

DALLE MERIDIANE AD UNA BUSSOLA SOLARE DI ALTA PRECISIONE PER IMPIANTI SOLARI TERMODINAMICI ED ALTRE APPLICAZIONI

**Francesco Flora, S. Bollanti, D. De Meis, P. Di Lazzaro, G.P. Gallerano, D. Murra,
L. Mezi, A. Torre, D. Vicca.**

ENEA, Unità Tecnica Sviluppo di Applicazioni delle Radiazioni
Laboratorio “Sorgenti di Radiazione” (UTAPRAD-SOR),
Via E. Fermi 45, 00044 Frascati (Roma), Italia
www.frascati.enea.it/utaprad - Tel. 06-94005745 - francesco.flora@enea.it

Sommario

La sinergia di competenze in vari campi del Laboratorio Sorgenti di Radiazione dell'ENEA di Frascati (ottica, matematica, progettazione di meridiane, ecc.) unita alla presenza in ENEA di gruppi di ricerca operanti nel settore dell'energia solare sia di tipo termodinamico (Unità Tecnica Fonti Rinnovabili, UTRINN) che di tipo fotovoltaico a concentrazione (Unità Tecnica Tecnologie Portici, UTTP), ha portato allo sviluppo di una bussola solare elettronica di elevata accuratezza (fino ad un minuto d'arco), in grado di funzionare ovunque nel mondo e senza la presenza di un operatore 1. I due prototipi finora realizzati ne hanno confermato sia la prevista accuratezza che la versatilità d'uso.

1. Introduzione

Il continuo sviluppo di impianti solari a concentrazione, sia di tipo termodinamico che di tipo fotovoltaico, e l'esigenza di poter aumentare l'intensità della luce solare (cioè il numero di “soli”) sui collettori dell'impianto al fine di aumentarne l'efficienza, hanno reso sempre più stringenti le esigenze di precisione nell'orientare verso il sole le ottiche dell'impianto stesso. Nella maggior parte degli impianti termodinamici, quelli in cui il corretto orientamento degli specchi è affidato ad un calcolo astronomico delle coordinate del sole, è divenuta così di cruciale importanza la conoscenza dell'orientamento della base che sorregge ciascuno specchio, con un livello di precisione ben inferiore ad 1° e quindi irraggiungibile da qualunque bussola magnetica. La bussola solare sviluppata in ENEA non solo offre una risposta semplice ed economica a questa esigenza, ma può semplificare notevolmente l'installazione degli impianti rendendo ciascun elemento autonomo nel orientamento e nel suo movimento.

2. La progettazione di orologi solari: una tradizione di famiglia

La passione per la progettazione e realizzazione di orologi solari ha una storia di tre generazioni nella famiglia Flora. Gli studi per una metodologia precisa di calcolo degli orologi iniziarono con Giuseppe Flora agli inizi del XX secolo. Nella sua breve vita riuscì però a realizzare poche decine di meridiane, tra cui quella riportata in Fig. 1 che

Gruppo per la storia dell'energia solare (GSES, www.gses.it)
Incontro dibattito presso Museo dell'Industria e del Lavoro di Brescia, Rodengo Saiano
Via del Commercio 18 - 25050 Rodengo Saiano - Brescia

“Storia e attualità del solare termodinamico con il contributo italiano”

venerdì 10 ottobre 2014

commemora il bombardamento della città di Treviso avvenuto durante la II guerra mondiale.

Giuseppe trasmise l'arte al figlio Giovanni Flora che, fino ad oggi (93enne), ha sempre avuto una incessante attività di progettazione di meridiane (oltre 400) realizzate prevalentemente su ville e su piazze della provincia di Treviso. In Fig. 2 sono riportate due di esse.

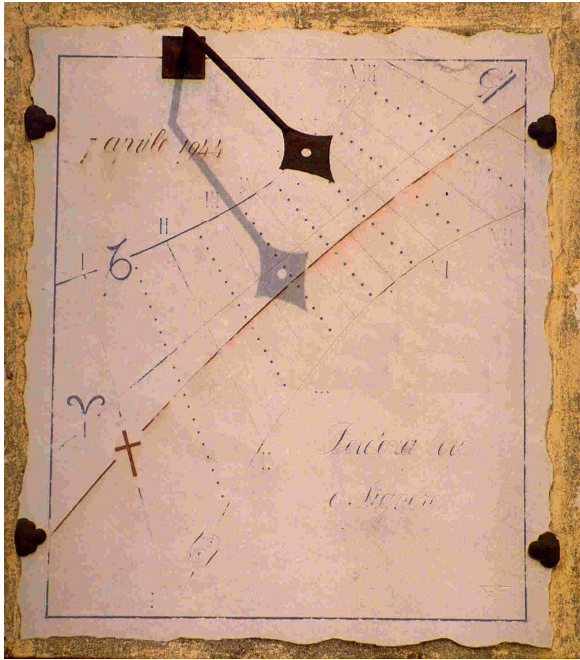


Figura – 1 Meridiana a Tempo Vero del Luogo (TVL) nella chiesa “La Madonnina” a Treviso, realizzata da Giuseppe Flora (1887-1952). Il 7 aprile il raggio luminoso percorre l’iperbole rossa e raggiunge la croce alle ore 1:00 TVL, ora in cui Treviso fu bombardata nel 1944. Il motto: “Perdona loro o Signore”

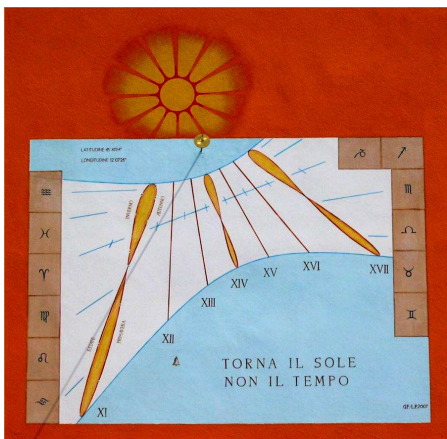


Figura – 2 Meridiane a Tempo Medio progettate da Giovanni Flora: (a) su villa a Padernello (TV); (b) sulla Piazza S. Parisio a Treviso.

Giovanni a sua volta trasmise la passione per le meridiane ai suoi quattro figli, tra cui Francesco Flora, coautore della presente relazione.

Gruppo per la storia dell'energia solare (GSES, www.gses.it)
Incontro dibattito presso Museo dell'Industria e del Lavoro di Brescia, Rodengo Saiano
Via del Commercio 18 - 25050 Rodengo Saiano - Brescia

“Storia e attualità del solare termodinamico con il contributo italiano”

venerdì 10 ottobre 2014

La domanda più ricorrente che i figli ponevano al padre mentre lo aiutavano, di giovani, a disegnare una meridiana era la seguente:

“perché quella curva a forma di 8 detta lemniscata, quella che consente di leggere sulla meridiana il tempo degli orologi meccanici, è fatta così?”.

La risposta del padre era sempre la medesima:

“il tempo vero è quello del sole! Gli orologi meccanici sbagliano perché assumono erroneamente che la terra giri intorno al sole sempre con la medesima velocità, ma non è così! Questo errore degli orologi meccanici porta ad una differenza tra tempo vero solare e tempo medio, detta Equazione del Tempo (ET), e la lemniscata non fa altro che riprodurre in modo grafico sul quadrante solare il valore di ET per le diverse stagioni”.

Se fotografassimo il cielo in tanti giorni dell’anno sempre alla stessa ora (del tempo medio) senza mai spostare la macchina fotografica e senza mai girare il rullino (cioè sovrapponendo le foto), ci accorgeremmo che il sole non si muove solo in su e in giù (secondo la variazione della sua declinazione) ma anche a destra e sinistra (vedi Fig. 3).

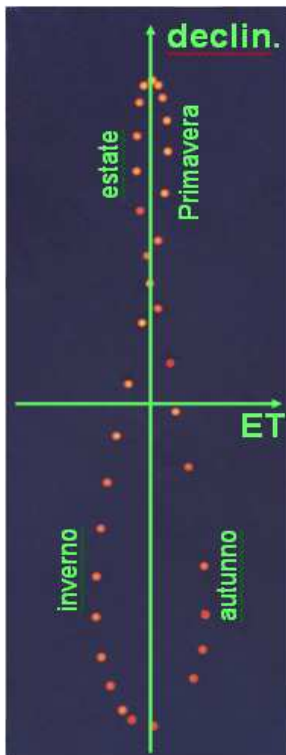


Figura – 3 Foto del cielo in direzione Sud ripetuta in diversi giorni dell’anno sempre alle ore 12:00 del tempo medio: a tale ora il sole non si trova sempre nella medesima direzione (circa Sud) ma si sposta di alcuni gradi a destra o sinistra, a seconda della stagione, per effetto dell’equazione del tempo.

3. Una semplice formula analitica per il calcolo dell’equazione del tempo

Dopo tanti anni di curiosità, nel 2003 il figlio Francesco, che oramai lavora da anni all’ENEA di Frascati, volendo approfondire la questione che lo stupiva fin da bambino, chiede ai suoi colleghi dell’ENEA di provare insieme a risolvere analiticamente le leggi

Gruppo per la storia dell’energia solare (GSES, www.gses.it)

Incontro dibattito presso Museo dell’Industria e del Lavoro di Brescia, Rodengo Saiano

Via del Commercio 18 - 25050 Rodengo Saiano - Brescia

“Storia e attualità del solare termodinamico con il contributo italiano”

venerdì 10 ottobre 2014

di Keplero in modo approssimato; si accorgono così che le suddette approssimazioni consentono comunque di calcolare molto facilmente, in modo analitico e per qualunque data e ora, l'Equazione del tempo dovuta all'eccentricità dell'orbita (ETo) ed all'inclinazione dell'asse (ETa) con un errore temporale inferiore a due secondi. La somma dei due dà ET, come mostrato in Figura 4.

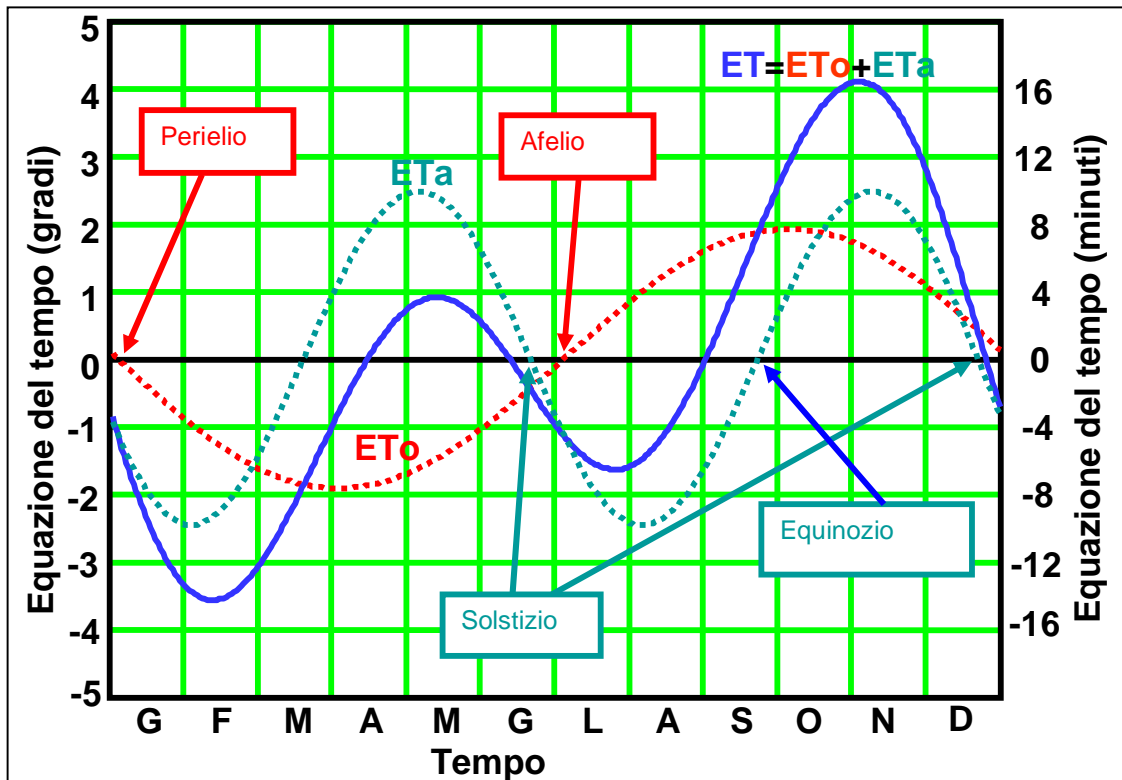


Figura – 4 Le componenti di equazione del tempo dovute all'eccentricità dell'orbita terrestre (ETo) e all'inclinazione dell'asse terrestre rispetto al piano dell'orbita (ETa), assieme alla loro somma (ET), calcolate con semplici formule analitiche in approssimazione al 2° ordine delle equazioni relative alle leggi di Keplero. Il tempo è riportato in mesi mentre ETo/ETa sono riportate sia in gradi (angolo di spostamento apparente del sole nel cielo) e sia in minuti.

Il grafico evidenzia come entrambi le componenti abbiano un andamento sinusoidale, ma mentre ETo ha un periodo annuale con gli zeri al perielio e afelio, ETa ha invece un periodo semestrale con gli zeri ai solstizi ed equinozi. Per l'effetto della precessione degli equinozi (rispetto al perielio), le due componenti continuano a sfasarsi tra di loro nel tempo (circa di un giorno ogni 70 anni). Le meridiane moderne, quindi, funzionano bene solo nel secolo in cui sono state progettate.

4. Dalle meridiane alla bussola solare

Sette anni dopo, nella primavera 2010, il responsabile del Laboratorio “Sorgenti di Radiazioni (SOR)” dell'ENEA di Frascati decide di avviare un'attività di supporto alla

Gruppo per la storia dell'energia solare (GSES, www.gses.it)
 Incontro dibattito presso Museo dell'Industria e del Lavoro di Brescia, Rodengo Saiano
 Via del Commercio 18 - 25050 Rodengo Saiano - Brescia

“Storia e attualità del solare termodinamico con il contributo italiano”

venerdì 10 ottobre 2014

ricerca sull'energia solare fotovoltaica a concentrazione e sul solare termodinamico già in corso da anni presso i Centri ENEA di Portici (NA) e di Casaccia (RM).

Rapidamente si crea un gruppo di alcuni fisici che, sfruttando non solo le suddette formule per il calcolo di ET e della declinazione del sole ma anche la loro esperienza in ottica e in matematica, progetta lo sviluppo di un pannello fotovoltaico a concentrazione lineare (con lenti o specchi parabolici) ad inseguimento solare per uso domestico (sui tetti) per la cogenerazione di elettricità e di acqua calda. Il pannello doveva venir adagiato sul tetto di una abitazione ed i suoi elementi ottici interni dovevano ruotare intorno ad assi paralleli al bordo inclinato del tetto.

Le nozioni sulle meridiane erano perfette per poter calcolare in ogni istante la posizione del sole: a partire dall'ora di Greenwich ($Orag$), fornita con elevata precisione da un qualunque GPS, e dal valore che ET assume in quel momento (calcolabile con le suddette formule analitiche approssimate) si può ottenere immediatamente il Tempo Vero del Luogo (TVL) dalla semplice relazione:

$$1) TVL = Orag + Long./15^\circ + ET$$

dopo di che il calcolo dell'angolo di rotazione del sole, intorno ad un asse polare, rispetto alla posizione Nord è immediato:

$$2) \theta(t) = TVL \times 15^\circ$$

Per poter orientare in modo preciso gli specchi cilindrici del pannello verso il sole mancava una cosa sola: la conoscenza dell'orientamento del tetto con una accuratezza molto minore di 1° .

Nessuna bussola magnetica avrebbe potuto raggiungere una simile precisione, ma le bussole solari sì: da oltre un secolo queste bussole hanno consentito di poter conoscere l'orientamento in modo estremamente preciso; ma per usarle era necessario disporre di un personale esperto, un orologio preciso, mappe geografiche, almanacchi di astronomia da cui poter estrarre il valore di ET del giorno, ecc.

Una bussola solare è sostanzialmente una meridiana portatile usata al rovescio: ruotando la meridiana fino al punto in cui l'ora da essa indicata coincide con quella dell'orologio (meccanico e di precisione) automaticamente l'asse principale della meridiana (detto anche "linea meridiana" o linea del mezzogiorno del TVL) viene a trovarsi esattamente in direzione Nord-Sud geografica.

L'idea del gruppo di lavoro è stata quindi quella di realizzare una bussola solare elettronica, dove il quadrante solare delle antiche meridiane fosse sostituito da un sensore di immagine di tipo CCD (come quelli delle moderne macchine fotografiche) mentre il valore di ET fosse calcolato da un economico processore utilizzando appunto le suddette formule analitiche approssimate.

Quanto alla tipologia della bussola, il gruppo si è rifatto ancora una volta alle meridiane: quelle più precise sono le meridiane da chiesa, dove l'asta dello gnomone è sostituita da un piccolo foro gnomonico su una parete o sul soffitto della chiesa. Su queste meridiane, grazie al principio della camera oscura, la penombra (che limita la precisione delle

Gruppo per la storia dell'energia solare (GSES, www.gses.it)

Incontro dibattito presso Museo dell'Industria e del Lavoro di Brescia, Rodengo Saiano

Via del Commercio 18 - 25050 Rodengo Saiano - Brescia

"Storia e attualità del solare termodinamico con il contributo italiano"

venerdì 10 ottobre 2014

meridiane da parete) si trasforma in una immagine del sole con bordi ben definiti (vedi Fig. 5a) e ciò consente di poter leggere l'ora con una precisione di pochi secondi. La bussola progettata in ENEA è quindi una microscopica meridiana da chiesa di pochi centimetri di lato dove il foro gnomonico è sostituito da una fenditura; conseguentemente l'immagine del sole che si forma sulla CCD (cioè sul quadrante solare della bussola) non è un disco ma una riga di luce come mostrato in Fig. 5b.

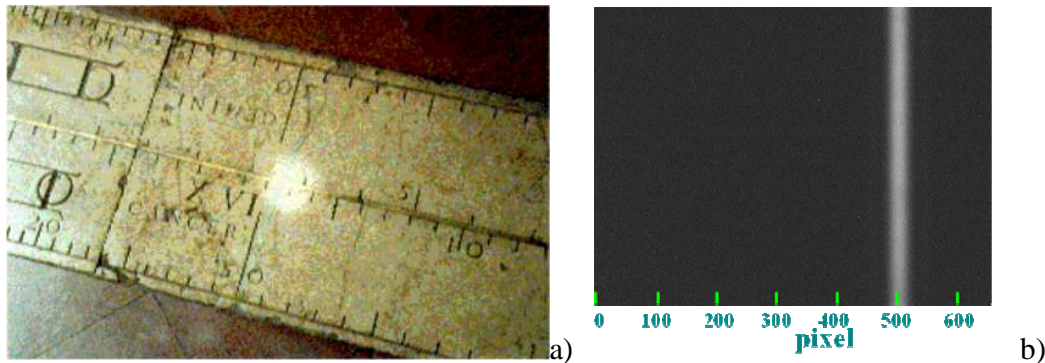


Figura – 5 Confronto dell'immagine del sole prodotta da una meridiana da chiesa e dalla bussola solare ENEA: (a) immagine a forma di disco luminoso nella meridiana da chiesa nel convento di S. Giuseppe (Brescia); (b) riga luminosa sulla CCD della bussola ENEA.

A fine 2012 è pronto e funzionante il primo prototipo della bussola realizzato secondo lo schema di Fig. 6: essa è costituita da una fenditura inclinata a 45° così che il sensore di immagine (la CCD) possa ricevere la riga di luce per qualunque elevazione del sole sopra l'orizzonte; al suo interno contiene un GPS ed un economico processore programmabile. Sotto di essa, un cannocchiale con croce di collimazione consente di puntare qualunque oggetto di interesse mentre un goniometro digitale, completo di rotore, trasferisce al processore l'angolo φ tra cannocchiale e bussola. Il principio di funzionamento è semplice:

- a) Si punta o si allinea il cannocchiale verso l'oggetto di interesse.
- b) Il rotore ruota il sensore circa verso il sole ($\pm 5^\circ$) e comunica al processore (interno alla scatola della bussola) l'angolo φ tra sensore e cannocchiale.
- c) Il processore riconosce il baricentro della riga di luce che si forma sul sensore, riceve da un GPS la data e l'ora di Greenwich, Lat. e Long. , calcola il TVL, ottiene l'azimut del sensore e vi aggiunge φ ottenendo così l'azimut del cannocchiale e quindi della linea di vista dell'oggetto puntato con il cannocchiale.

In alternativa al sistema cannocchiale+goniometro, la bussola può essere montata direttamente sopra un comune teodolite!

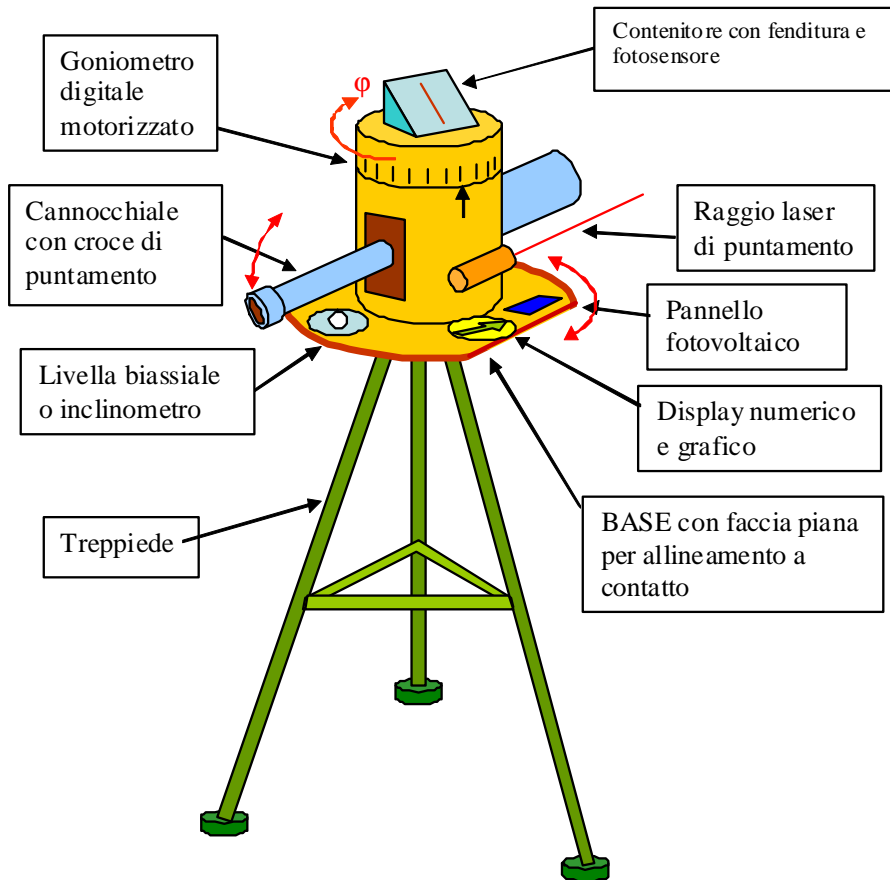


Figura – 6 La bussola solare ENEA (cioè il contenitore con fenditura + fotosensore + processore + GPS) montata su un sistema a cannocchiale + goniometro digitale.

Malgrado la fenditura sia stata realizzata usando semplicemente due lame da bisturi e la CCD sia di pochi pixel, le prestazioni del primo prototipo sono estremamente incoraggianti: viene raggiunta una accuratezza inferiore a 2'. Il gruppo decide quindi di depositare domanda di brevetto italiano e, successivamente, domanda di internazionalizzazione del brevetto (domanda n° RM2012A000664 del 27-12-12 e PCT WO2014/102841 del 3-7-14).

Nel primo prototipo il processore non era disponibile ed è stato quindi sostituito da un PC portatile collegato alla CCD, al GPS ed al goniometro.

Nel 2014 è stato realizzato un 2° prototipo (vedi Fig. 7), questa volta completo di processore e quindi completamente autonomo. In esso la fenditura è stata realizzata tramite litografia elettronica presso il CNR di Roma e la calibrazione dello strumento è stata eseguita tramite un apposito banco ottico di calibrazione (a laser) anziché sfruttando il sole; in vista di un possibile processo di trasferimento industriale è infatti necessario che le bussole possano venir calibrate velocemente e in modo semi-automatico.

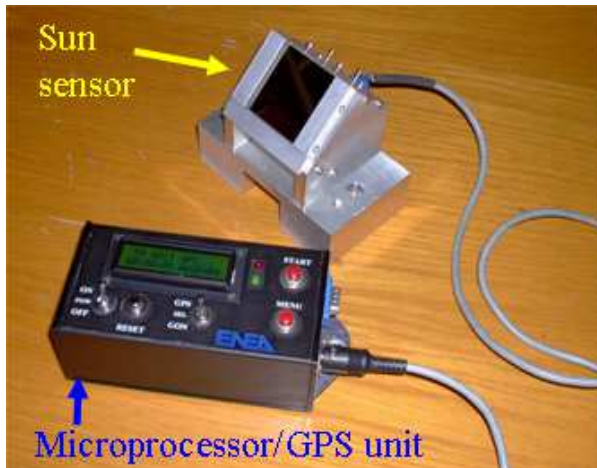


Figura – 7 Il 2° prototipo della bussola solare completo di tutta l’elettronica annessa. La fenditura è coperta da un filtro di attenuazione dei raggi solari.

Per verificare le prestazioni di questo secondo prototipo, la bussola è stata montata su un comune teodolite e si è puntato un oggetto situato a oltre 20km dalla bussola (l’antenna RAI situata su Monte Mario, ben visibile dalla collina di Frascati dove era stata collocata la bussola) in modo che dalle mappe satellitari fosse possibile stimare un valore teorico dell’orientamento della retta che congiunge la bussola all’oggetto (nel caso specifico, circa $+120^{\circ}:51'$ rispetto al Sud geografico). In Fig. 8 sono riportati i valori sperimentali indicati dalla bussola in più rilievi consecutivi e confrontati con i valori teorici estratti dalle mappe di Google Earth (GE) e di Google Mappe (GM). Come si nota dalla figura, il valore teorico di azimut fornito dalle mappe può variare a livello di $\pm 1'$ a seconda di quale mappa si consideri e comunque la differenza tra la media dei valori sperimentali e quella dei valori teorici è di appena $1.5'$.

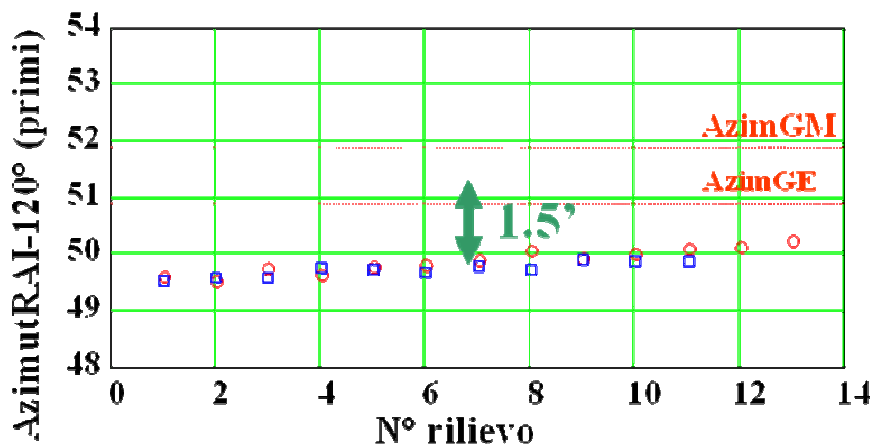


Figura – 8 Test del 2° prototipo della bussola ENEA montato su un teodolite: valori teorici (rette orizzontali rosse) e sperimentali (quadrati blu e cerchi rossi) del valore di azimut dell’antenna RAI di Monte Mario vista dall’ENEA di Frascati.

5. Prestazioni e potenziali applicazioni

Le prestazioni della bussola ENEA si possono così riassumere:

- è uno degli strumenti più accurati in grado di fornire in tempo reale l'orientamento rispetto al Sud (o Nord) geografico di qualunque oggetto.
- è totalmente automatica, in grado di funzionare in qualunque luogo del pianeta e molto economica (quanto un telefono cellulare di fascia media).
- è esente da influenze di tipo ferromagnetico
- fornisce valori istantanei (in <1s) di azimuth rispetto al Sud/Nord geografico con un'accuratezza (errore assoluto massimo) di 2' (1.5' su misure medie)

Le potenziali applicazioni sono molteplici:

- Rilevamento: montata su un teodolite o stazione totale, la bussola solare fornisce lo zero assoluto al goniometro azimutale del teodolite/stazione.
- Impianti solari a concentrazione: montata (permanentemente) su una delle basi portanti del sistema di movimentazione degli elementi ottici di un impianto solare termodinamico o fotovoltaico a concentrazione, la bussola può svolgere una doppia funzione:
 - a) rilevare periodicamente l'azimut della base
 - b) inviare continuamente ai motori di movimentazione-ottiche i valori angolari per il corretto puntamento verso il sole.
- Installazione di basi RADAR: consente di orientare correttamente la base del radar
- Metrologico: può fungere da campione primario per la taratura di dispositivi che misurino l'azimut (bussole magnetiche, elettroniche, giroscopiche,...).
- Navale: in corso lo studio per una variante in grado di funzionare su mezzi mobili.

Nel caso particolare di applicazione agli impianti solari termodinamici di tipo "a torre", la bussola, installata nella base di ciascuno specchio, potrebbe svolgere tre funzioni:

- 1) Rilevare periodicamente l'orientamento della base dello specchio
- 2) Rilevare la direzione di vista della caldaia rispetto al luogo in cui si trova lo specchio (illuminando la caldaia di notte)
- 3) Fornire in continuazione ai motori i due valori angolari affinché il raggio di sole riflesso dallo specchio centri la caldaia

La funzione n°2 potrebbe essere sostituita da una bussola su teodolite da usarsi solo al momento dell'installazione dello specchio; in tal caso i valori di azimuth ed elevazione della caldaia rilevati dalla bussola a teodolite verrebbero inseriti permanentemente nel processore della bussola abbinata allo specchio.

6. L'inizio di un primo processo di trasferimento tecnologico industriale

Durante il periodo estivo del 2014 è stato avviato un accordo di ricerca in collaborazione tra l'ENEA e la ditta D. D. s.r.l. di Mereto di Tomba (UD), una ditta che produce costruzioni metalliche e lavorazioni meccaniche di altissima precisione e che vuole proporre sul mercato impianti solari termodinamici di tipo a specchi parabolici.

Gruppo per la storia dell'energia solare (GSES, www.gses.it)
 Incontro dibattito presso Museo dell'Industria e del Lavoro di Brescia, Rodengo Saiano
 Via del Commercio 18 - 25050 Rodengo Saiano - Brescia

"Storia e attualità del solare termodinamico con il contributo italiano"

venerdì 10 ottobre 2014

Lo scopo dell'accordo di collaborazione è quello di sperimentare un prototipo della bussola solare ENEA (ottimizzato per applicazione ad impianti solari termodinamici e quindi privo del teodolite) sull'impianto solare dimostrativo a specchi parabolici già realizzato presso la ditta (ed anche su quello realizzato presso ENEA Casaccia). La finalità è quella di dimostrare che l'installazione di una bussola su ogni parabola, consente di massimizzare la potenza prodotta e di rendere completamente autonome ed indipendenti le parabole, semplificandone l'installazione e correggendo automaticamente gli effetti di eventuali cedimenti del terreno.

Nel mese di settembre 2014 è stata eseguita una misura preliminare di azimut dell'impianto solare della D.D. utilizzando il 2° prototipo della bussola ENEA montato su teodolite (vedi Fig. 9). Il rilievo ha dimostrato che l'asse di rotazione dello specchio parabolico dimostrativo, che nominalmente era stato orientato in direzione Nord-Sud utilizzando riferimenti locali (con un teodolite erano stati puntati alcuni campanili del luogo), ha un azimut effettivo di $-40'$, un errore assolutamente ininfluenza se considerato nel calcolo dell'angolo di cui i motori devono ruotare la parabola, ma tale da poter far perdere una considerevole percentuale dell'energia raccolta (quasi il 50% in alcune condizioni di orientamento del sole) qualora venisse ignorato.



Figura – 9 Misure preliminari dell'azimut dell'impianto solare dimostrativo presso la ditta D.D. s.r.l.

7. Conclusioni

Possiamo concludere lo stato attuale di sviluppo, sperimentazione ed applicazione della bussola solare ENEA con le seguenti considerazioni:

- L'arte della progettazione di meridiane, unita alle competenze di ottica di matematica e di informatica del laboratorio SOR dell'ENEA di Frascati, ha consentito lo sviluppo di una nuova bussola solare elettronica estremamente precisa ed economica.

Gruppo per la storia dell'energia solare (GSES, www.gses.it)

Incontro dibattito presso Museo dell'Industria e del Lavoro di Brescia, Rodengo Saiano

Via del Commercio 18 - 25050 Rodengo Saiano - Brescia

“Storia e attualità del solare termodinamico con il contributo italiano”

venerdì 10 ottobre 2014

- Realizzati due prototipi di bussola su teodolite: il 1° calibrato tramite il sole, il 2° tramite banco ottico a laser. Entrambi hanno dimostrato una accuratezza $< 2'$.
- Nell'ambito della collaborazione tra la ditta di costruzioni metalliche e lavorazioni meccaniche D.D. s.r.l. di Mereto di Tomba (UD) ed ENEA sono in fase di sviluppo 3 prototipi di bussola solare per impianti solari termodinamici a specchi parabolici; verranno sperimentati entro pochi mesi sull'impianto della D.D. e di ENEA Casaccia (Roma).
- La bussola è estremamente versatile e può essere utilizzata sia per impianti termodinamici di altra natura (a dish o a torre) e sia per applicazioni diverse da quella dell'energia solare. ENEA è aperta per collaborazioni di ricerca in tutti i potenziali campi di applicazione.