

SESSIONE POSTER

## **SOLAR THERMAL PASTEURIZATION: A SIMPLE WAY TO DISINFECT WATER**

Giampaolo Manfrida \*, Adalgisa Sinicropi<sup>°</sup>, Federico Rossi\*<sup>°</sup>

\*Università degli Studi di Firenze, giampaolo.manfrida@unifi.it, fe.rossi@unifi.it

<sup>°</sup> Università degli studi di Siena, adalgisa.sinicropi@unisi.it

### **Sommario**

In questo lavoro viene rivisitato un semplice sistema di pastorizzazione solare dell'acqua discusso in nostrirecentistudi dove è stato dimensionato esimulato per varie località in cui sono presenti evidenti problemi di crisi idrica. Tale modelloinclude l'intera descrizione termo-idraulica del sistema, l'analisi exergetica e il bilancio exergo-economico. In questo studio abbiamoanalizzato criticamente i risultatisimulati in termini di produttività del sistema e di costo giornaliero e medio-annuo dell'acqua per dedurne i potenziali impatti socioeconomicinei contesti proposti.

### **Abstract**

This work is a review of a simple system for solar water pasteurisation with natural circulation discussed in our recent papers where it was designed, sized and simulated in different locations where the need for safe drinkable water was evident. Such model includes the full thermo-hydraulics, and the exergy and exergo-economic balance. In this report we critically analysed the simulated results in terms of productivity of the system and of daily and annual-average costs of purified water in order to deduce its potential socioeconomic impacts in the proposed contexts.

### **Keywords**

Pastorizzazione; acqua potabile; energia solare; circolazione naturale, analisi exergo-economica.

### **Introduzione**

Le crisi idriche sono considerate come uno dei principali problemi mondiali sia a livello socio-umanitario sia a livello tecnico.

Molte regioni sottosviluppate, infatti, presentano un'elevata percentuale demografica dislocata in piccoli centri rurali privi di una rete idrica e di sistemi di potabilizzazione adeguati a garantire le minime condizioni igienico sanitarie per motivi economici e di accessibilità dei mezzi di trasporto. Essi infatti sono costosi e richiedono molta manutenzione oltre che il consumo massivo di reagenti chimici.

## SESSIONE POSTER

A causa di queste condizioni di vita, milioni di persone muoiono ogni anno entrando in contatto con agenti patogeni trasportati dall'acqua (Duff, Hodgson 2005). Purtroppo, sono soprattutto i bambini a risentire di questa grave situazione sanitaria in quanto, ad oggi, malattie come la diarrea sono la seconda causa di morte infantile nel mondo e sono principalmente dovute a virus che entrano in contatto con l'uomo a causa di consumo di acqua non potabile (WHO).

In questo contesto, impianti di pastorizzazione ad energia solare potrebbero contribuire al superamento del problema in quanto sono in grado di eliminare facilmente gli agenti patogeni in modo semplice, economico e sostenibile perché alimentati dalla sola energia solare, principale risorsa che solitamente è abbondante nelle regioni del pianeta a maggior crisi idrica. Queste caratteristiche si contrappongono a quelle di soluzioni più *Hi-tech* come l'osmosi inversa (RO) che consiste nel pompaggio di acqua verso membrane porose in grado di trattenere i patogeni contenuti al suo interno; questo tipo di impianti è solitamente piuttosto energivoro e richiede l'utilizzo di elettricità che, nel contesto in esame, può essere fornita da moduli fotovoltaici (Shen et al 2016, Alshegri 2015).

In questo lavoro viene presentata un'analisi energetica, exergetica ed exergo-economica di un sistema di pastorizzazione dell'acqua a circolazione naturale (Dainelli et al, 2017); in primo luogo è stato dimensionato per garantire le condizioni di disinfezione dell'acqua, dopodiché le sue performance sono state modellate in condizioni ambientali fuori progetto (Dainelli et al, 2017). Tutto questo al fine di valutare quale potrebbe essere l'impatto benefico e i difetti di questi sistemi in diversi paesi del mondo affetti dalle problematiche sopra citate, da vari punti di vista. Il sistema in esame (Dainelli et al, 2017) è rappresentato in Figura 1:

SESSIONE POSTER

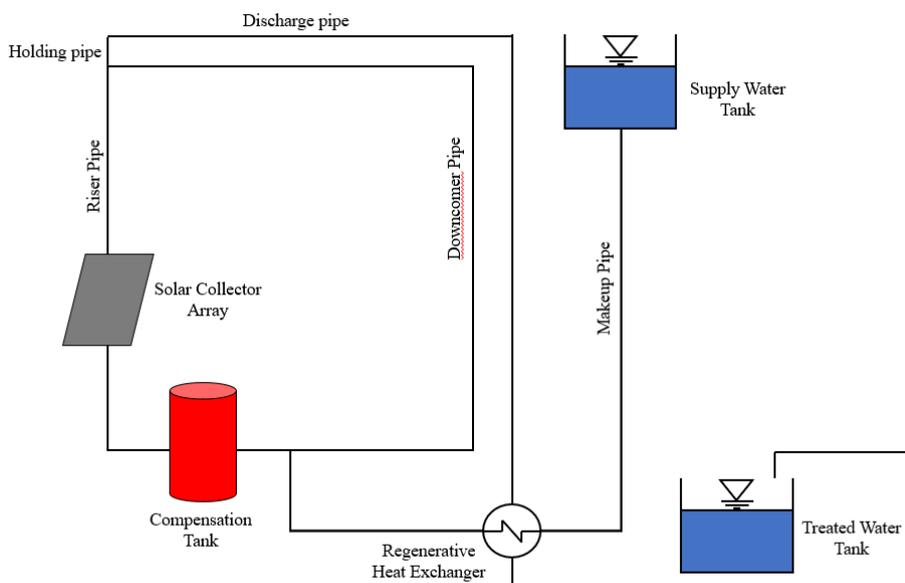


Figura 1 - Schema di impianto del Pastorizzatore a energia solare

La filiera di trattamento parte dal serbatoio “*Supply Tank*” e prosegue attraverso il “*Makeup Pipe*” verso uno scambiatore di recupero del calore dall’acqua trattata in uscita. Dopodiché, all’interno di un circuito di riscaldamento, l’acqua entra in un vaso di espansione il cui volume consente di aumentare la portata di acqua in uscita e quindi, per continuità, anche di quella in entrata a temperatura ambiente evitando l’ebollizione all’interno del circuito stesso.

Il passaggio successivo dell’acqua prevede l’ingresso in una stringa di collettori solari termici piani dove si riscalda; il calore utile rappresenta la forza motrice del fluido in quanto determina una dilatazione termica che consente all’acqua di innalzare la propria altezza geodetica oltre il valore iniziale e quindi di chiudere il circuito. Una temperatura di set-point è stata impostata a 85°C perché in tali condizioni la morte dei microorganismi richiede un tempo di esposizione di soli pochi secondi (Burch et al, 1998).

Il fenomeno della circolazione naturale viene anche utilizzato per evitare che acqua non disinfettata esca dall’impianto mettendo a rischio la salute dei suoi consumatori. Infatti, essa risale attraverso il “*Riser Pipe*” fino alla quota del pelo libero iniziale, livello che è in grado di superare grazie alla sua dilatazione termica.

Questo consente al volume in eccesso di entrare nell’ “*Holding pipe*” e, se la temperatura è di 85°C, di sfiorare nel “*Discharge pipe*” verso il *Treated Water Tank*. L’acqua restante torna al punto

SESSIONE POSTER

iniziale attraverso il “*Downcomer Pipe*” dove si miscela con la portata in ingresso che, per il Principio dei vasi comunicanti, è uguale a quella in uscita. Questo circuito è percorso più e più volte fino a che la radiazione non è troppo bassa da arrestare il flusso d’acqua.

## Metodologia

### *Dimensionamento dell’impianto*

Come anticipato nell’ Introduzione, il principale componente che permette il funzionamento del sistema è il collettore solare; è stato adottato un modello commerciale (TVPsolar) di cui, resi noti i parametri costruttivi, possiamo calcolare l’efficienza con l’equazione di Bliss del secondo ordine:

$$\eta_{SC} = C_0 - C_1 \frac{\Delta T_m}{G} - C_2 \frac{\Delta T_m^2}{G} \quad (1)$$

Dove  $C_0$ ,  $C_1$  e  $C_2$  sono forniti dal produttore e  $\Delta T_m$  è la differenza fra la temperatura media dell’acqua e quella ambiente.

Il dimensionamento del circuito consiste nella soluzione delle seguenti equazioni al fine di ricavare la portata di progetto  $\dot{m}$ , la costante del circuito  $k$  e il diametro  $D$  delle tubazioni, fissata la temperatura di *setpoint*  $T_3$  a 85°C (Dainelli et al., 2017):

$$\dot{m} C_p (T_3 - T_2) = \eta_{SC} G A_{SC} \quad (2)$$

$$\Delta P = gH(\rho_2 - \rho_3) \quad (3)$$

$$\Delta P = k \dot{m}^2 \quad (4)$$

Dove:

- (2) rappresenta il bilancio termico nei collettori;
- (3) rappresenta la forza motrice che permette al fluido di circolare nell’impianto, ovvero la sua variazione di densità  $\rho$ ;  $H$  è invece la differenza di quota geodetica dell’impianto.
- (4) rappresenta la resistenza per attrito dei tubi che deve essere vinta dalla forza motrice e  $k$  è una costante caratteristica del circuito ottenuta a partire dalla somma delle perdite di carico.

SESSIONE POSTER

Dopodiché è necessario dimensionare l'“ *Holding pipe* ” in modo che l'acqua possa sfiorare solo se disinfettata; definita la sezione  $A_{HP}$ , la sua altezza è calcolabile con (5)(Dainelli et al., 2017):

$$\Delta z_{HP} = \Delta z_{85^\circ} = \frac{\Delta V_{85^\circ}}{A_{HP}} = \frac{m}{A_{HP}} \left( \frac{1}{\rho_{85^\circ}} - \frac{1}{\rho_{20^\circ}} \right) \quad (5)$$

Dove  $m$  è la massa d'acqua nel sistema.

I dati di partenza sono riportati in Tabella 1(Dainelli et al., 2017):

Parametri di dimensionamento					
$C_0$	0.78	$C_1$	1.75 W/(m <sup>2</sup> K)	$C_2$	0.00625 W/(m <sup>2</sup> K <sup>2</sup> )
$T_{amb}$	30 °C	$C$	1000 W/m <sup>2</sup>	$A_{sc}$	2·1.95 m <sup>2</sup>
$L/H$	5.3	$I$	1.5 m	$D_{HP}$	0.15 m

Tabella 1 – Parametri del dimensionamento

*Simulazione in off-design*

Il dimensionamento è stato fatto per condizioni ambientali standard, diverse da quelle operative del sistema; per cui è importante testare le prestazioni del sistema in condizioni più reali possibili con un modello matematico che abbia come input i dati di dimensionamento e parametriclimatici forniti da Meteonorm (<http://www.meteonorm.com/>) e come output la portata di acqua potabile prodotta.

L'analisi viene effettuata con un intervallo temporale variabile calcolato da (6)(Dainelli et al., 2017):

$$\tau_i = \frac{L}{V_{av,i}} \quad (6)$$

Dove  $L$  è la lunghezza del circuito e  $V_{av,i}$  è la velocità media del fluido.

SESSIONE POSTER

La portata prodotta è data quindi da (7):

$$\dot{m}_{MU,i} = \frac{\rho_i}{\tau_i} \Delta V_i = \frac{\rho_i}{\tau_i} m \left( \frac{1}{\rho_i} - \frac{1}{\rho_{85^\circ}} \right) \quad (7)$$

*Scelta dei siti di installazione*

I potenziali siti di installazione del sistema sono stati scelti sulla base della presenza di problemi idrici realmente esistenti:

- Manila: su una popolazione nelle isole Filippine di 101 milioni di abitanti, 9 milioni consumano acqua non sicura e addirittura 19 milioni non hanno accesso a un sistema sanitario avanzato (water.org).
- Aden: in Yemen oltre il 50% della popolazione deve lottare ogni giorno per trovare o comprare acqua a scopo potabile o agricolo, e gran parte di essa riesce a farlo esclusivamente grazie ad aiuti esterni; inoltre il 70% della popolazione vive in zone rurali del tutto isolate, ma anche nella capitale Sana'a solo il 40% della popolazione è collegata al servizio idrico che comunque ha delle perdite che raggiungono il 60%. Utilizzare e depurare acqua piovana sarebbe una soluzione per rimuovere il problema della siccità ma anche delle guerre, che per il 70% riguardano l'acqua (Ward, C., 2015)
- Johannesburg: il Sudafrica è un paese semi-arido ma rappresenta comunque uno dei più industrializzati del continente Africano, per questo numerose opere di adduzione dell'acqua dai più grandi bacini presenti, come quello del fiume Orange, sono state realizzate nel corso degli anni. Tuttavia, il cambiamento climatico sta peggiorando sempre più la situazione idrica e ancora nei villaggi rurali il 19% della popolazione non ha accesso all'acqua, mentre nei centri urbani più del 26% delle scuole e il 45% degli ospedali sono isolati dal servizio idrico (UN Water. Water a Shared Responsibility, 2006).
- Nairobi: la Nigeria è il paese africano caratterizzato da maggiore densità demografica con una popolazione di oltre 174 milioni di abitanti, di cui 57 milioni (37%) non ha accesso all'acqua potabile e 60,000 bambini sotto 5 anni muoiono ogni anno di diarrea, e il costante aumento demografico porterà questa condizione a peggiorare irrimediabilmente (wateraid.org).

SESSIONE POSTER

- Larnaca:Cipro è oggi il paese dell'Unione Europea più affetto da problemi di siccità con un indice di stressi idrico
- di oltre il 40%, dove 20%-40% è classificato come medio-alto (Sofroniou et al.,2014).
- Pantelleria e Brindisi:l'Italia, a differenza dei precedenti paesi,può essere considerata come un paese in cui la crisi idrica è meno grave; numerosi casi specifici di mancato approvvigionamento dell'acqua si sono verificati però, soprattutto in alcune regioni meridionali e nelle isole, nei periodi più caldi dell'anno.

*Analisi exergetica*

L'analisi energetica è molto utile per valutare il corretto funzionamento dell'impianto e la sua effettiva produttività ma nessuna informazione è fornita però sulle irreversibilità e le inefficienze interne al processo.Quindi un'analisi exergetica è consigliata al fine di fornire un quadro più completo del funzionamento dell'impianto.

L'exergia è definita come il massimo lavoro ottenibile da un sistema sulla base della sua interazione con l'ambiente esterno e può essere calcolata con(8) (Szargut,et al, 1965).

$$\dot{E}x_j = \dot{m}_j [(h_j - h_o) - T_o(s_j - s_o)] \quad (8)$$

Dove $\dot{E}x_j$  rappresenta il rateo di exergia,  $\dot{m}_j$  la portata massica,  $h_j$  l'entalpia e  $s_j$  l'entropia relativi al flusso j;  $h_o$ ,  $T_o$  e  $s_o$  sono invece relative all'ambiente.

In generale possono esistere due tipi di inefficienze: le perdite e le distruzioni di exergia.

Le prime sono legate a un trasferimento di exergia dal sistema verso l'ambiente e possono essere viste come irreversibilità esterne, le seconde sono dovute a irreversibilità in scambi termici o in attriti e miscelezioni e sono per questo considerate come delle irreversibilità interne al componente.

Alla luce di queste definizioni, è possibile calcolare un rendimento exergetico, oltre che energetico, dell'impianto con (9) (Bejan, 1996):

$$\eta_x = \frac{\dot{E}x_{out}}{\dot{E}x_{in}} = 1 - \frac{\Sigma \dot{E}x_D + \Sigma \dot{E}x_L}{\dot{E}x_{in}} \quad (9)$$

*Analisi exergo-economica*

SESSIONE POSTER

Per la definizione di exergia, essa può essere considerata una variabile indicatrice della qualità dell'energia stessa; nel caso specifico, trattandosi di energia termica, una maggiore qualità significa una temperatura più alta che, secondo Carnot, rende una macchina termica in grado di produrre maggiore lavoro alle stesse condizioni ambientali.

Per cui è evidente che un vettore energetico con maggiore contenuto di exergia abbia anche un valore economico maggiore; in altre parole il costo può essere allocato sull'exergia calcolandone un valore specifico con (10) (Bejan, 1996):

$$c_j = \frac{\dot{C}_j}{\dot{E}x_j} \quad (10)$$

Dove  $c_j$  è il costo specifico per unità di exergia [€/J],  $\dot{C}_j$  è il rateo di costo [€/s] e  $\dot{E}x_j$  è il rateo di exergia [W] relativi al flusso j.

L'analisi exergo-economica consiste nell'effettuare un bilancio di costi in ingresso e in uscita da ogni singolo componente considerandone anche quelli di investimento  $\dot{Z}_k$  [€/s] (Bejan, 1996) al fine di calcolare il costo dell'acqua prodotta per unità di exergia:

$$\sum_{out} \dot{C}_{out,k} + \dot{C}_{w,k} = \dot{C}_{q,k} + \sum_{in} \dot{C}_{in,k} + \dot{Z}_k \quad (11)$$

$$\sum_{out} (c_{out} \dot{E}x_{m,out})_k = \sum_{in} (c_{in} \dot{E}x_{m,in})_k + \dot{Z}_k \quad (12)$$

Nel caso specifico è stato fatto un bilancio a livello integrale nell'arco di ciascun giorno medio mensile, ovvero i valori dei costi e dei contenuti exergetici sono stati espressi su base giornaliera (Dainelli et al., 2017).

## Risultati

Secondo i criteri di dimensionamento precedentemente illustrati, le variabili sono state calcolate e riportate in Tabella 2 (Dainelli et al., 2017):

SESSIONE POSTER

Risultati del dimensionamento					
I	0.02	L	8 m	$\dot{m}$	0.0255
	m				kg/s
$\Delta$	360	K	55200	$\eta$	0.692
p	Pa		0		
z	2.7	A	0.785	$\Delta$	0.147 m
	kW	HP	cm <sup>2</sup>	Z <sub>HP</sub>	

Tabella 2 - Risultati di dimensionamento

Una volta inseriti questi risultati nel modello, quest'ultimo è in grado di predire la produttività del sistema. A questo proposito, Figura 2 rappresenta la portata d'acqua prodotta nel giorno medio di maggio per ogni località citata, andamento rappresentativo anche per gli altri mesi. Per chiarezza grafica, i risultati relativi a Brindisi e Pantelleria, che mostrano un analogo andamento, non sono illustrati ma saranno riportati solamente i risultati globali.

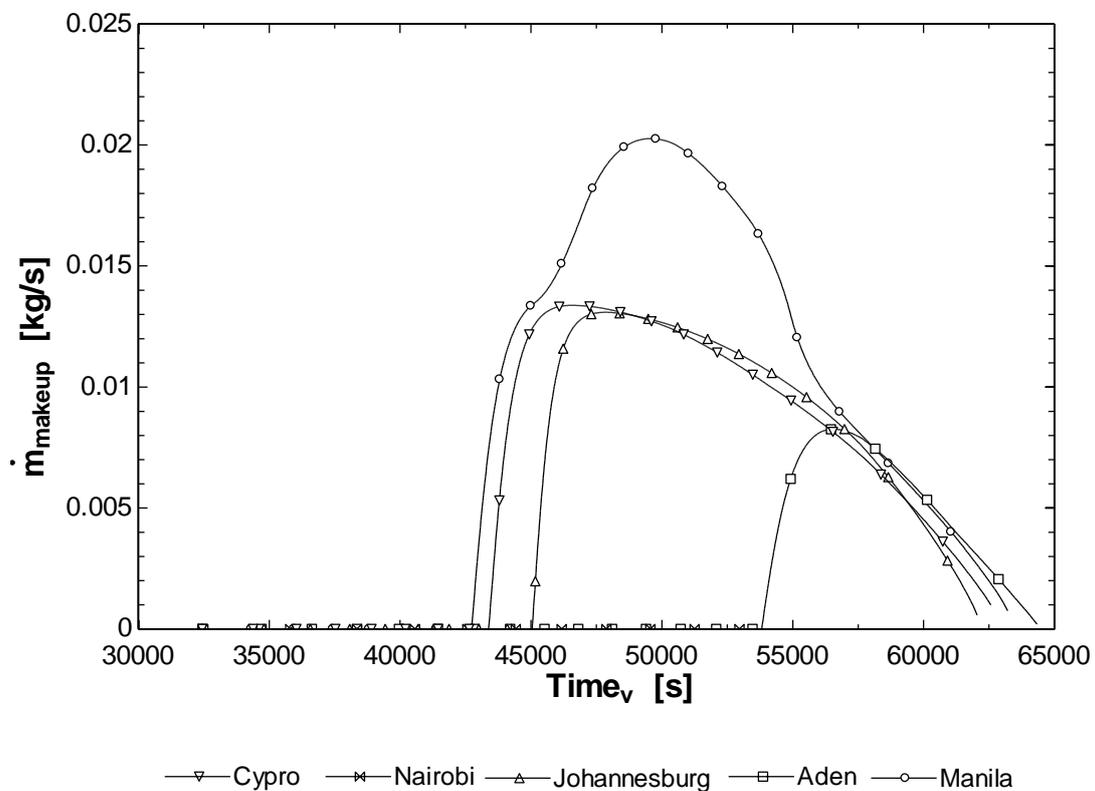


Figura 2 - Produzione di acqua nel giorno medio di agosto

SESSIONE POSTER

Essa evidenzia un picco di produttività corrispondente al momento di maggior irraggiamento e una forte dipendenza dalla latitudine: è evidente che a Manila (Filippine), l'irraggiamento sia molto più elevato che ad altre latitudini e che questo permetta di produrre un maggior volume di acqua rispetto alle altre località.

Tale dipendenza rende necessario espandere l'analisi su un intero anno solare per considerare la variabilità stagionale delle condizioni metereologiche; il risultato di questa operazione è riportato in Tabella 3, con la produzione annuale di acqua potabile in ciascuna località:

\*(Dainelli et al., 2017)

	Manila	Aden	Johannesburg	Nairobi	Brindisi	Pantelleria	Larnaca
	kg	kg	kg	kg	kg	kg	kg
Totale*	48792	106353	56819	41961	28341	28347	59525
N persone	66	145	77	57	38	38	81

Tabella 3 - Produttività della pastorizzazione

A differenza di quanto visto in Figura 2, le condizioni globali di irraggiamento fanno in modo che la maggior produttività non sia a Manila ma bensì ad Aden.

Assumendo un consumo idrico a scopo potabile di 2 litri al giorno, è stato analizzato il numero di persone che, secondo i calcoli, possono essere servite da un singolo sistema di pastorizzazione e questi risultati sono anche essi riportati in Tabella 3.

I risulti mostrano che la potenzialità di questo sistema è in grado di soddisfare i bisogni di piccoli centri rurali dove spesso è concentrato il problema della siccità e non sono richiesti sistemi in grado di produrre una portata d'acqua così elevata come nei grandi centri urbani. Per cui la diffusione su larga scala è fortemente consigliata nei paesi affetti dal problema dell'accesso all'acqua potabile e dove si riscontra un'alta percentuale di casi di malattie legate alla qualità batteriologica dell'acqua.

L'analisi exergetica permette il calcolo delle perdite e distruzioni exergetiche: da Figura 3 si capisce che queste sono presenti soprattutto nel collettore solare termico, mentre i valori calcolati nelle altre parti dell'impianto sono quasi del tutto trascurabili.

SESSIONE POSTER

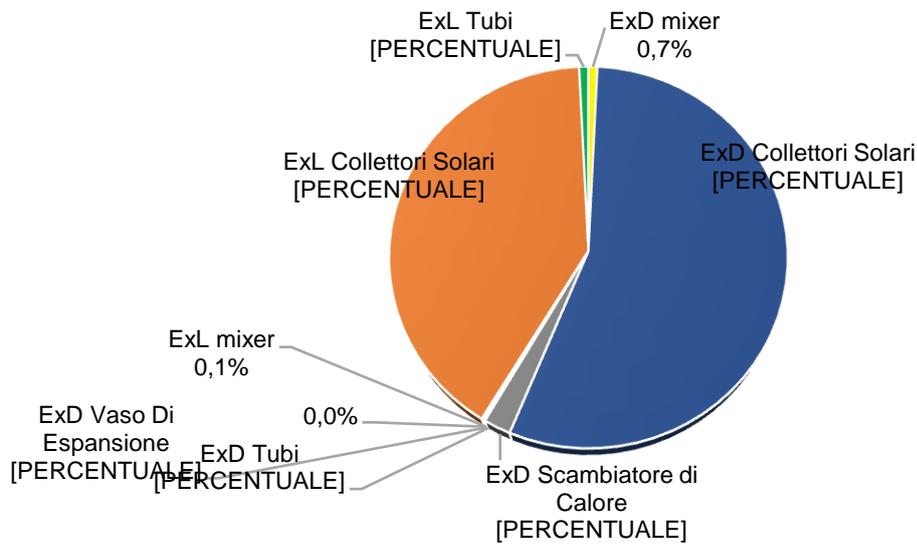


Figura 3 - Distribuzioni exergetiche dei componenti

Vista l'ideale collocazione di questi sistemi in villaggi rurali affetti da gravi problemi di caratteresocioeconomico, è particolarmente importante che il costo dell'acqua prodotta sia più sostenibile possibile in rapporto alle sue prestazioni.

Per questo il primo passo dell'analisi exergo-economica è la valutazione dei costi di investimento dei componenti, attualizzati considerando un tasso di interesse del 9% e 15 anni di ammortamento (13), sulla base dei valori commercialmente disponibili (Dainelli et al., 2017).

$$Z_k^{an} = \frac{ir(1+ir)^n}{(1+ir)^n - 1} Z_k \quad (1)$$

3)

Il costo maggiore è sicuramente legato al collettore solare piano in cui sono illustrati i valori totali e percentuali, pari ad oltre il 40%; sono stati stimati costi di installazione ma non di manutenzione in quanto trascurabili per la semplicità dell'impianto; i prezzi dei componenti sono stati ottenuti da un'analisi di quelli commercialmente disponibili.

Poiché il modello matematico descritto nel precedente paragrafo consente il calcolo del numero di ore operative nell'arco dell'anno e del giorno medio di ogni mese, è possibile ricondurre i costi totali calcolati con l'eq.(13) a valori giornalieri.

SESSIONE POSTER

Dalla scrittura dei bilanci di costo per ogni componente (12,13) e dalla scrittura di N-1 equazioni ausiliarie laddove il componente presenti N flussi in uscita, possiamo risolvere il sistema lineare per calcolare il costo specifico dell'acqua trattata.

Dal momento però che l'obiettivo finale dell'impianto non è quello di produrre energia ma acqua, si preferisce valutare il costo su 1kg di acqua piuttosto che sull'unità di exergia.

Per valutare ed interpretare i risultati ottenuti è possibile fare un confronto con i costi specifici di un impianto a più alto livello tecnologico, come un sistema a osmosi inversa fotovoltaica (PVRO).

La qualità del prodotto di un impianto a RO, la cui vita utile è stata fissata a 15 anni, è superiore in quanto non solo disinfetta l'acqua da microorganismi patogeni, ma è in grado anche di intercettare solidi o perfino desalinizzarla; tuttavia per evitare l'ostruzione delle membrane che la costituiscono è indispensabile una filtrazione a monte dell'impianto.

In questo caso i costi di impianto riguardano l'accumulo d'acqua (25%), i pre-trattamenti (10%), i costi dei componenti per l'osmosi inversa (25%), di cui il 30% è attribuibile alle membrane (Bilton,2011) e i costi di installazione e di manutenzione (35%); a questi costi devono essere sommati quelli dei componenti elettrici (batterie, inverter, cablaggio e materiali di supporto), valutato senza incentivi  $1.5 \text{ €/W}_{\text{picco}}$  (irena.org).

I risultati medidell'analisi exergo-economica dei due sistemi sono riportati in Tabella 4:

No.	Località	Manila (Filippine)	Aden (Yemen)	Johannesburg (Sud Africa)	Nairobi (Kenya)	Brindisi (Italia)	Pantelleria (Italia)	Larnaca (Cipro)
1.	<b>Coordinate*</b>	<b>14.52°N 121°E</b>	<b>12.83°N 45.03°E</b>	<b>26.13°S 28.23°E</b>	<b>1.3°S 36.75°E</b>	<b>40.65°N 17.95°E</b>	<b>36.82°N 11.97°E</b>	<b>34.88°N 33.63°E</b>
2.	<b>Radiazione Solare annuale, MWh/(m<sup>2</sup>year)*</b>	1.818	2.244	2.254	1.933	1.701	2.111	1.702
3.	<b>Produttività annuale, m<sup>3</sup>*</b>	48.792	106.354	56.819	41.961	28.342	28.347	59.525
4.	<b>Costo specifico dell'acqua - Circolazione naturale, €/m<sup>3</sup>*</b>	4.64	2.24	4.19	5.20	6.80	6.77	4.01
5.	<b>Costo specifico</b>	5.34	4.02	3.81	5.13	5.96	6.87	4.83

SESSIONE POSTER

	dell'acqua - Osmosi inversa, €/m <sup>3</sup> *							
6.	Costo specifico dell'acqua pubblica, €/m <sup>3</sup>	0.26	-	0.48	0.12	0.76	0.85	1.03

Tabella 4 – Range di costi specifici dell'acqua potabile prodotta da pastorizzazione e ROPV (€/t)

I due costi sono piuttosto simili, ma sono lievemente a vantaggio del sistema a circolazione naturale per il minore impatto dell'installazione e della manutenzione; in ciascuno dei casi analizzati, la variabilità dei costi è definita dall'irraggiamento che nei mesi e nelle ore di picco consente di massimizzare la produzione e quindi di abbattere i costi specifici dell'acqua.

Evidentemente la scelta del sistema da adottare dipenderà, oltre che dai costi, anche dalle condizioni locali di installazione: per esempio a Pantelleria o a Cipro potrebbe essere più utile un impianto PVRO perché, trattandosi di isole, avranno a disposizione molta acqua da poter dissalare.

I costi, forniti dai distributori di acqua nelle reti nazionali nelle varie località<sup>0</sup>, sono riportati in Tabella 4. È evidente che se confrontiamo i prezzi dell'acqua potabile ottenuta con questi sistemi non tradizionali con quella da sistemi ormai consolidati non possono essere competitivi. I prezzi a Nairobi o Manila i costi sono molto bassi perché proporzionati ai poteri d'acquisto della popolazione locale.

Nessun dato è noto riguardo al prezzo dell'acqua ad Aden che è bagnata dal mare; uno dei problemi idrici principali dello Yemen è la capitale San'a' che, trovandosi ad oltre 2200 m sul livello del mare, ha un costo dell'acqua pari a 8.02€/m<sup>3</sup>(Lichtenthäler et al., 2010); per cui ipotizzando analoghe condizioni climatiche ad Aden, nel caso specifico usare l'energia solare rappresenterebbe anche un sensibile vantaggio economico.

## Conclusioni

In questo lavoro sono stati discussi nel dettaglio sistemi di pastorizzazione dell'acqua ad energia solare termica e sono stati confrontati con impianti di dissalazione a osmosi inversa alimentati da pannelli fotovoltaici. I sistemi in questione possono assumere particolare importanza pratica laddove, a causa di gravose condizioni socioeconomiche-sanitarie, non sono presenti impianti di

## SESSIONE POSTER

potabilizzazione delle acque e la siccità e la presenza di microorganismi patogeni è letale per milioni di persone.

Da un'analisi energetica approfondita effettuata con un modello termo-fluidodinamico del pastorizzatore è emerso che la produttività di un solo sistema è sufficiente a soddisfare le necessità idriche di piccoli villaggi rurali, o zone in emergenza climatica a causa di calamità naturali o guerre. Invece un'analisi exergetica ci consente di dedurre quali parti del sistema siano meno efficienti a causa di irreversibilità esterne o interne ai componenti e di applicare un'analisi exergo-economica per la stima del costo specifico dell'acqua prodotta. Ciò che ne emerge è che i costi dell'acqua sono confrontabili con quelli di soluzione a più alto livello tecnologico come un impianto a osmosi inversa con pannelli fotovoltaici, ma leggermente inferiori; tuttavia, anche una leggera differenza di prezzo che in località come l'Italia può apparire insignificante, possono essere invece importanti in paesi sottosviluppati.

Per questo l'analisi è stata applicata in varie zone con chiare emergenze idriche come Manila (Filippine), Aden (Yemen), Johannesburg (Sud Africa), Nairobi (Nigeria), Brindisi e Pantelleria (Italia).

Il risultato è che economicamente nessuna delle due soluzioni è competitiva con altri impianti tradizionali che fanno uso di tecnologie consolidate e immettono nella rete idrica enormi volumi di acqua, ma rappresentano l'unica soluzione in zone con caratteristiche simili a quelle sopra citate è che quindi i costi calcolati possano comunque giustificare l'investimento su questi sistemi per i suoi vantaggi a livello sanitario e sociale. Un caso particolare è rappresentato dallo Yemen la cui capitale Sana'a si trova in altura e presenta un costo dell'acqua molto elevato dovuto ai sistemi di pompaggio utilizzati. Per cui in questi casi la diffusione su larga scala di sistemi di pastorizzazione rappresentano, oltre che una soluzione tecnica utile a fornire acqua potabile dove non è disponibile, anche un modo per superare profondi problemi sociali come le malattie, la siccità o le guerre che purtroppo ancora oggi affliggono ampie zone del pianeta, ma che riguardano tutta l'umanità.

SESSIONE POSTER

**Lista degli acronimi**

RO Reverse Osmosis

PVRO Photovoltaic Reverse Osmosis

**Bibliografia**

Duff, W.S.; Hodgson, J.A. (2005) “A simple high efficiency solar water purification system”. *Sol. Energy* 2005, 79, 25–32. doi:10.1016/j.solener.2004.10.005.

WHO: World Health Organization (<http://www.who.int/en/>) (31/01/2018).

Shen J, Richards BS, Schafer AI. (2016) “Renewable energy powered membrane technology: case study of St. Dorcas borehole in Tanzania demonstrating fluoride removal via nanofiltration/reverse osmosis”. *Sep Purif Technol* 2016;170: 445e52. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2016.06.042>.

Alshegri A, Sharief SA, Rabbani S, Aitzhan NZ.(2015) “Design and cost analysis of a solar photovoltaic powered reverse osmosis plant for Masdar Institute”. *Energy Procedia* 2015;75:319e24. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2015.07.365>.

Dainelli, N.; Manfrida, G.; Petela, K.; Rossi, F. (2017) “Exergo-Economic Evaluation of the Cost for SolarThermal Depuration ofWater”. *Energies* 2017, 10, 1395; doi:10.3390/en10091395 [www.mdpi.com/journal/energies](http://www.mdpi.com/journal/energies).

Manfrida, G.; Petela, K.; Rossi, F. (2017) “Natural circulation solar thermal system for water disinfection”*Energy* 141 (2017) 1204-1214 <https://doi.org/10.1016/j.energy.2017.09.1320360-5442/>© 2017.

TVP solar (<http://www.tvpsolar.com/>) (29/01/2018).

Meteonorm (<http://www.meteonorm.com/>) (29/01/2018).

Water.org (<https://water.org/our-impact/philippines/>) (31/01/201).

Ward C.,(2015), “The water crisis in Yemen: Managing extreme water scarcity in the Middle East”, Vol. 7, No. 2 (2016), pp. 171-175, Penn State University Press, DOI: 10.5325/bustan.7.2.0171.

SESSIONE POSTER

UN Water. Water a Shared Responsibility (2006), UNESCO  
(<http://unesdoc.unesco.org/images/0014/001431/143120E.pdf>) (31/01/2018).

Wateraid (<http://www.wateraid.org/ng>), (31/01/2017).

Anastasia Sofroniou, Steven Bishop, (2014) Water Scarcity in Cyprus: A Review and Call for Integrated Policy, *Water* 2014, 6, 2898-2928; doi:10.3390/w6102898.

Szargut, J.; Petela, R. (1965) Exergy; “WNT:Warsaw”, Poland, 1965.

Bejan, A.; Tsatsaronis, G.; Moran, M. (1996)“Thermal Design and Optimization”; JohnWiley & Sons, Inc.: New York, NY, USA, 1996.

Bilton, A. M., Wiesman, R., Arif, A. F. M., Zubair, S. M., & Dubowsky, S. (2011). “On the feasibility of community-scale photovoltaic-powered reverse osmosis desalination systems for remote locations”. *Renewable Energy*, 36(12), 3246–3256.

Renewable Energy Technologies: Cost Analysis Series, International Renewable Energy Agency (IRENA).([https://www.irena.org/DocumentDownloads/Publications/RE\\_Technologies\\_Cost\\_Analysis-SOLAR\\_PV.pdf#page=1&zoom=auto,475,874](https://www.irena.org/DocumentDownloads/Publications/RE_Technologies_Cost_Analysis-SOLAR_PV.pdf#page=1&zoom=auto,475,874) )(21/01/2018).

Manila Water (<http://www.manilawater.com/Pages/Bill%20Information.aspx>), (31/01/2018)

Lichtenthäler, Gerhard: (2010), “Water Conflict and Cooperation in Yemen”, Middle East Report 254, Spring 2010.

Johannesburg Water (<https://www.johannesburgwater.co.za/about/city-of-johannesburg-tariffs-2016-17/>), (31/01/2018).

Nairobi City water and sewage company,  
(<https://www.nairobewater.co.ke/index.php/en/watertariffs>), (31/01/2017).

Acquedotto Pugliese,  
([http://www.aqp.it/portal/page/portal/MYAQP/SERVIZI/Tariffe/Il\\_prezzo\\_ATO\\_Puglia/Dettagli%20articolazione%20tariffaria2](http://www.aqp.it/portal/page/portal/MYAQP/SERVIZI/Tariffe/Il_prezzo_ATO_Puglia/Dettagli%20articolazione%20tariffaria2)) (31/01/2018).

SOGEA (<https://sogea.pa.it/servizi/tariffe>), (31/01/2018).

SESSIONE POSTER

Cyprus: Electricity, Water and Council Tax Costs (council <http://www.cyprus-property-sales-resales.com/cyprus-cost-of-living/cyprus-electricity-water-council-tax-costs.html#water>), (31/01/2018).