

Metodologie innovative per il supporto nella progettazione e l'analisi delle prestazioni di impianti ad energia solare a concentrazione ed eolici off-shore utilizzando immagini satellitari ottiche e SAR

Marco Morelli (*), Andrea Masini (**), Marco Alberto Carlo Potenza (*)

(*) Dipartimenti di Fisica, Università degli Studi di Milano
Via Celoria 16, 20122 Milano, email: marco.morelli1@unimi.it
(**) Flyby S.r.l., Via Puini 97, 57128 Livorno

Riassunto

In questo lavoro presentiamo delle nuove metodologie, sviluppate nell'ambito del progetto SATENERG (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 pianificazione 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, abbiamo sviluppato un metodo 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%, 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.

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).

1. INTRODUZIONE

1.1 Il progetto SATENERG

Il progetto SATENERG 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.

1.2 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.

2. STIMA DEL VENTO E DELL'IRRADIANZA SOLARE DAI SATELLITI 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:

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

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

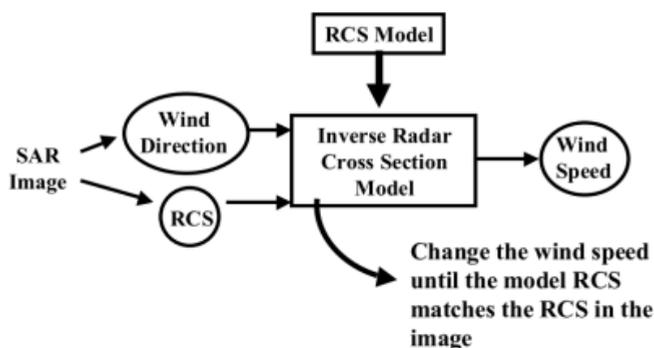


Figura 1. Schema dell'algoritmo per la stima del vento da immagini SAR.

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 Fig 1.

Alla base di tutto viene utilizzato un modello che metta in relazione la RCS con la velocità e la direzione del vento (Nirchio, Venafrà, 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° 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 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. La revisione 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 et al., 1986) e nel corso degli anni è stata oggetto di studi migliorativi (nuovi modi di calcolare l'indice di nuvolosità, di cielo sereno e l'irradianza globale orizzontale nel caso di cielo sereno) e di validazione, che ne hanno fatto una metodologia standard e affidabile.

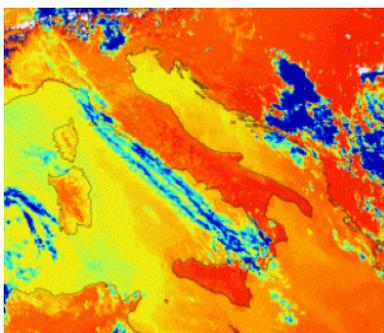


Figura 2. Mapa di irradiazione solare ricavata usando il modello Heliosat ed immagini del satellite MSG.

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 relazione 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 μm , 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.

3. LA MODELLIZZAZIONE DEGLI IMPIANTI

Partendo dai parametri ambientali stimabili fruttando i dati EO satellitari è possibile, utilizzando opportuni modelli che descrivono il comportamento degli impianti, ricavare all'energia prodotta.

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 turbina) 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 su dei 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 la 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, già implementata nel servizio SolarSAT PV-Controller, è quella che prevede la rappresentazione del modulo fotovoltaico tramite un circuito equivalente costituito da un generatore di corrente (fotovoltaica), collegato in serie con una resistenza e in parallelo con un diodo e un'altra resistenza.

4. PRIMI RISULTATI DEI TEST

Le prime applicazioni di questi metodi 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%, 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 il successivo sviluppo dei servizi web.

5. BIBLIOGRAFIA

Cano D., Monget J.M., Albuissou M., Guillard H., Regas N., and Wald L. (1986), "A method for the determination of the global solar radiation from meteorological satellite data", *Solar Energy*, 37: 31-39

Eicker U. (2003), *Solar technologies for buildings*, John Wiley & Son Ltd, Chichester (UK)

Nirchio F. and Venafrà S., (2010), "Preliminary model for wind estimation from Cosmo/SkyMed X band SAR data", *Proceedings of International Geoscience and Remote Sensing Symposium IGARSS 2010*: 3462-3465

Powell W. R. (1981), "An Analytical Expression for the Average Output Power of a Wind Machine", *Solar Energy*, 26: 77-80

Rigollier C., Bauer O. and Wald L. (2000), "On the clear sky model of the 4th European Solar Radiation Atlas with respect to the Heliosat method", *Solar Energy*, 68: 33-48