



Agenzia Nazionale per le nuove tecnologie, l'energia e lo sviluppo economico sostenibile

**SPERIMENTAZIONE E MONITORAGGIO DI UN EVAPORATORE SOLARE PER
COMUNITA' POVERE**

Marri Pietro¹, Cappelletti Andrea¹, Cecconi Marco², Gini Edoardo², Orsetti Valerio²

¹ENEA, Ente per le nuove tecnologie, l'energia e lo sviluppo economico sostenibile
Via Vasco Viviani 23
Pisa,
050-3156223

²Insegnante Istituto Professionale per l'Industria e l'Artigianato "Giovanni Giorgi",
Via del Giardino Botanico 12,
Lucca
0583-494125

SPERIMENTAZIONE E MONITORAGGIO DI UN EVAPORATORE SOLARE PER COMUNITA' POVERE

Marri Pietro, Cappelletti Andrea, Cecconi Marco, Gini Edoardo, Orsetti Valerio con la collaborazione di Studenti dell'Istituto "Giorgi"

Riassunto

Ricercatori ENEA e professori di un istituto scolastico di Lucca hanno coinvolto due classi nella costruzione di un evaporatore solare per produrre acqua potabile da acque salate o salmastre o di scarsa qualità; l'evaporatore, dal 4 giugno al 24 settembre 2009, è stato anche monitorato per valutare la quantità di acqua potabile prodotta; la produzione è stata elevata e in accordo con quella ottenuta da uno studio effettuato nel 1971 su un'apparecchiatura simile. Ottimizzare la produzione di acqua con soluzioni innovative è un impegno della comunità scientifica, ma anche riutilizzare soluzioni semplici e già sperimentate, come l'evaporatore solare usato in Cile dal 1872 al 1911; apparecchiature moderne per produrre acqua potabile costose e difficili da gestire ne limitano l'uso in comunità povere. Questo lavoro ha dimostrato che l'apparecchiatura realizzata è semplice da costruire e da far funzionare, quindi è adatta alle esigenze di piccole comunità povere di paesi nel sud del mondo. Un futuro obiettivo è promuovere un'iniziativa a carattere interculturale ed educativo per sperimentare il funzionamento dell'evaporatore solare in un paese povero nel sud del mondo per proporre una soluzione a basso costo e impatto tecnologico in realtà dove la disponibilità di cibo e di acqua è scarsa. Le attività svolte sono state un ottimo esempio di collaborazione tra il mondo della ricerca e quello della scuola con gli studenti coinvolti in tutti gli aspetti del progetto e nell'analisi dei dati acquisiti; gli stessi studenti hanno visto riconosciuto il loro sforzo e il loro impegno durante l'iniziativa pubblica, organizzata il 26 maggio all'interno dell'istituto, a cui hanno partecipato numerosi istituti scolastici della Provincia ed amministratori pubblici in occasione della manifestazione European Solar Days (www.eusd.it), organizzata per promuovere in Europa l'uso del sole come sorgente di energia.

Parole chiave: evaporatore solare, desalinizzazione delle acque, pastorizzazione delle acque.

TESTING AND MONITORING OF A SOLAR STILL FOR POOR COMMUNITIES

Summary

ENEA researchers and teachers of a public school in Lucca have involved two classes in the construction of a solar still to produce waters from sea or brackish waters or non-saline groundwaters, not adequate to be used as drinking waters; the solar still from 4th June to 24th September 2009 was monitored to evaluate the water production, that has been high and concordant to that of a scientific test on a similar equipment, performed in 1971. The task of the scientific community is to discover innovative solutions to produce potable waters, but also to reuse simple and old solutions like the solar still, built in Chile since 1872 to 1911, because modern equipments, expensive and difficult to manage, cannot be used in poor third world countries. This work has proved that the solar still is an equipment simple to built and to manage, so it is suitable for needs of poor third world communities. A future objective is to organise a multicultural and educational initiative to test the solar still in a third world country, on 26th May 2009, to create a real collaboration, using a low cost and simple equipment, with realty where, as poverty, the distribution of resources, food and water, is scarce;. This work is a example of a good collaboration between the school education and research because the students were involved in all aspects of the solar still construction as well as in data analysis: moreover the students has seen prized their efforts in a public meeting, where numerous schools and public administrators have been present; the meeting was organized in the school in the contest of the campaign, the European Solar Days (www.eusd.it), aimed at promoting the use of the sun as organised within the school and an energy source throughout Europe.

Key words: solar still, water desalination, water pasteurisation

Premessa

Secondo l'Organizzazione Mondiale della Sanità (WHO) l'accesso all'acqua potabile, priva di sostanze patogene, è una necessità primaria degli esseri umani e un diritto irrinunciabile; inoltre secondo la commissione per i diritti umani delle Nazioni Unite la mancanza di acqua potabile è un affronto alla dignità dell'uomo perché mette a rischio la salute degli individui e la sopravvivenza delle comunità (OHCHR, 2003).

Un terzo della popolazione nei paesi in via di sviluppo non ha accesso ad acqua potabile ed è priva di strutture sanitarie adeguate, quindi è a rischio di vita: nel mondo i casi di infezioni intestinali gravi sono molto elevati, dei quali circa 4500 bambini (1.8 milioni/anno) muoiono per queste infezioni intestinali, dovute al consumo di acque non potabili (SODIS, 2007).

Ricercatori ENEA ed insegnanti dell'istituto professionale "Giovanni Giorgi" di Lucca, in collaborazione con L'Agenzia Lucchese Energia Recupero Risorse (ALERR), hanno promosso un'iniziativa finalizzata a sperimentare un'apparecchiatura per produrre acqua potabile e adatta a comunità rurali povere di paesi nel sud del mondo, e per sensibilizzare gli studenti sull'uso dell'energia solare in favore delle popolazioni povere del sud del mondo con risposte locali e con soluzioni di basso impatto tecnologico.

Due classi seconde, una del settore elettrico e l'altra del settore meccanico, hanno aderito con entusiasmo all'iniziativa; insegnanti di scienze hanno tenuto lezioni sul ciclo naturale dell'acqua e sui rischi del consumo di acque non sicure dal punto di vista sanitario; insegnanti di lettere hanno approfondito il tema dei conflitti sociali, causati dalla mancanza dell'acqua. Dopo alcune lezioni gli studenti, su scelta volontaria, hanno deciso di aderire all'iniziativa e hanno collaborato alla costruzione dell'evaporatore e all'analisi dei risultati.

Introduzione

Le soluzioni tecnologiche, per produrre acqua potabile (Buros, 1990; Wangnidk, 1998), sono numerose, ma alcune sono costose e difficili da gestire, quindi inadatte per piccoli nuclei familiari o per comunità rurali povere, prive di rete elettrica e di comunicazioni. Il mare, le lagune, i fiumi o gli acquiferi sono potenziali sorgenti di acque potabili, ma spesso con proprietà chimico-fisiche e/o batteriologiche inadeguate per il consumo umano; quindi è necessario rendere queste acque potabili e/o purificarle con apparecchiature funzionanti possibilmente senza energia elettrica, modulari, a costi accessibili alle popolazioni, autocostruibili con materiali del luogo di basso costo, facili da gestire anche a livello familiare o di piccoli nuclei; l'evaporatore solare (*solar still* nella letteratura internazionale) è un'apparecchiatura che soddisfa queste condizioni.

Le tipologie di evaporatori solari realizzati dalla comunità scientifica sono numerose (Delyannis et al., 1983; Delyannis, 2003; Headley, 1982; Mathioulakis et al., 2003; Khalifa et al., 1999; Minasian et al., 1994; El-Bahi et al., 1998; Toure et al., 1999; Abdel-Rehim et al., 2005; Singh et al., 1996; Aggarwal et al., 1999; Balladin et al., 1998; McCracken, 1990; Kumar et al., 2000). Questa tecnica fu usata dagli arabi nel XVI secolo e da numerosi uomini di scienza: Della Porta (1589), Lavoisier (1862) e Mauchot (1869).

Il primo impianto produttivo a grande scala fu realizzato nel 1872 in Cile da un ingegnere svedese, Charles Wilson, nelle miniere di salnitro e d'argento "Las Salinas" (Hading, 1883; Telkes, 1956), dove per le elevate concentrazioni di sali (140g/kg) e di arsenico le acque di falda non erano potabili. Fu costruito quindi un evaporatore solare per produrre 23000 litri di acqua potabile al giorno per le necessità della comunità locale; l'evaporatore aveva un'area di 4700 m² e rimase operativo per circa 40 anni fino al 1911, quando le miniere furono chiuse.

Di recente è stato attivato un progetto (Hanson et al., 2005; Foster et al., 2005) sul confine messicano, per rendere potabili le acque di falda con elevate concentrazioni di metalli pesanti

e di sostanze organiche; per mezzo dell'evaporatore le acque di falda contaminate venivano trasformate in acque potabili e purificate per i bisogni di una famiglia.

Studi passati e recenti hanno dimostrato che batteri, nocivi alla salute e presenti nelle acque potabili, possono essere eliminati mediante due meccanismi sinergici: (1) l'esposizione alla radiazione solare nello spettro dei raggi UV-A (320-400nm) e (2) il riscaldamento dell'acqua (Downes et al., 1877; Saitoh et al., 1999); è noto che, l'esposizione ai raggi solari per sei ore dell'acqua, contenuta in bottiglie di plastica di materiale PET e trasparente ai raggi UV-A (SODIS, 2007), garantisce un eccellente livello di purificazione dell'acqua; maggiore è la temperatura, più veloce ed più efficiente è il processo di purificazione. Questi due meccanismi sono sfruttati in un evaporatore solare, il quale può quindi produrre acqua potabile e contemporaneamente eliminare dall'acqua numerosi batteri pericolosi per la salute dell'uomo.

Principio di funzionamento di un evaporatore solare

Nella figura 1 viene illustrato lo schema generale dell'evaporatore solare; questa apparecchiatura è una scatola chiusa con la parete superiore di vetro e con all'interno un contenitore metallico pieno d'acqua salata o da purificare; la radiazione solare attraversa il vetro e raggiunge il fondo del contenitore, il quale si riscalda e trasferisce calore all'acqua che evapora. Il vapore tende a condensare sulla superficie interna del vetro, e quindi si crea uno sottile strato di condensato che fluisce per gravità in un contenitore, che si riempie di acqua diventata potabile. La scatola deve essere ermetica in modo da annullare o minimizzare le perdite di vapore; il fondo e le pareti laterali sono coibentate per limitare le perdite di calore e per consentire all'acqua di raggiungere temperature il più elevate possibile; infatti la produzione di un evaporatore solare aumenta all'aumentare della temperatura dell'acqua nel contenitore.

E' noto che la produzione dipende anche dalla differenza di temperatura tra l'acqua e la parete interna del vetro (Abdulrahman et al. 1997); se questa differenza si annulla, la produzione cessa (Cooper, 1972). Quindi il vetro deve disperdere verso l'atmosfera il calore del vapore condensato sulla parete interna (El-Sebaili, 2004); poiché la capacità del vetro di disperdere calore dipende anche dalla temperatura dell'aria e dalla velocità del vento, anche questi due ultimi parametri influenzano la produzione dell'evaporatore solare (Cooper, 1972; Abdulrahman et al., 1997).

Nell'apparecchiatura realizzata (fig.1), l'acqua esterna salata o contaminata viene fornita per gravità da un alimentatore chiuso e non collegato all'atmosfera, in modo che il livello dell'acqua rimane costante durante l'evaporazione.

Durante la fase di progettazione gli studenti, spinti dalla curiosità e dal desiderio di innovazione, hanno arricchito l'apparecchiatura di una valvola a due vie, attivata da un sensore crepuscolare (fig.1), con lo scopo di raccogliere in due contenitori differenti la produzione diurna, dall'alba al tramonto, e quella notturna, dal tramonto all'alba. Questa soluzione tecnologica, non necessaria ai fini di produrre acqua potabile, ha comunque consentito di valutare la produzione di acqua anche dopo il tramonto.

Una condizione essenziale, per un evaporatore solare adatto ad una comunità povera, è il costo basso di realizzazione; per questo si tende ad usare vetri comuni commerciali facilmente reperibili sul mercato a costi contenuti; sfortunatamente questi vetri sono solo parzialmente trasparenti alla radiazione solare, in particolare a quella ultravioletta (UV), contenendo Fe^{3+} , che è un forte assorbitore di radiazione UV (Donald et al., 2006). Quindi un vetro comune è facilmente reperibile sul mercato, ma attenua la radiazione UV e quindi ostacola o rallenta il processo di purificazione dell'acqua; per questa ragione si è deciso di utilizzare una soluzione semplice, ma efficace: l'acqua prodotta dall'evaporatore viene raccolta in contenitori di materiale PET (SODIS, 2007), trasparenti ai raggi UV, in modo che la purificazione dell'acqua avviene, all'interno dell'evaporatore, prevalentemente per effetto del riscaldamento, e all'esterno, nei contenitori di PET, per effetto dei raggi UV.

Progettazione e realizzazione dell'evaporatore solare

La figura 2 descrive l'apparecchiatura (lunghezza 1145mm, larghezza 430mm e altezza 420mm); il contenitore d'acqua (superficie complessiva di $0,42\text{ m}^2$) è di acciaio inossidabile (spessore 1mm) con il fondo e le pareti interne verniciate di nero per aumentare l'assorbimento della radiazione solare; nel contenitore, l'acqua ha uno spessore di 20mm, mantenuto costante da un alimentatore esterno a gravità chiuso all'atmosfera.

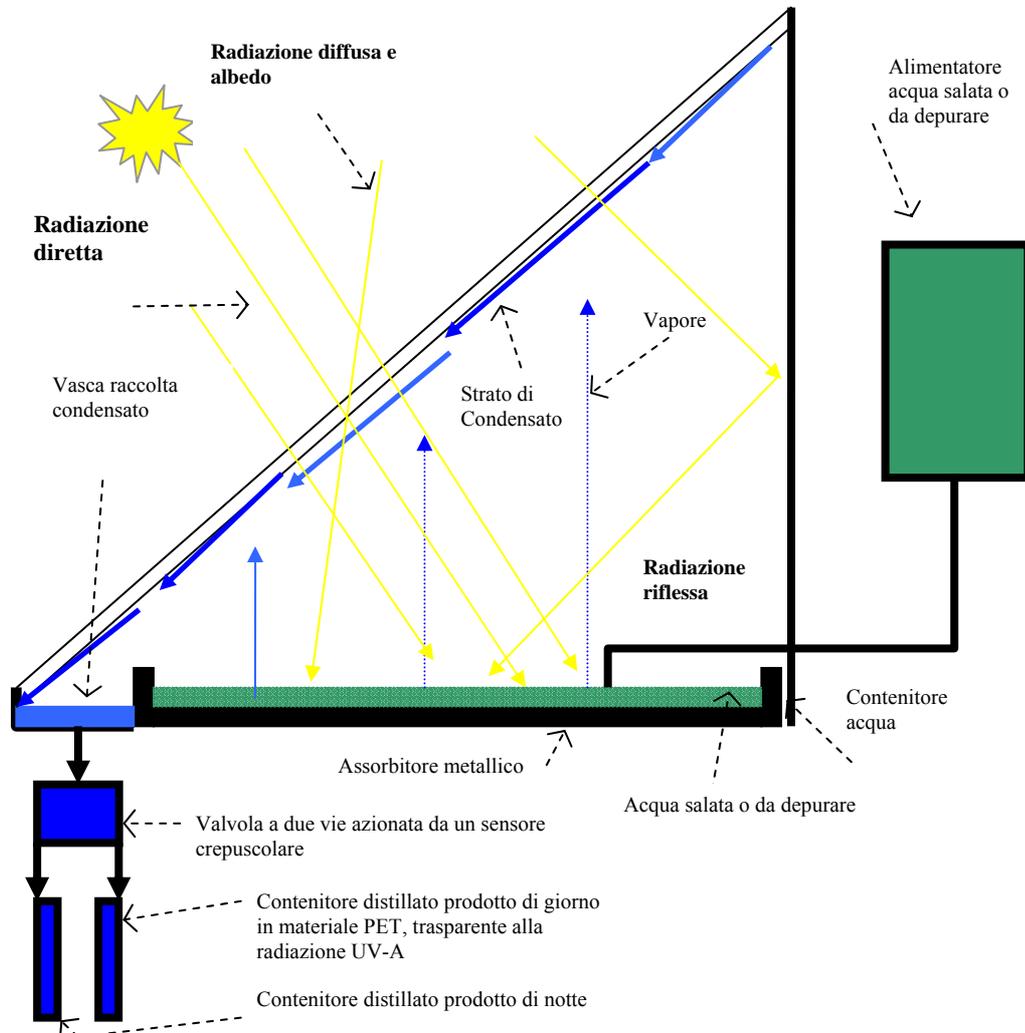


Figura 1: Schema generale dell'evaporatore solare; è visibile la valvola a due vie, utilizzata per differenziare la produzione diurna da quella notturna; questo dispositivo è stato usato solo per valutare quantitativamente l'acqua ottenuta dopo il tramonto.

All'interno dell'apparecchiatura il fondo e le pareti dell'evaporatore sono isolati da un strato di sughero di 3mm (peso specifico: $100-115\text{Kg/m}^3$; conducibilità termica $0,038\text{W/m }^\circ\text{K}$) che è un materiale naturale e riciclabile; le pareti esterne del contenitore sono di legno (peso specifico 450Kg/m^3 ; conducibilità termica $0,10\text{W/m }^\circ\text{K}$) con uno spessore di 20mm. Il vetro usato è di tipo commerciale con uno spessore di 4mm (peso specifico 2500Kg/m^3 ; conducibilità termica $1,0\text{W/m }^\circ\text{K}$); la superficie vetrata, che deve essere orientata a Sud, ha un'inclinazione di $44,3^\circ$. L'uso di colle a base di silicone ha consentito di impedire la fuoriuscita di vapore dall'apparecchiatura.



Figura 2: Foto dell'evaporatore solare.

I ricercatori ENEA, professori, studenti e personale della scuola hanno anche predisposto un sistema di monitoraggio dell'apparecchiatura in tempo reale utilizzando strumentazione di proprietà dell'ALERR; tale sistema è costituito da un acquirente 510 Campbell Scientific Data Logger (<http://www.campbellsci.com>) e dai seguenti sensori:

1. un piranometro (CS300-L Apogee PYR-P),
2. un anemometro (014-L Met One Anemometer),
3. un sensore di temperatura dell'aria (108-L Campbell Scientific) con schermo antiradiante,
4. un sensore di temperatura dell'acqua (108-L Campbell Scientific) per misure fino a 90°C,
5. un sensore PT100, schermato ai raggi del sole, per misure di temperatura della superficie esterna del vetro,
6. un pannello fotovoltaico per ricaricare la batteria di alimentazione dell'apparecchiatura.

I sensori di velocità del vento e di temperatura dell'aria sono stati posizionati vicino all'evaporatore solare.

Il software di acquisizione prevedeva tempi di campionamento dei sensori di 5 secondi e l'ottenimento dei seguenti parametri, come valori medi ogni 10 minuti:

1. radiazione solare globale sulla superficie orizzontale (W/m^2),
2. temperatura dell'acqua ($^{\circ}C$),
3. temperatura della parete esterna del vetro ($^{\circ}C$); non è stata misurata la temperatura della parete interna del vetro per mancanza di canali di ingresso dell'acquisitore e per non effettuare misure ridondanti; infatti uno studio (Cooper, 1973) ha dimostrato che, un vetro sottile ha elevata conducibilità termica, quindi l'andamento della temperatura della superficie interna del vetro è simile a quella esterna con differenze massime di 2-5 $^{\circ}C$ durante le ore di massima insolazione, e di 1-2 $^{\circ}C$ nelle restanti ore;
4. temperatura dell'aria ($^{\circ}C$),
5. velocità del vento (m/s),
6. la tensione della batteria (V),
7. la temperatura all'interno del contenitore dell'acquisitore.

I dati dall'acquisitore venivano trasferiti in formato ASCII ad un personal computer mediante una porta seriale comandata dal software PC208W della Campbell Scientific; nella figura 3 viene indicato un esempio di dati grezzi acquisiti comprendente anche la data (giorno giuliano) e l'ora dell'acquisizione.

Anno	Giorno Giuliano	Ora e minuti	T_Aria	T_Acqua	T_Vetro	Radiazione Solare	Velocità Vento	Tensione Batteria	Temper. Acquisitore
			°C	°C	°C	W/m ²	m/s	Volt	°C
2009	129	1000	21,0	47,8	41,0	710,0	1,0	14,4	25,7
2009	129	1010	20,2	46,7	39,9	526,2	1,1	14,4	26,2
2009	129	1020	20,4	45,1	38,8	459,5	1,1	14,4	26,3
2009	129	1030	21,2	46,0	39,7	570,0	1,0	14,4	26,2
2009	129	1040	20,9	45,0	38,9	438,4	1,0	14,4	26,2
2009	129	1050	21,5	47,6	40,9	727,0	0,9	14,4	26,1
2009	129	1100	22,1	51,1	43,7	792,0	0,9	14,4	26,4
2009	129	1110	23,8	53,3	45,8	823,0	0,7	14,4	27,1
2009	129	1120	23,6	54,9	47,0	814,0	0,8	14,4	28,0
2009	129	1130	23,5	55,5	47,4	782,0	1,0	14,4	28,6
2009	129	1140	23,8	56,5	48,2	863,0	1,1	14,4	29,1
2009	129	1150	23,6	55,3	47,3	886,0	1,0	14,4	29,4
2009	129	1200	25,0	54,1	46,7	835,0	0,8	14,4	29,7

Figura 3: Un esempio dei dati grezzi acquisiti.

Fase sperimentale e analisi dei dati

L'evaporatore solare è stato installato sulla terrazza dell'Istituto "Giorgi", situato all'interno delle mura urbane di Lucca (43°50'38", 10°30'18"); nella figura 4 vengono visualizzati i dati grezzi acquisiti ogni dieci minuti dal 7 maggio (ore 14:00) al 17 giugno (ore 9:45) e, per una migliore rappresentazione, nella figura 5, solo quelli dal 7 al 14 maggio.

L'analisi delle figure 4 e 5 conduce ad interessanti osservazioni: l'escursione giornaliera della temperatura dell'aria ha mostrato valori compresi nell'intervallo 10-32°C, mentre quella dell'acqua ha superato, quasi tutti i giorni, il valore di 60°C e solo, in quattro giorni, il valore di 70°C.

Fin dai primi giorni il sottile strato di materiale metallico riflettente, che rivestiva lo strato di sughero, ha mostrato segni di deterioramento a causa dell'elevata temperatura interna raggiunta; ciò ha diminuito la quantità di radiazione solare riflessa dalle pareti verso l'acqua e ha aumentato le dispersione termiche; i livelli di temperatura dell'acqua raggiunti sono stati comunque sufficientemente elevati da garantire una buona produzione di acqua; l'uso di un coibente più resistente alle temperature elevate, specialmente in paesi con elevata insolazione, è opportuno allo scopo di limitare le dispersioni termiche e favorire un riscaldamento maggiore dell'acqua.

Le temperature dell'acqua, del vetro e dell'aria mostrano andamenti ciclici giornalieri con valori di picco nelle ore di massima insolazione (fig.5), mentre la temperatura del vetro segue l'andamento di quella dell'acqua, ma con valori più bassi.

Come è già stato ricordato la produzione di un evaporatore dipende anche dalla differenza tra la temperatura dell'acqua e quella del vetro (lato interno); un riscaldamento eccessivo del vetro, che annulla questa differenza, interrompe la produzione di acqua; si può osservare (fig.5) che la temperatura del vetro, nelle ore di massima insolazione, è stata inferiore a quella dell'acqua, e per questo la produzione di acqua è stata buona. L'uso di un vetro con uno spessore di 3-4mm assicura, in genere, una buona produzione e, soprattutto, tiene bassi i costi dell'apparecchiatura; ciò avviene anche in condizioni di vento basso che limitano lo scambio convettivo sul lato esterno del vetro; infatti nonostante valori di velocità del vento bassi, tipici di un'area urbana (fig.5), con picchi solo nel tardo pomeriggio, la produzione è stata buona.

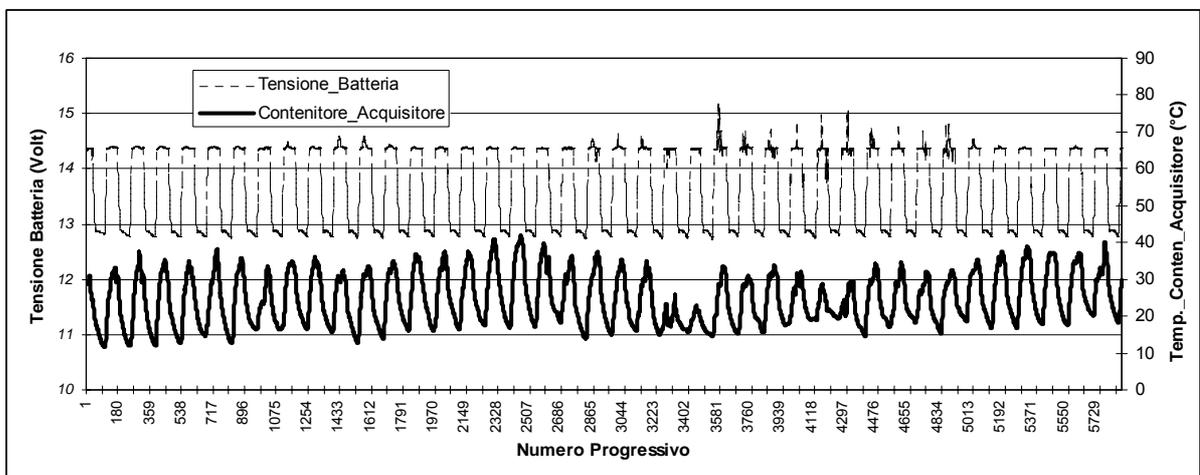
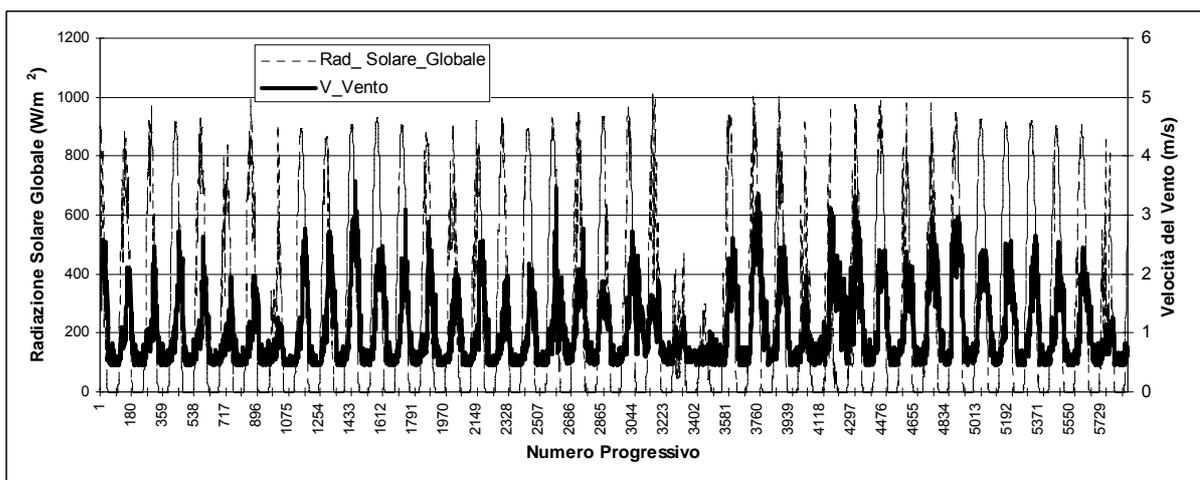
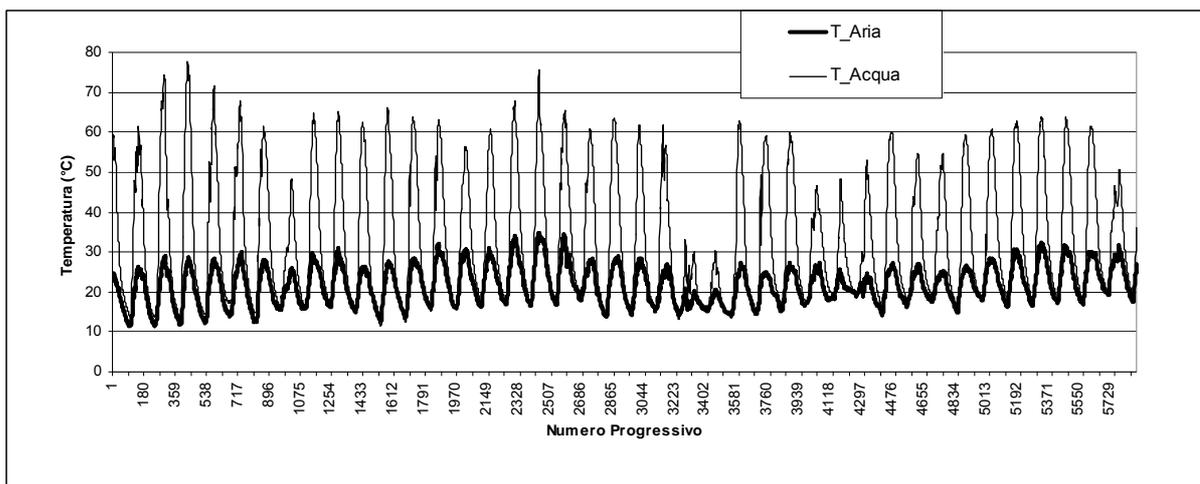


Figura 4: Dati grezzi, acquisiti ogni 10 minuti, dal 7 maggio (ore 14:00) al 17 giugno (ore 9:45): (in alto) le temperatura dell'acqua e dell'aria, (in mezzo) la radiazione solare e la velocità del vento, (in basso) la temperatura all'interno del contenitore dell'acquisitore e la tensione della batteria di alimentazione.

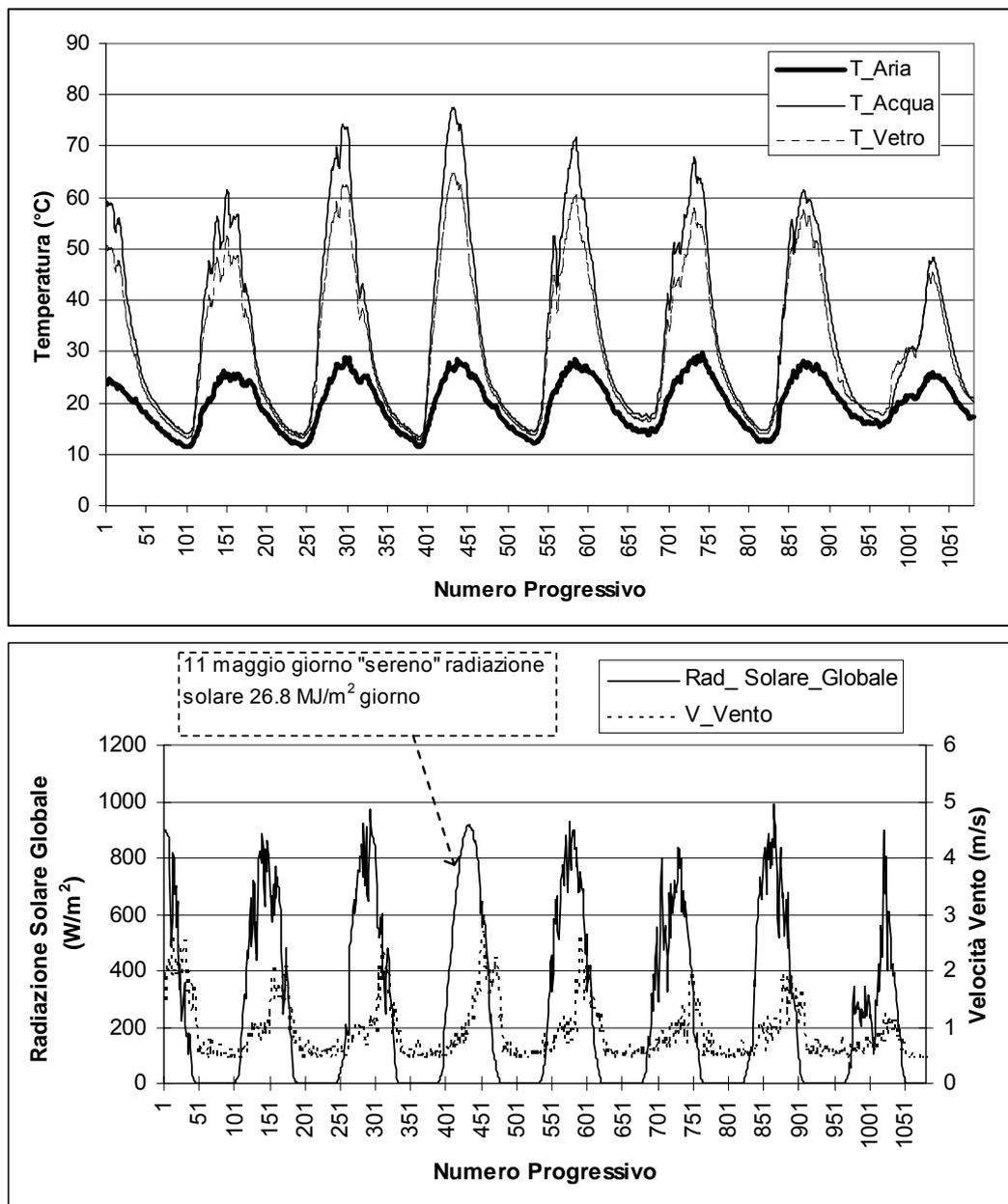


Figura 5: Andamenti dal 7 al 14 maggio dei dati grezzi, acquisiti ogni 10 minuti relativamente (in alto) alle temperature dell'acqua e dell'aria e anche del vetro, (in basso) alla radiazione solare globale e alla velocità del vento; il giorno 11 maggio, con una radiazione solare continua e poco variabile, può essere qualitativamente definito "sereno".

Nella figura 5 la radiazione solare mostra valori massimi fino a 1000 W/m^2 ; invece la figura 6 descrive gli andamenti della radiazione solare totale giornaliera misurata, insieme a quella diretta e di quella diffusa, stimate con uno specifico algoritmo (Iqball, 1979); si può osservare che la radiazione solare totale è stata generalmente nell'intervallo $15\text{-}30 \text{ (MJ/m}^2 \text{ giorno)}$; a causa della nuvolosità, ad esempio intensa il 30 maggio, il 4 giugno e il 15 settembre, la radiazione diretta si è annullata, mentre quella diffusa raggiunge valori di circa $10 \text{ (MJ/m}^2 \text{ giorno)}$.

Nella figura 6 viene riportata anche la radiazione solare extraterrestre giornaliera, quella sopra l'atmosfera e stimata con specifici algoritmi in funzione della latitudine e del giorno (Iqball, 1983); si può osservare che il 21 giugno è massima, con un valore superiore a $40 \text{ (MJ/m}^2 \text{ giorno)}$, mentre quella misurata al suolo e attenuata dall'atmosfera, rimane inferiore a $30 \text{ (MJ/m}^2 \text{ giorno)}$.

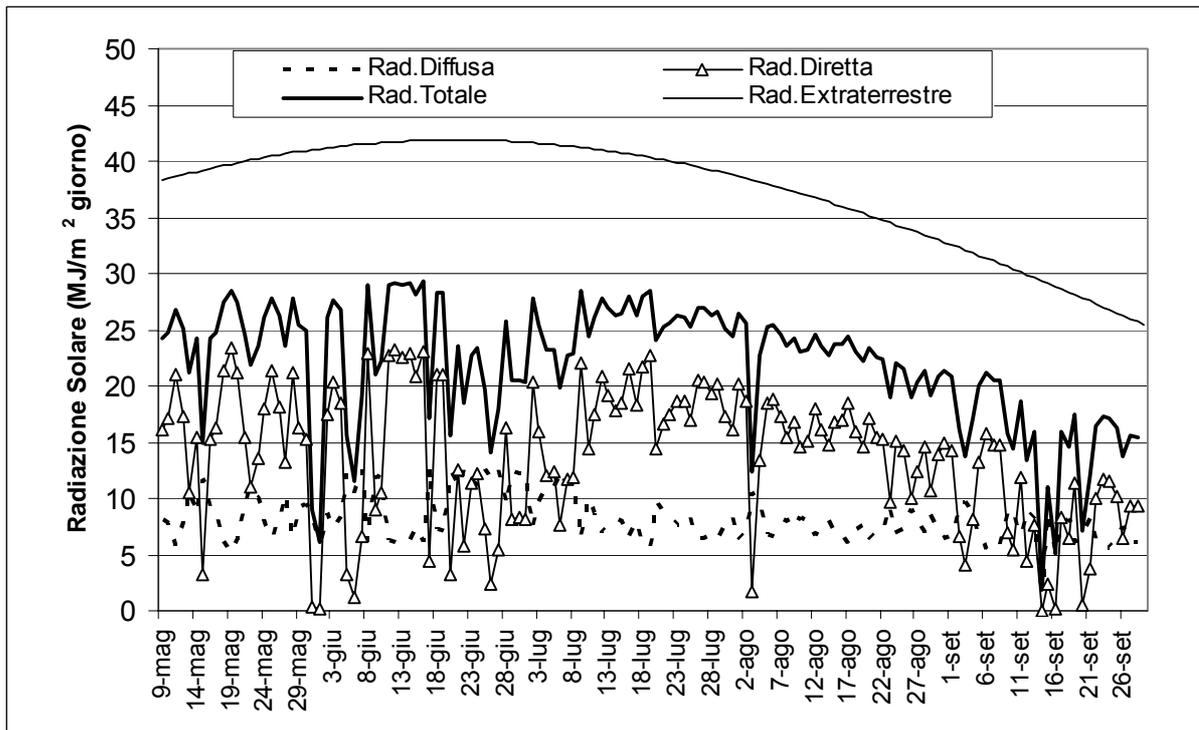


Figura 6: Andamenti della radiazione solare misurata insieme a quella diretta, a quella diffusa e a quella extraterrestre, calcolate con appositi algoritmi (Iqball, 1979); si può osservare che, in presenza di nuvolosità, la radiazione diretta ha un minimo, ma quella diffusa cresce con valori percentuali, rispetto a quella totale, non trascurabili e comunque sfruttabili per produrre energia.

Una valutazione qualitativa della nuvolosità può essere effettuata per mezzo dell'analisi dell'andamento della radiazione solare, che, ad esempio in un giorno "sereno", è continuo e poco variabile. Una valutazione quantitativa può invece essere effettuata mediante il rapporto tra la radiazione solare misurata e quella extraterrestre, definito indice di trasparenza atmosferica: un giorno viene classificato "sereno" quando questo indice è compreso nell'intervallo 0,7-0,9, "parzialmente nuvoloso" quando invece è tra 0,3 e 0,7 e infine "molto nuvoloso" quando è nell'intervallo 0-0,3 (Iqball, 1983).

Nella figura 7 sono rappresentati gli andamenti delle temperature dell'acqua, del vetro e dell'aria insieme a quello della radiazione solare in quattro giorni con differenti indici di attenuazione atmosferica; si può osservare che il 17 giugno la nuvolosità è assente, infatti l'indice di attenuazione di 0,69 è di poco inferiore al minimo valore per un giorno sereno che è 0,70; l'analisi degli andamenti in questo giorno, nel quale la produzione di acqua è stata la più elevata, conduce alle seguenti considerazioni generali :

- prima dell'alba (ore 5:00-7:00) le tre temperature mostrano un minimo con valori dipendenti essenzialmente dalle condizioni notturne;
- dopo l'alba (ore 7:00-10:00) il vetro si riscalda più velocemente dell'acqua; la velocità di riscaldamento dell'acqua dipende da numerosi fattori, quali lo stato di coibentazione dell'apparecchiatura, dall'inerzia termica dei materiali usati e in particolare dallo spessore dell'acqua nel contenitore; uno spessore di 2-3mm, invece di 20mm, avrebbe reso più veloce il riscaldamento dell'acqua durante le esperienze;
- quando la temperatura dell'acqua diventa superiore a quella del vetro (10:00-14:30) l'evaporatore inizia a produrre acqua;
- durante il pomeriggio le temperature tendono a diminuire con un andamento in generale più lento del riscaldamento; si può notare che il giorno 17 la temperatura del vetro rimane

inferiore a quella dell'acqua fino alle 21:50 e, negli altri giorni, anche oltre; infatti la produzioni di acqua, in genere, è continuata anche dopo il tramonto. L'analisi dei andamenti negli altri giorni mostra che le temperature dell'acqua e del vetro mostrano andamenti che seguono quello della radiazione solare.

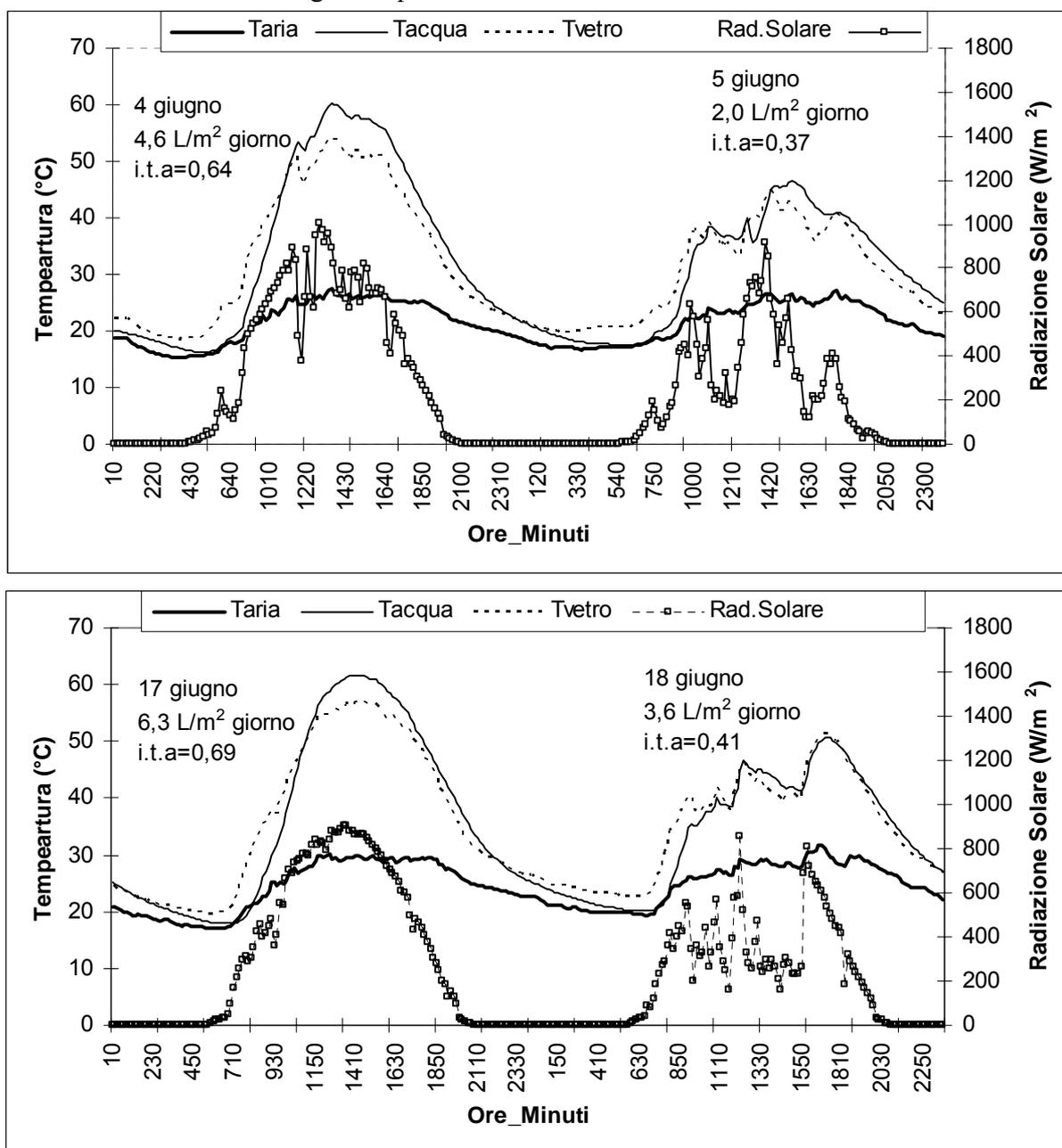


Figura 7: Andamenti della temperatura dell'acqua, del vetro (lato esterno) e dell'aria insieme alla radiazione solare; la sigla i.t.a sta per "indice di attenuazione atmosferica".

Purificazione delle acque da parte dell'evaporatore solare

Un evaporatore solare è un'apparecchiatura semplice per produrre acqua potabile anche di buona qualità batteriologica (Dale et al., 1994; Bandal et al., 1988; SODIS, 2007). E' noto che il riscaldamento del latte a temperature superiori a 71,7°C per 15 secondi, oppure a 62,8°C per 30 minuti, elimina la maggior parte di microbi patogeni; alcuni sono termoresistenti e sopravvivono alla pastorizzazione, ma non sono pericolosi per la popolazione. Effetti analoghi si ottengono con il riscaldamento dell'acqua; ad esempio si possono eliminare il 99,99% dei coliformi fecali, responsabili di infiammazioni intestinali, pericolose per l'uomo; ciò è particolarmente importante nei paesi del sud del mondo dove le condizioni igieniche sono

carenti e i livelli elevati di radiazione solare consentono il riscaldamento dell'acqua per tutto l'anno.

Per fornire un'indicazione pratica sul livello di purificazione si riportano tre condizioni: il raggiungimento di temperature comprese tra 60-65°C, per almeno 60 minuti, assicura un buon livello di purificazione delle acque (David et al., 1984) (Condizione 1^a); a temperature superiori a 70°C sono sufficienti 10-15 secondi (Condizione 2^a) (Fjendbo et al., 1998); inoltre un flusso di radiazione solare superiore a 500 W/m² per almeno 2-4 ore (Lawand et al., 1990) assicura una buona purificazione dell'acqua (Condizione 3^a).

Data	Condizione 1 ^a T > 60 °C per 30 minuti	Condizione 2 ^a T > 70 °C per 10-15 secondi	Condizione 3 ^a Rad > 500 W/m ² per 4 ore
7-mag	0	0	190
8-mag	30	0	430
9-mag	290	110	460
10-mag	320	200	490
11-mag	230	40	460
12-mag	180	0	370
13-mag	60	0	470
14-mag	0	0	130
15-mag	190	0	470
16-mag	180	0	440
17-mag	140	0	500
18-mag	180	0	500
19-mag	190	0	500
20-mag	140	0	440
21-mag	0	0	400
22-mag	50	0	370
23-mag	250	0	460
24-mag	260	60	500
25-mag	210	0	420
26-mag	70	0	430
27-mag	200	0	480
28-mag	100	0	420
29-mag	20	0	390
30-mag	0	0	0
31-mag	0	0	0
1-giu	150	0	430
2-giu	0	0	520
3-giu	30	0	470
4-giu	0	0	170
5-giu	0	0	130
6-giu	0	0	250
7-giu	50	0	530
8-giu	0	0	340
9-giu	0	0	340
10-giu	0	0	500
11-giu	110	0	520
12-giu	220	0	520
13-giu	240	0	520
14-giu	190	0	510
15-giu	170	0	450
16-giu	0	0	170
17-giu	0	0	40

Figura 8: Una cella “in grigio” significa che la singola condizione per purificare l'acqua non si è verificata; si può osservare che le condizioni di non purificazione dell'acqua (tre celle in grigio contemporaneamente) sono state solo 8 su 42 casi; il primo e l'ultimo giorno le misure sono state solo parziali.

A titolo esemplificativo sono state calcolate, per mezzo delle misure, le durate in minuti delle tre condizioni operative; quando una condizione di purificazione non è verificata, la cella è rappresentata in grigio. Si può osservare (fig.8) che, dal 7 maggio al 17 giugno, tre celle grigie contemporanee (condizione di non purificazione) è avvenuta solo in 8 giorni, ma nel primo e nell'ultimo giorno le misure erano incomplete. Questi risultati forniscono un'indicazione di massima che l'apparecchiatura, anche operativa ad una latitudine di 44°, possiede nel periodo estivo, ma non solo, un'importante potenzialità di purificare le acque, soprattutto adottando

criteri progettuali tendenti a favorire il riscaldamento dell'acqua utilizzando materiali con bassa capacità termica, una buona coibentazione e piccoli (2-3mm) spessori di acqua nel contenitore.

E' chiaro che, nei paesi a latitudini basse e con elevati livelli di radiazione solare, il raggiungimento di temperature dell'acqua fino a 65°C, previsto dagli standard batteriologici per la purificazione (WHO, 1996), viene garantito per la maggior parte dell'anno, ma è realistico aspettarsi il raggiungimento frequente anche di valori superiori a 75°C, che eliminano la maggior parte dei batteri, dannosi alla salute dell'uomo (Fjendbo et al., 1998).

Analisi delle prestazioni dell'apparecchiatura

In generale la produzione di un evaporatore solare dipende prevalentemente dai seguenti parametri: il tipo e la geometria, i materiali, la radiazione solare, la temperatura dell'aria e la velocità del vento (El-Sebaili, 2003); normalmente viene valutata semplicemente con due parametri: (a) la produzione giornaliera Y (L/ m² giorno), espressa per unità di superficie del contenitore d'acqua e (b) l'efficienza giornaliera (η) e si trascurano gli effetti degli altri parametri.

La produzione Y viene normalmente misurata in funzione dell'energia solare giornaliera Q_s (MJ/ m² giorno), ma talvolta può essere stimata anche per mezzo di curve sperimentali ricavate da evaporatori simili; ad esempio una curva, che fornisce la produzione in funzione della radiazione solare, valida per un evaporatore simile a quello costruito, è la seguente (Abdulrahman et al., 1997):

$$Y = 0,1187 \times Q_s - 0,262 \quad (1).$$

L'efficienza giornaliera (η), invece, viene calcolata con il seguente metodo (Khalifa et al., 1999):

$$\eta = \frac{Q_u}{Q_s} \quad (2),$$

dove Q_s (MJ/ m² giorno) è il valore giornaliero della radiazione solare incidente sulla superficie orizzontale del contenitore dell'acqua; Q_u è la quantità di calore utilizzata per evaporare l'acqua prodotta, che si stima moltiplicando la quantità giornaliera di distillato Y per il calore latente L_h , il cui valore è 2,26 (MJ/ Kg); si ipotizza che il peso specifico dell'acqua sia uguale a 1 (kg/L), e che la quantità giornaliera di acqua Y (L/ m² giorno) sia quella ottenuta dall'alba di un giorno a quella successiva; fino ad ora, non è stato possibile misurare o quantificare con precisione la produzione notturna causata solo dal riscaldamento diurno; si può osservare comunque (fig.7) che, circa alle 23:30 la temperatura del vetro diventa uguale a quella dell'acqua e, fino all'alba, è anche superiore; in queste condizioni la produzione è bassa o nulla. E' noto che la produzione notturna viene favorita dalla ridotta temperatura dall'aria (Tiwari et al., 2006), ma dipende anche da altri fattori: ad esempio un spessore d'acqua piccolo nel contenitore velocizza il riscaldamento dell'acqua, e quindi la produzione nelle prime ore del mattino, ma fa immagazzinare meno energia per la produzione dopo il tramonto; il tema della produzione notturna ha bisogno di ulteriori approfondimenti.

Per evaporatori solari, uguali a quello realizzato, le efficienze giornaliere ottenute sono nell'intervallo 0,20-0,25 (Ghoneyem et al., 1995), ma talvolta hanno raggiunto valori anche maggiori, ma senza superare il 50% (Cooper, 1972); vale la pena osservare che il confronto tra apparecchiature richiede cautela perché le apparecchiature sono solo in apparenza simili, ma spesso con differenze sostanziali nei materiali, nelle geometrie e nelle condizioni climatiche di funzionamento.

Nella figura 9 sono riportate le produzioni giornaliere Y misurate nell'intervallo di radiazione solare compreso tra 12 e 27 (MJ/m^2 giorno), insieme alla radiazione diffusa, a quella diretta (Iqball, 1979) e all'indice di trasparenza atmosferica. Nella figura 10 sono invece mostrati gli andamenti della radiazione solare extraterrestre, calcolata per la latitudine di Lucca e per tutto l'anno, e, limitatamente al periodo di monitoraggio, gli andamenti della radiazione solare, misurata sulla superficie orizzontale e dell'indice di trasparenza atmosferica; si può notare che questo indice è in genere compreso nell'intervallo 0,60-0,70, ma non supera mai il valore 0,70, perché la radiazione solare misurata sulla terrazza della scuola è evidentemente attenuata, anche se di poco, dalla presenza di vegetazione e di edifici.

Si può osservare (fig.9) che, il 17 giugno, con il valore più elevato di energia solare pari a 29,26 (MJ/m^2 giorno) la produzione giornaliera è stata di 6,3 $\text{L}/(\text{m}^2$ giorno) con un rendimento η pari a 0,48, che è un valore piuttosto elevato; invece la minima produzione è stata di 1,5 $\text{L}/(\text{m}^2$ giorno) con una radiazione di 11,99 (MJ/m^2 giorno); il rendimento η , in questo caso, è stato di 0,28.

Giorno Giuliano	Data	Energia Solare Totale MJ/m^2 giorno	Energia Solare Diffusa MJ/m^2 giorno	Energia Slare Diretta MJ/m^2 giorno	Indice Trasparenza Atmosferica	Produzione Totale Y L/m^2 giorno	η
155	04-giu	26,72	8,20	18,48	0,64	4,6	0,39
156	05-giu	15,52	12,24	3,28	0,37	2,0	0,29
167	17-giu	29,26	6,12	23,15	0,69	6,3	0,48
168	18-giu	17,11	12,63	4,48	0,41	3,6	0,47
202	21-lug	25,20	8,60	16,56	0,63	4,3	0,38
203	22-lug	25,60	8,20	17,38	0,64	4,8	0,42
204	23-lug	26,20	7,55	18,64	0,66	5,1	0,43
205	24-lug	26,16	7,49	18,66	0,66	4,8	0,41
206	25-lug	25,18	8,30	16,88	0,63	5,3	0,47
207	26-lug	26,99	6,40	20,97	0,68	5,6	0,46
208	27-lug	26,87	6,40	20,42	0,68	5,2	0,44
215	03-ago	12,38	10,59	1,75	0,32	1,6	0,29
216	04-ago	22,67	9,25	13,42	0,59	4,3	0,43
238	27-ago	18,97	8,85	10,12	0,56	3,6	0,43
239	28-ago	20,33	7,92	12,40	0,60	3,8	0,42
240	29-ago	21,41	6,88	14,53	0,64	4,0	0,42
246	03-set	13,80	9,70	4,09	0,44	1,8	0,29
247	04-set	17,04	8,85	8,19	0,54	2,6	0,35
264	21-set	11,99	8,34	3,65	0,43	1,5	0,28
265	22-set	16,44	6,45	9,98	0,61	2,3	0,32
266	23-set	17,26	5,61	11,62	0,64	3,5	0,45
267	24-set	17,16	5,52	11,59	0,64	3,7	0,48

Figura 9: Produzione giornaliera di acqua ed efficienza giornaliera in funzione dell'indice di trasparenza atmosferica, della radiazione solare, di quella diretta e di quella diffusa.

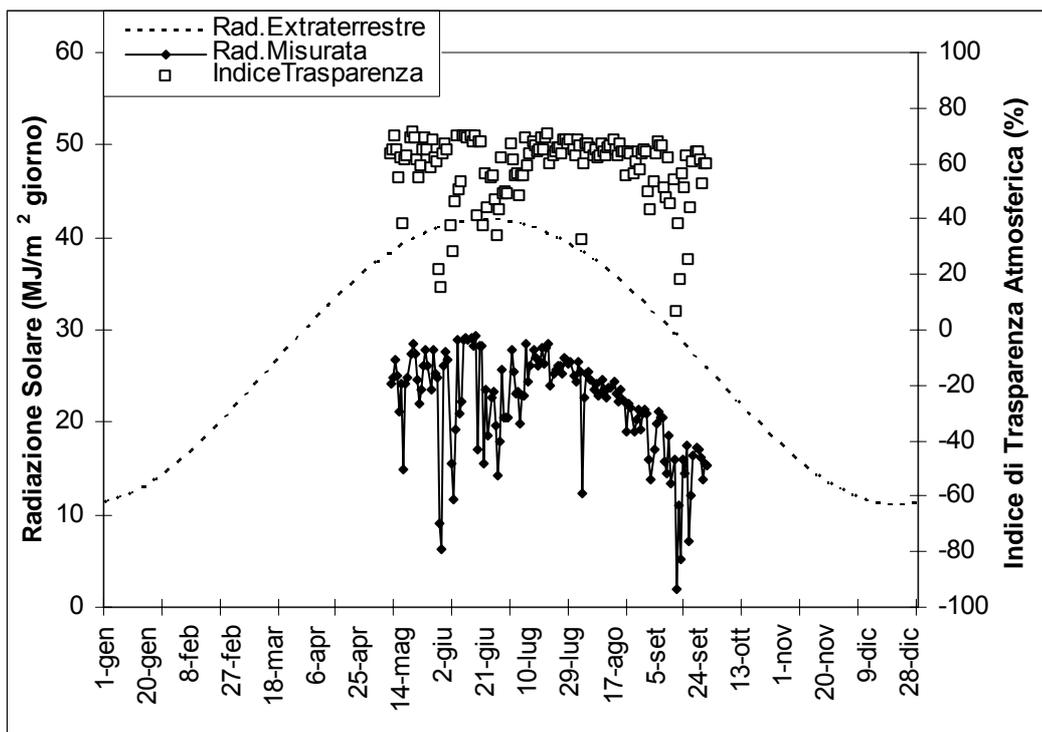


Figura 10: Andamenti della radiazione solare extraterrestre (calcolata per la latitudine di Lucca), della radiazione solare misurata sulla superficie orizzontale e dell'indice di trasparenza atmosferica (la scala di questo indice è stata scelta per non sovrapporre i grafici).

Nella figura 11 la produzione dell'apparecchiatura viene confrontata con quella stimata dalla relazione (1) (Abdulrahman et al., 1997), e con quella ricavata da una curva sperimentale (Cooper, 1972). Si può osservare che le due curve sono molto diverse: le differenze sono relativamente basse fino a valori di radiazione solare inferiori a 10 (MJ/m^2 giorno), poi, mentre la curva inferiore (Abdulrahman et al., 1997) è di tipo lineare, l'altra (Cooper, 1972) ha una pendenza maggiore che aumenta in modo non lineare con la radiazione solare; si fa notare che questa ultima curva è stata ottenuta dall'autore interpolando misure effettuate soprattutto nell'intervallo 20-30 (MJ/m^2 giorno) che è quello di maggior interesse per applicazioni in paesi nel sud del mondo.

Nella stessa figura si può notare che l'evaporatore solare ha prodotto acqua con un andamento molto simile a quello della curva superiore e che la quantità di acqua prodotta non è da sottovalutare, infatti un'apparecchiatura di dimensioni limitate può essere sufficiente a soddisfare pienamente le esigenze di acqua potabile per nuclei familiari o piccole comunità.

Conclusioni

L'iniziativa aveva l'obiettivo di costruire, insieme a degli studenti, un evaporatore solare, ma anche di aprire una collaborazione concreta tra il mondo della ricerca e quello della scuola.

I risultati dell'iniziativa sono stati superiori alle aspettative: gli studenti hanno apprezzato la presenza di personale esterno e hanno partecipato con entusiasmo alla costruzione e al monitoraggio dell'apparecchiatura; i risultati del loro lavoro sono stati molto apprezzati in occasione della manifestazione European Solar Days (www.eusd.it), organizzata dalla scuola e a cui sono stati invitati numerosi istituti scolastici della Provincia di Lucca.

Per il successo riscontrato il prossimo anno le tematiche affrontate verranno approfondite e saranno coinvolte intere classi e anche un istituto tecnico chimico per effettuare analisi chimiche e batteriologiche sulle acque prodotte dall'evaporatore; sarà inoltre migliorato il sistema di monitoraggio con un dispositivo per rilevare la produzione dell'evaporatore in

modo continuo per tutto il giorno anche da una stazione remota; si avrà quindi la possibilità di indagare sulla produzione anche durante le ore notturne.

L'esperienza ha ampiamente dimostrato che studenti, privi di conoscenze specialistiche, sono stati in grado di costruire un'apparecchiatura con un'efficienza elevata simile a quella di apparati simili realizzati per scopi di ricerca; ciò significa che l'apparecchiatura è facile da costruire e da gestire; quindi nuclei familiari e piccole comunità possono costruire e gestire in proprio apparecchiature di questo tipo per produrre acqua potabile e garantire la sopravvivenza nei luoghi di origine; è comunque bene ricordare che, per realtà isolate e povere del terzo mondo, è necessario l'impegno di organizzazioni e istituzioni pubbliche per trasferire, a titolo gratuito, le competenze tecniche alle comunità interessate e per reperire le risorse economiche necessarie per l'acquisto dei materiali.

Per queste motivazioni sarebbe auspicabile per il futuro sfruttare l'esperienza di questo lavoro per promuovere un'iniziativa a carattere interculturale ed educativo sul diritto all'acqua; tale iniziativa dovrebbe essere finalizzata a costruire un evaporatore solare, simile a quello costruito dagli studenti, e ad analizzare la disponibilità, da parte di una comunità povera che non dispone di acqua potabile, ad accettare questo tipo di soluzione tecnologica,

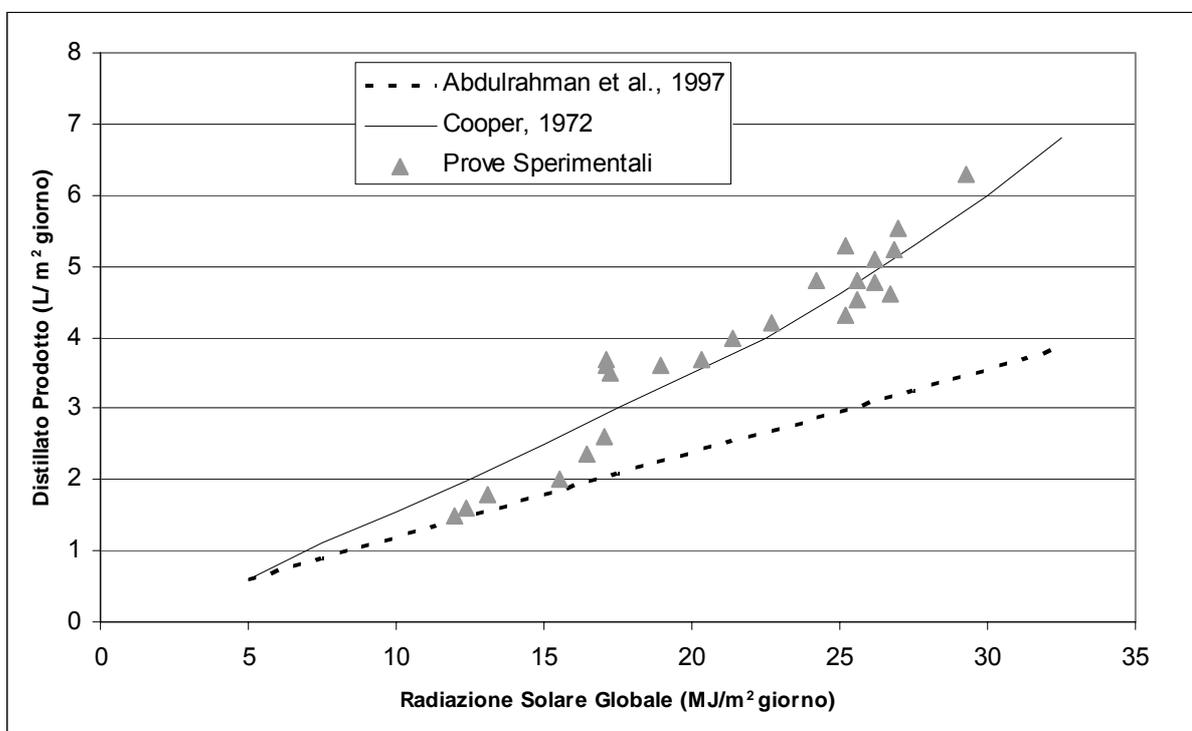


Figura 11: Produzione di acqua dell'evaporatore solare, in funzione della radiazione solare, ottenuta con relazioni empiriche e con misure sperimentali effettuate presso l'Istituto "Giorgi".

Ringraziamenti

I seguenti studenti hanno preso parte attiva al progetto:

Hoxa Edison¹, Leu Marius Marian¹, Pucci Umberto¹, Aliu Xhemil², Baggiano Vincenzo², Durlescu Vadim², Francesconi Daniele², Giorgi Gabriele², Livi Alessio², Mazzone Cataldo², Cantucci Daniele², Simonetti Daniele², Trotta Micael², Zambenedetti Cristian²

¹Classe 2° Operatori Meccanici (OMA) Istituto “Giorgi”, Via del Giardino Botanico 12, Lucca, 0583-49125.

²Classe 2° Operatori Elettrici (OEA) Istituto “Giorgi”, Via del Giardino Botanico 12, Lucca, 0583-49125.



Figura 12: Alunni che hanno preso parte attiva al lavoro.

Si ringraziano, per l’Istituto Professionale per l’Industria e l’Artigianato, il preside Sermiotti Erminio e i collaboratori Biondi Giuseppe, Chiavacci Brunello e Frediani Roberto.

Un particolare ringraziamento anche a Mauro Giovanni Picchi e a Francesco Nolli, rispettivamente presidente e vice presidente dell’Agenzia Lucchese per l’Energia e il Recupero delle Risorse (ALERR), per l’incoraggiamento ad attivare progetti di diffusione della cultura scientifica e tecnologica in collaborazione negli istituti scolastici, e per aver messo a disposizione la strumentazione per il monitoraggio dell’apparecchiatura.

Bibliografia

Aggarwal S., Tiwari G.N., 1999, Thermal Modelling of a Double Condensing Chamber Solar Still: an Experimental Validation, *Energy Conversion & Management*, 40, 97-114.

Abdel-Rehim Z., Lasheen A., 2005, Improving the Performance of Solar Desalination Systems, *Renewable Energy*, 30, 1955-1971.

Abdulrahman G., Ileri A., 1997, Software to Analyze Solar Stills and an Experimental Study on the Effects of the Cover, *Desalination*, 114, 37-44.

ALERR: www.alerr.it.

Bandal N.K, Sawhney R.L, Misra A., 1988, Solar Sterilization of Water, *Solar Energy*, 40, 35-39.

Balladin D.A., Headley O., Arlene Roach, 1998, Evaluation of a Concrete Cascade Solar Still, *Renewable Energy*, 17,191-206.

Buros O.K., 1990, The Desalting ABC’s, International Desalination Association.

- Ciochetti D.A., Metcalf R.H., 1983, Pasteurization of Naturally Contaminated Water with Solar Energy, *Applied and Environmental Microbiology*, 47 (2), 223-228.
- Cooper P.I., 1972, The Maximum Efficiency of Single Effect Solar Stills, *Solar Energy*, 15, 205-217.
- Dale Andreatta P.E., Yegian D.T., Connelly L., Metcalf R.H., 1994, Recent Advances in Devices for the Heat Pasteurization of Drinking Water in the Developing World, 29th Intersociety Energy Conversion Engineering Conference , IECEC-94. 4, 1741-1746.
- David A., Robert H., 1984, Pasteurization of Naturally Contaminated Water with Solar Energy, *Applied and Environmental Microbiology*, 47(2), 223-228.
- Delyannis A., Delyannis E., 1983, Recent Solar Distillation Development, *Desalination*, 45, 361-369.
- Delyannis E., 2003, Historic Background of Desalination and Renewable Energies, *Solar Energy*, 75, 357-366.
- Donald S.B., Swink A.M., Scriber H.D., 2006, High-Iron Ferric Glass, *Journal of Non-Crystalline Solids*, 352, 539-543.
- Downes A., Blunt T.P., 1877, Researches on the Effect of Light upon Bacteria and Other Organisms, *Proceedings of the Royal Society of London*, 26, 488-500.
- El-Bahi A., Inan D., 1998, Analysis of a Parallel Double Glass Solar Still with Separate Condenser, *Renewable Energy*, 17, 509-521.
- El-Sebaï A.A., 2003, Effect of Wind Speed on Active and Passive Solar Stills, *Energy Conversion and Management*, 45, 1187-1204.
- Fjendbo Jørgensen A.J., Nøhr K., Sørensen H., Boisen F., 1998, Decontamination of Drinking Water by Direct Heating in Solar Panels, *Journal of Applied Microbiology*, 85, 441-447.
- Foster R., Amos W., Eby S., 2005, Ten Years of Solar Distillation Application Along the U.S.-Mexico, Border, *Solar World Congress, International Solar Energy Society, Orlando, Florida, August 11*.
- Ghoneyem A., 1995, Experimental Study on the Effects of the Cover and Numerical Prediction of a Solar still Output. In: (16th ed.), M.S. Thesis, METU, Ankara.
- Iqbal M. 1979, A Study of Canadian, Diffuse and Total Solar Radiation Data, I. Monthly Average Daily Horizontal Radiation, *Solar Energy*, 22 (1), 81-86.
- Iqbal M., 1983, *An Introduction to Solar Radiation*, Academic Press, ISBN:0-12-373752-4, New York.
- Hanson A., Zachritz W., Stevens K., Mimbela L., Polka R., Cisneros L., 2004, Distillate Water Quality of a Single-Basin Solar Still: Laboratory and Field Studies, *Solar Energy*, 76.
- Harding J., 1883, Apparatus for Solar Distillation, *Proceedings of the Institution of Civil Engineers*, London 73, 284-288.

- Headley O., 1982, Solar Distillation of Saline Water Solar Stills, In: Hoogendoorn DJ Editor, Thermal Solar Engineering for Developing Countries, Belgrade, Yugoslavia: International Centre for Heat and Mass Transfer.
- Kalifa A.J.N., Al-Jubouri A.S., Abed M.K., 1999, An Experimental Study on Modified Simple Solar Stills, Energy Conversion & Management, 40, 1835-1847.
- Kumar S., Tiwari G.N., Singh H.N., 2000, Annual Performance of an Active Solar Distillation System, Desalination, 127, 79-88.
- Lawand T., Alward R., Ayoub J., 1990, Solar Disinfection of Water, Clean and Safe Energy Forever. Proceedings of the 19 89 Congress of the International Solar Energy Society, 3, 1952-1956.
- Mathioulakis E., Belessiotis V., 2003, Integration of Solar Still in a Multi-source, Multi-use Environment, Solar Energy, 75, 403-411.
- McCracken H., 1990, Distillate Production of a Simple Direct Solar Still, SunWorld, 14(3), 83-87.
- Minasian A.N., Al-Karaghoul A.A., 1994, An Improved Solar Still: The Wick-basin Type, Desalination, 153, 55-64.
- OHCHR, 2003, http://www2.ohchr.org/english/issues/water/docs/Right_to_Water.pdf.
- Saitoh T.S., El-Ghetany H.H., 1999, Solar Water Sterilization System with Thermally-Controlled Flow, Applied Energy, 64, 387-399.
- Singh S. K., Bhatnagar V. P., Tiwari G. N., 1996, Design Parameters for Concentrator Assisted Solar Distillation System, Energy Conversion & Management, 37, 2, 247-252.
- SODIS, Solar Water Disinfection , 2007, <http://www.sodis.ch>.
- Telkes M., 1956, Solar Stills, In Proceedings of World Symposium on Applied Solar Energy, 73-79.
- Tiwari A.K., Tiwari G.N., 2006, Effect of Water Depths on Heat and Mass Transfer in a Passive Solar Still: in Summer Climatic Condition, Desalination, 195, 78-94.
- Toure S., Salami H., Meukam P., 1999, Theoretical and Experimental Studies of a Solar Still Type Suitable for Alcoholic Distillation, Renewable Energy, 16, 739-742.
- Wangnik K., 1998, Ida Worldwide Desalting Plants Inventory, Report n° 15.
- Werner A., 2007, External Water Condensation and Angular Solar Absorbance, Acta Universitatis Upsaliensis Upsala, ISSN 1651-6214.
- WHO, 1996, Guidelines for Water Quality, Geneva: WHO Publications.