* (turbina e *inverter*), di sviluppare sia  
un servizio di supporto alla progettazione/pianificazione che un servizio di monitoraggio quasi  
in tempo reale della produzione di un impianto eolico *off-shore*.

Le prime applicazioni di queste nuove metodologie hanno già portato ad avere ottimi risultati in  
vari casi di prova sia per quanto concerne il monitoraggio dell'irradianza diretta su piano normale,  
in cui l'irradianza misurata e quella ricavata da dato satellitare non si sono discostate più del 10%,

---

\* Dipartimento di Fisica, Università degli Studi di Milano, Via Celoria 16, 20133 – Milano (Italia); marco.mo-  
relli1@unimi.it

\*\* Flyby S.r.l., Via Puini 97, 57128 – Livorno (Italia)

sia per quanto riguarda il calcolo dell'intensità e direzione del vento da immagini SAR, in cui l'errore rispetto al dato misurato è rimasto al di sotto del 15%, fornendo quindi una buona base per il monitoraggio della energia AC prodotta dagli impianti.

**Parole chiave:** energie rinnovabili; monitoraggio da remoto; CSP; CPV; eolico *off-shore*; immagini satellitari ottiche; immagini satellitari SAR; Meteosat Second Generation; Cosmo-Skymed

### **Abstract**

*In this work we present new methodologies aimed to support both planning and near-real-time monitoring of new generation solar and wind energy plants (CSP, CPV and wind off-shore) using satellite imagery. Such methodologies are currently being developed in the scope of SATENERG, a project funded by ASI (Italian Space Agency).*

*In particular, for what concerns the concentrating solar energy plants (CSP and CPV) we developed a method to calculate solar irradiance at ground (and its direct normal component, that has primary importance in this type of plants) starting from satellite optical images. Then, using also detailed opto-electronic models of the plants and inverters, we are able to calculate the producible energy, which can be used to support either the design of potential plants (using historical series of satellite images) or the monitoring and performance analysis of existing plants (using near-real-time satellite imagery). Producible energy and other interesting parameters, like production efficiency, return on investment etc., are delivered through dedicated web services.*

*In a similar way, we developed also a method to calculate the intensity and the direction of off-shore wind from satellite SAR (Synthetic Aperture Radar) images that permitted us, together with detailed models of wind turbine and inverters, to develop a new service in support to both planning and near-real-time monitoring activities of off-shore wind plants.*

*The first applications of these methods gave successful results in several test cases: we obtained a maximum error of 10% for satellite retrieved direct normal solar irradiance and a maximum error of 15% for wind direction and intensity calculated from SAR images (with respect to in-situ measured data).*

**Keywords:** renewable energies; remote monitoring; CSP; CPV; wind off-shore; optical satellite imagery; SAR satellite imagery; Meteosat Second Generation; Cosmo-Skymed

## **I. Introduzione**

### **I.1 Contesto**

L'incremento del consumo di energia, previsto per i prossimi anni è superiore al tasso di crescita delle fonti energetiche derivanti dai combustibili fossili (carbone, gas e petrolio), che rappresentano oggi all'incirca, l'80% dell'energia prodotta globalmente. Il problema di garantire un'abbondanza di disponibilità di fonti energetiche il cui uso abbia, al contempo, un impatto limitato sul sistema ambientale è una delle grandi sfide per prossimi decenni.

Un modo concreto per affrontare il problema energetico, che è stato adottato dall'Italia e da altri paesi, è quello di favorire, anche tramite l'introduzione di un'apposita legislazione, un uso sempre maggiore di energie rinnovabili. Le potenzialità dell'energia solare ed eolica, pur essendo note da anni, iniziano ad essere sfruttate solo oggi. Data la variabilità non facilmente prevedibile che caratterizza queste due fonti energetiche, l'installazione di nuovi impianti richiede un'attenta analisi in termini di pianificazione e operatività. Strumenti capaci di fornire un'accurata stima delle risorse sono quindi fortemente richiesti dagli investitori che hanno la necessità di pianificare il rientro degli investimenti necessari a finanziare la costruzione di nuovi impianti energetici. Prima di giungere ad un uso fattuale

dell'energia solare e di quella eolica, è fondamentale, quindi, valutare la loro disponibilità tramite il monitoraggio dei parametri ambientali significativi. Può accadere, però, come nel caso di impianti eolici *off-shore*, che le tecniche standard per il monitoraggio dei dati ambientali, basate sull'uso di sensori in situ, siano particolarmente onerose.

Una significativa riduzione dei costi può, allora, essere ottenuta impiegando metodi di monitoraggio che usano tecniche di misura satellitare per valutare la quantità di energia producibile in una certa località. Inoltre sin dall'inizio dell'attività produttiva dell'impianto energetico, è necessario uno strumento che consenta di monitorare e gestire in modo ottimale la produttività dell'impianto così da aumentarne l'efficienza e da garantire una riduzione dei costi operativi. Un metodo efficace ed economicamente sostenibile per questo scopo, è il controllo dell'impianto tramite il confronto tra la potenza prodotta e quella prevista da opportuni metodi di simulazione, che usano dati satellitari per la stima dei parametri ambientali coinvolti nella produzione.

## 1.2 Il progetto SATENERG

SATENERG è un progetto finanziato dall'Agenzia Spaziale Italiana (ASI) nell'ambito del 2° Bando Tematico P.M.I. "Osservazione della Terra" dedicato all'utilizzo di dati satellitari per servizi nell'ambito delle energie rinnovabili. I partner del progetto sono l'azienda Flyby S.r.l. di Livorno (*Prime Contractor*) e l'azienda PXL di Roma.

Al fine di orientare, il più possibile, lo sviluppo dei servizi verso le effettive richieste del mercato, è stato coinvolto come utente di riferimento del progetto ENEL Green Power S.p.a (ENEL GP), che ha formalmente espresso il suo interesse per le attività di SATENERG.

Il progetto mira a sviluppare servizi di pianificazione e monitoraggio della produzione energetica da fonti rinnovabili sfruttando dati satellitari EO (*Earth Observation*) e tecniche di modellizzazione. Gli impianti oggetto di tali servizi sono gli impianti eolici *off-shore*, solari termodinamici (CSP) e fotovoltaici a concentrazione (CPV).

Per offrire questo tipo di servizi si propone di stimare due principali entità fisiche:

- l'intensità e della direzione del vento in mare aperto;
- l'irradianza solare a terra.

La stima del vento è di fondamentale importanza per assistere la progettazione e il monitoraggio di impianti eolici *off-shore*. Il progetto SATENERG ha l'obiettivo di analizzare e sviluppare le metodologie satellitari per la stima dei venti, in particolare si pianifica di sviluppare una nuova metodologia per la stima dei venti in banda X (permettendo l'utilizzo dei dati COSMO/SKYMED per questa finalità) e di investigare altre possibilità come l'uso di scatterometri e SAR in banda C.

Per quanto riguarda invece la stima della quantità di energia solare che giunge a terra, essa è fondamentale per assistere l'industria energetica nella progettazione e nel monitoraggio di impianti solari termodinamici e di impianti fotovoltaici a concentrazione. Il progetto prevede di utilizzare i dati del satellite MSG (SEVIRI) e contemplare i sensori MIOSAT e PRISMA per un futuro utilizzo con questa applicazione.

I servizi di assistenza nella produzione energetica da fonti rinnovabili che saranno sviluppati all'interno del progetto SATENERG consistono in due aspetti:

- supporto alla progettazione dell'impianto;
- supporto per la gestione dell'impianto.

## 2. Stima del vento e dell'irradianza solare dai satellite di osservazione della Terra

### 2.1 Stima del vento in ambiente marino

L'estrazione di informazioni ambientali da immagini SAR oceaniche è stata un'area di ricerca per molti anni, e molteplici approcci sono stati sviluppati per caratterizzare una vasta serie di parametri:

- onde;
- venti;
- correnti.

Nel progetto SATENERG l'attenzione si concentra maggiormente sull'uso di immagini SAR per la stima di vettori di vento in acque marine, costiere e non. Quasi tutte le metodologie di estrazione di informazioni oceaniche da immagini SAR si basano sulla teoria di *scattering* dell'oceano (*scattering* Bragg). Questa teoria, presuppone che le variazioni della luminosità (o intensità) delle immagini SAR siano proporzionali all'ampiezza delle onde superficiali oceaniche. Secondo questa teoria le onde che scatterano maggiormente hanno un numero d'onda  $K_b$  tale che:

$$K_b = 2K_{em} \sin(\vartheta) \quad [1]$$

dove  $K_{em}$  è il numero d'onda della radiazione elettromagnetica incidente e  $\vartheta$  l'angolo con cui incide. Ciò significa che si avrà maggiore evidenza dello *scattering* da onde di piccola scala.

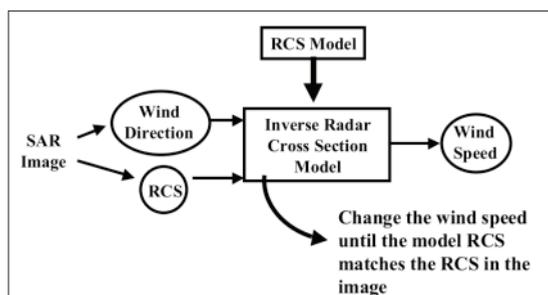


Fig. 1 – Schema dell'algoritmo per la stima del vento da immagini SAR

Fonte: Stoffelen, 1997.

Considerando che il responsabile delle onde di piccola scala è proprio il vento locale, è da queste considerazioni che derivano i vari approcci, presentati in letteratura, per stimarlo. Questo fatto, infatti implica, che la RCS (*Radar Cross Section*) dell'immagine SAR possa essere collegata alla velocità e alla direzione del vento locale. L'approccio generale per la stima del vento è illustrato nella Figura 1. Alla base di tutto viene utilizzato un modello che metta in relazione la RCS con la velocità e la direzione del vento (Nirchio, 2010). La procedura generale è quella di stimare inizialmente la direzione del vento e successivamente trovare la velocità del vento che riproduce la RCS osservata. Ciò che differenzia i diversi approcci sono il modello di RCS utilizzati e il modo con cui viene stimata la direzione del vento.

Per la Missione ESA ERS-1/2 (sensori SAR in banda C che operano in polarizzazione VV) alcuni modelli di RCS sono stati presentati e validati. Per la missione canadese RADARSAT-1 (sensore SAR in banda C che opera in polarizzazione HH), in letteratura sono stati presentati due diversi approcci. Il primo è quello di modificare empiricamente i modelli VV per adattarli alla polarizzazione HH. Il secondo approccio è quello di analizzare nuovi modelli direttamente per la polarizzazione HH.

Per la missione ENVISAT (sensore SAR in banda C) sono due i modelli, derivanti dagli approcci seguiti per la missione ERS 1/2, che hanno portato ai migliori risultati:

- CMOD4 sviluppato dall'Agenzia Spaziale Europea;
- CMOD\_IFR2.

Vari approcci sono stati sviluppati anche per stimare la direzione del vento. Una classe di metodologie sfrutta l'immagine SAR anche per stimare questo parametro osservando che ci sono caratteristiche nelle immagini che tendono ad essere allineate con il vento locale. Il vantaggio di questa classe di approcci è stimare il vettore di vento dal solo dato SAR senza riferimento ad altre sorgenti. Lo svantaggio è che la direzione del vento risultante ha ambiguità di  $180^\circ$  e che le caratteristiche che vengono utilizzate non sempre sono presenti nell'immagine SAR.

La seconda classe di approcci utilizza contemporaneamente altri satelliti (ad esempio scatterometri) o fa uso di modelli atmosferici da cui derivare questo parametro. La recente possibilità di poter usufruire di nuove costellazioni in banda X (COSMO/SKYMED, TerraSARX) sta focalizzando l'interesse del mondo accademico verso lo sviluppo di metodologie (XMOD) per la stima di parametri utilizzando queste nuove sorgenti di dati.

Se per l'utilizzo di dati della missione TerraSAR-X in letteratura è possibile trovare alcuni risultati, sono molto poche ad oggi le metodologie che sfruttino la costellazione Cosmo/SkyMed e la definizione di nuove metodologie per la stima del vento utilizzando questa costellazione garantirebbe lo sfruttamento di nuovi dati per applicazioni facilmente sfruttabili commercialmente.

## 2.2 Stima dell'irradianza solare al suolo

Lo sfruttamento dei dati di osservazione della Terra per la stima della radiazione solare che giunge al suolo è stata oggetto di molte ricerche che hanno portato alla definizione della metodologia denominata Heliosat. La tecnica Heliosat per l'analisi di immagini satellitari fu introdotta per la prima volta da Cano (Cano, 1986) e nel corso degli anni è stata più volte validata ed oggetto di studi migliorativi (Rigollier, 2000) che hanno introdotto nuove metodologie per calcolare l'indice di nuvolosità, di cielo sereno e l'irradianza globale orizzontale nel caso di cielo sereno. Tale tecnica è pertanto ad oggi una metodologia standard e affidabile.

Heliosat è uno dei metodi più usati per ottenere da dati ambientali rilevati con tecniche di misura satellitare, l'irradianza globale orizzontale sulla superficie terrestre. I suoi aspetti chiave sono:

- la conversione dell'immagine satellitare in una matrice di "indici di nuvolosità";
- la conversione dell'indice di nuvolosità in "indice di cielo sereno";
- il modello per il calcolo dell'irradianza globale orizzontale in condizioni di cielo sereno.

L'indice di nuvolosità rappresenta una sorta di attenuazione della radiazione dovuta all'atmosfera. Per il suo calcolo è anche necessario una serie temporale di immagini satellitari, insieme con la corrispondente informazione (*Cloud Mask*) sulla presenza o meno di nuvole al momento della rilevazione della radiazione da parte dei pixel del sensore. L'indice di nuvolosità è quindi collegato, da una rela-

zione lineare, all'indice di cielo sereno che rappresenta il rapporto tra l'irradianza globale orizzontale (la grandezza che si vuole calcolare) e l'irradianza globale orizzontale in condizioni di cielo sereno. Stimando quest'ultima per mezzo di un modello di atmosfera priva di nubi (Rigollier, 2000), si può infine ricavare l'irradianza globale orizzontale.

Questo metodo è applicato a immagini acquisite da satelliti meteorologici geostazionari, quali Meteosat (EUMETSAT), GOES (NASA) e GMS (NASDA). La metodologia appena descritta potrà essere adattata ai dati che verranno raccolti dal sistema PRISMA, che avrà anche un sensore iperspettrale che rileverà la radiazione nell'intervallo  $0.4-2.5 \mu\text{m}$ , avrà una risoluzione spaziale di 20-30 metri e annovererà tra i prodotti di livello 1 la *Cloud Mask*. Si potrà valutare l'applicazione di questa metodologia anche ai dati raccolti con il sensore MIOSAT.

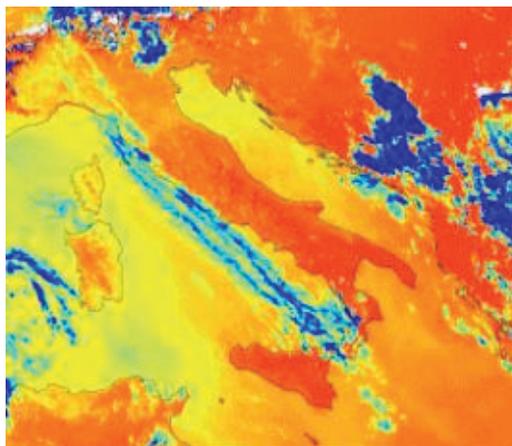


Fig. 2 – Mappa di irradiazione solare ricavata usando il modello Heliosat ed immagini del satellite MSG  
Fonte: elaborazione dati MSG effettuata da Flyby, 2013.

### 3. La modellizzazione degli impianti

Partendo dai parametri ambientali stimabili sfruttando i dati satellitari è possibile, utilizzando opportuni modelli che descrivono il comportamento degli impianti, calcolare la potenza producibile dall'impianto e confrontarla con quella effettivamente prodotta ai fini di un monitoraggio delle prestazioni.

#### 3.1 Gli impianti eolici *off-shore*

Il modello di impianto eolico *off-shore* che sarà considerato include due elementi:

- il campo di vento;
- le turbine eoliche.

La turbina eolica è un trasformatore di energia con, in ingresso, l'energia eolica e, in uscita, la potenza prodotta. Quando il vento attraversa le pale della turbina parte della sua energia cinetica è trasferita al rotore. La frazione di potenza che è estratta dalla potenza eolica (stimabile dalla velocità del vento, dalla densità dell'aria e dal raggio delle pale della turbine) può essere calcolata tramite un coefficiente che dipende, esso stesso, dalla velocità del vento e dall'angolo di beccheggio della pala eolica.

### 3.2 Gli impianti CSP

Gli impianti solari termodinamici sfruttano la radiazione solare diretta su superficie normale per produrre energia. La conoscenza di questa quantità è essenziale, sia nella fase di pianificazione, per valutare la fattibilità finanziaria di un nuovo impianto produttivo, che nella fase operativa, per un'accurata analisi delle prestazioni del sistema.

I principali dati necessari per la modellizzazione di un campo solare sono:

- la temperatura e la portata del fluido termovettore;
- l'irradianza solare diretta su superficie normale;
- la temperatura ambiente;
- la velocità del vento.

In uscita dal campo solare, il modello, tramite l'analisi del bilancio energetico tra la potenza assorbita dal fluido termovettore e quella ceduta all'ambiente circostante, fornirà i seguenti risultati:

- la temperatura del fluido termovettore;
- la potenza assorbita;
- la potenza ceduta all'ambiente;
- l'efficienza istantanea del campo.

Altri aspetti significativi della modellizzazione del campo solare riguardano:

- l'ottica degli specchi (caratteristiche quali la forma e le proprietà riflettenti);
- la pellicola sulla superficie del tubo ricevitore).

### 3.3 Gli impianti CPV

I sistemi fotovoltaici a concentrazione sono generalmente costituiti da:

- un sistema ottico di specchi riflettenti o di lenti refrattive che concentrano la radiazione solare sui moduli fotovoltaici;
- un sistema di inseguimento del sole.

I sistemi fotovoltaici concentrati sono usualmente classificati in sistemi a bassa, media e alta concentrazione, a secondo del rapporto tra l'area della superficie effettiva su cui incide la radiazione solare e l'area della superficie dei moduli su cui la radiazione viene concentrata.

I sistemi fotovoltaici a bassa concentrazione sono i più diffusi.

Come nel caso dei sistemi CSP, l'unica componente della radiazione solare che può essere concentrata è quella diretta su superficie normale, la cui conoscenza è fondamentale sia al momento di pianificare l'installazione di un nuovo impianto, per valutarne la fattibilità finanziaria, sia durante la fase operativa dell'impianto, per analizzarne accuratamente le prestazioni.

Gli altri due aspetti significativi della modellizzazione degli impianti CPV sono:

- la geometria degli specchi riflettenti;
- i moduli fotovoltaici.

I moduli, essendo quelli utilizzati nei sistemi fotovoltaici tradizionali, possono essere modellizzati tramite delle tecniche ben collaudate. Una di queste prevede la rappresentazione del modulo fotovol-

taico tramite un circuito equivalente costituito da un generatore di corrente (fotovoltaica), collegato in serie con una resistenza e in parallelo con un diodo ed un'altra resistenza.

## 4. Risultati

Le prime applicazioni di questi metodi hanno già portato ad avere ottimi risultati in vari casi di test sia per quanto concerne il monitoraggio dell'irradianza diretta su piano normale, in cui l'irradianza misurata e quella ricavata da dato satellitare non si sono discostate più del 10%, sia per quanto riguarda il calcolo dell'intensità e direzione del vento da immagini SAR, in cui l'errore rispetto al dato misurato è rimasto al di sotto del 15%, fornendo quindi una buona base per il monitoraggio della energia AC prodotta dagli impianti e per i servizi web.

### 4.1 Impianti eolici *off-shore*

Il confronto dell'intensità di vento stimata dall'XMOD e i valori di riferimento è stato effettuato su un data set costituito dalle stesse immagini utilizzate per il calcolo dei parametri del modello usato in (Nirchio, 2010), validando i risultati con l'integrazione di immagini acquisite sul Mar Mediterraneo per le quali fossero disponibili i dati QuikSCAT e quelli di ECMWF.

Per ognuno dei 3 satelliti della Costellazione Cosmo-SkyMed allora in orbita, si è verificata l'accuratezza dell'intensità di vento stimata. Per CSKS1 (1° satellite della Costellazione) si è misurata una RMS di circa 1.55 m/s con una deviazione standard di 1.26 m/s (Figura 3a). Per CSKS2, RMS≈1 m/s con deviazione standard pari a 1.2 m/s (Figura 3b). Infine per CSKS3 i risultati non sono dei migliori in quanto solo il 57% delle misure disponibili ha una RMS con QuikSCAT compresa tra 1 e 2 m/s (Figura 3c), forse giustificato dal fatto che tali misure si discostano evidentemente da quelle degli altri due sensori, rendendo il terzo sensore indipendente dagli altri due, dal punto di vista delle misure, come si evince dalla Figura 4.

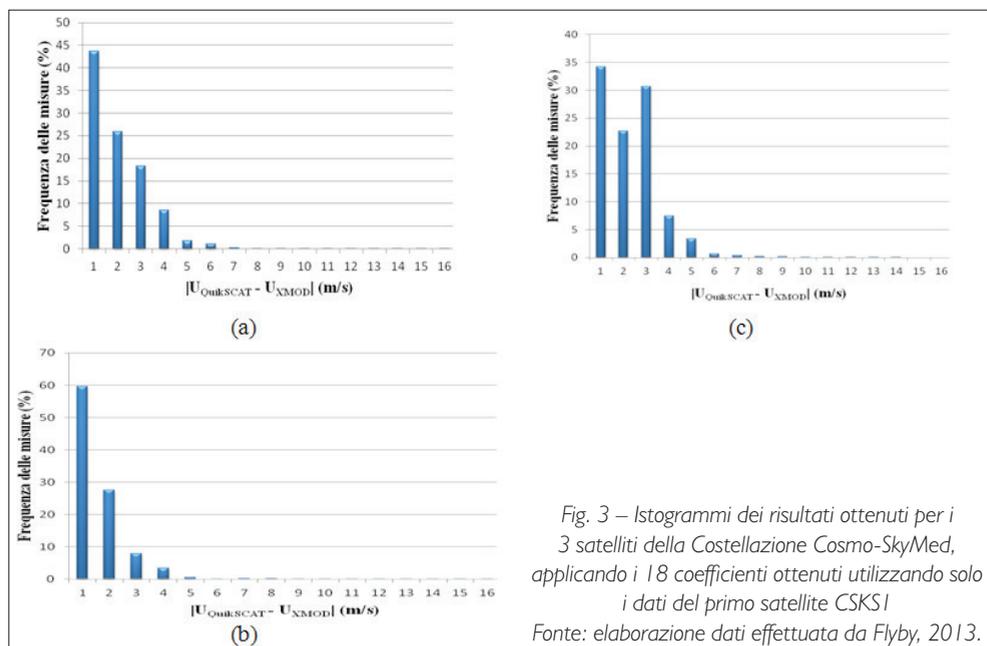


Fig. 3 – Istogrammi dei risultati ottenuti per i 3 satelliti della Costellazione Cosmo-SkyMed, applicando i 18 coefficienti ottenuti utilizzando solo i dati del primo satellite CSKS1  
Fonte: elaborazione dati effettuata da Flyby, 2013.

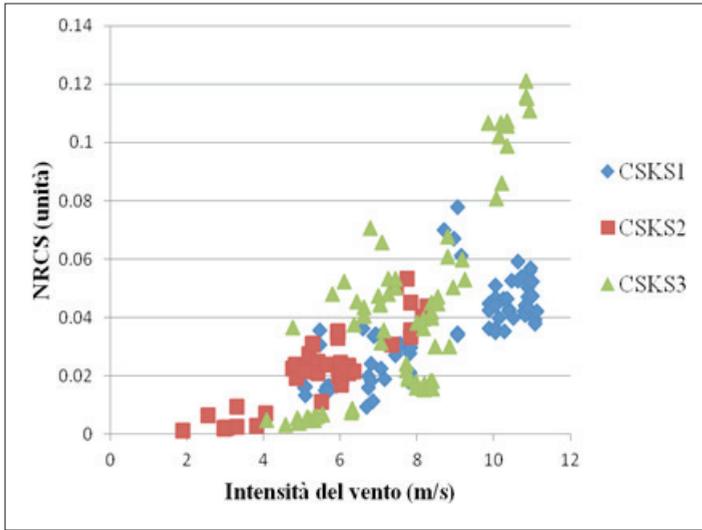


Fig. 4 – Distribuzione della  $\sigma_0 \sigma_0$  in funzione dell'intensità del vento fissato l'angolo d'incidenza tra  $30^\circ$  e  $35^\circ$  per tutti e 3 i sensori della Costellazione Cosmo-SkyMed.

Fonte: elaborazione dati effettuata da Flyby, 2013.

Analizzando i risultati ottenuti si può affermare che l'implementazione dell'XMOD possa considerarsi abbastanza soddisfacente. Tali misure forniscono un ottimo punto di riferimento per le previsioni meteorologiche, la navigazione, le variazioni climatiche, le previsioni di disastri naturali e/o pericoli ambientali, per il monitoraggio del vento in prossimità di impianti eolici offshore, etc. a livello mondiale. Esso rappresenta un modello preliminare per la stima del vento sul mare da dati SAR in banda X: un aspetto che richiederà ulteriori approfondimenti è quello che riguarda il *range* dei dati usati nello sviluppo del modello che, nella presente sperimentazione, copre venti d'intensità compresa tra i 2 e gli 8 m/s. In futuro sarà necessario estendere questo *range* a venti che raggiungano i 25 m/s. In secondo luogo si vorrebbe anche comprendere le motivazioni per cui c'è un miglior accordo tra i risultati ottenuti confrontando CSKS1 e CSKS2 con QuikSCAT, rispetto a quelli ottenuti tra CSKS3 e QuikSCAT.

Come già accennato precedentemente, una miglioria apportabile all'XMOD [RD I] è stata realizzata con l'implementazione dell'XMOD2 (sviluppato precedentemente al progetto SATENERG e in attesa di essere pubblicato). Similmente a ciò che è stato fatto in banda C con il CMOD4, anche in banda X si è pensato di separare l'intensità del vento in due *range* e di determinare due diversi set di coefficienti, uno per i venti bassi e l'altro per i venti alti. È stato quindi necessario acquisire nuovi dati Cosmo-SkyMed in zone in cui è nota una ventosità alta (al largo dell'Islanda, del Regno Unito, dell'Alaska e del Canada nell'Oceano Atlantico). Il confronto tra i dati calcolati con l'XMOD2 e i dati di verità a terra (QuikSCAT, NCEP, etc.) ha fornito una RMS pari a 0.8 m/s per i venti di bassa intensità (Figura 5a) e uguale a circa 2 m/s per i venti alti (Figura 5b).

Nella Figura 6 è possibile visualizzare direttamente il confronto tra i dati di vento XMOD2 e quelli di riferimento (QuikSCAT ed NCEP) sia per i venti di bassa intensità che per quelli ad elevata intensità.

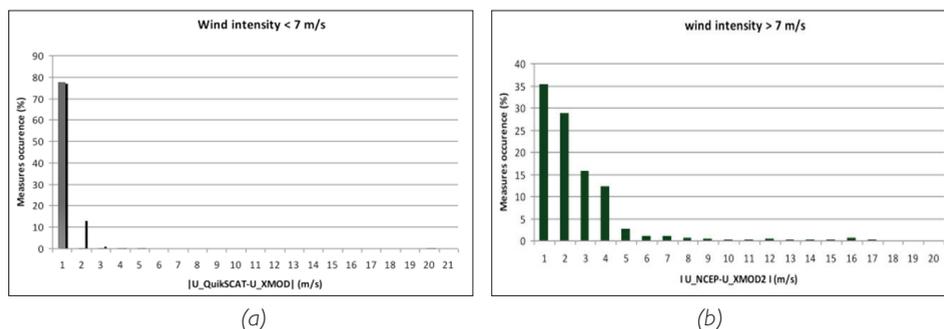


Fig. 5 – Istogrammi dei risultati ottenuti per il primo satellite della Costellazione Cosmo-SkyMed CSKS1 con XMOD2, rispettivamente per venti bassi (a) e per venti alti (b)  
 Fonte: elaborazione dati effettuata da Flyby, 2013.

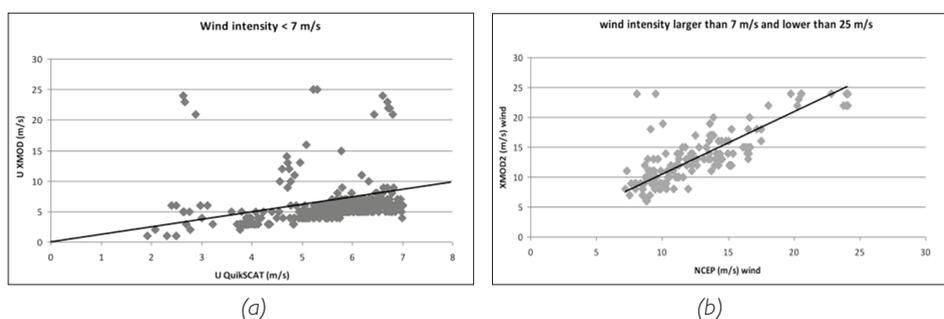


Fig. 6 – Scatter Plot dei risultati ottenuti con XMOD2, rispettivamente per venti bassi (a) e per venti alti (b)  
 Fonte: elaborazione dati effettuata da Flyby, 2013.

A differenza dei risultati ottenuti con l'XMOD, anche le misure relative ai sensori CSKS2 (Figura 7a – 7b) e CSKS3 (Figura 8a – 8b), hanno prodotto un buon accordo in termini di intensità di vento se confrontate coi dati di vento di riferimento. Si potrebbe pensare di migliorare ulteriormente l'XMOD2 cercando di ottenere un set di dati più completo soprattutto nei *range* in cui il data set precedente era carente.

La validazione dell'algoritmo per la stima del vento in banda C (Stoffelen, 1997), ovvero il CMOD4, ha invece prodotto un'accuratezza pari a  $\pm 1.2$  m/s in mare aperto con una deviazione standard di circa 0.5-1 m/s.

A partire dalla stima del vento effettuata è poi possibile calcolare la potenza AC prodotta da un impianto eolico *off-shore* localizzato in tale sito usando una modellizzazione matematica delle prestazioni di una o più turbine eoliche e degli inverter collegati (Powell, 1981).

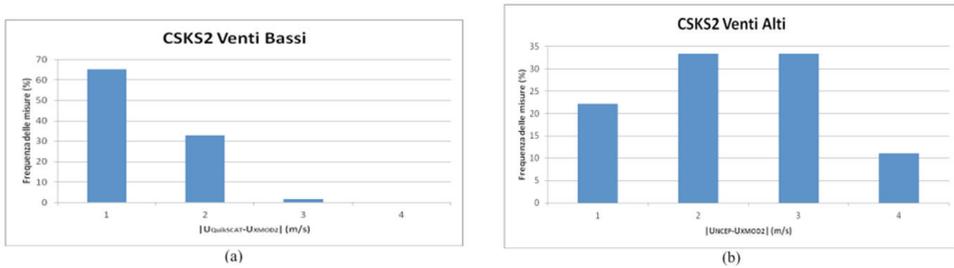


Fig. 7 – Istogrammi dei risultati ottenuti per CSK2 con XMOD2, rispettivamente per venti bassi (a) con una RMS pari a 0.7 m/s e per venti alti (b) con RMS uguale a 1.7 m/s  
Fonte: elaborazione effettuata da Flyby, 2013.

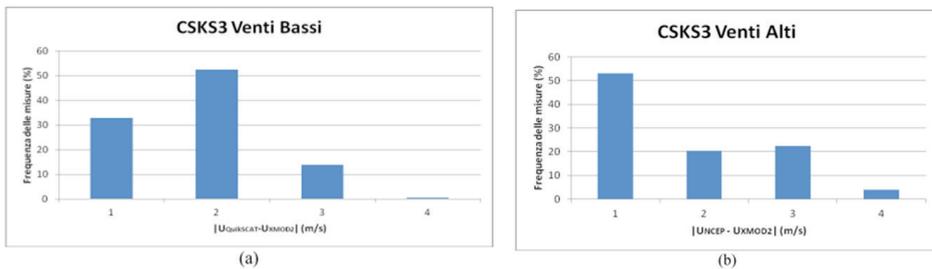


Fig. 8 – Istogrammi dei risultati ottenuti per CSK3 con XMOD2, rispettivamente per venti bassi (a) con una RMS pari a 1.27 m/s e per venti alti (b) con RMS uguale a 1.3 m/s  
Fonte: elaborazione dati effettuata da Flyby, 2013.

## 4.2 Impianti ad energia solare

Nel caso degli impianti ad energia solare è stato ottenuto un ottimo riscontro fra l'irradianza calcolata da satellite e quella misurata *in-situ*: in generale l'accordo fra i dati rientra nella soglia del 15% per condizioni meteorologiche nuvolose e sotto il 5-10% in condizioni di cielo sereno.

Allo stesso modo anche il test di utilizzo del nuovo metodo nel processo di monitoraggio della produzione di impianti fotovoltaici (pre-esistente) ha condotto ad ottimi risultati, confermando un accordo compreso tra il 5% ed il 10% fra la produzione di potenza AC ricavata a partire da immagini satellitari e quella invece misurata al contatore *in-situ*. Infatti utilizzando i dati di irradianza solare incidente a terra ricavati da satellite è stato possibile ricavare la produzione di potenza AC attesa utilizzando un modello opto-elettronico dell'impianto solare (Eicker, 2003).

Ad esempio nel caso di un impianto test in cui sono state effettuate misurazioni per un periodo di circa otto mesi (aprile – dicembre 2012), il confronto fra la potenza AC oraria misurata e quella calcolata a partire da dati satellitari ha portato ad ottenere un coefficiente di correlazione pari a 0.9075 ed una RMS del 2.06% (come mostrato in Figura 9).

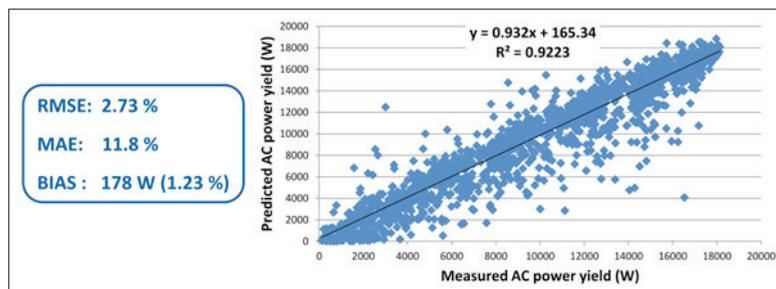


Fig. 9 – Confronto nel caso di un impianto fotovoltaico di 20 kWp installato presso Baucina, Sicilia (periodo aprile-dicembre 2012) fra la produzione di potenza AC misurata e quella calcolata a partire da dati satellitari  
 Fonte: elaborazione dati effettuata da Flyby, 2012.

Utilizzando la nuova metodologia sviluppata è stata anche prodotta una mappa dell'irradiazione diretta annuale media incidente su di un piano ad inseguimento solare in Italia. A tal fine sono state elaborate le immagini MSG relative agli ultimi 5 anni ed il risultato (riportato su mappa GIS) è raffigurato in Figura 10.

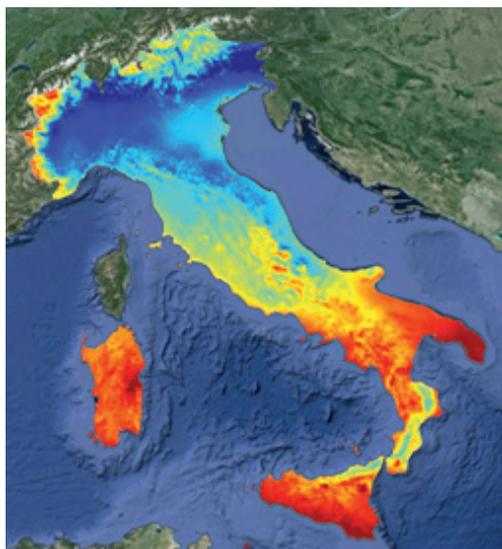


Fig. 10 – Esempio di mappa GIS dell'irradiazione annuale media incidente su di un piano ad inseguimento solare in Italia ricavata dall'applicazione della nuova metodologia EO ad una serie di immagini satellitari MSG di archivio  
 Fonte: elaborazione dati effettuata da Flyby, 2013.

È attualmente in corso di messa a punto la parte di modellizzazione degli impianti CSP e CPV, a cui sarà applicata la stessa metodologia sopra descritta per poterne monitorare le prestazioni partendo dal calcolo dell'irradianza solare incidente a terra da immagini ottiche satellitari.

I test saranno effettuati utilizzando i dati di produzione di alcuni impianti CSP e CPV messi a disposizione dall'utente di riferimento Enel Green Power.

## **Bibliografia**

- CANO D., MONGET J.M., ALBUISSON M., GUILLARD H., REGAS N., e WALD L. (1986), A method for the determination of the global solar radiation from meteorological satellite data, "Solar Energy", 37, pp. 31-39.
- EICKER U. (2003), Solar technologies for buildings, John Wiley & Son Ltd, Chichester (UK).
- NIRCHIO F. e VENAFA S. (2010), *Preliminary model for wind estimation from Cosmo/SkyMed X band SAR data*, in *Conference Proceedings: Proceedings of 2010 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS)*, Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE), Honolulu (USA), pp. 3462 –3465.
- POWELL W. R. (1981), An Analytical Expression for the Average Output Power of a Wind Machine, "Solar Energy", 26, pp. 77-80.
- RIGOLLIER C., BAUER O. e WALD L. (2000), On the clear sky model of the 4th European Solar Radiation Atlas with respect to the Heliosat method, "Solar Energy", 68, pp. 33-48.
- STOFFELEN A. e ANDERSON D. (1997), Scatterometer Data Interpretation: Measurement and inversion, "Journal of Atmospheric and Oceanic Technology", 14, pp. 1298-1313.