



UNIVERSITÀ
DEGLI STUDI
FIRENZE

Scuola di Ingegneria
Corso di laurea in
Ingegneria per l'Ambiente, le Risorse e il Territorio

Processo di pastorizzazione ad energia solare dell'acqua

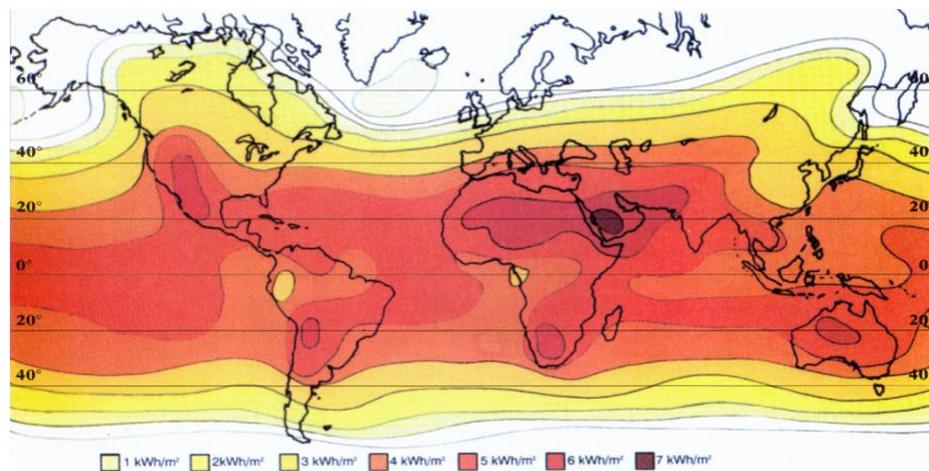
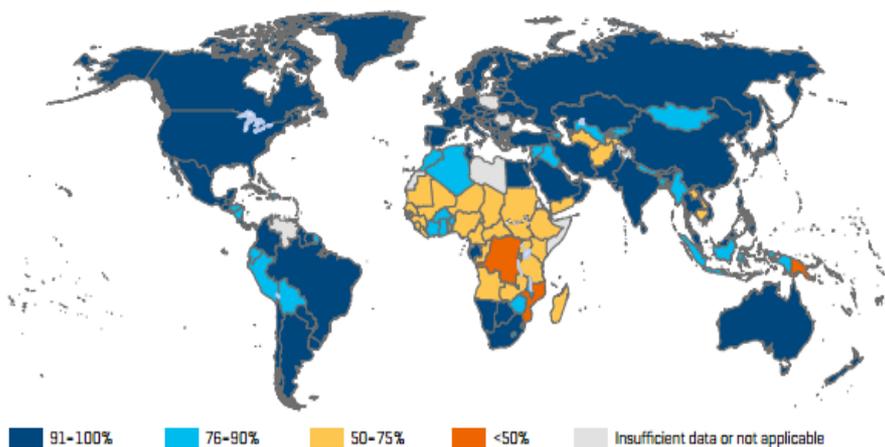
Candidato: **Federico Rossi**
Relatore: Prof. Giampaolo Manfreda

Santa Marta 26/02/2015

Situazione idrica mondiale

L'11 % della popolazione mondiale beve ancora acqua contaminata, cioè ben 748 milioni di persone.

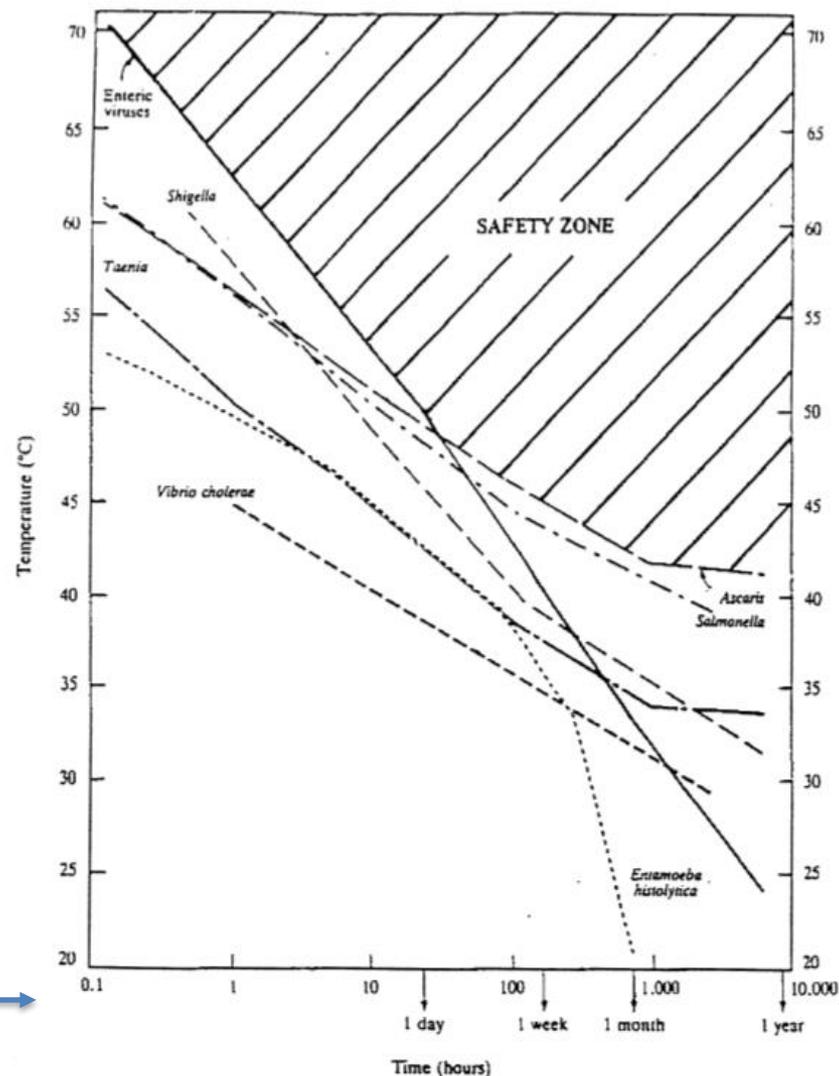
Di queste l'82 % vive in zone rurali e il 43 % nell'Africa subsahariana, ovvero zone che per motivi tecnici, economici e ambientali sono difficili da approvvigionare. L'unica risorsa di cui c'è ampia disponibilità è l'energia solare !



Radiazioni solari medie e disponibilità idriche nel mondo

La risorsa solare può essere sfruttata per la potabilizzazione...

- **Rimozione del particolato** più grossolano con l'utilizzo di filtri;
- **Disinfezione dell'acqua** (cioè l'eliminazione di tutti i patogeni presenti) per via termica, ovvero riscaldando l'acqua con un collettore solare, mantenendone la temperatura a un certo livello per un certo intervallo di tempo («Pastorizzazione»).
- Le condizioni di **tempo e temperatura** per cui la disinfezione può essere considerata completa sono descritte dal grafico a lato

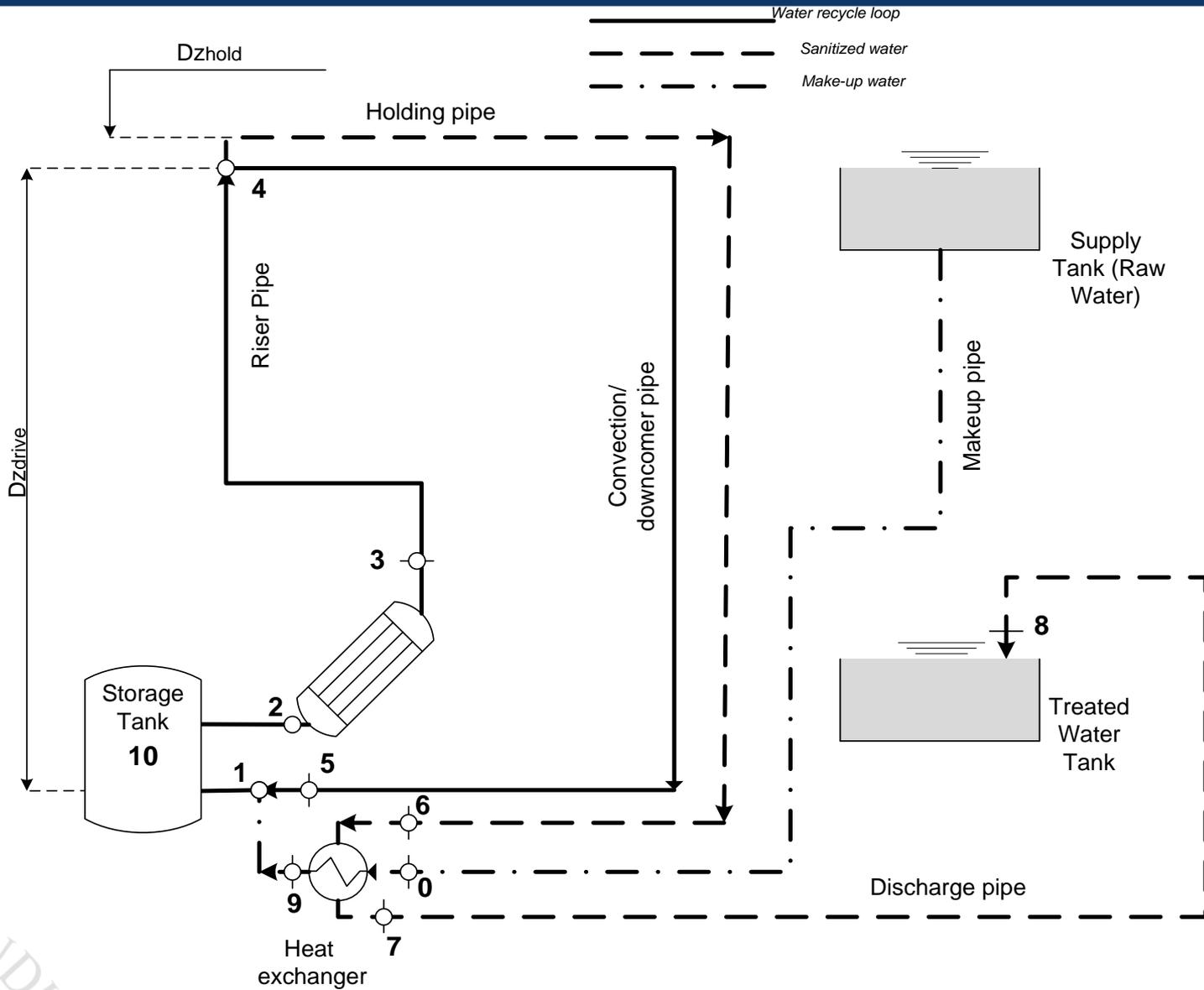


Impianti possibili con collettori solari

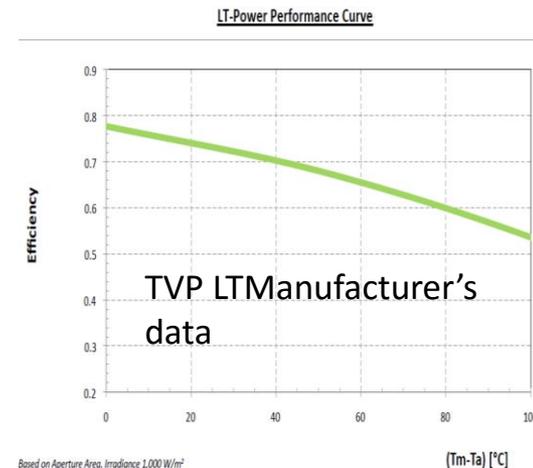
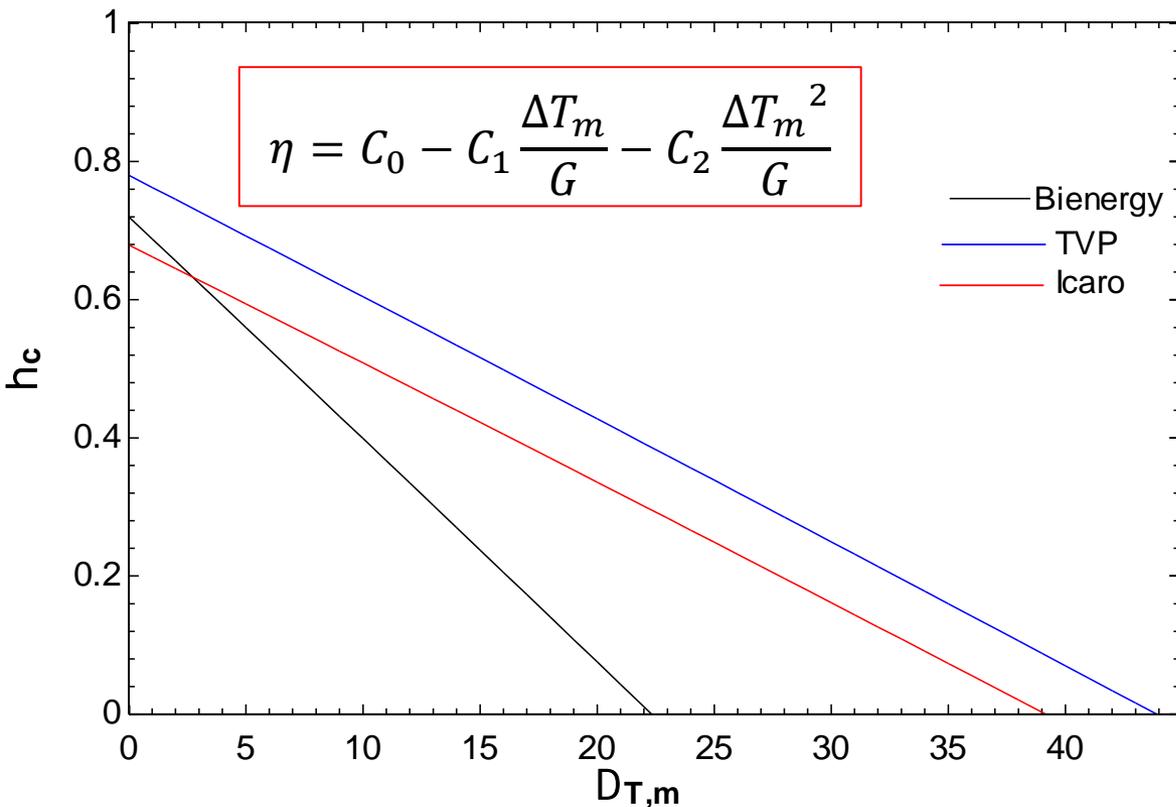
- **Sistemi con valvola termostatica:** sfruttano una valvola termostatica, uno strumento che regola la propria apertura in funzione della temperatura che si vuole ottenere, per controllare la temperatura e la portata del flusso in uscita dal collettore.
- **Sistemi a densità (Density Driven Systems) :** sfruttano la variazione di densità dell'acqua con la temperatura per innescare una circolazione naturale. Il sistema può essere con o senza ricircolo.



Impianto Density-Driven a ricircolo



Collettori solari



$G=1000 \text{ W/m}^2$

Numero collettori = 2

	C_0 [-]	C_1 [W/m ² K]	C_2 [W/m ² K]	S [m ²]	\dot{V}_{test} [l/h]	V [l]
TVP	0.78	1.75	0.00625	1.95	100	1.2
ICARO	0.679	1.696	0.0099	1.939	135	1.2
Bienergy	0.72	3.2	0.011	1.95	100	4

Correzione per portata off-design (Collettore)

- In condizioni di esercizio la portata unitaria attraverso il collettore, in un sistema a circolazione naturale, può essere molto diversa da quella di test del collettore; si adatta il rendimento del collettore mediante un **fattore correttivo**:

$$r = \frac{\frac{\dot{m}C_p}{A_c F' U_L} \left[1 - \exp(-A_c F' U_L / \dot{m} C_p) \right] \Big|_{\text{use}}}{\frac{\dot{m}C_p}{A_c F' U_L} \left[1 - \exp(-A_c F' U_L / \dot{m} C_p) \right] \Big|_{\text{test}}}$$

Dispersioni termiche lungo le tubazioni

- Per il calcolo delle **dispersioni termiche** lungo il circuito è necessario conoscere il coefficiente di scambio termico convettivo. Esso dipende dalla geometria del tubo; è stato calcolato mediante la funzione PipeFlow interna al SW EES utilizzato per la simulazione, che calcola anche la perdita di pressione distribuita. Lo scambio termico è regolato dalle seguenti equazioni, che comprendono anche la conduzione (il tubo è stato coibentato con 3 cm di poliuretano espanso $\lambda=0,034\text{W/m K}$) e la convezione naturale esterna:

$$\dot{Q}_{disp} = \frac{(T_{est} - T_m)}{R_{tot}}$$

$$\dot{Q}_{disp} = \dot{m}C_p(T_{out} - T_{in})$$

Dimensionamento del Circuito di Ricircolo

Dati:

Temperature:

- Temperatura in ingresso nel circuito $T_1=60\text{ °C}$
- Temperatura in uscita dal collettore $T_3=85\text{ °C}$

Condizioni ambientali:

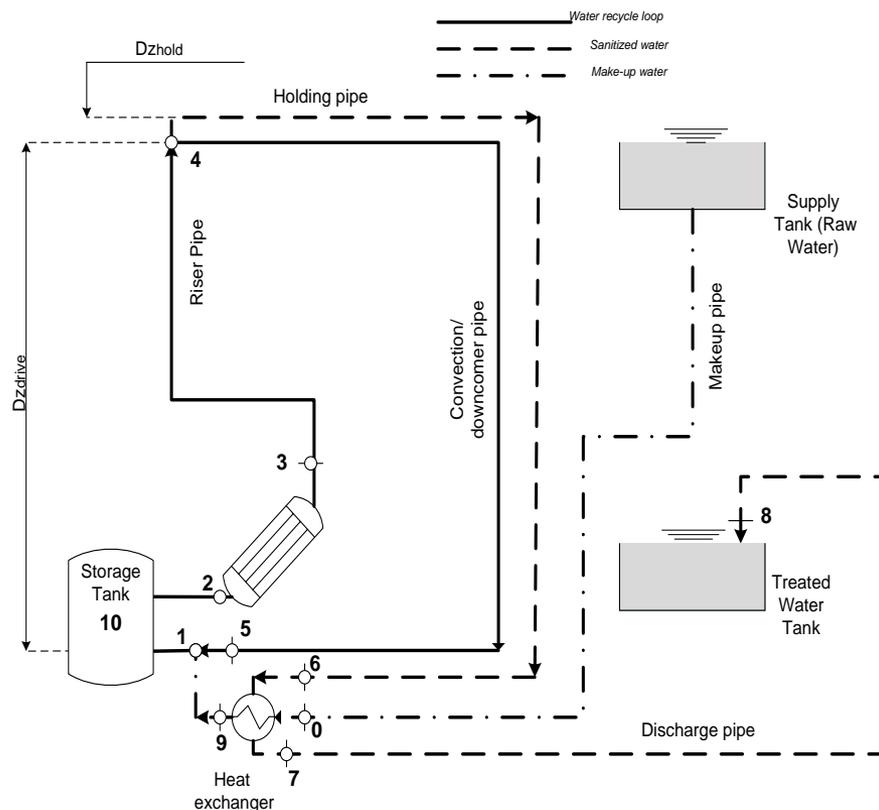
- Temperatura ambiente $T_{\text{amb}}=30\text{ °C}$
- Irraggiamento $G=1000\text{ W/m}^2$

Lunghezza tubazioni:

	Lunghezza (m)
Makeup Pipe	3,8
Starting Pipe (1-2)	5
Riser Pipe (3-4)	2
Convection Pipe (4-5)	3
Holding Pipe (4-6)	4
Discharge Pipe (7-8)	2

Incognite:

- Diametro della tubazione D in m
- Portata in massa di progetto \dot{m} in kg/s
- Costante k di perdita globale caratteristica del circuito in $\text{Pa}/(\text{kg/s})^2$



Equazioni: Il problema si riduce a un sistema di 3 equazioni in 3 incognite che viene risolto direttamente con il Software di calcolo EES:

$$\begin{cases} \dot{m}C_p(T_3 - T_2) = \eta GA \\ \Delta P = gH(\rho_2 - \rho_3) \\ \Delta P = k \dot{m}^2 \end{cases}$$

Lo **scambiatore di calore rigenerativo** è stato dimensionato con il metodo ε -NTU (la funzione ε -NTU è disponibile nelle librerie Heat Transfer di EES per diverse geometrie e rapporti delle capacità termiche dei fluidi; nel caso presente si è scelto un semplice scambiatore in controcorrente):

$$NTU = \frac{S_{exc} h}{\dot{c}} = \pi \frac{D^2}{4} L \frac{h}{\dot{c}}$$

Nota l'efficienza, ipotizzate le temperature di ingresso e fissate le temperature di uscita obiettivo, e la potenza massima scambiabile :

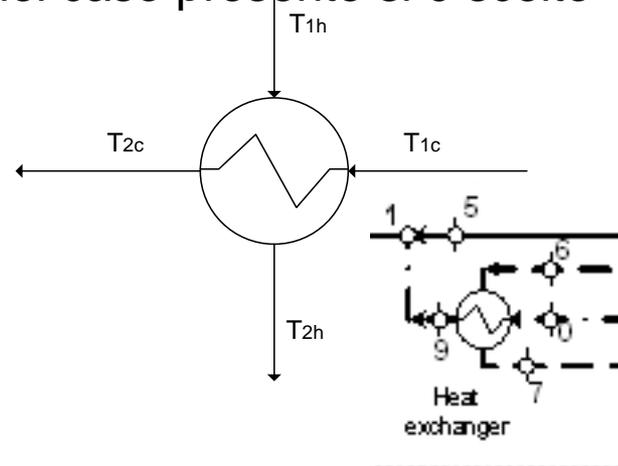
$$\dot{Q}_{max} = \dot{m} C_p (T_{1h} - T_{1c})$$

La potenza termica effettivamente scambiata, funzione della superficie di scambio termico è

$$\dot{Q} = \varepsilon \dot{Q}_{max} = f(D)$$

Fissata una lunghezza di 5 m, il diametro è calcolato con l'equazione :

$$\dot{Q} = \dot{m} C_p (T_{2c} - T_{1c}) = \dot{m} C_p (T_{1h} - T_{2h})$$

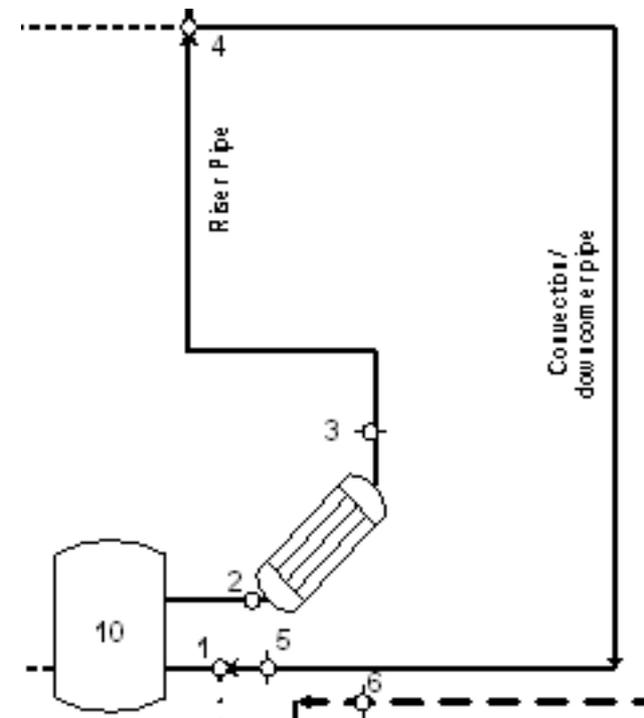


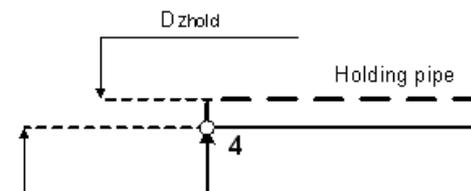
Simulazione (Off-Design) – Modello Dinamico

- Il modello dinamico di simulazione è stato concepito con **passo temporale variabile**, determinato sulla base della fisica del circuito (valutazione del tempo di ritorno sul circuito di ricircolo). La durata di ogni passo temporale è pari al tempo necessario per percorrere l'intera lunghezza del circuito di ricircolo, con la velocità media (variabile nel tempo) indotta dal meccanismo di circolazione naturale:

$$Time_{step} = \frac{L_{tot}}{u}$$

- I dati meteo sono stati tratti da Trnsys Meteororm e riportati nelle Lookup Tables di EES per varie località.
- Il modello dinamico prevede il calcolo delle variabili fisiche nei vari punti del circuito e lungo tutta la giornata, ad ogni step.





Il sistema è concepito in modo tale che solo quando raggiunge la temperatura di 85 °C, l'acqua può uscire dall'impianto per dilatazione termica; l'aumento di volume è pari a :

$$\Delta V = m \left(\frac{1}{\rho} - \frac{1}{\rho_{20^\circ}} \right)$$

Il volume aggiuntivo viene raccolto da una **torretta di carico** con diametro 15 cm e altezza 30cm, a cui è collegato il tubo di scarico alla quota:

$$\Delta h_{85^\circ} = \frac{\Delta V_{85^\circ}}{A_c} = \frac{m}{A_c} \left(\frac{1}{\rho_{85^\circ}} - \frac{1}{\rho_{20^\circ}} \right)$$

- $\rho_{20^\circ C}$ è la densità dell'acqua a 20 °C
- $\rho_{85^\circ C}$ è la densità dell'acqua a 85 °C
- ρ è la densità dell'acqua in un dato istante di tempo

Quando si raggiunge tale altezza, il volume e la portata che tracimano per dilatazione termica sono calcolabili **per ogni giro del circuito**:

$$V_{makeup} = \Delta V - \Delta V_{85^\circ}$$

$$\dot{V}_{makeup} = \frac{V_{makeup}}{Time_{step}}$$

Per la **conservazione della massa** nel circuito le portate di traccimazione e di ricircolo sono collegate tra di loro:

$$\dot{m}_{makeup} = \rho \dot{V}_{makeup}$$

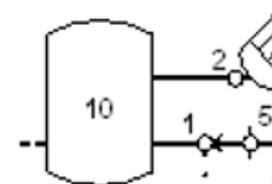
$$\dot{m}_{ric} = \dot{m} - \dot{m}_{makeup}$$

La portata di makeup attraversa holding pipe e discharge pipe verso il serbatoio di stoccaggio di acqua disinfettata, passando per lo scambiatore di calore, il cui funzionamento è descritto anche in off-design con il metodo ε -NTU.

Per il principio dei **vasi comunicanti**, a una portata in uscita dall'impianto corrisponde una entrante che, **preriscaldata dallo scambiatore di calore**, si miscela con quella di ricircolo raffreddandola con il seguente **bilancio di energia**:

$$T_1 = \frac{\dot{m}_{ric} T_5 + \dot{m}_{makeup} T_9}{\dot{m}_{ric} + \dot{m}_{makeup}} \Bigg|_{step-1}$$

Il volume totale di acqua nel circuito di ricircolo deve essere adeguato per sostenere la produzione di acqua disinfettata; si aumenta artificialmente la massa del circuito inserendo un **serbatoio di stoccaggio**, che si riscalda progressivamente nel tempo. In questo modo si evita anche che l'acqua nel circuito arrivi all'ebollizione.



La precisione del calcolo è legata all'imperfetta chiusura del bilancio energetico tra due successivi passi temporali (modello time-marching esplicito). Si calcolano le quantità:

$$\dot{Q}_{net} = \dot{Q}_2 - \dot{Q}_1 - \dot{Q}_3 - \dot{Q}_4 - \dot{Q}_5 - \dot{Q}_8 - \dot{m}C_p(T_1 - T_{10})$$

➤ Assenza traccimazione

$$\dot{Q}_{TW} = \dot{m}C_p(T_5 - T_1)$$

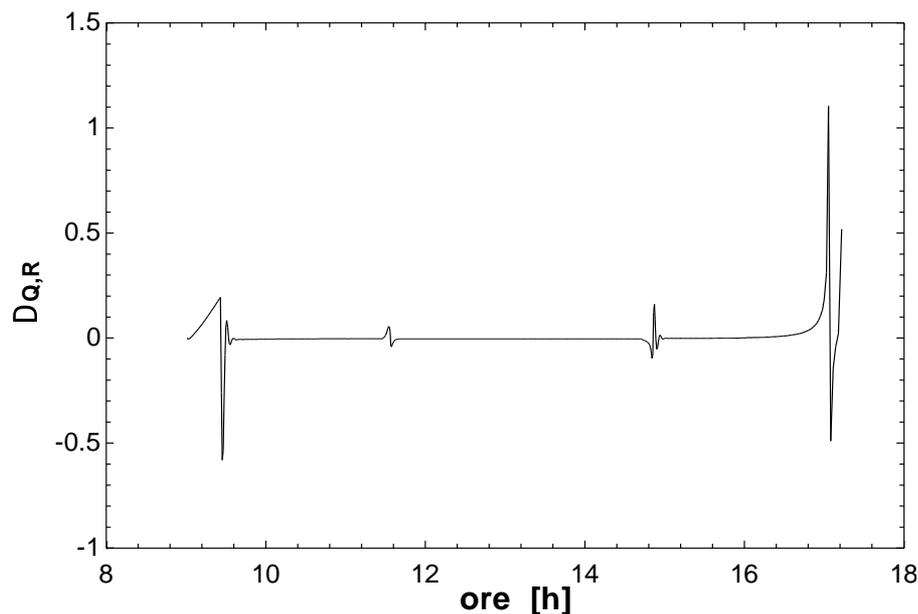
➤ Presenza di traccimazione:

$$\dot{Q}_{TW} = \dot{m}C_p(T_8 - T_0)$$

E si calcola l'errore come:

$$\Delta\dot{Q} = \dot{Q}_{net} - \dot{Q}_{TW}$$

$$\Delta\dot{Q}_r = \frac{\Delta\dot{Q}}{\dot{Q}_{net}}$$



L'errore risulta particolarmente rilevante nei passi temporali nei quali si attiva o disattiva la traccimazione, in quanto in tali situazioni cambia la configurazione del sistema ed il bilancio complessivo di energia.

Risultati

I risultati globali sono espressi con i seguenti parametri:

$$m = \int \dot{m}_{makeup} dt$$

$$Prod = \frac{\int \dot{V}_{makeup} dt}{A_c \int \dot{Q}_{inc} dt}$$

$$\eta = \frac{\int \dot{Q}_{ass} dt}{\int \dot{Q}_{inc} dt}$$

L'intervallo di integrazione d'interesse può essere quello annuale o quello giornaliero.

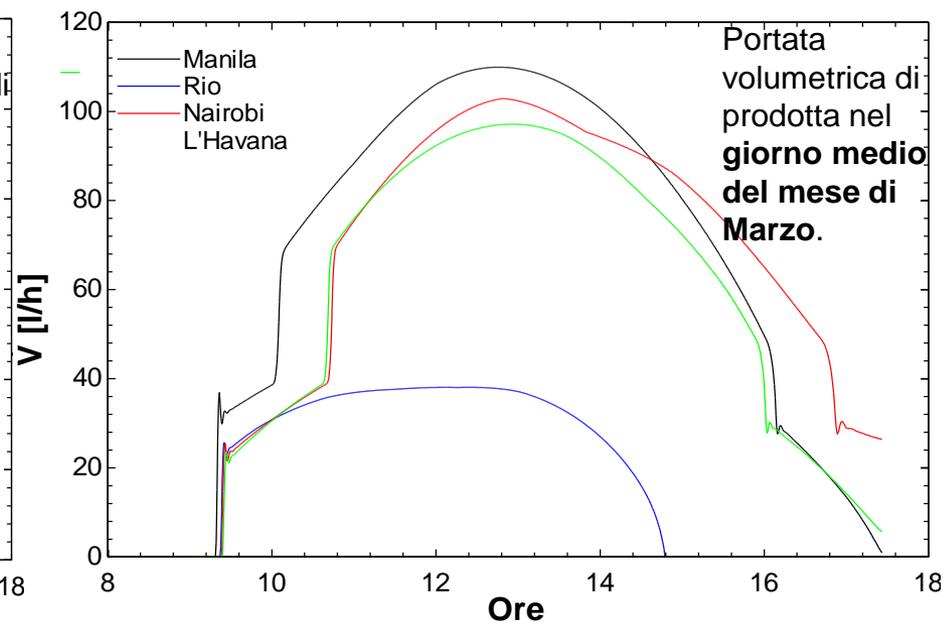
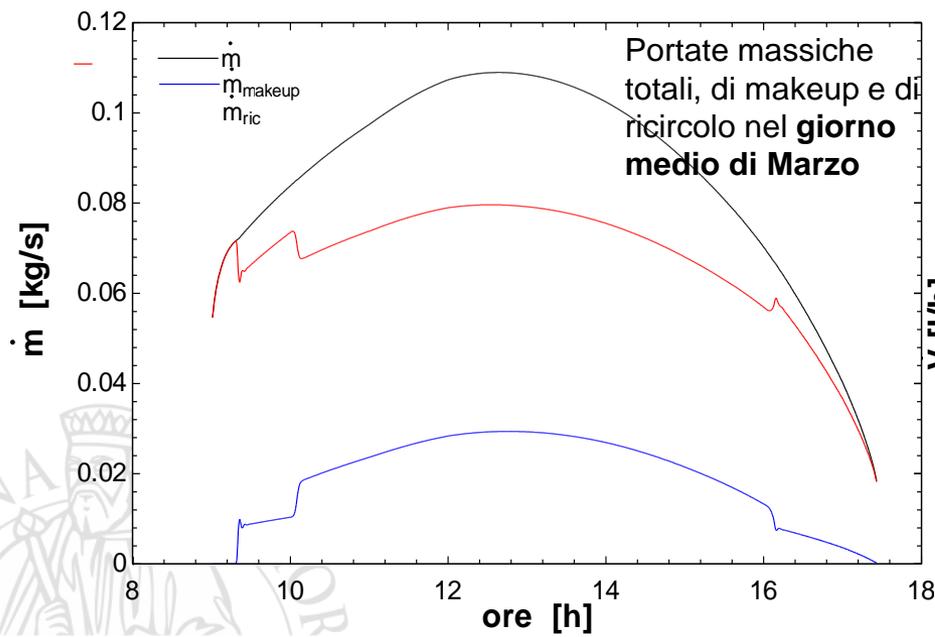
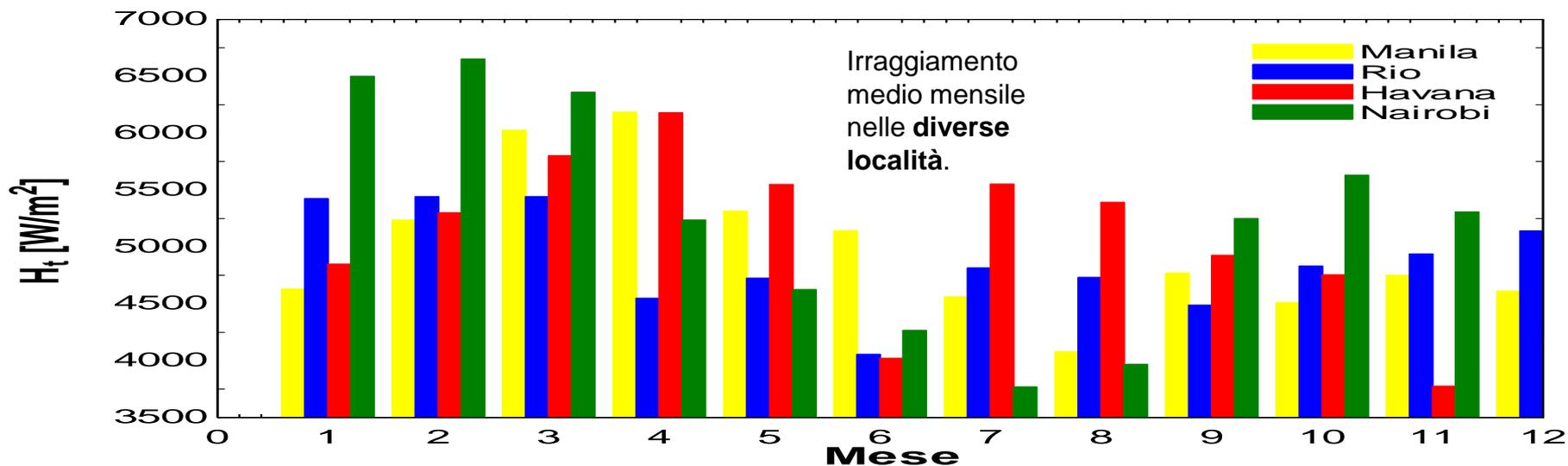
La simulazione è stata condotta in diverse località:

- **Manila**
- **Rio de Janeiro**
- **L'Havana**
- **Nairobi**
- **Brindisi**

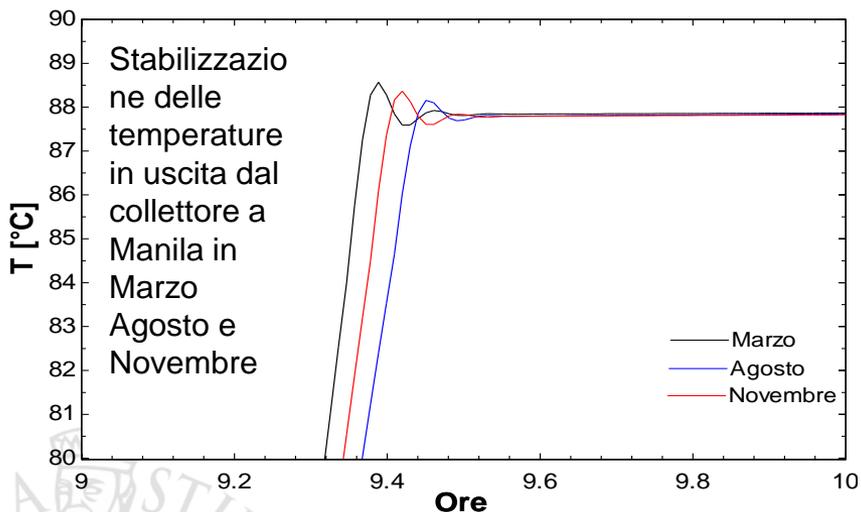
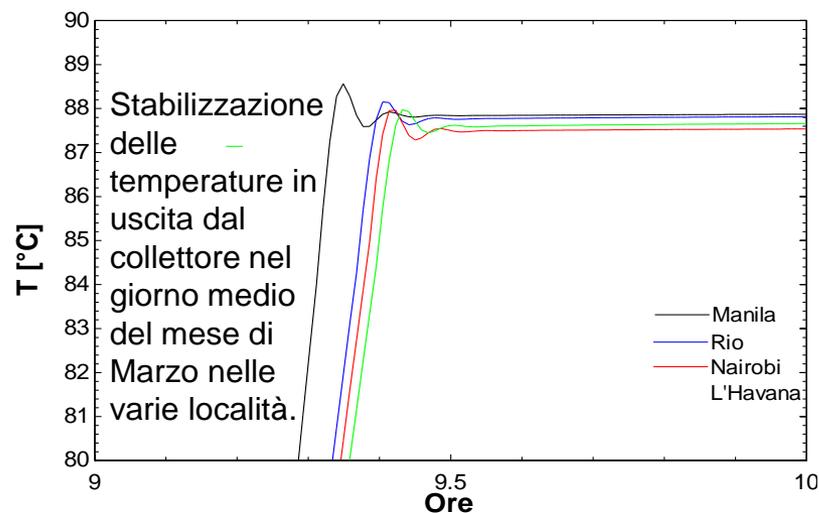
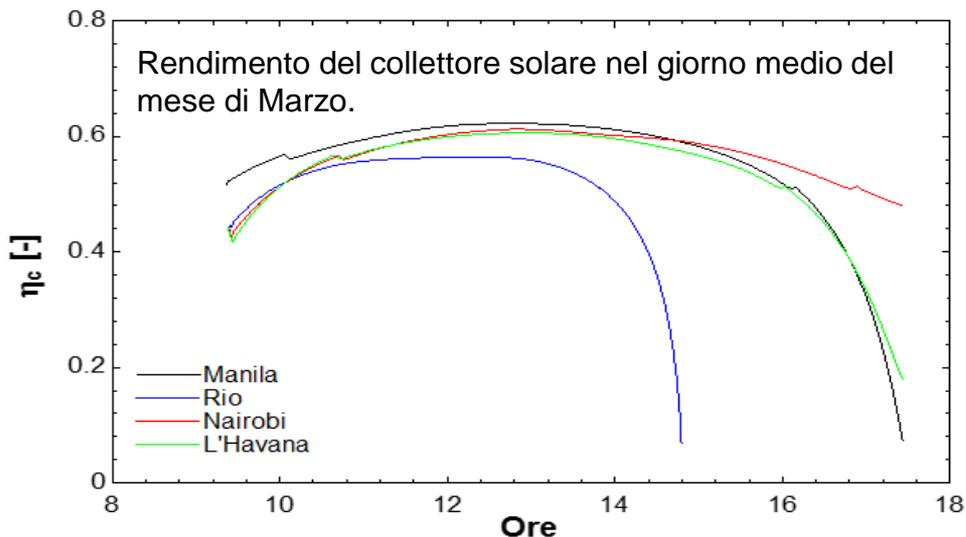
	m [kg]	Prod [l/MJ m²]	η_{en} [-]
Manila	145 918	575.5	0.5458
Rio	130 292	459.6	0.5047
L'Havana	139 075	528.9	0.5281
Nairobi	143 298	501.6	0.5118
Brindisi	101 700	413.4	0.4661

Risultati **annuali** della simulazione nelle varie località
(Collettori TVP – LT)

Risultati – Analisi Giornaliera



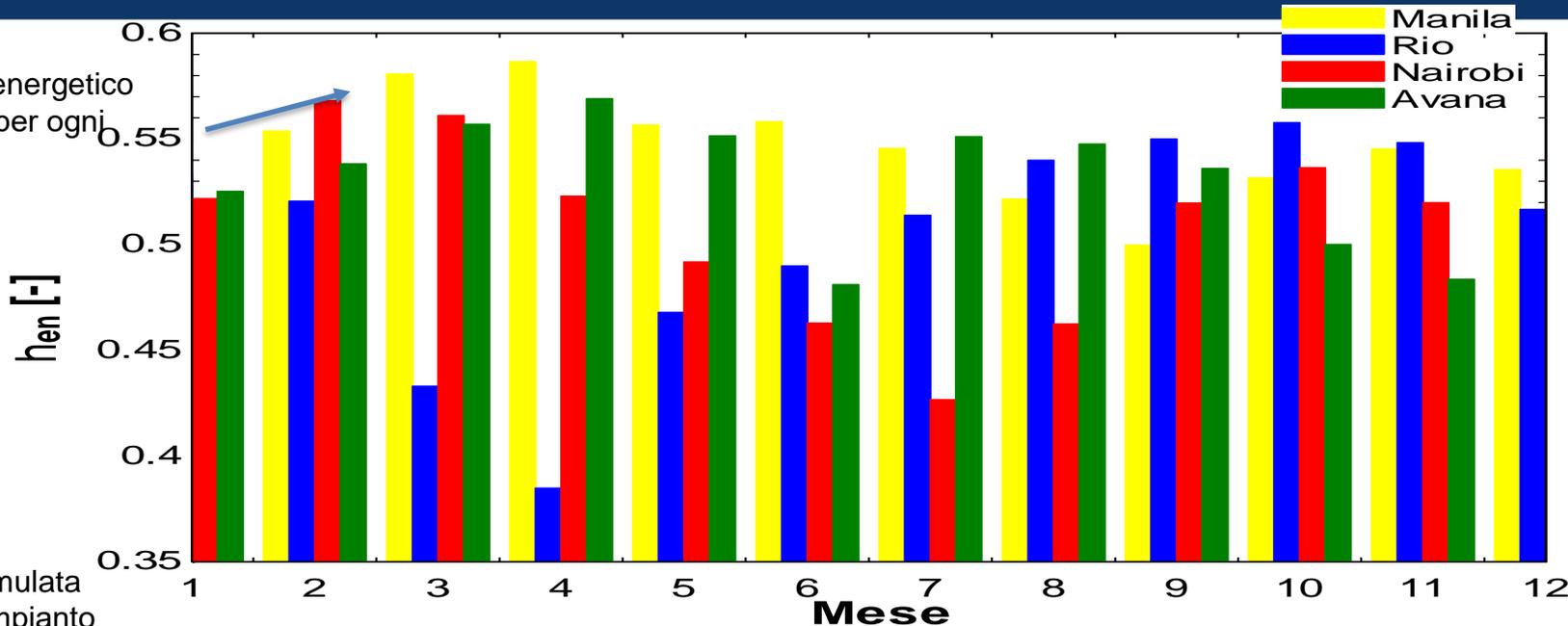
Risultati – Analisi Giornaliera



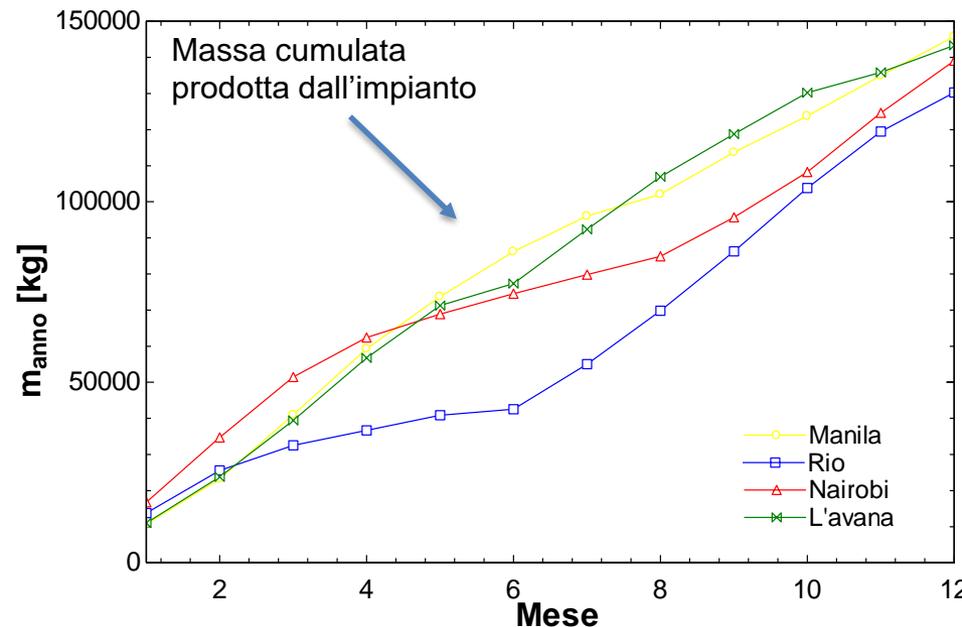
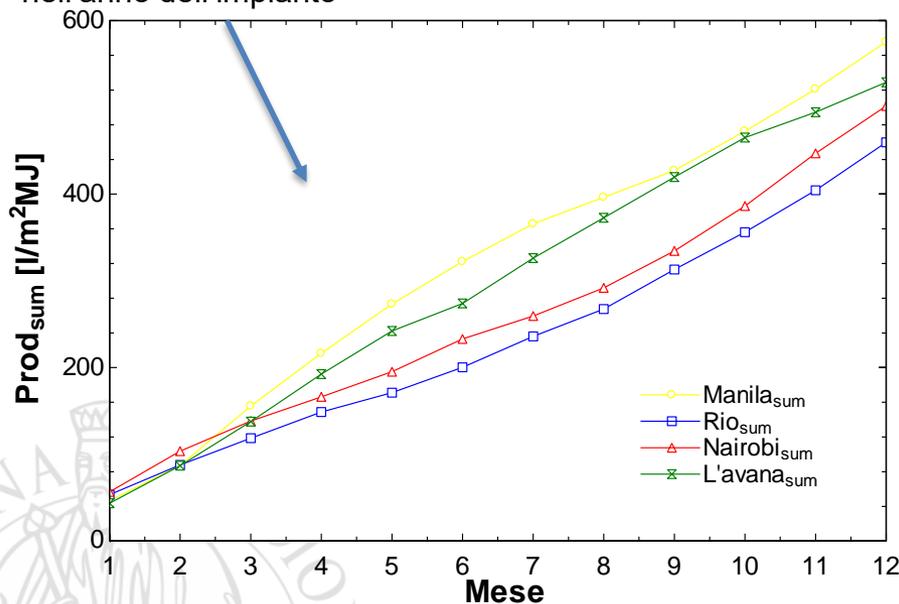
Osservo che le temperature a regime sono circa le stesse, l'irraggiamento nel giorno o nelle varie località altera i tempi con cui vengono raggiunte.

Risultati – Analisi della Produzione Annuale

Rendimento energetico dell'impianto per ogni mese

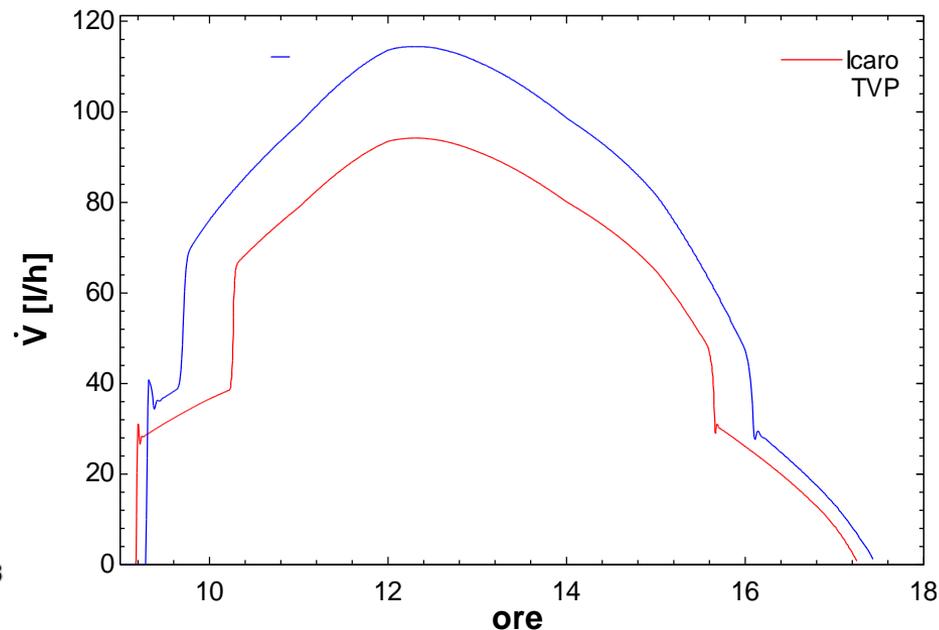
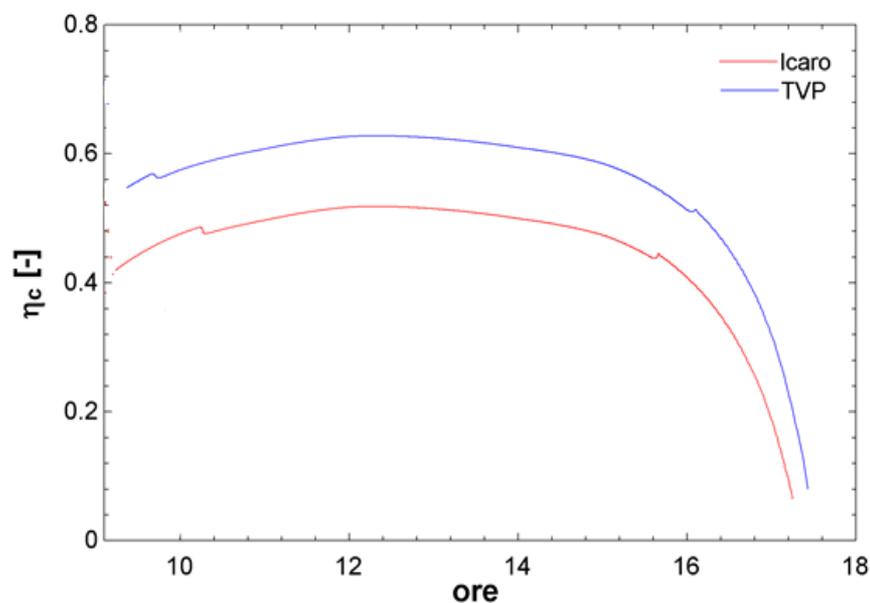


Produttività cumulata nell'anno dell'impianto

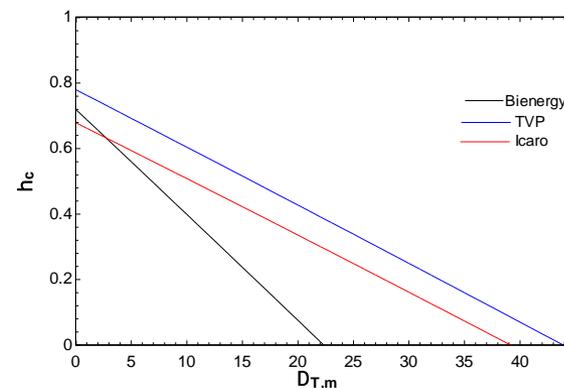


Confronto con collettore Icaro Fds

Mese Aprile:

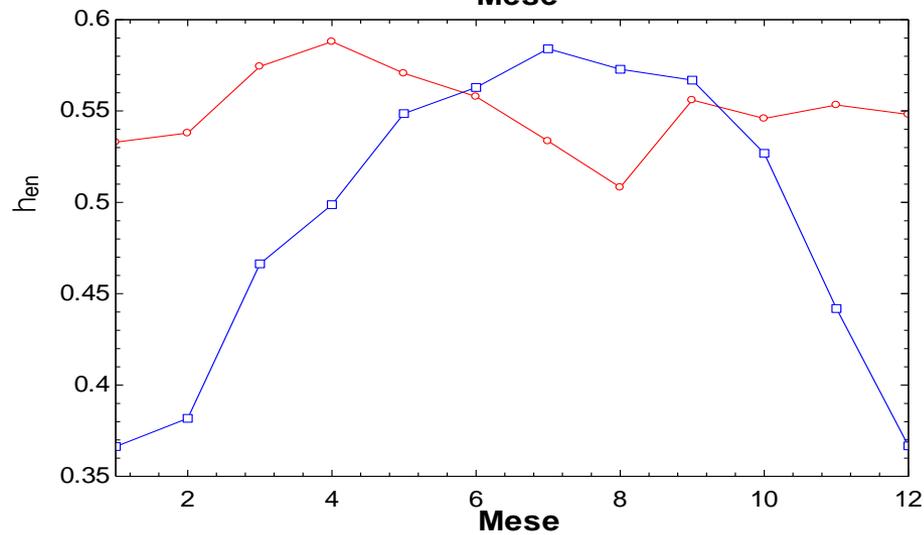
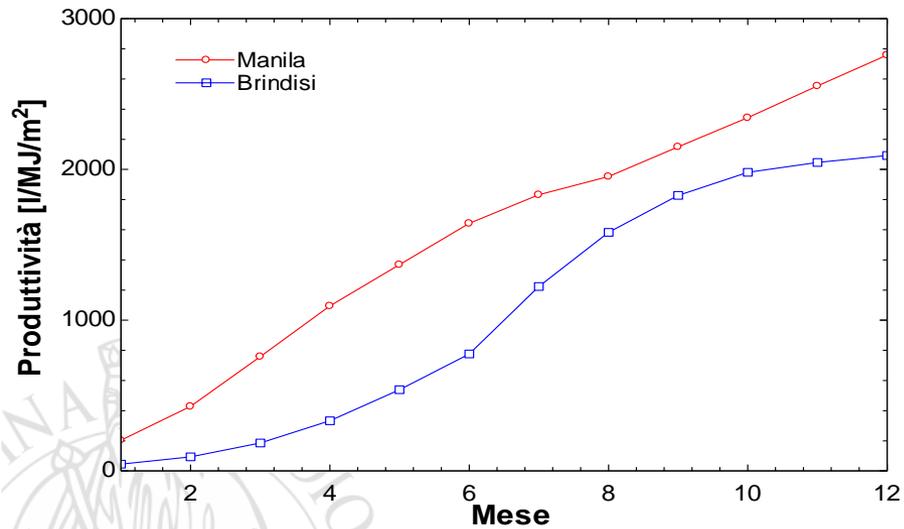
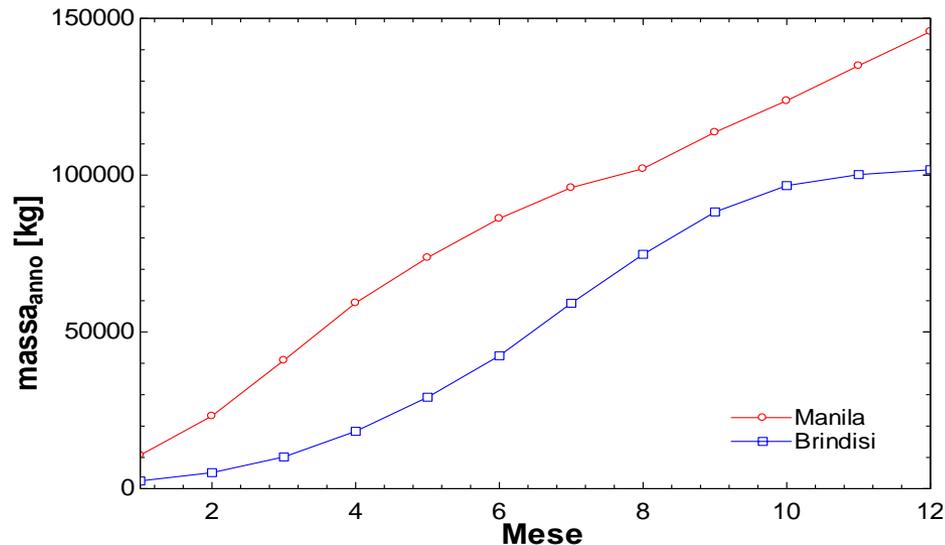
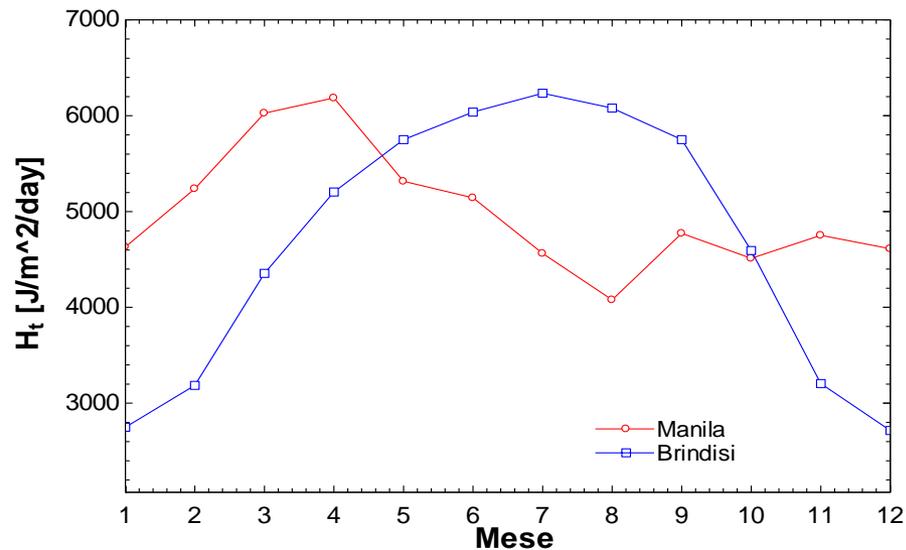


	m_{day} [kg]	Produttività [l/MJ/m ²]	η_{en} [-]
TVP	609.3	2.02	0.588
ICARO	476.6	1.739	0.4672



Confronto Manila - Brindisi

Irraggiamento, produttività e rendimento energetico nell'anno



Conclusioni

I risultati ottenuti a livello di simulazione dimostrano come questo sistema, il cui punto di forza è la **semplicità realizzativa**, sia assolutamente utile ed efficace: infatti sono sufficienti due collettori solari ed un semplice impianto correttamente dimensionato per avere un apporto idrico importante di acqua disinfettata, in media **382 litri al giorno** nelle località tropicali; ciò rappresenta un contributo importante al benessere per i paesi in via di sviluppo, dove la mancanza di acqua potabile è molto grande, ma è altrettanto grande la disponibilità della risorsa solare.

Nel sistema proposto il sole è **l'unica fonte di energia** richiesta per mettere in moto il fluido con circolazione naturale, senza approvvigionamento di energia elettrica od altre tecnologie spesso inaccessibili per questi paesi.

Il sistema comprende il **recupero termico**, con la doppia funzione di aumentare la produttività e garantire acqua disinfettata raffreddata utilizzabile in tempi brevi.

Si ottengono **risultati soddisfacenti anche in paesi non tropicali.**





Grazie per l'attenzione