

# STIMA DELLA DNI IN ANTARTIDE

F. SPINELLI, T. CRESCENZI, G. NAPOLI, S. ROLDANO

ENEA – Unità Tecnica Fonti Rinnovabili  
Laboratorio Progettazione Componenti e Impianti  
Centro Ricerche Casaccia, Roma

P. GRIGIONI, L. DE SILVESTRI

ENEA - Unità Tecnica Modellistica Energetica Ambientale  
Laboratorio Analisi e Osservazioni sul Sistema Terra  
Centro Ricerche Casaccia, Roma

ARCANGELO BENEDETTI

ENEA - Unità Tecnica Fonti Rinnovabili  
Laboratorio Solare Termodinamico  
Centro Ricerche Casaccia, Roma



AGENZIA NAZIONALE PER LE NUOVE TECNOLOGIE,  
L'ENERGIA E LO SVILUPPO ECONOMICO SOSTENIBILE

## STIMA DELLA DNI IN ANTARTIDE

F. SPINELLI, T. CRESCENZI, G. NAPOLI, S. ROLDANO

ENEA – Unità Tecnica Fonti Rinnovabili  
Laboratorio Progettazione Componenti e Impianti  
Centro Ricerche Casaccia, Roma

P. GRIGIONI, L. DE SILVESTRI

ENEA - Unità Tecnica Modellistica Energetica Ambientale  
Laboratorio Analisi e Osservazioni sul Sistema Terra  
Centro Ricerche Casaccia, Roma

ARCANGELO BENEDETTI

ENEA - Unità Tecnica Fonti Rinnovabili  
Laboratorio Solare Termodinamico  
Centro Ricerche Casaccia, Roma

I Rapporti tecnici sono scaricabili in formato pdf dal sito web ENEA alla pagina  
<http://www.enea.it/it/produzione-scientifica/rapporti-tecnici>

I contenuti tecnico-scientifici dei rapporti tecnici dell'ENEA rispecchiano l'opinione degli autori e non necessariamente quella dell'Agenzia.

The technical and scientific contents of these reports express the opinion of the authors but not necessarily the opinion of ENEA.

## **STIMA DELLA DNI IN ANTARTIDE**

F. SPINELLI, P. GRIGIONI, T. CRESCENZI, G. NAPOLI, A. BENEDETTI, S. ROLDANO, L. DE SILVESTRI

### **Sommario**

E' effettuata la stima dell'irradiazione solare diretta normale (DNI) giornaliera media mensile e annua, riferita alla regione che ospita la Stazione Mario Zucchelli, nella baia di Terra Nova (Antartide). Le stime si basano sulle misure delle irradianze diretta normale, globale orizzontale (GHI) e diffusa orizzontale, effettuate mediante una stazione di acquisizione dati solarimetrica, installata nel corso della XXVIII spedizione scientifica effettuata nell'estate australe 2012/2013 nell'ambito del *Piano Nazionale di Ricerche in Antartide* (PNRA). La misura contemporanea delle tre irradianze ha consentito la messa a punto del modello per la stima della DNI a partire dai soli valori della GHI, validato per le condizioni meteo della regione antartica. La ricostruzione dei valori di DNI, per un tempo sufficientemente lungo a caratterizzare compiutamente sotto il profilo dell'irraggiamento solare diretto la zona antartica che ospita la base Mario Zucchelli, è così resa possibile grazie alla disponibilità di misurazioni orarie di GHI protrattesi per più anni ed effettuate, con centraline di acquisizione di dati meteorologici installate sia presso la base, sia in luoghi sparsi intorno ad essa.

**Parole chiave:** irradianza diretta normale, Antartide.

## **ESTIMATION OF THE DNI IN ANTARCTICA**

### **Abstract**

*Daily, monthly and yearly means of Direct Normal Irradiation (DNI) have been estimated for the area hosting the Italian Station "Mario Zucchelli", in Terra Nova Bay, Antarctica. The estimations are based on measurements of DNI, Global Horizontal Irradiance (GHI), and Diffused Irradiance, taken using a solar measurement and data acquisition unit installed during the XXVIII antarctic summer scientific expedition performed in 2012/2013 in the frame of the Italian Antarctic Research Programme. The simultaneous measurement of the three values of irradiance allowed to develop and fine-tune a model for the DNI estimation from GHI measurement data only, validated for the meteo conditions of Antarctica. The re-construction for a sufficient time-lag of DNI data useful for the comprehensive characterization of the "Mario Zucchelli" area is therefore possible thanks to the hourly measurements of GHI only; such historical data are available for several years from a number of locations either in the Station area and the surroundings.*

**Parole chiave:** Direct Normal Irradiance, Antarctica.



# Indice

<b>1</b>	<b>INTRODUZIONE .....</b>	<b>7</b>
1.1	LA PRESENZA DELL'ITALIA IN ANTARTIDE .....	7
1.2	IL CLIMA ANTARTICO.....	11
<b>2</b>	<b>MISURAZIONE DELLA DNI E MESSA A PUNTO DEL MODELLO <math>GHI = F(DNI)</math>..</b>	<b>13</b>
2.1	DESCRIZIONE DELLA CENTRALINA DI ACQUISIZIONE-DATI SOLARIMETRICA .....	13
2.2	ANALISI DEI DATI E SVILUPPO DEI MODELLI.....	16
2.2.1	<i>Validazione dei dati di misura</i> .....	21
2.2.2	<i>Correlazione <math>DNI = f(GHI)</math></i> .....	24
<b>3</b>	<b>ANALISI DEI DATI DI GHI PER LA STIMA DELLA DNI MEDIA MENSILE E ANNUALE.....</b>	<b>31</b>
<b>4</b>	<b>CONCLUSIONI .....</b>	<b>35</b>
	<b>APPENDICE .....</b>	<b>37</b>
A.1	L'ORA (TEMPO) SOLARE VERA .....	37
A.2	ANGOLO ORARIO .....	39
A.3	POSIZIONE DEL SOLE (ANGOLO ZENITALE) E CALCOLO DEGLI ISTANTI DELL'ALBA E DEL TRAMONTO E DELLA LUNGHEZZA DEL GIORNO .....	39
	<b>SIGLE, ABBREVIAZIONI, GRANDEZZE, UNITÀ DI MISURA.....</b>	<b>41</b>
	<b>BIBLIOGRAFIA.....</b>	<b>44</b>



# 1 Introduzione

## 1.1 La presenza dell'Italia in Antartide

Il 1° dicembre 1959 fra 12 dei Paesi partecipanti all'Anno Geofisico Internazionale (1957-58) venne stipulato il Trattato Antartico per regolare la presenza dei Paesi operanti sul continente, favorendone gli usi pacifici. In seguito nel 1991, ad integrazione del Trattato Antartico, venne siglato il Protocollo sulla Protezione Ambientale; tale accordo, noto anche come Protocollo di Madrid, dichiarava la messa al bando per 50 anni di ogni sfruttamento minerario dell'Antartide imponendo la valutazione dell'impatto ambientale per qualsiasi attività in programma. Al Trattato Antartico aderiscono ad oggi 46 Paesi, che rappresentano più dell'80% della popolazione globale.

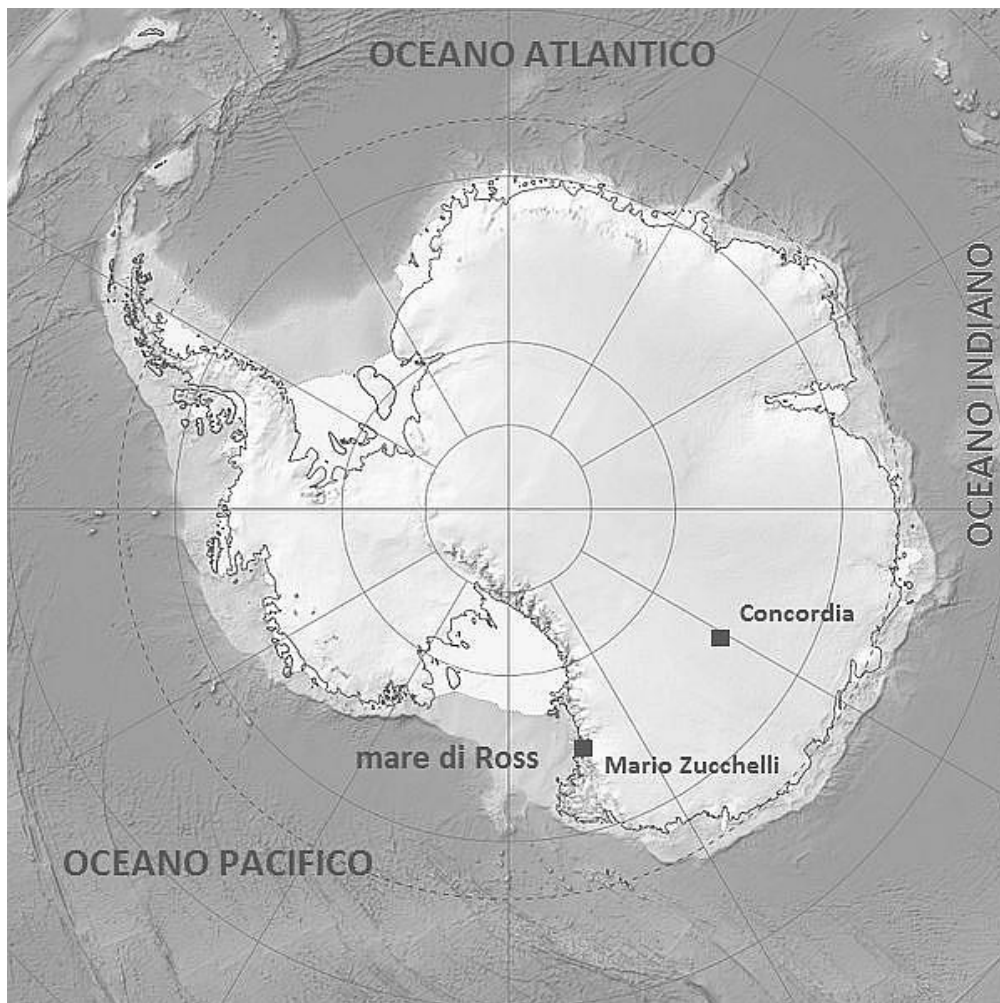
L'Italia ha ratificato il Trattato nel 1981 ed ha dato inizio ad attività governative in Antartide nel 1985, con il Programma Nazionale di Ricerche in Antartide (PNRA, /1/), nell'ambito del quale all'ENEA è affidato il compito attuativo e logistico, nonché la responsabilità organizzativa nelle zone operative. Per la posizione geografica, le caratteristiche fisiche, la distanza dalle fonti di inquinamento e la quasi totale assenza di perturbazioni antropiche, l'Antartide è uno dei luoghi privilegiati per un'osservazione globale del pianeta. Le attività intraprese toccano settori che avranno importanza anche in futuro quali ad esempio lo studio dei cambiamenti globali. La storia climatica degli ultimi 10000 anni è infatti registrata sia nei sedimenti sia, con maggiore risoluzione, nel ghiaccio continentale; le risposte sulle cause dei cambiamenti climatici del passato e sui bilanci di massa delle calotte e le connesse variazioni del livello marino saranno utili per la comprensione delle cause delle variazioni climatiche di brevissimo periodo e della influenza degli effetti antropici sull'ambiente globale.

Attualmente, l'Italia mantiene in Antartide due basi scientifiche permanenti (Figura 1): *Stazione Mario Zucchelli* (MZS, coordinate 74°41' S e 164°05' E, Figura 2), nella baia di Terra Nova, prospiciente il mare di Ross, nella porzione del continente attribuita alla Nuova Zelanda<sup>1</sup>, e *Concordia* (DC, coordinate 75°S e 123°E), nell'interno del continente a circa 1200 km da Mario Zucchelli, in condominio con la Francia. La Stazione Mario Zucchelli rappresenta il punto di riferimento per tutte le attività scientifiche dell'Italia in Antartide. E' stata costruita nel 1986 e da allora, durante la stagione estiva, che nell'emisfero boreale si protrae da settembre a febbraio, è oggetto delle spedizioni scientifiche annuali organizzate nell'ambito delle attività del PNRA.

---

<sup>1</sup> Il Trattato Antartico ha congelato, senza però sconfessarle, le rivendicazioni territoriali avanzate fino al momento della sua stipula; al tempo stesso, ha escluso che in futuro possano essere sollevate ulteriori pretese di sovranità. La baia di Terra Nova si trova nel territorio già rivendicato dalla Nuova Zelanda, corrispondente al settore polare compreso tra i meridiani 160° Est e 150° Ovest.





*Figura 1 – Mappa dell'Antartide con le due basi scientifiche permanenti italiane.*



*Figura 2 – Stazione Mario Zucchelli nella baia di Terra Nova.*

Una realizzazione significativa delle attività italiane condotte in Antartide è costituita dall'**Osservatorio Meteo-climatologico**, avviato nel 1985 (contestualmente al Progetto Antartide) con l'installazione della prima stazione meteorologica automatica – Eneide (Figura 3) – nel sito dove, in seguito, verrà costruita l'attuale Base Mario Zucchelli. Ma è solo a partire dal 1987 che, a seguito dell'installazione di altre stazioni meteorologiche e all'inizio della attività di radiosondaggio atmosferico, prende corpo il progetto di un vero e proprio osservatorio meteo-climatologico italiano in Antartide, il cui scopo è ovviamente quello di contribuire alla misura ed al monitoraggio dei cambiamenti climatici globali in un ambiente ritenuto dalla comunità scientifica internazionale come molto sensibile alle variazioni del clima.



*Figura 3 – Stazione meteorologica automatica Eneide, presso la base Mario Zucchelli.*

Oggi l'Osservatorio gestisce una rete di 23 stazioni meteorologiche automatiche (AWS) che sono state posizionate sul territorio nell'arco delle 29 spedizioni finora svolte (Figura 4). Questa rete di monitoraggio è presente su tutta l'area delle Terre di Victoria e si estende dalla base costiera Mario Zucchelli verso la zona più interna del Plateau Antartico fino a Concordia e nell'area delle Terre di Wilkes in direzione della base scientifica francese di Dumont'Urville (coordinate 66°40'S e 140°01'E). Sedici di queste AWS sono funzionanti tutto l'anno, 5 sono stagionali e dedicate alle attività di volo nei pressi delle basi scientifiche di MZS e DC, una è montata sui moduli di sopravvivenza della traversa dell'International Trans-Antarctic Scientific Expedition (ITASE) ed una è posizionata a bordo della nave oceanografica Italica.

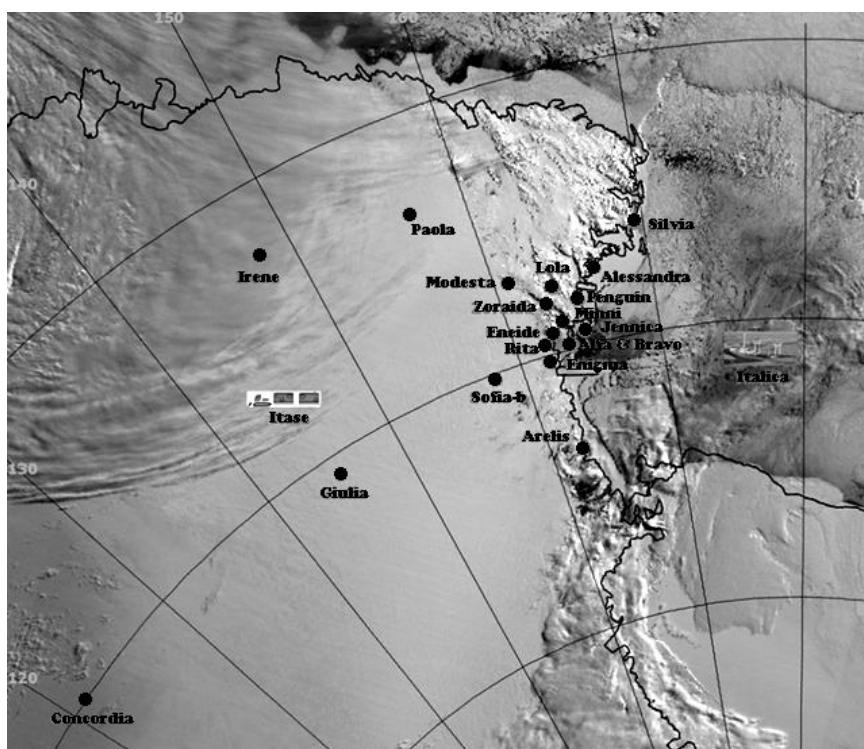


Figura 4 – Mappa delle stazioni automatiche gestite dall'Osservatorio Meteo-climatologico. L'immagine da satellite rappresenta l'area delle Terre di Victoria, parte del mare di Ross e del Plateau Antartico dove sono dislocate le stazioni meteorologiche automatiche.

Le AWS sono tutte basate su sistemi di acquisizione VAISALA. Le grandezze fisiche campionate sono generalmente temperatura, umidità, pressione, velocità e direzione del vento. Alcune AWS (Eneide, Alessandra, Irene) misurano anche la radiazione solare incidente diretta e diffusa con un errore di misura di  $\pm 3\%$  utilizzando un piranometro CM11 Kipp & Zonen. L'ampiezza dello spettro va da 335 a 2200 nm e la sensibilità dello strumento va da 4 a 6  $\mu V/Wm^{-2}$ .

La gestione delle stazioni è curata dal laboratorio ENEA di *Analisi e Osservazioni sul Sistema Terra (UTMEA-TER)*, mentre l'unità tecnica ENEA *Antartide (UTA)* ha la responsabilità operativa e logistica delle attività italiane sul continente.

## 1.2 Il clima antartico

Il clima del continente antartico è fortemente condizionato, oltre che dai fattori astronomici, dalla sua posizione geografica, dall'altitudine media e dalla coltre di ghiaccio che lo ricopre.

Infatti poiché la terra durante la stagione invernale dell'emisfero australe è alla massima distanza dal sole, tale stagione risulta più lunga che nell'emisfero boreale. Pertanto questa lunga notte polare e la bassa inclinazione dei raggi solari anche in estate rendono l'Antartide il continente meno riscaldato dal Sole. Inoltre la superficie quasi completamente coperta da ghiaccio o nevi perenni ed il ghiaccio che si forma sull'oceano Antartico, riflettono la maggior parte dell'energia solare incidente.

L'altezza media del continente, inoltre, superiore a 2000 m contribuisce a diminuire lo spessore di troposfera che di norma funge da magazzino di calore.

Tutti questi fattori rendono l'Antartide il luogo più freddo sulla terra con un'estate molto breve, un inverno molto lungo e con le temperature che in autunno scendono già in prossimità dei valori minimi invernali (Schwerdtfeger /9/).

Durante l'inverno le temperature medie oscillano tra i  $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$  della fascia costiera e i  $-70\text{ }^{\circ}\text{C}$  dell'interno, mentre in estate le medie oscillano tra  $0\text{ }^{\circ}\text{C}$  lungo la costa e i  $-35\text{ }^{\circ}\text{C}$  sul plateau.

La perdita di calore causata dall'albedo superficiale provoca la formazione di una più o meno intensa inversione termica nelle vicinanze del suolo con la conseguente formazione di aria molto fredda che muovendosi dal plateau si sposta per gravità verso le zone costiere originando i venti catabatici. Questi venti, che superano spesso i  $100\text{ km/h}$ , danno origine a tempeste di neve che possono protrarsi anche per lunghi periodi; una volta giunti nei pressi della fascia costiera, essi incontrano masse d'aria più umide e calde generando violente perturbazioni.

Le precipitazioni, in Antartide, sono in generale scarse e maggiormente concentrate nella fascia costiera tanto da considerare il continente antartico un deserto freddo.

L'orografia del continente presenta un vasto altopiano centrale, il Plateau, che digrada più o meno rapidamente verso l'oceano. La costa del mare di Ross dov'è situata la Stazione Mario Zucchelli è invece separata dal plateau dalla Catena Transantartica, pertanto i ghiacciai in questa zona scendono rapidamente verso il mare. La conseguenza principale è l'elevata frequenza dei venti catabatici: l'area circostante la stazione infatti è considerata uno dei luoghi più ventosi della Terra.

Su scala regionale quest'area merita un'attenzione particolare per l'importanza che il fenomeno dei venti catabatici assume in relazione alla circolazione generale sul continente ed alle sue relazioni con il sistema climatico. L'importanza di monitorare il flusso catabatico infatti è legata all'influenza che questo fenomeno ha sia come principale meccanismo di drenaggio di aria fredda verso latitudini inferiori sia come causa della formazione della polynya, zona di mare libera dai ghiacci anche durante il periodo invernale. La polynya di Baia Terra Nova è considerata infatti, una delle più importanti dell'intero continente, e si stima che circa il 40% di tutto il ghiaccio marino dell'Antartide viene prodotto nelle polynya, con la conseguente formazione di acque dense. Le polynya sono dunque un elemento chiave dell'intero sistema climatico (Petrelli e al. /10/ e Parmigiani /11/).

L'andamento delle temperature medie mensili mostra un massimo in corrispondenza dei mesi di dicembre e gennaio, in cui le temperature si avvicinano a 0 °C, pur restando negative. Una caduta repentina delle temperature si ha tra febbraio e marzo, raggiungendo in aprile valori medi attorno ai -20 °C. Le temperature continuano poi a scendere fino a luglio - agosto, mesi in cui si registrano le temperature più basse di tutto l'anno, arrivando a raggiungere i -22 °C di media, con punte estreme intorno ai -40 °C. Da settembre, poi, le temperature riprendono a crescere in modo regolare fino dicembre.

I venti predominanti misurati presso la Stazione Mario Zucchelli sono occidentali o nord occidentali. Da qui soffiano anche i venti più intensi provenienti dalle valli glaciali dei ghiacciai Reeves e Priestley che in quest'area collegano il Plateau Antartico con l'Oceano. In generale molto rari sono i venti provenienti dai quadranti orientali e meridionali. Molto frequenti risultano i casi di calma di vento.

## 2 Misurazione della DNI e messa a punto del modello GHI = f (DNI)

Nell'ambito della XXVIII spedizione scientifica del PNRA avvenuta nella stagione estiva australe (ottobre 2012 / febbraio 2013), il laboratorio ENEA UTRINN-PCI ha curato l'installazione presso la Stazione Mario Zucchelli di una stazione di acquisizione dati solarimetrica, con lo scopo di effettuare misure delle irradianze globale e diffusa orizzontali e diretta normale, e creare un archivio di dati per la modellizzazione dell'irraggiamento solare nella regione antartica. Nel seguito sono forniti alcuni dettagli della strumentazione utilizzata, è effettuata l'analisi dei dati acquisiti e sono descritti i modelli risultanti.

### 2.1 Descrizione della centralina di acquisizione-dati solarimetrica

La stazione solarimetrica, prodotta dalla EKO Instruments, è dotata di tre sensori – un pireliometro e due piranometri – per la misura indipendente delle grandezze fondamentali ai fini della caratterizzazione della radiazione solare al suolo:

- l'irradianza globale sul piano *orizzontale* (acronimo GHI, da *Global Horizontal Irradiance*),
- l'irradianza diffusa sul piano *orizzontale* (Dif. HI) e infine
- l'irradianza diretta sul piano *normale* ai raggi del Sole (acronimo DNI, da *Direct Normal Irradiance*).

La strumentazione comprende anche un *inseguitore*, ossia un dispositivo con parti in movimento che rileva istante per istante la posizione del Sole e permette il puntamento della strumentazione nella direzione del disco solare.

La GHI è misurata per mezzo di un piranometro costituito da una termopila le cui giunzioni calde sono esposte ai raggi solari, mentre quelle fredde sono schermate dalla radiazione stessa: la tensione prodotta dalla termopila sarà pertanto proporzionale alla radiazione incidente. Dovendo raccogliere la radiazione proveniente da un emisfero, la parte esposta del sensore è isolata e protetta da due semisfere di quarzo; inoltre, il sensore stesso è disposto parallelamente al piano orizzontale, affinché vi incida proprio la radiazione solare proveniente dall'intera volta celeste soprastante.

Per la misura della Dif. HI si utilizza un piranometro il cui principio di funzionamento è del tutto identico a quello descritto in precedenza. Poiché in questo caso si deve misurare la sola componente diffusa della radiazione, è indispensabile che il sensore sia schermato dai raggi provenienti direttamente dal disco solare. Ciò è ottenuto interponendo una piccola sfera tra le parti attive del piranometro e il Sole. Una serie di leverismi e la sfera metallica di 5 cm di diametro (*shadow-ball assembly*), meccanicamente collegati all'inseguitore, svolgono tale funzione.

La DNI si misura mediante un pireliometro costituito anch'esso da una termopila. Al fine di considerare solo la radiazione proveniente direttamente dal disco solare, l'elemento sensibile è in questo caso situato ad una estremità di un cilindro metallico, con rivestimento interno assorbente; in

corrispondenza dell'altra estremità, quella rivolta al Sole, è situata invece una finestra di quarzo che isola il sistema dall'esterno. Il cilindro (pireliometro) dev'essere costantemente puntato nella direzione di provenienza dei raggi affinché sul sensore incida solo la radiazione proveniente dal disco solare: per questo motivo, esso è montato direttamente sull'inseguitore.

L'inseguitore solare (*solar tracker*), mostrato in Figura 5, è sicuramente l'elemento più critico della stazione di misura. Infatti esso è un organo in movimento che assolve al duplice compito di schermare, come già spiegato, mediante una sfera metallica nera opportunamente orientata, il sensore di radiazione diffusa sul piano orizzontale, e di comandare il puntamento del pireliometro per la DNI verso il disco solare. Pertanto, all'inseguitore è richiesta una notevole precisione e un'estrema affidabilità, per limitare al minimo i periodi di non allineamento, nei quali tutte le grandezze misurate sarebbero falsate.

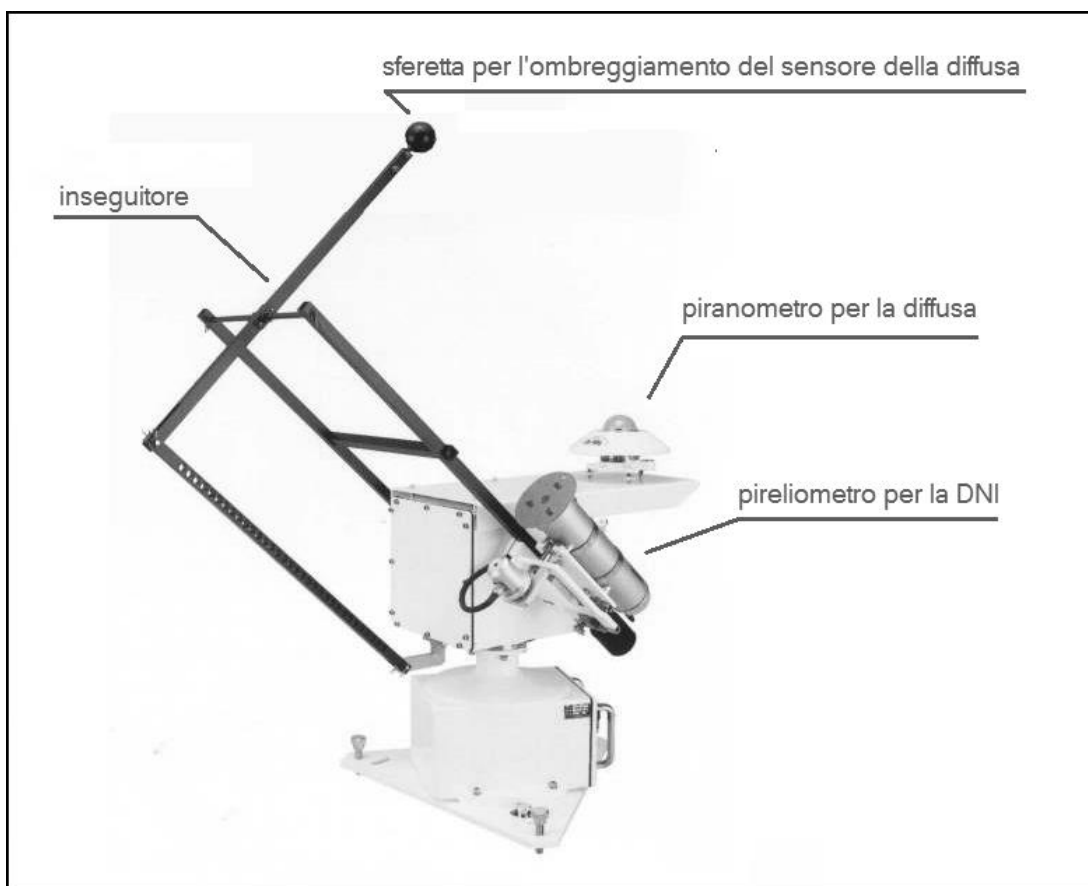
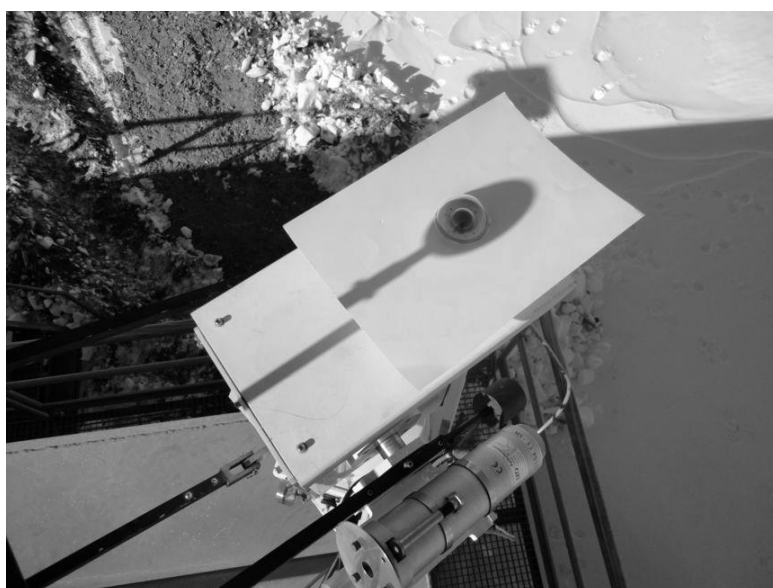
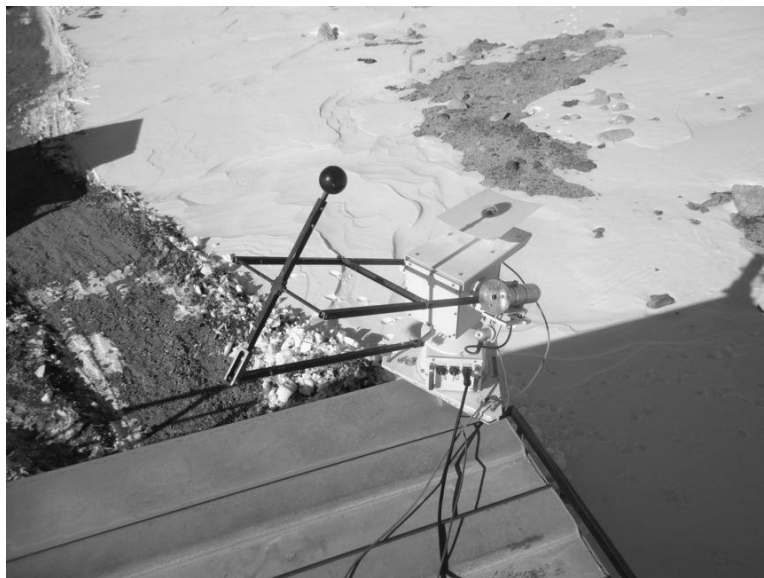


Figura 5 – **Stazione solarimetrica. Particolari dell'inseguitore solare (*solar tracker*) e di due solarimetri (per la DNI e la diffusa orizzontale).**

Il sistema si orienta automaticamente sul disco solare durante il suo percorso, giornaliero e stagionale, sulla volta celeste. Poiché il puntamento dev'essere garantito sia in presenza che in assenza di nuvole, l'inseguitore solare è programmato per orientarsi verso la posizione del Sole calcolata a partire dall'ora, dal giorno e dalla posizione geografica del sito (latitudine e longitudine). Al fine di garantire un più affidabile puntamento, il solar tracker è dotato di un sistema di orientamento a catena chiusa, basato su fotocellule, che interviene qualora la radiazione diretta sia superiore ad una certa soglia (cielo sereno). In tal modo piccoli errori di impostazione o di orientazione dell'inseguitore sono compensati dal sistema di controreazione automatico.

La stazione è dotata infine di un sistema automatico di acquisizione dati (CR-1000 prodotto da Campbell Scientific) che memorizza il valor medio e gli scarti quadratici medi di ogni grandezza a partire dai dati misurati nei 5 minuti precedenti. Tutti i dati sono registrati su di un modulo di memoria interno (MS-716 Campbell Scientific) in grado di contenere i dati acquisiti per un tempo di alcuni mesi.



*Figura 6 – Stazione solarimetrica montata presso la Stazione Mario Zucchelli (Baia Terra Nova, Antartide). Nella prima foto è visibile il meccanismo deputato all'inseguimento della posizione del Sole (sun tracker): a) che permette il puntamento corretto del sensore della DNI nella direzione dei raggi solari; b) che muove la sferetta nera affinché il sensore per la diffusa resti sempre in ombra, come si può vedere nel particolare della foto in basso.*



## 2.2 Analisi dei dati e sviluppo dei modelli

Dopo un breve periodo di *test* condotti nei primi giorni dell'ottobre 2012, la centralina ha funzionato correttamente e ininterrottamente dal 30 ottobre 2012 al 2 gennaio 2013, ultima data utile affinché, dopo lo smontaggio e imballaggio, sia rispedita in Italia insieme alle altre attrezzature scientifiche della spedizione estiva.

La centralina è stata programmata per effettuare una misurazione al minuto delle tre grandezze DNI, GHI e Dif. HI, mentre la registrazione dei dati è stata impostata sulla frequenza di un record ogni cinque minuti. In particolare, ogni cinque minuti sono stati registrati, per ciascuna delle tre irradianze, la media e lo scarto quadratico medio (s.q.m.) delle cinque misure effettuate nell'intervallo. Ai fini della costruzione del modello di stima della DNI a partire dalla GHI sono state ovviamente utilizzate solo le medie, mentre gli s.q.m. – esprimendo essenzialmente il grado della variabilità nel (breve) tempo fra una registrazione e l'altra delle grandezze misurate – sono stati utilizzati per solo controllare (ed eventualmente scartare) quei valori medi che apparivano inverosimili: tipicamente, i valori negativi per condizioni di illuminazione chiaramente diurna (valori inferiori a zero, purché di poco, sono giustificati a causa dell'imprecisione inevitabile degli strumenti di misura solo per gli istanti notturni o per quelli a ridosso dei crepuscoli dell'alba e del tramonto). Tutti i valori d'irradianza registrati sono espressi in  $W/m^2$ .

Nell'arco dei 65 giorni di funzionamento sono stati registrati 18709 record di dati, corrispondenti a 288 record/giorno. Di questi, 18545 sono relativi a intervalli “diurni” – ossia con il Sole al di sopra dell'orizzonte – i soli utilizzabili ai fini della stima della DNI: negli intervalli notturni, infatti, tutte le irradianze sono nominalmente nulle.

Il motivo per cui la frazione degli intervalli diurni rispetto al totale sia così preponderante è che alle latitudini elevate, oltre i paralleli dei circoli polari, la durata del giorno aumenta sensibilmente nella stagione estiva, fino a quando il Sole non tramonta più (simmetricamente, in inverno, il Sole rimane ininterrottamente per molti giorni al di sotto dell'orizzonte: è la notte polare). Alla latitudine in cui si trova la Stazione Mario Zucchelli, il Sole albeggia e tramonta per l'ultima volta il 3 novembre; poi, a partire dal 4 novembre e fino al 7 febbraio, si mantiene al di sopra dell'orizzonte per l'intero arco delle 24 ore (Figura 7 e Figura 8). In appendice A.3 è mostrato il calcolo degli istanti dell'alba e del tramonto per qualunque località di latitudine assegnata e, per differenza fra tramonto e alba, l'effettiva durata delle ore di luce (*durata del giorno*).

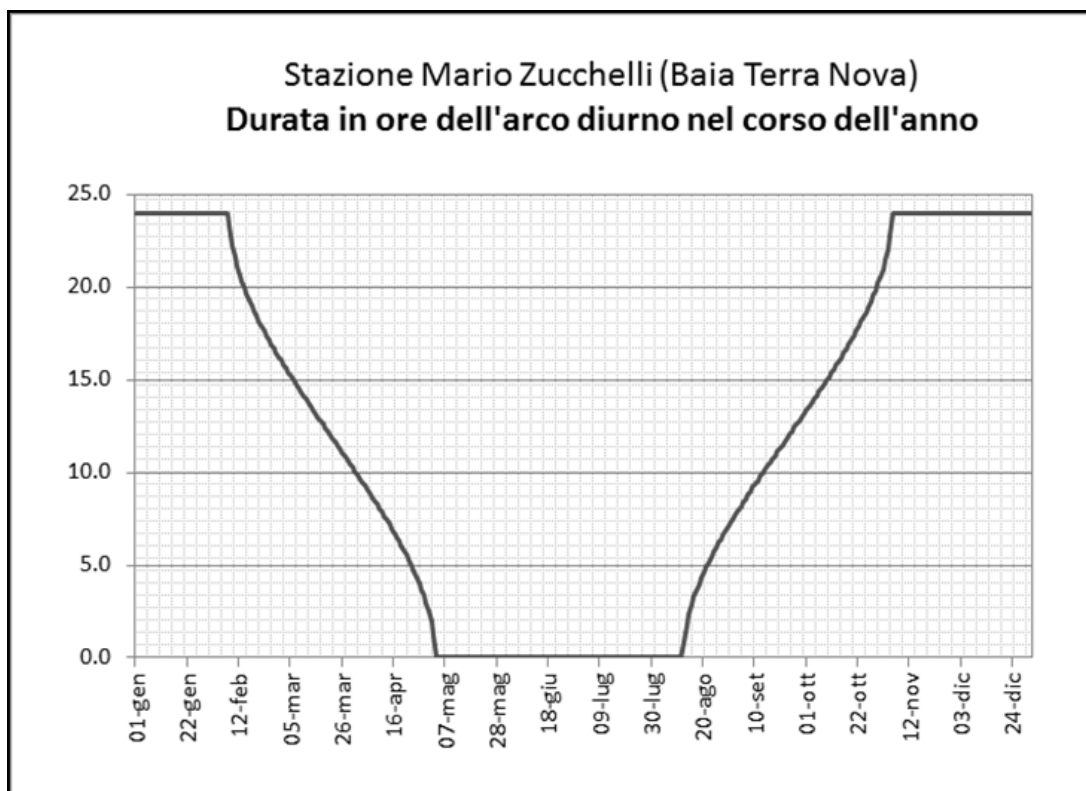


Figura 7 – Durata dell'arco diurno nel corso dell'anno alla Stazione Mario Zucchelli (Baia Terra Nova). Presso la stazione – che si trova alla latitudine di  $74^{\circ}41.7'$  Sud – il Sole non tramonta mai durante la stagione estiva australe, precisamente dal 4 novembre al 7 febbraio, in cui la durata dell'arco diurno è esattamente pari a 24 ore. Viceversa, dal 3 maggio al 10 agosto, durante l'inverno australe, la nostra stella non albeggia mai, mantenendosi sempre al di sotto dell'orizzonte. Nelle stagioni intermedie il numero di ore di luce aumenta o diminuisce con gradualità.

Per converso va osservato che benché le giornate siano lunghe, in realtà il Sole si eleva relativamente poco al di sopra dell'orizzonte nell'arco della giornata e questo effetto è tanto più pronunciato quanto più ci si sposta verso latitudini prossime ai poli. Il fenomeno può essere mostrato calcolando l'elevazione massima durante la giornata, per tutti i giorni dell'anno. L'*elevazione solare* è l'angolo che la direzione dei raggi solari forma con il piano orizzontale. Esso è nullo all'alba, aumenta durante il mattino e raggiunge il valore massimo quando il Sole attraversa il piano meridiano della località (mezzogiorno solare). Per la Stazione Mario Zucchelli la massima elevazione del Sole avviene a mezzogiorno del 21 dicembre e risulta essere pari a circa  $38^{\circ}$  (figura F07). Per confronto, sulla regione italiana, che è compresa fra le latitudini  $36^{\circ}$  e  $48^{\circ}$  Nord, la massima elevazione del Sole è all'incirca doppia rispetto a Mario Zucchelli e si verifica il 21 giugno (più precisamente, il Sole si eleva fino a  $78^{\circ}$  gradi sopra l'orizzonte in Sicilia e  $66^{\circ}$  al Brennero, Alto Adige). Per il calcolo dell'elevazione massima del Sole nell'arco della giornata, per tutti i giorni dell'anno, i dettagli sono in appendice A.3.

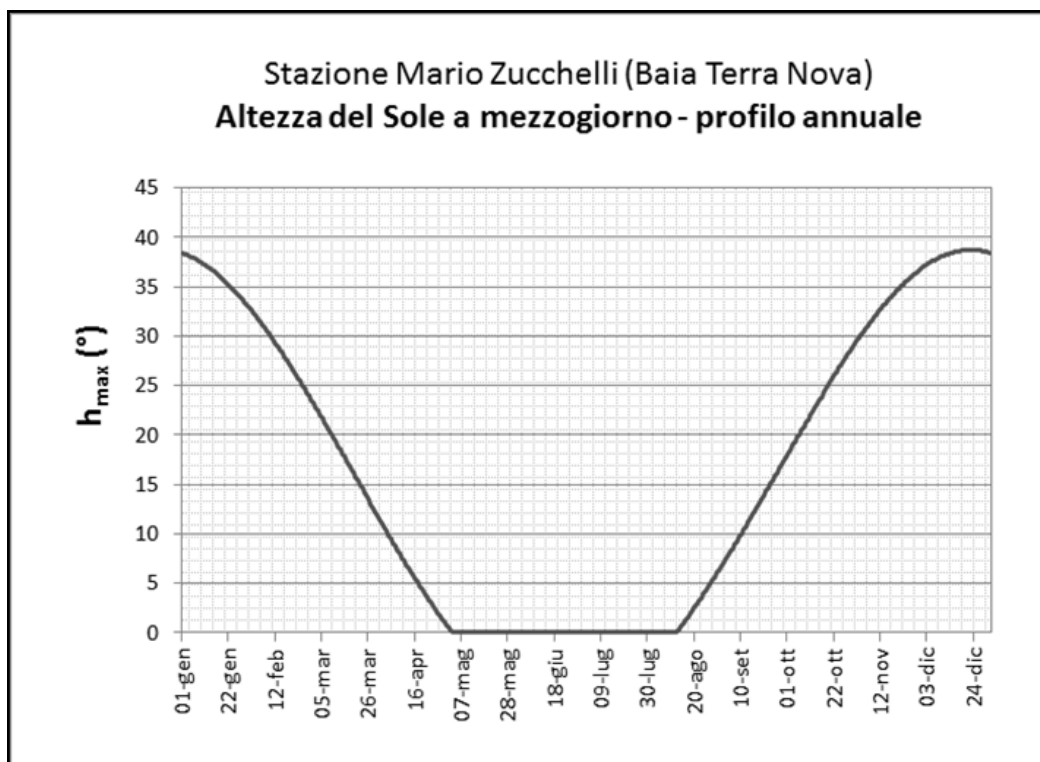


Figura 8 – Altezza del sole a mezzogiorno nel corso dell’anno alla Stazione Mario Zucchelli (Baia Terra Nova, Antartide). L’elevazione massima si verifica a mezzogiorno solare del 21 dicembre ed è pari a 38° gradi circa. Nel corso dell’anno l’elevazione a mezzogiorno varia fra il valore appena indicato e il valore nullo, che si verifica nel periodo dal 3 maggio al 10 agosto, quando il Sole è sempre al di sotto dell’orizzonte.

Come già accennato, la centralina di acquisizione meteo è stata programmata per registrare le misure delle irradianze diretta normale  $I_{bn}$ , globale orizzontale  $I$  e diffusa orizzontale  $I_d$ ; in realtà le tre grandezze sono legate dalla relazione:

$$I = I_{bn} \cos \vartheta_z + I_d \quad [1]$$

per cui ciascuna di esse può essere calcolata a partire dalle restanti due. La disponibilità delle tre misure rende pertanto possibile il controllo sulla correttezza delle singole misurazioni (vedi oltre: criteri di validazione, al punto 2.2.1). Nell’equazione precedente,  $\vartheta_z$  è l’angolo (detto *zenitale*) che la direzione di provenienza dei raggi solari forma con la normale al piano orizzontale della località; per definizione, esso è complementare all’elevazione solare e varia con continuità nel corso della giornata a causa del movimento del Sole sulla volta celeste. Fissati posizione della località (latitudine e longitudine) e giorno dell’anno, l’angolo zenitale si calcola in funzione dell’ora del giorno (vedi appendice A.3), per cui la conoscenza esatta dell’istante di acquisizione è essenziale per l’applicazione della equazione [1]. Il prodotto della DNI ( $I_{bn}$ ) per il coseno dell’angolo zenitale non è altro che l’irradianza diretta, riferita non già al piano normale bensì a quello orizzontale, per la quale nel testo si utilizzerà il simbolo  $I_b$ :

$$I_b = I_{bn} \cos \vartheta_z \quad [2]$$

L'equazione prima indicata si traduce allora nella seguente relazione fra le tre irradianze globale, diretta e diffusa, tutte riferite alla giacitura orizzontale<sup>2</sup>:

$$I = I_b + I_d \quad [1b]$$

In alternativa, l'equazione [1] può essere usata per controllare l'impostazione dell'ora con cui il *datalogger* della centralina solarimetrica marca le registrazioni delle misure. Il controllo si effettua confrontando per ciascun record le due quantità seguenti:

$(I_{bn})_{mis}$                     ossia la DNI così come risulta dalla misura;

$(I_{bn})_{calc} = \frac{I - I_d}{\cos \mathcal{G}_z}$             ossia la DNI calcolata a partire dalle misure della GHI ( $I$ )  
e della Dif. HI ( $I_d$ ).

Poiché l'angolo zenitale dipende dal tempo, l'eventuale registrazione errata dell'ora di acquisizione renderebbe il valore calcolato della DNI manifestamente discosto da quello misurato (si veda la Figura 9). Va precisato che in tutte le formule che coinvolgono i parametri astronomici, compreso l'angolo zenitale, è necessario ricorrere all'*ora* (o *tempo*) *solare vera*, la quale differisce dall'*ora media* utilizzata negli orologi che regolano per convenzione la vita umana e, ovviamente, anche nella registrazione delle misure. L'*ora solare* si computa stabilendo come istante di mezzogiorno – ovvero le 12:00:00 – il momento in cui il Sole transita nel piano meridiano della località. Il passaggio fra i due riferimenti orari (medio e solare vero) deve tener conto sia dello scostamento temporale dovuto alla differenza di latitudine fra il meridiano della località in esame e quello del fuso orario preso a riferimento, sia della circostanza che il Sole attraversa il piano meridiano di una data località a intervalli variabili da un giorno all'altro e dunque, non esattamente uguali a 24 ore (appendice A.1). La formula che lega l'ora solare vera e quella media è pertanto la seguente:

$$t_S = t_{GMT} + \xi \lambda + E_t \quad [3]$$

in cui:

-  $t_{GMT}$  è il *tempo medio di Greenwich* (GMT); il GMT è in ritardo di un'ora esatta rispetto al fuso orario adottato invece per l'Europa Centrale (Central European Time), in cui è compresa l'Italia (per i dettagli, vedasi l'appendice A.1);

$\lambda$  è la longitudine, riferita a Greenwich, positiva se la località è a Est. Per la Stazione Mario Zucchelli è:

$$\lambda_{MZS} = +164.12^\circ$$

<sup>2</sup> Nel testo ci si attiene alla seguente convenzione riguardo alla scelta dei simboli per le irradianze: tutte sono indicate con la lettera maiuscola  $I$  e l'eventuale apposizione di pedice serve poi a distinguerne il tipo (globale, diretta, diffusa o extra-atmosferica) e la giacitura a cui sono riferite (orizzontale o normale). In particolare, nessun pedice è usato quando ci si riferisce all'irraggiamento globale o al piano orizzontale; il pedice 'b' sta invece per irraggiamento diretto (da  $b = beam$ ), 'd' per diffuso, 'o' per extra-atmosferico e, infine, 'n' per normale. Così, ad esempio, il simbolo  $I$ , privo di qualunque pedice, sta per l'irradianza globale orizzontale (GHI),  $I_b$  per l'irradianza diretta orizzontale,  $I_{bn}$  per l'irradianza diretta (su piano) normale (DNI) e  $I_{on}$  per quella extra-atmosferica normale.

- $\xi$  è il fattore di conversione fra longitudini (angoli) e tempi, in base all'equivalenza:  
 $360^\circ \equiv 2\pi \equiv 24h$

Se ad esempio  $\lambda$  è espresso in gradi e si vuole il prodotto  $\xi\lambda$  in minuti, allora  $\xi = 4$  (analogamente, per ottenere il risultato in ore, occorre usare  $\xi = 1/15$ );

- $E_t$  è la correzione – detta *equazione del tempo* – che tiene conto degli anticipi e ritardi dei passaggi del Sole dal piano meridiano.  $E_t$  varia nel corso dell'anno fra -15 e +15 minuti circa (appendice A.1).

Poiché i settaggi della centralina sono stati effettuati in Italia prima della spedizione in Antartide, il *datalogger* è stato impostato secondo il fuso orario dell'Europa Centrale. La differenza di un'ora di quest'ultimo dal tempo medio di Greenwich si traduce in  $15^\circ$  di longitudine, per cui l'equazione [3] si può scrivere alternativamente nel modo seguente:

$$t_S = t_{CENTR} + \xi (\lambda_{MZS} - 15^\circ) + E_t \quad [4]$$

in cui con  $t_{CENTR}$  è indicata l'ora del datalogger. Nella Figura 9 sono riportati i grafici a dispersione della *DNI calcolata* vs *DNI misurata*, in cui il termine  $\cos \vartheta_z$  è calcolato una prima volta in funzione del tempo solare vero espresso dalla formula [4], la seconda senza apportare al parametro temporale alcuna correzione.

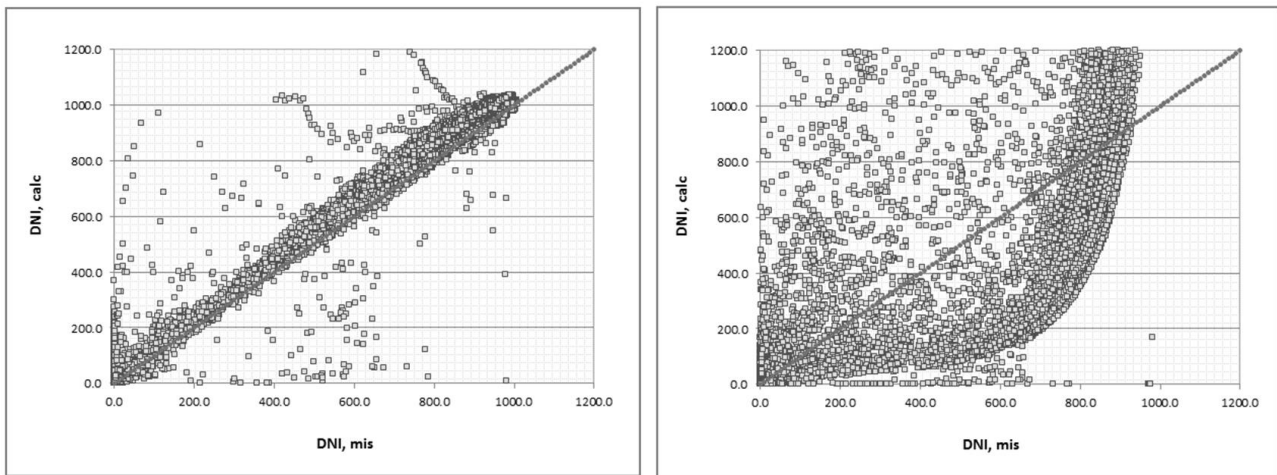


Figura 9 – Diagrammi a dispersione delle *DNI calcolate* ( $DNI, calc$ ) vs *misurate* ( $DNI, mis$ ). Le *DNI* sono irradianze espresse in  $W/m^2$ . A sinistra, la *DNI calcolata* è ottenuta usando nelle formule le ore solari vere; a destra, usando le ore medie degli orologi convenzionali senza apportarvi alcuna correzione. Nel primo caso, corretto, le coppie di valori tendono a disporsi sulla bisettrice del grafico di equazione:  $DNI, calc = DNI, mis$ .

## 2.2.1 Validazione dei dati di misura

Come si è detto, il data-base delle misure è costituito da 18709 record, corrispondenti a un periodo di acquisizione di circa 65 giorni. Di questi, 18547 sono relativi a intervalli diurni.

Prima che siano utilizzati per qualunque scopo, un insieme di dati di misura dev'essere validato. Una buona progettazione ed esecuzione delle misurazioni permette certamente di eliminare la maggior parte delle fonti di errori *sistematici*, ma a questi ultimi si aggiungono inevitabilmente quelli *casuali*, i quali, essendo intimamente connessi al processo stesso della misurazione, non sono mai del tutto eliminabili preventivamente. La validazione dei dati acquisiti ha pertanto lo scopo d'individuare quei valori che risultassero errati ed escluderli dall'elaborazione successiva.

Nel nostro caso i criteri di validazione imposti sono i seguenti:

- a.  $0 < I < I_o$
- b.  $0 < I_d \leq 0.8 I_o$
- c.  $I - I_b \leq 0.8 I_o$
- d.  $0 \leq I_{bn} < I_{on}$
- e.  $I_d \leq I$
- f.  $I_b < I$
- g.  $I_b + I_d < I_o$
- h. **se:**  $I > 0.6 I_o$  **allora:**  $I_d \leq 0.8 I$
- i. **se:**  $I > 0.6 I_o$  **allora:**  $I_b \geq 0.2 I$
- j. **se:**  $I_b + I_d > 0.6 I_o$  **allora:**  $I_d \leq 4 I_b$
- k. **se:**  $I < 0.2 I_o$  **allora:**  $I_d \geq 0.9 I$
- l. **se:**  $I < 0.2 I_o$  **allora:**  $I_b \leq 0.1 I$
- m. **se:**  $I_b + I_d < 0.2 I_o$  **allora:**  $9 I_b \leq I_d$
- n.  $I_b + I_d = I$

Nelle formule precedenti il significato dei simboli è il seguente:

- $I_{on}$  irradianza extra-atmosferica normale (ENI);
- $I_o$  irradianza extra-atmosferica orizzontale (EHI);
- $I$  irradianza globale orizzontale (GHI): si tratta di quella **misurata**;
- $I_{bn}$  irradianza diretta normale (DNI) – **misurata**;
- $I_d$  irradianza diffusa orizzontale (Dif. HI) – **misurata**;
- $I_b$  irradianza diretta orizzontale, però **calcolata** come:  $I_b = I_{bn} \cdot \cos(\vartheta_z)$ ;
- $\vartheta_z$  angolo zenitale.

I criteri sopra elencati hanno diversa origine. Alcuni discendono dalla definizione stessa delle grandezze coinvolte: ad esempio, il punto (**n**) è la riscrittura del legame già visto [1b] fra le tre irradianze globale, diretta e diffusa. Altri criteri invece si rifanno a limitazioni fisiche, come ad esempio il punto (**a**), in base al quale l'irradianza globale al suolo (GHI) debba essere sempre inferiore a quella extraatmosferica (entrambe riferite al piano orizzontale). Il criterio (**h**) traduce la circostanza riscontrata in natura secondo cui quanto più il cielo è sereno (ossia maggiore è il rapporto fra GHI e ENI), tanto più piccola è – nel computo dell'ammontare globale – la frazione diffusa rispetto alla diretta. I fattori 0.6 e 0.8 sono scelti in base al controllo visivo dei grafici di dispersione e in modo da eliminare la maggior parte delle misure anomale e allo stesso tempo evitare il rischio di scartare misure che risultano accettabili pur trovandosi nella zona di border-line. Il criterio (**i**) è lo stesso appena visto, ma applicato alla coppia di grandezze ( $I, I_b$ ): infatti, poiché  $I, I_{bn}$  e  $I_d$  sono tutte grandezze misurate, devono essere testate separatamente. Analoga origine è alla base della formulazione dei restanti criteri semi-quantitativi, tutti mutuati dalla letteratura scientifica /6/.

I test di validazione servono a controllare l'accuratezza (= *esattezza*) dei dati di misura: dati inesatti, che non superano i test, sono dichiarati errati ed esclusi dall'elaborazione. Nondimeno, dati esatti possono essere *imprecisi*: infatti, come si è detto, un dato di misura è comunque affetto da una imprecisione la cui entità dipende da diversi fattori: insensibilità dello strumento, disturbi casuali ecc. In teoria, indicato con  $\Delta$  l'intervallo d'imprecisione ammissibile, una misura  $m$  è accettabile se cade nell'intervallo di ampiezza  $\Delta$  centrato sul valore *vero*  $v$ :

$$m \in v \pm \frac{\Delta}{2}$$

ma poiché il valore vero  $v$  non è noto – altrimenti la stessa misurazione sarebbe superflua! –, si tratterà di trasformare i precedenti criteri, di volta in volta, in maniera opportuna. Ad esempio, la condizione (**e**):

$$I_d \leq I$$

si traduce in:

$$I_d - \frac{\Delta I_d}{2} \leq I + \frac{\Delta I}{2} \quad [5]$$

dove  $\Delta I_d$  e  $\Delta I$  sono rispettivamente gli intervalli d'imprecisione ammessi per le irradianze orizzontali diffusa e globale, da stabilire a priori. La Figura 10 illustra graficamente il criterio appena esposto.

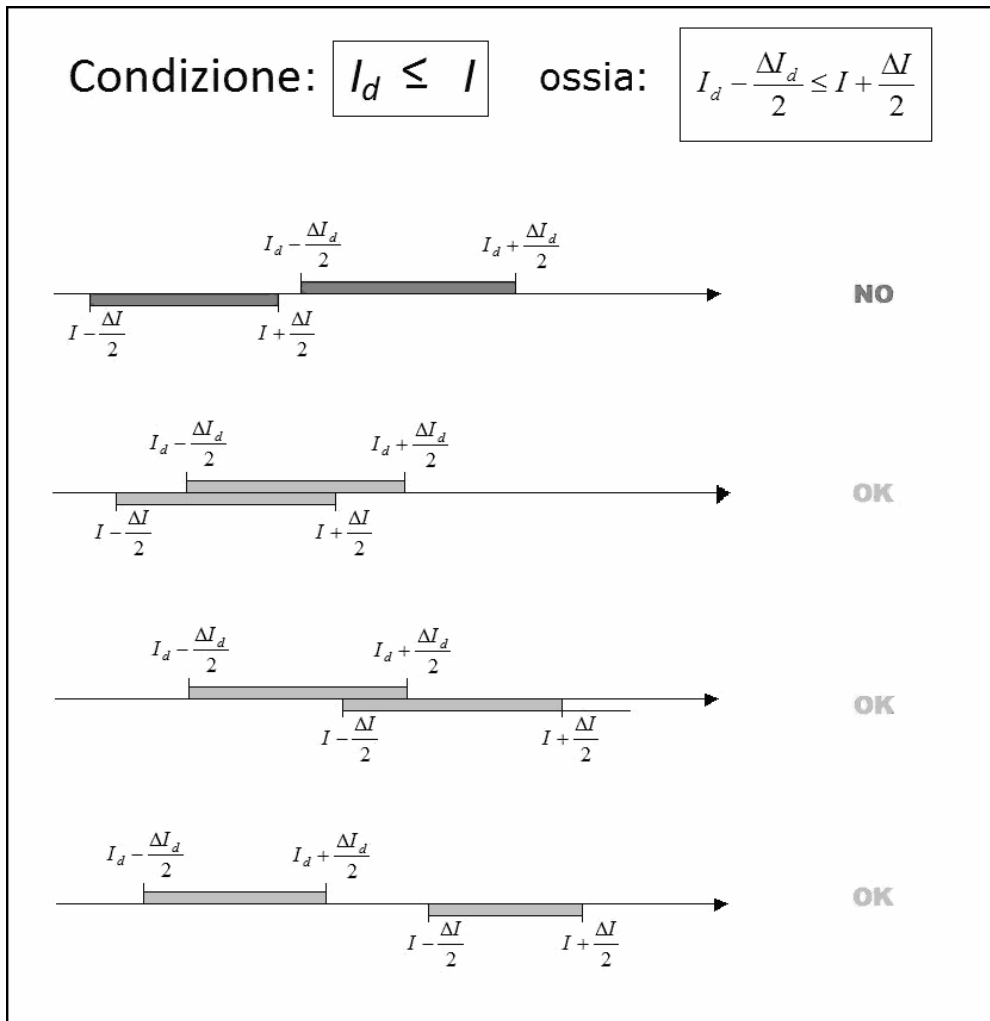


Figura 10 – Esempio di criterio di validazione delle misure:  $I_d \leq I$ . Gli intervalli d'imprecisione per le irradianze orizzontali globale e diffusa sono rispettivamente  $I \pm \Delta I / 2$  e  $I_d \pm \Delta I_d / 2$ . Con riferimento alle possibili posizioni reciproche, si dànno pertanto quattro casi, di cui solo il primo è incompatibile con il criterio  $I_d \leq I$ ; gli altri tre si traducono collettivamente nella condizione:  $I_d - \frac{\Delta I_d}{2} \leq I + \frac{\Delta I}{2}$ .

Come ulteriore esempio, il criterio  $I = I_b + I_d$ , che trattandosi di un'uguaglianza non potrà essere mai essere esattamente verificata con valori provenienti da misure, si traduce nella richiesta che siano congiuntamente soddisfatte le due disuguaglianze seguenti:

$$\left( I_{bn} - \frac{\Delta I_{bn}}{2} \right) \cos \vartheta_z + \left( I_d - \frac{\Delta I_d}{2} \right) \leq \left( I + \frac{\Delta I}{2} \right)$$

$$\left( I_{bn} + \frac{\Delta I_{bn}}{2} \right) \cos \vartheta_z + \left( I_d + \frac{\Delta I_d}{2} \right) \geq \left( I - \frac{\Delta I}{2} \right)$$

[6]



Restano da stabilire le ampiezze per le imprecisioni ammissibili nei test. Poiché nelle misure d'irradianza notturne, che teoricamente dovrebbero essere nulle, si riscontrano valori (quasi) sempre compresi fra  $-10 W/m^2$  e  $+10 W/m^2$ , appare ragionevole assumere il seguente intervallo:

$$\Delta I = \Delta I_{bn} = \Delta I_d = 20 W/m^2 \quad [7]$$

uguale per tutte e tre le irradianze.

Ecco il quadro riassuntivo dei dati validati:

numero totale di registrazioni (record):	18709
numero di record "diurni":	18545
numero di record "diurni" e validi:	10641

## 2.2.2 Correlazione DNI = f (GHI)

I 10641 record di terne (GHI, DNI, Dif.HI) diurne e valide, acquisite con frequenza pari a  $1/5'$  e relative a un periodo di 65 giorni, non possono ritenersi sufficienti per estrapolare una stima dell'irraggiamento in Antartide per il periodo che si estende per l'intero anno solare di 365 giorni, né tantomeno sono sufficienti per la caratterizzazione pluriennale dell'esposizione solare al suolo in Antartide. Però forniscono un campione adeguato se lo scopo è quello di modellare il fenomeno radiativo mediante correlazioni fra le tre irradianze. In particolare, in questo studio riveste particolare interesse la relazione fra la DNI e la GHI:

$$\text{DNI} = \text{funzione (GHI)}$$

L'utilità dell'espressione precedente risiede nel fatto che le numerose spedizioni protrattesi in Antartide hanno permesso di acquisire serie storiche pluri-decennali di GHI orarie sia presso Stazione Mario Zucchelli, sia presso le stazioni meteo installate in siti sparsi intorno a Mario Zucchelli. La disponibilità dei dati GHI permette allora di ricavare la DNI mediante la relazione precedente e conseguentemente di caratterizzare in maniera compiuta la zona della base Mario Zucchelli e i siti antartici satelliti anche sotto il profilo dell'irraggiamento solare diretto.

In letteratura sono attestate numerose correlazioni fra le diverse componenti della radiazione, stabilite in diverse epoche, per diverse aree geografiche, per diverse condizioni meteo e climatiche e – infine – per diversi intervalli di tempo (orari, giornalieri ecc.): Erbs, Liu e Jordan, Collaires-Pereira e Rabl, Iqbal, Reindl ecc.<sup>3</sup> Storicamente, la più studiata è la dipendenza della frazione diffusa  $k$  dal coefficiente di trasmissione globale  $K_T$  :

$$k = f(K_T)$$

---

<sup>3</sup> Per una rassegna, ancorché incompleta, vedasi /2,3,4/

Il *coefficiente di trasmissione globale dell'atmosfera* è definito dal rapporto fra l'irradianza globale al suolo e quella extraatmosferica, entrambe riferite al piano orizzontale:

$$K_T = \frac{I}{I_o} = \frac{GHI}{EHI} \quad [8]$$

mentre la *frazione della radiazione diffusa orizzontale rispetto alla globale* è data dal rapporto:

$$k = \frac{I_d}{I} = \frac{D_{diff} HI}{GHI} \quad [9]$$

Nel nostro caso, il *coefficiente di trasmissione per la diretta normale*  $K_{bn}$  – che interessa in primo luogo per il calcolo della DNI:

$$K_{bn} = \frac{I_{bn}}{I_{on}} = \frac{DNI}{ENI} \quad [10]$$

si ricaverà da  $K_T$  e  $k$  mediante la relazione:

$$K_{bn} = K_T(1-k) \quad [11]$$

Un'ottima correlazione  $k = f(K_T)$  è quella stabilita da Boland-Ridley /5/:

$$k = \frac{1}{1 + e^{\alpha + \beta K_T}} \quad [12]$$

per una molteplicità di motivi:

- si tratta della *curva logistica*, adoperata per descrivere molti fenomeni fisici e attività umane, caratterizzati da una fase iniziale di rapida crescita, seguita da una fase di saturazione del fenomeno;
- Boland e Ridley forniscono una giustificazione teorica per l'applicazione ai fenomeni di attenuazione radiativa in atmosfera;
- è elegante e compatta, infatti dipende solo da due parametri:  $\alpha$  e  $\beta$ , e si applica in tutto l'intervallo di definizione di  $K_T$  (ossia  $0 \div 1$ )<sup>4</sup>;
- è versatile: i due parametri  $\alpha$  e  $\beta$  si possono stimare di volta in volta per adattare la formula alle differenti situazioni geografiche (si veda più avanti, Figura 11);
- è pratica, perché il rapporto fra DNI e GHI si ricava agevolmente e assume una forma altrettanto compatta:

$$\frac{K_{bn}}{K_T} = \frac{1}{1 + e^{-\alpha - \beta K_T}} \quad [13]$$

<sup>4</sup>

Per confronto, la formula di Erbs utilizza invece otto parametri distribuiti in tre intervalli di applicabilità di  $K_T$  ( $0 \div 0.22$ ,  $0.22 \div 0.8$  e  $0.8 \div 1$ ), in ciascuno dei quali è proposto un diverso legame di tipo polinomiale.

A questo punto va segnalato che ci sono due controindicazioni, non trascurabili, al tentativo di ottenere una correlazione diretta fra i due parametri  $K_T$  e  $k$  o – equivalentemente – fra  $K_T$  e  $K_{bn}$ :

- 1) In primo luogo, il grafico di dispersione delle coppie di valori  $(K_T, k)$  mostra una variabilità eccessiva dei dati intorno all'ipotetica curva di correlazione (si veda Figura 11, a sinistra). Ciò è inevitabile se si considera che il fenomeno dell'attenuazione radiativa in atmosfera dipende da troppe altre variabili meteorologiche, tutte imprevedibili e difficilmente misurabili o stimabili, quali l'umidità, il vento, la temperatura ecc. Va detto pure che di solito queste correlazioni sono studiate con i dati medi orari, per i quali la variabilità risulta ovviamente meno accentuata rispetto alle misure adottate in questo studio, effettuate ogni 5 minuti. Le medesime considerazioni appena fatte valgono per il grafico a dispersione che considera la coppia di parametri  $(K_T, K_{bn})$  (Figura 11, al centro).
- 2) In secondo luogo, c'è una difficoltà operativa. Di solito la stima dei parametri di regressione si effettua con il metodo dei minimi quadrati e risulta computisticamente agevole se la correlazione proposta è lineare. Pertanto, affinché il metodo possa applicarsi ai parametri  $\alpha$  e  $\beta$ , occorre trasformare la [12] in maniera da rendere lineare l'espressione che contiene i parametri da stimare per regressione. Si ottiene:

$$\ln\left(\frac{1}{k} - 1\right) = \alpha + \beta K_T \quad [14]$$

In questo modo però il metodo determina i valori di stima dei parametri che rendono minima l'espressione:

$$\sum_i \left[ \ln\left(\frac{1}{k_i} - 1\right) - (\alpha + \beta K_{T,i}) \right]^2$$

(l'indice  $i$  è relativo all'insieme di tutte le misure). Non sempre, però, i valori così definiti sono gli stessi che renderebbero minima la sommatoria che più interessa, ossia:

$$\sum_i [k_{i,mis} - k_{i,stima}]^2 = \sum_i \left[ k_i - \frac{1}{1 + e^{\alpha + \beta K_{T,i}}} \right]^2$$

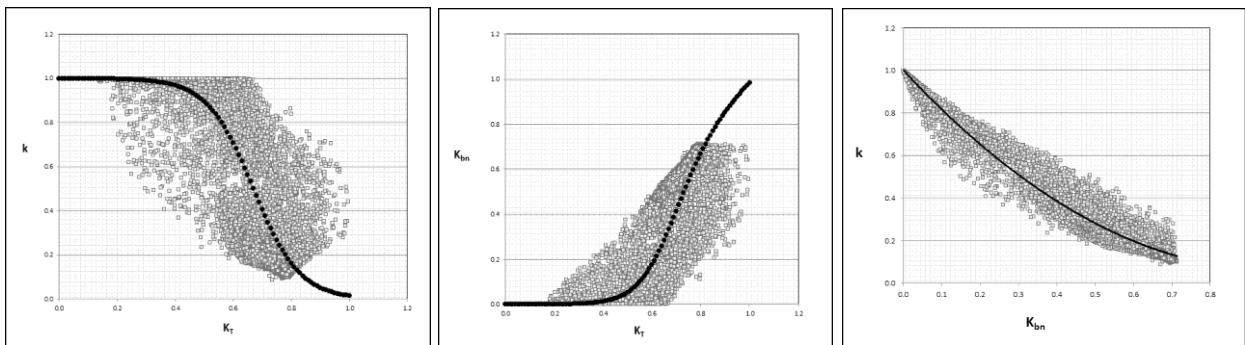


Figura 11 – Tipici grafici a dispersione fra i coefficienti di trasmissione delle irradiazioni. Il grafico a destra mette in relazione la coppia  $(K_T, k)$ : i punti rappresentano le misure, la linea nera è una possibile curva d'interpolazione, come ad esempio la curva logistica proposta da Boland-Ridley. Gli altri due grafici a confronto mostrano le dispersioni della coppia  $(K_T, K_{bn})$  [al centro] e  $(K_{bn}, k)$  [a destra].

Osservando i diagrammi, si vede invece che quello che mette in relazione i parametri della coppia  $(K_{bn}, k)$  si presta meglio allo scopo in quanto i punti di misura si addensano più fortemente su di una curva approssimabile con un polinomio al più di secondo grado, oppure con una potenza. Nel primo caso, il polinomio candidato assume l'aspetto:

$$k = a K_{bn}^2 + b K_{bn} + c \quad [15]$$

In condizioni d'irraggiamento diretto nullo:  $K_{bn} = 0$ , l'irraggiamento globale è costituito interamente dalla componente diffusa, di conseguenza la frazione diffusa dev'essere unitaria:  $k = 1$ . Pertanto, nella [15] il termine  $c$  è noto a priori e vale 1. Tenendo conto di questa assunzione e utilizzando il metodo dei minimi quadrati, la regressione sulla parabola [15] produce le seguenti stime (Figura 12):

- stima del parametro:  $a = 0.994$
- stima del parametro:  $b = -1.93$
- coefficiente di determinazione:  $R^2 = 0.98$

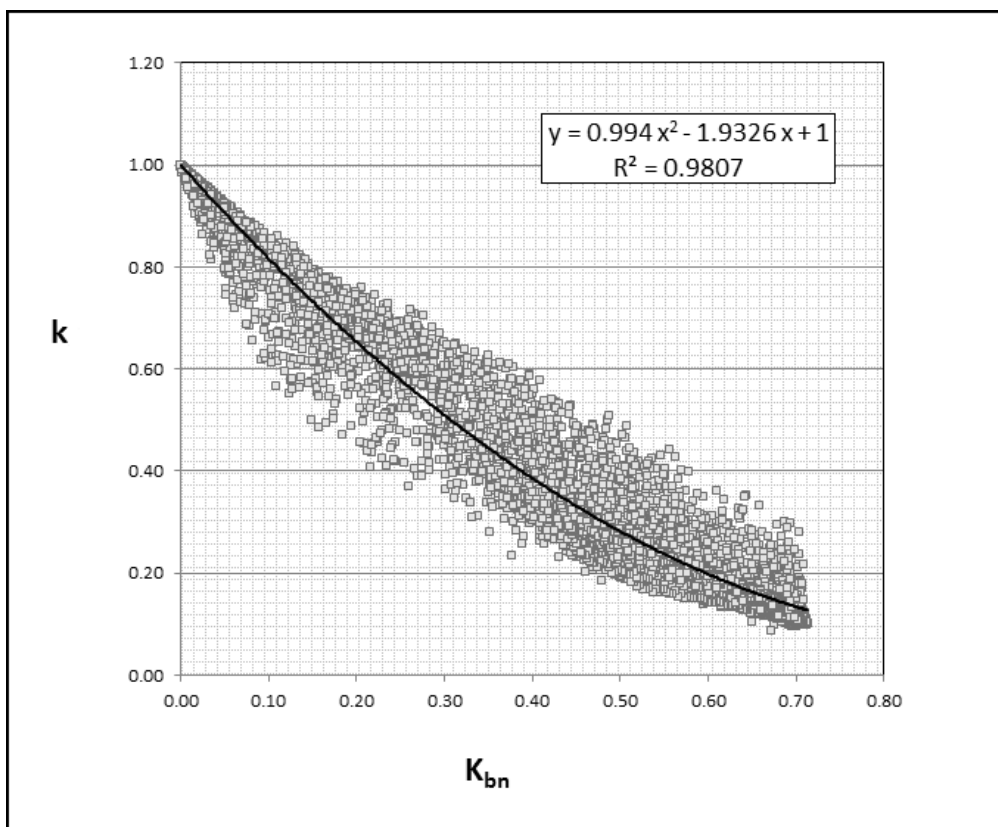


Figura 12 – Grafico a dispersione del coefficiente di trasmissione della diretta normale ( $K_{bn}$ ) e della frazione della diffusa ( $k$ ). Il grafico è ottenuto usando le misure di GHI e DNI alla Stazione Mario Zucchelli nel periodo nov-2012 / gen-2013. Nel grafico è disegnata anche la curva d'interpolazione proposta (parabola) e sono riportati i corrispondenti i valori dei parametri stimati per regressione.

Va precisato che poiché lo scopo di questo studio è la ricerca di un legame diretto fra DNI e GHI, i tre parametri coinvolti  $K_T$ ,  $K_{bn}$  e  $k$  sono derivati tutti dalle sole misure di DNI e GHI secondo le uguaglianze:

$$K_T = \frac{I_{mis}}{I_o} = \frac{GHI_{mis}}{EHI}$$

$$K_{bn} = \frac{I_{bn,mis}}{I_{on}} = \frac{DNI_{mis}}{EHI}$$

$$k = \frac{I_{mis} - I_{bn,mis} \cdot \cos \mathcal{G}_z}{I_{mis}} = \frac{GHI_{mis} - DNI_{mis} \cdot \cos \mathcal{G}_z}{GHI_{mis}}$$

Non si tiene conto, cioè, nel calcolo di  $k$ , delle effettive misure dell'irradianza diffusa:

$$k = \frac{I_{d,mis}}{I_{mis}} = \frac{(D_{diff} HI)_{mis}}{GHI_{mis}}$$

ma, stante il legame [1] fra le tre irradianze  $I$ ,  $I_{bn}$  e  $I_d$  e avendo i dati di misura superato i test di validazione, e in particolare il criterio (**n**), le due formule possibili per  $k$  conducono allo stesso risultato a meno dell'imprecisione ammessa nei dati di misura validati.

Anche tenendo conto del legame [11] che sussiste fra i tre coefficienti di trasmissione  $K_T$ ,  $K_{bn}$  e  $k$ , va detto che non vi è la possibilità di ricavare dal modello [15] in maniera univoca l'espressione esplicita per calcolare la DNI a partire dai dati di GHI (invece il viceversa, ossia il calcolo della GHI dalla DNI, si ottiene agevolmente). D'altra parte, non il legame parabolico [15] fra  $k$  e  $K_{bn}$ , cui qui si è fatto ricorso come mero espediente di calcolo, bensì la formulazione di Boland-Ridley, con le due equazioni [12] e [13], modella al meglio il fenomeno della radiazione solare al suolo e i legami fra i coefficienti di trasmissione che lo descrivono. Perciò, per tradurre la correlazione parabolica [15] nelle formule di Boland-Ridley, occorre riportare su di un riferimento cartesiano di ascissa  $K_T$  e ordinata  $k$ , sia la curva  $k = f(K_T)$  ottenuta per tabellazione dall'espressione polinomiale (parabolica) [15], sia le curve [12] di Boland-Ridley con differenti coppie di parametri  $(\alpha, \beta)$ ; e stimare poi questi ultimi per regressione. Procedendo in questo modo si ottiene:

$$\begin{aligned} \alpha &= -9.18 \\ \beta &= 14.28 \end{aligned} \tag{16}$$

che costituiscono i coefficienti di Boland-Ridley qui cercati per l'Antartide (per inciso, il coefficiente di determinazione per quest'ultimo caso risulta essere:  $R^2 = 0.88$ ). La Figura 13 riporta i grafici definitivi di dispersione fra i tre coefficienti ( $K_T$ ,  $K_{bn}$ ,  $k$ ) e le curve d'interpolazione del modello messo a punto in questo studio.

Per confronto, nelle figure sono state aggiunte le curve del modello di Boland-Ridley con i valori dei parametri proposti dagli stessi autori per il continente europeo. Si può notare che per valori relativamente piccoli di  $K_T$  (ossia per condizioni di cielo coperto), in Antartide la componente diffusa è più accentuata rispetto all'Italia, e ciò si spiega con la presenza della neve che riflette moltissimo verso gli strati bassi dell'atmosfera, i quali contribuiscono significativamente

all'aumento di diffusa. Invece per valori elevati di  $K_T$  (cielo sereno) la situazione s'inverte: la frazione della diffusa è inferiore in Antartide rispetto all'Europa e, per complemento, l'irraggiamento diretto è relativamente più grande. Difatti, in condizioni serene la (maggiore o minore) limpidezza dell'atmosfera dipende essenzialmente da due fattori: il carico di aerosol e la quantità di umidità presenti; orbene, in Antartide, entrambi i fattori sono ridotti: l'aria è pressoché pulita e l'umidità quasi del tutto assente. Tutto ciò è quantificato nel valore basso del *fattore di torbidità di Linke*, che modula la trasmissione della radiazione diretta nello strato atmosferico che ricopre il pianeta: i nostri dati di DNI a Stazione Mario Zucchelli danno  $T_L = 1.75$ , mentre valori tipici per giornate terse in Italia, durante la stagione più favorevole, ossia l'inverno, sono  $T_L = 2 \div 3$ .

Come si vedrà più avanti, anche l'ammontare annuo di DNI in Antartide è significativamente più grande rispetto alla regione italiana; in questo caso, oltre ai motivi appena spiegati, si aggiunge il fatto che, rispetto all'Italia, in Antartide è molto più grande il numero annuo di ore serene (ossia con  $K_T$  grandi), e corrispondentemente grande il numero di ore con DNI elevate che contribuiscono alla somma annua.

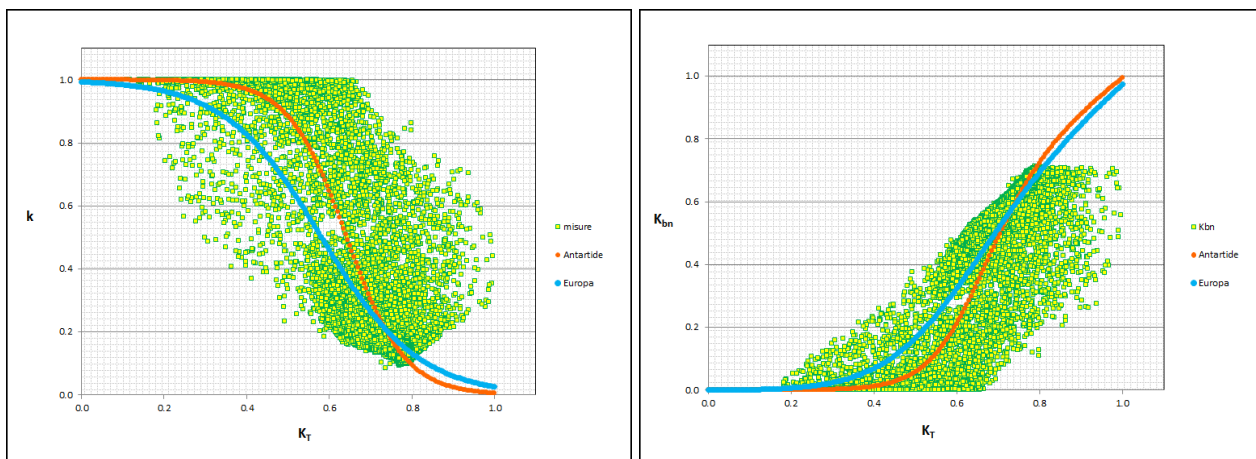


Figura 13 – Grafici a dispersione con le curve d'interpolazione definitive secondo il modello Boland-Ridley. I dati di misura sono rappresentati con punti di colore verde-giallo. Le misure utilizzate sono la GHI e la DNI della Stazione Mario Zucchelli nel periodo nov-2012 / gen-2013. Per confronto, oltre alle curve di Boland-Ridley ricavate in questo studio per l'Antartide ( $\alpha = -9.18$ ,  $\beta = 14.28$ ) [colore rosso], sono disegnate anche quelle proposte dai due autori per i dati di irradianza misurati in Europa [colore celeste].

Messo a punto un qualunque modello con un insieme di dati acquisiti mediante misurazione, occorre poi confrontare le misure con le corrispondenti stime e valutare se l'entità degli scostamenti non è tale da invalidare la bontà del modello proposto. A questo scopo sono utili alcuni indicatori statistici. Il primo di questi, detto Men Bias Error (MBE), è semplicemente la differenza fra la media delle stime e quella delle misure. Nel nostro caso è:

$$MBE = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (I_{bn,i,s} - I_{bn,i,m}) = 14.6 \text{ W/m}^2 \quad [17a]$$

Nell'espressione precedente,  $N = 10641$  è il numero totale delle coppie (*misura, stima*) dei dati; il pedice '*i*' si riferisce alla *i*-esima coppia, mentre '*m*' ed '*s*' rispettivamente alle misure e alle

stime, queste ultime calcolate mediante la [13] con i valori  $\alpha, \beta$  dati dalle [16]. In questo caso il valore basso dell'MBE significa che misure e stime si compensano in media. Però un basso (o, al limite, nullo) MBE non esclude la possibilità che ci siano scarti anche significativi fra misure e stime, eventualmente in numero non trascurabile, sia di un segno sia di quello opposto, tali da compensarsi a vicenda. Per disporre di un indice di scostamento che tenga conto di questa possibilità, è utile ricorrere anche al calcolo del cosiddetto Mean Absolute Error (MAE), che in questo caso dà:

$$MAE = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N |I_{bn,i,c} - I_{bn,i,m}| = 117.5.7 \text{ W/m}^2 \quad [17b]$$

o, in termini relativi:

$$\frac{MAE}{\bar{I}_{bn,m}} = 0.227 = 22.7\% \quad [17c]$$

dove è stato indicato con  $\bar{I}_{bn,m}$  la media delle misure di DNI, che risulta:

$$\bar{I}_{bn,m} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N I_{bn,i,m} = 516.7 \text{ W/m}^2 \quad [17d]$$

Un altro indice di scostamento molto usato è il Root Mean Squared Error (RMSE) il quale, rispetto al precedente MAE, considera i quadrati degli scarti anziché i valori assoluti, cioè al fine di attribuire nella sommatoria un peso maggiore agli scarti più elevati. Abbiamo:

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (I_{bn,i,c} - I_{bn,i,m})^2} = 171.8 \text{ W/m}^2 \quad [17e]$$

Un ultimo indice può ottenersi confrontando i valori medi di DNI di tutte le misure e dei corrispondenti valori stimati. Poiché la media delle stime è:

$$\bar{I}_{bn,m} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N I_{bn,i,c} = 531.4 \text{ W/m}^2 \quad [17f]$$

si ottiene:

$$\frac{\bar{I}_{bn,m} - \bar{I}_{bn,m}}{\bar{I}_{bn,m}} = \frac{531.4 \text{ W/m}^2 - 516.7 \text{ W/m}^2}{516.7 \text{ W/m}^2} = \frac{14.7}{516.7} = +0.028 = +2.8\% \quad [17g]$$

Ovviamente, i valori degli indicatori appena riportati risentono della complessità della fenomenologia della radiazione solare al suolo nelle sue varie componenti. Come già evidenziato sopra, essa dipende da numerosi fattori meteorologici contingenti e di difficile acquisizione ai fini della messa a punto dei modelli. Per di più, va ricordato che in questo studio si è tentato di applicare a dati con frequenza di acquisizione molto ravvicinata – una misurazione ogni 5 minuti – metodi e modelli solitamente sviluppati con riferimento a dati orari, in cui la variabilità insita nel fenomeno è attenuata grazie al più lungo intervallo di misura considerato. Ciò nonostante, i valori degli indici ottenuti sopra sono in linea con quelli che si ottengono in studi analoghi effettuati su dati orari e confortano l'idea che, se lo scopo è di qualificare il sito antartico su base pluriennale, la DNI possa utilmente stimarsi a partire dalla GHI.

### 3 Analisi dei dati di GHI per la stima della DNI media mensile e annuale

La presenza continuativa dell'Italia in Antartide a partire dal 1985, con la costruzione dell'attuale Stazione Mario Zucchelli, nella baia di Terra Nova, ha reso disponibili le serie storiche di numerose grandezze meteorologiche, fra cui l'irradianza globale orizzontale (GHI). Attualmente l'ENEA dispone dei dati pluriennali di misure GHI effettuate sia presso la Stazione Mario Zucchelli, sia in diversi siti intorno alla base, dove sono stati installate le centraline di misurazione della rete dell'Osservatorio Meteo-climatologico.

In particolare, il sito Eneide, che si trova proprio nei pressi della stazione Mario Zucchelli – vi si giunge a piedi in 5 minuti di cammino – ospita una centralina che acquisisce la GHI a partire dal 1987: dapprima con cadenza tri-oraria, poi anche oraria e più recentemente, con frequenza di registrazione al minuto. In questo studio la GHI misurata a Eneide è utilizzata per costruire la serie temporale della DNI presso la stessa località mediante il modello di stima descritto in precedenza. Allo scopo, è stata considerata la serie oraria che copre il periodo 1998-2013, per un totale di 16 anni di dati.

		<b>E n e i d e</b>		ARGOS ID
				7353
<b>INDICATIVO WMO</b>	89662			
<b>LATITUDINE</b>	74° 41' 45.33313" S			
<b>LONGITUDINE</b>	164° 05' 31.83782" E			
<b>ALTITUDINE</b>	91.94 m			
<b>RAGGIUNGIBILE CON</b>	A piedi da Campo Meteo			
<b>TEMPO DI VIAGGIO (andata)</b>	5 min			
<b>MODELLO</b>	Milos 500			
<b>ARCHIVIAZIONE DATI</b>	N° 1 flash eeprom 4 Mb			
<b>TRASMETTITORE ARGOS</b>	Telonics			
<b>SENSORI</b>	Pressione Atmosferica			
	Temperatura			
	Umidità Relativa			
	Velocità e direzione del vento			
	Radiazione solare			
<b>DATA DI AVVIO</b>	Febbraio 1987			
<b>ALTEZZA TRALICCIO</b>	10 m			
<b>ALIMENTAZIONE</b>	N° 4 Pannelli solari Italsolar (40 Watt*4) e 12 batterie al Ni-Cd Sabnife totale 1080 Ah. Regolatore di carica CDC106			
<b>RADIOMODEM</b>	No			

Tabella 1 – Scheda delle caratteristiche della stazione meteo Eneide, presso la base Mario Zucchelli, in Antartide.



Ovviamente, anche i nuovi dati sono stati validati con i criteri già esposti sopra, con la differenza che in questo caso i controlli sono di meno riguardando la sola GHI. Noto il dato orario della GHI, i parametri geografici del luogo e quelli temporali dell'acquisizione, il corrispondente valore orario della DNI è stimato con il ricorso al seguente algoritmo:

0. *input* :  $GHI \rightarrow$
1.  $K_T = \frac{GHI}{EHI} = \frac{GHI}{ENI \cdot \cos \vartheta_z} \rightarrow$
2. *correlazione* :  $K_{bn} = \frac{K_T}{1 + e^{-\alpha - \beta K_T}}$  [modello Boland – Ridley – ENEA/Antartide]  $\rightarrow$
3.  $DNI = K_{bn} \cdot ENI$

Nelle formule precedenti occorrono grandezze già note:  $ENI$  è l'irradianza extraatmosferica normale,  $EHI$  è l'irradianza extraatmosferica orizzontale ( $EHI = ENI \cdot \cos \vartheta_z$ ),  $\vartheta_z$  è l'angolo zenitale e, infine,  $\alpha = -9.18$  e  $\beta = 14.28$  sono i parametri della relazione di Boland-Ridley stimati dall'ENEA per l'Antartide.

Come conseguenza della validazione, i giorni per i quali il numero dei dati orari disponibili è inferiore a 24 sono esclusi dall'elaborazione in quanto non è agevole per essi ricostruire con accuratezza la radiazione giornaliera. Altri dati giornalieri mancano, in corrispondenza dei periodi in cui la stazione meteorologica è stata ferma per manutenzione. Il dato mensile di DNI è comunque calcolato come media dei valori giornalieri di quel mese disponibili, se questi sono almeno 16. Finalmente, il dato annuo si ottiene sommando i 12 valori giornalieri medi mensili, ciascuno moltiplicato per il numero di giorni del mese (31 per gennaio, marzo, maggio, luglio, agosto, ottobre e dicembre; 29 o 28 per febbraio, a seconda che sia bisestile o no; 30 per i restanti mesi).

La sintesi finale della DNI giornaliera media mensile e annua a Eneide, relativa al periodo 1998/2013, è mostrata nella Tabella 2 e illustrata con la Figura 14. Dalla tabella si evince che gli anni 2002 e 2008 sono incompleti di alcuni mesi a causa di periodi di fermo dell'apparecchiatura per manutenzione e riparazione. Inoltre, nei primi due anni esaminati, il 1998 e 1999, sono stati stimati dei valori di DNI annua inverosimilmente bassi. Poiché i valori di DNI sono stati ricavati a partire dalla GHI, è possibile che valori sospetti delle prime derivino da valori errati delle seconde: ciò induce a ipotizzare che il sensore di misura della GHI o qualche parametro della catena di registrazione non fosse correttamente calibrato<sup>5</sup>. I dati archiviati mostrano che misurazioni corrette di GHI riprendono a partire da novembre 1999, con l'avvio delle attività della nuova spedizione estiva (per l'emisfero australe) 1999/2000, con la probabile sostituzione del sensore starato. In conclusione, escludendo dall'analisi i quattro anni appena citati, si constata che la DNI annua a Eneide (Stazione Mario Zucchelli) varia fra il valore minimo di **1816 kWh/m<sup>2</sup>** del 2005 e quello massimo di **2240** del 2013, con media **2027**.

Un'altra considerazione è infine importante. Le condizioni dell'irraggiamento diretto in Antartide sono ancora più favorevoli rispetto alle nostre latitudini se il confronto è effettuato sui singoli mesi. Infatti, in Antartide il contributo all'ammontare annuale è concentrato in pochi mesi, in quanto per buona metà dell'anno il continente si trova completamente al buio a causa della notte polare; mentre in Italia la DNI è ovviamente distribuita con maggiore uniformità in tutti i mesi dell'anno. Ciò fa sì che nei mesi estivi australi, quando la stazione Mario Zucchelli è frequentata e ospita le attività

<sup>5</sup> In tutti gli apparati di misura, i sensori possono stararsi durante il funzionamento prolungato e per questo motivo devono essere ricalibrati periodicamente.

scientifiche, e dunque nel periodo in cui il fabbisogno energetico è effettivamente richiesto<sup>6</sup> e potrebbe essere in parte soddisfatto da un impianto che sfrutti proprio la fonte solare, si raggiungono livelli di DNI medi *giornalieri* anche superiori a **16 kWh/m<sup>2</sup>**, contro i poco meno di **9** riscontrabili sul territorio italiano.

### DNI giornaliera media mensile e annua (kWh/m<sup>2</sup>)

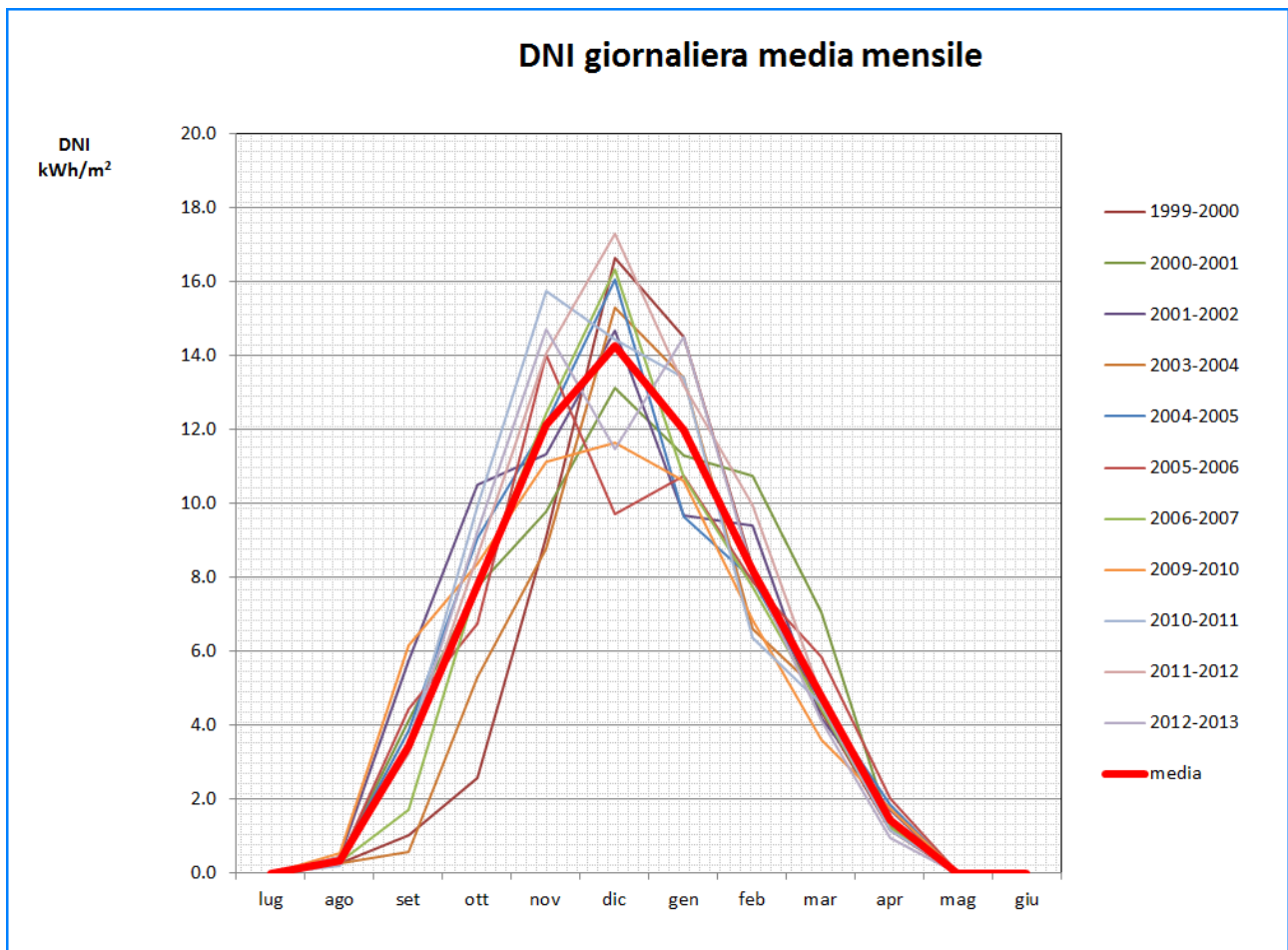
Stima sulla base di misure di GHI

Stazione meteorologica Eneide (c/o Mario Zucchelli)

	gen	feb	mar	apr	mag	giu	lug	ago	set	ott	nov	dic	<b>anno</b>
1998	4.162	1.821	0.608	0.082	0.001	0	0	0.088	0.885	2.239	5.066	5.101	<b>613.4</b>
1999	3.517	1.628	0.522	0.122	0.001	0	0	0.269	1.011	2.558	9.082	16.660	<b>1076.2</b>
2000	14.521	8.264	4.375	1.145	0.003	0	0	0.355	4.109	7.746	9.778	13.129	<b>1939.8</b>
2001	11.306	10.745	7.074	1.252	0.003	0	0	0.418	5.740	10.520	11.333	14.670	<b>2231.4</b>
2002	9.691	9.412	4.187	1.723	0.001	0					12.988		
2003	13.296	11.454	5.282	1.822	0.007	0	0	0.260	0.569	5.292	8.793	15.291	<b>1897.6</b>
2004	13.390	6.611	4.852	1.235	0.000	0	0	0.366	3.856	9.059	12.150	16.076	<b>2064.4</b>
2005	9.632	7.952	4.620	1.836	0.001	0	0	0.338	4.425	6.732	14.041	9.731	<b>1816.4</b>
2006	10.738	7.896	5.860	2.016	0.006	0	0	0.300	1.719	7.801	12.424	16.346	<b>1987.4</b>
2007	10.724	7.751	4.443	1.213	0.005	0	0	0.057	4.588	7.071	14.229	14.574	<b>1978.0</b>
2008	10.627	6.239									13.005	14.789	
2009	12.411	5.533	5.406	1.415	0.007	0	0	0.542	6.165	8.358	11.122	11.649	<b>1913.8</b>
2010	10.611	6.838	3.599	1.757	0.006	0	0	0.207	3.463	9.917	15.768	14.453	<b>2036.6</b>
2011	13.393	6.379	4.577	1.167	0.005	0	0	0.425	3.225	8.564	14.055	17.301	<b>2110.6</b>
2012	13.216	9.968	4.776	1.505	0.002	0	0	0.324	3.380	9.241	14.702	11.463	<b>2099.8</b>
2013	14.494	8.162	4.141	0.957	0.001	0	0	0.226	4.523	8.402	15.818	16.491	<b>2240.2</b>
<b>media</b>	<b>12.311</b>	<b>8.129</b>	<b>4.917</b>	<b>1.443</b>	<b>0.004</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0.318</b>	<b>3.814</b>	<b>8.225</b>	<b>12.851</b>	<b>14.264</b>	<b>2026.5</b>

Tabella 2 – DNI giornaliera media mensile e annua a Eneide (Stazione Mario Zucchelli, Antartide), periodo 1998-2013. Nell'ultima riga sono riportate le medie su tutti gli anni, con l'esclusione del 2002 e 2008, perché incompleti, e del 1998 e 1999, perché l'ammontare annuo è manifestamente inverosimile.

<sup>6</sup> Nei mesi invernali la base viene chiusa e rimane presidiata solo Concordia, all'interno del continente



*Figura 14 – Andamento annuale della DNI giornaliera media mensile a Eneide (Stazione Mario Zucchelli, Antartide). Nel grafico sono omessi i periodi annuali con dati di misura anomali o semplicemente mancanti (vedi testo). In ascissa sono stati considerati intervalli pari a un anno (= 12 mesi) che iniziano a luglio e terminano nel mese di giugno dell'anno civile successivo, in modo da riprodurre l'andamento familiare "a campana" della radiazione nel corso dell'anno così come si osserva alle nostre latitudini. Infatti, in Antartide, il mese di luglio è al buio e corrisponde sotto il profilo climatico al periodo invernale dell'emisfero boreale; viceversa, a dicembre si è nel periodo di maggiore illuminazione e irradiazione, che in Italia si verifica fra fine giugno e inizio luglio. Pertanto l'andamento dell'esposizione solare è simile nei due emisferi boreale (il nostro) ed australe (Antartide), ma risulta traslato di sei mesi.*

## 4 Conclusioni

Comparati ai corrispondenti valori, mediamente inferiori, che si ottengono per larga parte del territorio nazionale, i livelli di DNI stimati per l'Antartide suggeriscono la possibilità di progettare e installare alla Stazione Mario Zucchelli un impianto di potenza che ricorra alla tecnologia a concentrazione solare (*Concentrated Solar Power*, acronimo CSP)<sup>7</sup>. Questa tecnologia utilizza specchi opportunamente orientabili per concentrare la radiazione solare su di un ricevitore, il quale ne trasferisce l'energia termica a un fluido ad alta temperatura, da cui viene poi estratta per finalità diverse: produrre energia elettrica, alimentare processi industriali o semplicemente accumularla. Affinché la concentrazione sia efficace, ed il fluido ricevente raggiunga le elevate temperature di funzionamento che sono richieste, è necessario che la radiazione solare provenga da una direzione ben determinata: caratteristica, quest'ultima, precipua della componente diretta<sup>8</sup>.

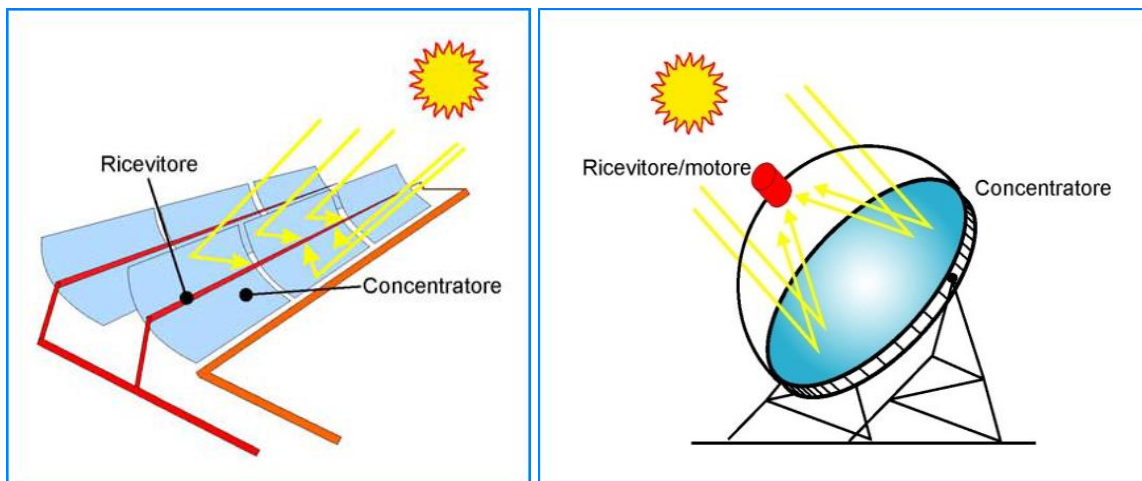
Esistono diversi tipi di impianto, che si differenziano per il meccanismo in base al quale i raggi solari vengono concentrati (/7,8/ e anche Figura 15). Negli anni passati, in Italia, sono stati studiati e portati a maturazione tecnologica i *concentratori parabolici lineari*: in essi, la radiazione solare in arrivo è riflessa da specchi cilindrici con base parabolica, disposti a schiera, e concentrata su di un ricevitore tubolare in cui scorre il fluido vettore, posizionato lungo l'intera linea focale della stringa degli specchi. La disposizione costruttiva prevede che gli specchi possano ruotare intorno all'asse focale, che è sempre orizzontale e preferibilmente orientato lungo la direzione Nord-Sud. Però in questo modo non si potrà mai "raccogliere" tutta la radiazione diretta disponibile, vale a dire la DNI, tuttavia è sempre possibile massimizzare, rispettando i vincoli costruttivi, la radiazione diretta utilizzata, ovvero minimizzare l'angolo d'incidenza dei raggi solari diretti, imponendo agli specchi una rotazione tale che il Sole rimanga sempre, nel suo percorso giornaliero, nel piano meridiano della superficie parabolica. Questa tipologia può essere utilmente impiegata in impianti di taglia industriale, con potenze non inferiori alle decine di MW.

Più recentemente, in particolare in ENEA, è invece allo studio un tipo di *concentratore parabolico puntuale*: in questo, lo specchio è a forma di disco concavo e riflette tutta la radiazione diretta incidente in un unico punto, il fuoco, dove è disposto il ricevitore. Rispetto alla tecnologia lineare descritta prima, i concentratori parabolici puntuali presentano diversi vantaggi: in primo luogo, si possono realizzare con impianti relativamente più compatti, con potenza fino a 50 kW, eventualmente scalabili in maniera modulare per raggiungere la potenza voluta; inoltre, lo specchio ruota ora intorno a due assi anziché uno, e dunque in esercizio è orientato sempre nella direzione del disco solare, per "ricevere" la massima irradianza diretta possibile, la DNI; infine, il fluido termovettore, essendo un gas, non presenta problemi di solidificazione alle basse temperature. Per tali caratteristiche, questo tipo di impianto si presta egregiamente ad essere impiegato in Antartide, e contribuire alla produzione di energia elettrica che soddisfi (in parte) il notevole fabbisogno energetico richiesto per il funzionamento della stazione permanente italiana.

---

<sup>7</sup> Le locuzioni "impianto solare termodinamico" e "impianto solare ad alta temperatura" sono sinonimi di CSP.

<sup>8</sup> Il meccanismo descritto differisce sostanzialmente da quello che è alla base del funzionamento degli impianti fotovoltaici, nei quali si sfruttano entrambe le componenti della radiazione solare, diretta e diffusa.



*Figura 15 – Due soluzioni costruttive per impianti di potenza a concentrazione solare: con concentratori parabolici lineari (a sinistra) e puntuali (a destra).*

## Appendice

### A.1 L'ora (tempo) solare vera

Durante il giorno il Sole disegna una traiettoria nella volta celeste e vi è un istante, detto *mezzogiorno solare*, in cui esso transita per il piano meridiano del luogo. Ora, il passaggio del Sole per il meridiano di una località non avviene a intervalli regolari, esattamente uguali a 24 ore, ma mostra ritardi o anticipi fino a circa 15 minuti nel corso dell'anno, in conseguenza della velocità variabile del moto ellittico della Terra intorno al Sole. A causa di tale irregolarità torna conveniente riferirsi invece al *giorno solare medio*, suddiviso in 24 ore esatte e definito in base ad un *Sole medio* che si muova a velocità costante lungo l'equatore celeste. Poiché il Sole vero si muove lungo l'ecclittica anziché l'equatore celeste, si richiede che in uno dei due punti in cui equatore celeste e ecclittica s'intersecano, nel nostro caso all'equinozio di primavera, il Sole medio transiti in contemporanea a quello vero. L'entità dell'anticipo o ritardo dell'*ora (o tempo) solare vera*<sup>9</sup> – definita in modo che segni sempre le 12:00:00 quando il Sole è sul meridiano del luogo – rispetto all'ora media, è quantificata nella cosiddetta *equazione del tempo*. In formula (Spencer /12/):

$$\begin{aligned} E_t &= a_0 + a_1 \cos(\Gamma) + a_2 \sin(\Gamma) + a_3 \cos(2\Gamma) + a_4 \sin(2\Gamma) \\ a_0 &= 0.000075 \\ a_1 &= 0.001868 \\ a_2 &= -0.032077 \\ a_3 &= -0.014615 \\ a_4 &= -0.04089 \\ a_0 \div a_4 &\text{ sono costanti espresse in } rad \end{aligned}$$

[18]

Per esprimere  $E_t$  in minuti, occorre moltiplicare il risultato della [18] per 229.18 secondo l'equivalenza:

$$1 \text{ angolo gio} \equiv 1 \text{ giorno} \text{ e dunque: } 360^\circ \equiv 2\pi \equiv 24 \text{ h} \equiv 1440 \text{ min}$$

Se si volesse  $E_t$  in ore, il fattore sarebbe ovviamente 3.81972. Il grafico di  $E_t$  in funzione del giorno dell'anno è mostrato in Figura 16.

---

<sup>9</sup> In inglese: *True Solar Time*, o anche *Local Apparent Time*.

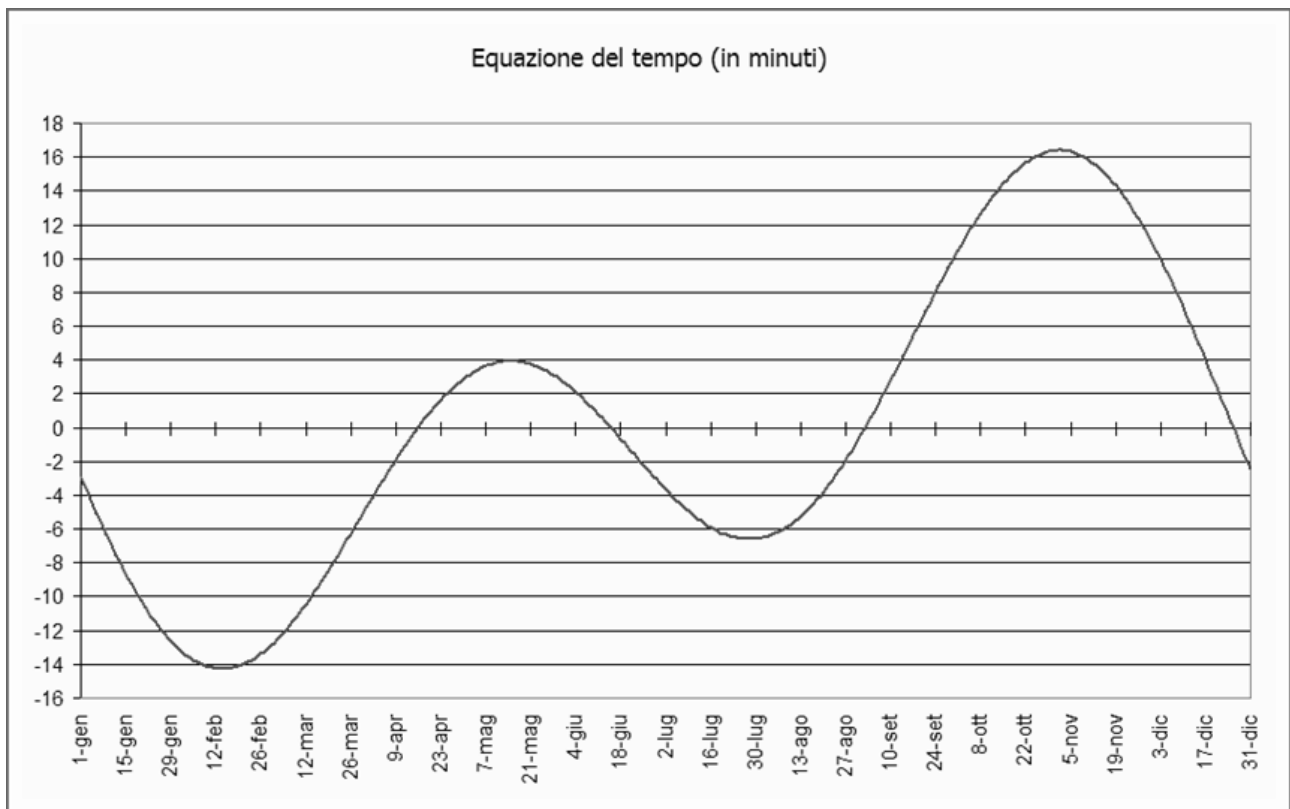


Figura 16 – **Equazione del tempo.**

Per convenzione, gli orologi che regolano le attività umane sono sincronizzati sul tempo solare medio e tutte le zone di un medesimo fuso orario adottano la stessa ora media del proprio meridiano centrale. D'altro canto per due luoghi aventi longitudine diversa pur appartenendo ad uno stesso fuso orario, il mezzogiorno solare si verificherà ad istanti differenti. Di conseguenza, per ricavare l'ora solare vera di una data località conoscendone l'ora media segnata dagli orologi, occorre considerare, oltre allo scarto in anticipo o ritardo determinato dall'equazione del tempo, anche la differenza temporale esistente fra il meridiano della località e quello centrale del suo fuso orario, differenza che per i periodi estivi deve tener conto anche dell'adozione convenzionale dell'*ora legale*. Si possono evitare tutte queste complicazioni a patto di riferirsi a un tempo fisso e uguale per tutti i punti della Terra e il *tempo medio di Greenwich (Greenwich Mean Time, GMT)*<sup>10</sup> risponde proprio a questi requisiti (equazione [3]).

L'Italia adotta l'ora del fuso dell'Europa Centrale (acronimo: CET, da *Central European Time*), che è in anticipo di un'ora rispetto al GMT; pertanto il passaggio dall'uno all'altro si effettua in base alla formula:

$$\text{GMT} = \text{CET} - 1\text{h}$$

In estate invece vige l'*ora legale*, in base alla quale gli orologi sono ulteriormente anticipati di un'ora; di conseguenza si avrà:

$$\text{GMT} = \text{ora legale estiva in Italia} - 2\text{h}$$

<sup>10</sup> Il GMT è definito come il tempo (medio) relativo al meridiano passante per Greenwich; il Coordinated Universal Time (UTC) è praticamente sinonimo di GMT.

Ad esempio, le 11:00 italiane corrisponderanno alle 10:00 GMT in un giorno d'inverno e alle 09:00 GMT in un giorno estivo.

## A.2 Angolo orario

L'*angolo orario*  $\omega$  esprime semplicemente nella scala degli angoli il tempo necessario al Sole per portarsi dalla posizione in cui si trova a quella del mezzogiorno solare: perciò è nullo a mezzogiorno, positivo per le ore del mattino (il Sole deve ancora transitare per il meridiano) e negativo per quelle del pomeriggio (essendovi già passato); il valore massimo si avrà all'alba (momento più distante da mezzogiorno) e quello minimo al tramonto. Poiché alba e tramonto sono equidistanti dal mezzogiorno solare, massimo e minimo sono uguali in valore assoluto. Stante l'equivalenza stabilita in precedenza fra angoli e tempi ( $360^\circ \equiv 2\pi \equiv 24h$ ) e ricordando che il mezzogiorno solare corrisponde per definizione al valore 12:00:00, il legame fra il tempo solare vero  $t$  e l'angolo orario  $\omega$  si traduce in definitiva nella formula:

$$\omega = \frac{360^\circ}{24h}(12h - t) \quad \text{oppure:} \quad \omega = \frac{2\pi}{24h}(12h - t) \quad [19]$$

secondo che  $\omega$  si esprima in gradi ( $^\circ$ ) o radianti.

## A.3 Posizione del Sole (angolo zenitale) e calcolo degli istanti dell'alba e del tramonto e della lunghezza del giorno

L'angolo che la direzione di provenienza dei raggi solari forma con la verticale del luogo è detto *angolo zenitale* ed è indicato solitamente con  $\mathcal{G}_z$ . Esso è complementare dell'*altezza* (o *elevazione*) *solare*, ossia l'angolo che i raggi stessi formano con il piano orizzontale, e varia nel corso della giornata in conseguenza del continuo spostarsi del Sole nella volta celeste. Il coseno dell'angolo zenitale –  $\cos \mathcal{G}_z$  – ricorre in molte formule per il calcolo dell'irradianza solare e pertanto è fondamentale saperlo ricavare per qualunque situazione. L'angolo zenitale dipende dalla posizione del Sole nel cielo e questa è il risultato, innanzitutto, dei due moti della Terra rispetto al sistema solare, il primo di rivoluzione intorno al Sole, con periodo uguale a un anno, il secondo di rotazione giornaliera intorno al proprio asse, inclinato di circa  $23.45^\circ$  rispetto al piano di rivoluzione; in secondo luogo, l'angolo zenitale è funzione anche della posizione geografica della località da cui il Sole è osservato, del giorno prescelto e del particolare istante della giornata. Tutto ciò si traduce nell'espressione seguente:

$$\cos \mathcal{G}_z = \sin \phi \sin \delta + \cos \phi \cos \delta \cos \omega \quad [20]$$



in cui:  $\phi$  è la latitudine della località,  $\delta$  è la *declinazione solare*<sup>11</sup> e  $\omega$  è l'*angolo orario* (appendice A.2).

Nel corso della giornata il Sole presenterà la massima elevazione sull'orizzonte in corrispondenza del valore minimo dell'angolo zenitale, essendo i due angoli complementari. Dall'equazione precedente si vede che tale istante si verifica quando è  $\cos \omega = 1$ , ossia per  $\omega = 0$  (mezzogiorno solare).

Invece negli istanti dell'alba e del tramonto si ha elevazione nulla e quindi  $\mathcal{G}_z = \pi/2$ ,  $\cos \mathcal{G}_z = 0$ ; per tali istanti si avrà:

$$\cos \omega = -\frac{\sin \phi \sin \delta}{\cos \phi \cos \delta} = -\tan \phi \tan \delta \quad [21]$$

L'equazione [21] ammette due soluzioni  $\omega$  nell'intervallo  $[-\pi, +\pi]$ . Se indichiamo con  $\omega_s$  la soluzione positiva, in base alla convenzione sul segno dell'angolo orario stabilita nell'appendice A.2, si ha che  $+\omega_s$  è l'angolo orario dell'alba e  $-\omega_s$  quello che corrisponde al tramonto. La *lunghezza (durata) del giorno* in termini angolari varrà pertanto  $2\omega_s$  e in termini di tempo (ore):

$$L = 2\omega_s \left| \frac{dt}{d\omega} \right| = 2\omega_s \frac{12h}{\pi} \quad [22]$$

Non sempre l'equazione [21] ammette due soluzioni; queste si otterranno solo se è:

$$|\tan \phi \tan \delta| \leq 1 \quad [23]$$

In caso contrario, non ci sarà né alba né tramonto e il Sole o sarà al di sopra dell'orizzonte (periodo diurno) o al di sotto dell'orizzonte (periodo notturno) per l'intero intervallo delle 24 ore. Poiché la declinazione solare  $\delta$  varia nel corso dell'anno fra gli estremi  $-23.45^\circ$  e  $+23.45^\circ$ , la [23] è soddisfatta in tutti i giorni dell'anno per tutte le località della Terra con latitudini comprese fra i valori  $66.56^\circ$  Sud (circolo polare antartico) e  $66.56^\circ$  Nord (circolo polare artico). Per i luoghi al là dei circoli polari, l'alternarsi quotidiano del giorno e della notte si verificherà nei soli periodi dell'anno in cui la declinazione solare è piccola tale da soddisfare la condizione [23]. Ci saranno invece due periodi annuali in cui il Sole si manterrà ininterrottamente (in un caso) sempre al di sopra dell'orizzonte o (nell'altro) sempre al di sotto. Tali periodi sono tanto più lunghi quanto più ci si avvicina ai poli. Alla Stazione Mario Zucchelli la notte polare dura ininterrottamente dal 3 maggio al 10 agosto, mentre dal 4 novembre al 7 febbraio il Sole è sempre al di sopra dell'orizzonte.

---

<sup>11</sup> ossia l'angolo che la direzione dei raggi solari, al momento del passaggio del Sole per il piano meridiano (vedi avanti), forma con il piano equatoriale.

## Sigle, abbreviazioni, grandezze, unità di misura

DNI	Irradia[nza zione] diretta normale (Direct Normal Irradia[nce tion])
GHI	Irradia[nza zione] globale su piano orizzontale (Global Horizontal Irradia[nce tion])
Dif. HI	Irradia[nza zione] diffusa sul piano orizzontale
ENI	Irradia[nza zione] extraatmosferica su piano normale
EHI	Irradia[nza zione] extraatmosferica su piano orizzontale
PNRA	Piano Nazionale di Ricerche in Antartide
MBE	Mean Bias Error
MAE	Mean Absolute Error
RMSE	Root Mean Squared Error
CSP	Impianto di potenza a concentrazione solare (Concentrated Solar Power)
GMT	Tempo medio di Greenwich (Greenwich Mean Time)
UTC	Tempo Coordinato Universale (Coordinated Universal Time)
CET	Tempo (ora) medio del fuso dell'Europa Centrale (Central European Time)
AWS	Stazione meteorologica automatica (Automatic Weather Station)
ITASE	International Trans-Antarctic Scientific Expedition
MZS	Stazione Mario Zucchelli (Mario Zucchelli Station)
DC	Dome C (sito della base permanente Concordia)
s.q.m.	scarto quadratico medio
ENEA	Agenzia nazionale per le nuove tecnologie, l'energia e lo sviluppo economico sostenibile
UTRINN	ENEA – Unità Tecnica Fonti Rinnovabili
UTRINN-PCI	ENEA – UTRINN – Laboratorio Progettazione Componenti e Impianti
UTMEA	ENEA – Unità Tecnica Modellistica Energetica Ambientale
UTMEA-TER	ENEA – UTMEA – Laboratorio Analisi e Osservazioni sul Sistema Terra
UTA	ENEA – Unità Tecnica Antartide

<b>Grandezza</b>	<b>Definizione</b>	<b>Unità di misura</b>
$I_{bn}$	Irradianza diretta su piano normale (DNI)	$W/m^2$
$I$	Irradianza globale su piano orizzontale (GHI)	$W/m^2$
$I_b$	Irradianza diretta su piano orizzontale	$W/m^2$
$I_d$	Irradianza diffusa su piano orizzontale	$W/m^2$
$I_{on}$	Irradianza extraatmosferica su piano normale	$W/m^2$
$I_o$	Irradianza extraatmosferica su piano orizzontale	$W/m^2$
$\mathcal{G}_z$	Angolo zenitale	<i>rad</i> o grado (°)
$h_s$	(Angolo di) elevazione (o altezza) del Sole	<i>rad</i> o grado (°)
$L$	Durata del giorno	ore
$K_T$	Coefficiente di trasmissione globale (al suolo)	adimensionale
$K_{bn}$	Coefficiente di trasmissione dell'irraggiamento diretto (al suolo)	adimensionale
$k$	Frazione della radiazione diffusa rispetto a quella globale (riferite entrambe al piano orizzontale)	adimensionale
$\mathcal{G}$	Angolo d'incidenza dei raggi solari	<i>rad</i> o grado (°)
$\alpha, \beta$	Parametri del modello di Boland-Ridley	adimensionali
$\phi$	Latitudine (geografica)	<i>rad</i> o grado (°)
$\delta$	Declinazione solare	<i>rad</i> o grado (°)
$\omega$	Angolo orario	<i>rad</i> o grado (°)
$\omega_s$	Angolo orario dell'alba	<i>rad</i> o grado (°)
$t_s$	Ora (o tempo) solare vero; a volte detto anche tempo solare apparente	ore (h) e/o minuti
$E_t$	Equazione del tempo	[di solito in] minuti

**Nota:** nel testo gli acronimi DNI e GHI sono usati sia nell'accezione di *irradianza* sia in quella di *irradiazione* (giornaliera, giornaliera media mensile o annua). Nel primo caso, trattandosi di potenza per unità di superficie, l'unità di misura è il  $W/m^2$ ; invece le irradiazioni corrispondono dimensionalmente all'energia per unità di superficie e si esprimono in  $J/m^2$ ,  $MJ/m^2$  o  $kWh/m^2$ .

<b>Prefissi (nelle unità di misura)</b>	<b>Nome</b>	<b>Valore</b>
<i>n</i>	nano-	$10^{-9}$
$\mu$	micro-	$10^{-6}$
<i>k</i>	kilo-	$10^3$
<i>M</i>	mega-	$10^6$

<b>Altri simboli</b>	<b>Significato</b>
÷	intervallo

## Bibliografia

- 1 URL dei siti web dedicati alle attività scientifiche dell'Italia in Antartide:  
[http://www.enea.it/it/Ricerca\\_sviluppo/ambiente-e-clima/supporto-al-programma-nazionale-di-ricerche-in-antartide](http://www.enea.it/it/Ricerca_sviluppo/ambiente-e-clima/supporto-al-programma-nazionale-di-ricerche-in-antartide) – Pagina del sito Internet dell'ENEA sulle attività nel continente.  
<http://www.pnra.it> – *Programma Nazionale di Ricerche in Antartide*.  
<http://www.mna.it> – *Museo Nazionale dell'Antartide "Felice Ippolito"*.  
<http://www.italiantartide.it> – *Obiettivo Antartide*.  
<http://www.climantartide.it/> – *Clima Antartide*.
- 2 M. Iqbal (1983), *An Introduction to Solar Radiation*, Academic Press Canada, Don Mills (Ontario, Canada), 1983. ISBN: 0-12-373750-8. Pagine 390.
- 3 V. Badescu editor (2008), *Modeling Solar Radiation at the Earth's Surface. Recent Advances*, Springer-Verlag, Berlin Heidelberg, 2008. ISBN: 978-3-540-77454-9. e-ISBN: 978-3-540-77454-6. Pagine XXXIII+517.
- 4 Y. Cascone, V. Corrado, V. Serra, C. Toma (2010), *Calcolo dell'ombreggiamento sull'involucro dell'edificio*, Rapporto tecnico, redatto nell'ambito programma "Ricerca Sistema Elettrico". ENEA e Ministero per lo Sviluppo Economico, Roma.
- 5 Boland J. and Ridley B. (2008), "Models of Diffuse Solar Fraction", in *Modeling Solar Radiation at the Earth's Surface*, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, cap. 8, p. 193-219.
- 6 F. Lanini (2010), *Division of Global Radiation into Direct Radiation and Diffuse Radiation*, Master's thesis, Faculty of Science, University of Bern. Documento reperito in rete.
- 7 A. Fontanella (2012), "Solare termico a concentrazione", in *Le tecnologie delle fonti rinnovabili di energia*, a cura di P.M. Putti e O. Bramanti, 2012, Il Sole 24ORE, Milano. ISBN: 978-88-324-8314-7. Pagine 408.
- 8 A. Fontanella, T. Crescenzi, F. Di Mario, F. Fabrizi e D. Mazzei (2011), *Solare termodinamico*, luglio 2011, ENEA, Collana "I quaderni dell'Energia", Roma. Anche scaricabile dall'URL:  
[http://www.enea.it/it/enea\\_informa/documenti/quaderni-energia/solaretermodinamico.pdf](http://www.enea.it/it/enea_informa/documenti/quaderni-energia/solaretermodinamico.pdf)
- 9 W. Schwerdtfeger (1984), "Weather and climate of the Antarctic", included in series *Developments in atmospheric science*, Vol. 15. Elsevier
- 10 P. Petrelli, N.L. Bindoff, A. Bergamasco (2008), "The sea ice dynamics of Terra Nova Bay and Ross Ice Shelf Polynyas during a spring and winter simulation", *J. Geophys. Res.*, 113, C09003, doi:10.1029/2006JC004048.

- 11 F. Parmiggiani (2006): "Fluctuations of Terra Nova Bay polynya as observed by active (ASAR) and passive (AMSR-E) microwave radiometers", *Int. J. Remote Sensing*, vol. 27, pp. 2459-2467.
- 12 J.W.Spencer (1971), "Fourier series representation of position of the Sun", *Search* 2 (5), 172 (1971).

Edito dall' **ENEA**  
Servizio Comunicazione

Lungotevere Thaon di Revel, 76 - 00196 Roma

*[www.enea.it](http://www.enea.it)*

Stampa: Tecnografico ENEA - CR Frascati  
Pervenuto il 29.5.2014

Finito di stampare nel mese di maggio 2014