

65° Congresso Nazionale ATI – Domus de Maria (CA), 13-17 Settembre 2010

UN MODELLO ALLE DIFFERENZE FINITE DI UN PANNELLO FOTVOLTAICO ACCOPPIATO A MATERIALE A CAMBIAMENTO DI FASE

Maurizio Cellura¹, Valerio Lo Brano¹, Aldo Orioli¹, Giuseppina Ciulla^{1*}

¹DREAM, Dipartimento di Ricerche Energetiche ed Ambientali,
Università degli Studi di Palermo, Viale delle Scienze, Edificio 9, 90128 Palermo
*ina@dream.unipa.it

SOMMARIO

La diffusione commerciale dei dispositivi fotovoltaici presenta negli ultimi anni un trend di crescita significativa a livello internazionale. Numerose ricerche sono state svolte al fine di incrementare l'efficienza di conversione elettrica dei pannelli fotovoltaici e tra le soluzioni indagate è stato sperimentato l'impiego di materiali a cambiamento di fase (MCF) per ridurre i picchi di temperatura di funzionamento.

Nel lavoro è stato sviluppato un algoritmo di calcolo in grado di fornire l'andamento temporale della temperatura di un pannello fotovoltaico accoppiato a materiale a cambiamento di fase (Sistema PV-MCF).

La determinazione della distribuzione di temperature che interessano un sistema PV-MCF è stata affrontata con il metodo delle differenze finite in geometria monodimensionale. Sono state definite le equazioni di conservazione dell'energia per ogni punto nodale in cui è stato discretizzato il sistema fisico, differenziandole per i nodi "interni" e per i nodi "superficiali". Le equazioni alle differenze finite sono state formulate esplicitamente rispetto alla variabile temporale e sono state codificate in un apposito software.

Il confronto con alcune soluzioni analitiche largamente impiegate nella bibliografia di settore ha permesso di verificare la correttezza e la validità dell'approccio sviluppato.

INTRODUZIONE

La diffusione dei pannelli fotovoltaici presenta significativi trend di crescita nel panorama internazionale delle tecnologie energetiche alimentate da fonti rinnovabili e tali dispositivi sono stati oggetto in questi ultimi anni di numerose ricerche tese a incrementarne l'efficienza di conversione. Le prestazioni di un pannello fotovoltaico vengono definite in base alla "potenza di picco", che identifica la potenza elettrica massima fornita dal pannello quando riceve una insolazione di 1 kW/m² e la temperatura della cella è di 25 °C. Nella realtà l'irraggiamento solare ha una intensità variabile ed il pannello è sottoposto ad escursioni termiche notevoli, che ne portano la temperatura a valori ben al di sopra di 25 °C.

Schematizzando il fenomeno, il flusso di energia solare assorbito dal pannello in un dato intervallo di tempo si trasforma in energia elettrica e in calore. Il calore è in parte assorbito dal pannello, che per tale ragione innalza la sua temperatura, e in parte è riversato nell'ambiente circostante. Quanto più grande è la porzione dell'energia solare trasformata in calore, tanto minore sarà il rendimento di trasformazione del componente fotovoltaico. È noto infatti che il rendimento di un pannello fotovoltaico diminuisce con l'aumentare della temperatura di funzionamento.

Allo scopo di elevare la resa di conversione elettrica del pannello fotovoltaico, diminuendone la temperatura, alcuni

autori hanno proposto di utilizzare materiali a cambiamento di fase (MCF) per limitare le fluttuazioni di temperatura del pannello [1, 2]. I MCF sono materiali che sfruttando il fenomeno della transizione di fase scambiano energia termica a temperatura costante o pressoché tale.

Il lavoro presentato si propone di sviluppare un algoritmo di calcolo in grado di descrivere l'andamento temporale delle temperature del pannello accoppiato a materiale a cambiamento di fase. Lo scopo principale è quello di pervenire ad una attendibile valutazione del sistema indagato, stimando la reale efficacia connessa all'impiego dei MCF.

APPLICAZIONE DEL METODO DELLE DIFFERENZE FINITE

La determinazione della distribuzione di temperature che interessano un pannello fotovoltaico accoppiato con MCF è stata affrontata con il metodo delle differenze finite in geometria monodimensionale. Sono state definite le equazioni di conservazione dell'energia per ogni punto nodale in cui è stato discretizzato il sistema fisico. Tali equazioni sono state ricavate per i nodi "interni", soggetti a flussi di tipo conduttivo, e per i nodi "superficiali", interessati anche da flussi termici convettivi e radiativi adottando la formulazione esplicita delle equazioni alle differenze finite.

In presenza di cambiamento di fase risulta più utile calcolare la variazione di entalpia all'interno del mezzo.

Poiché i cambiamenti di fase ordinari delle sostanze pure avvengono a temperatura costante, il legame tra l'entalpia e la temperatura può essere schematizzato come in Fig.1.

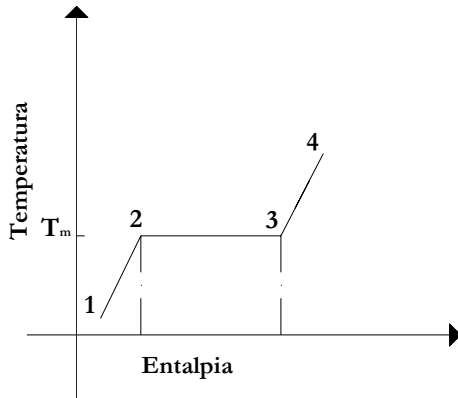


Fig.1: Variazione dell'entalpia in funzione della temperatura

Alla fine di ogni intervallo di calcolo lo stato termodinamico di ciascuno degli strati elementari individuati dalla discretizzazione spaziale dipende dalle condizioni iniziali della sostanza e dagli scambi termici con gli strati, o con i fluidi, contigui.

Gli scambi termici netti coincidono con una variazione di entalpia dello strato elementare. A seconda dell'entità della variazione di entalpia e dello stato fisico iniziale è possibile che la sostanza subisca un passaggio di stato, liquefacendosi o solidificandosi a seconda del segno della variazione di entalpia.

I diagrammi di flusso di figura 2, 3 e 4 visualizzano tutte le possibili combinazioni e consentono di identificare l'equazione di bilancio da cui derivare l'equazione risolutiva del problema.

Caso 1): Condizione iniziale della sostanza (all'istante p) rappresentato

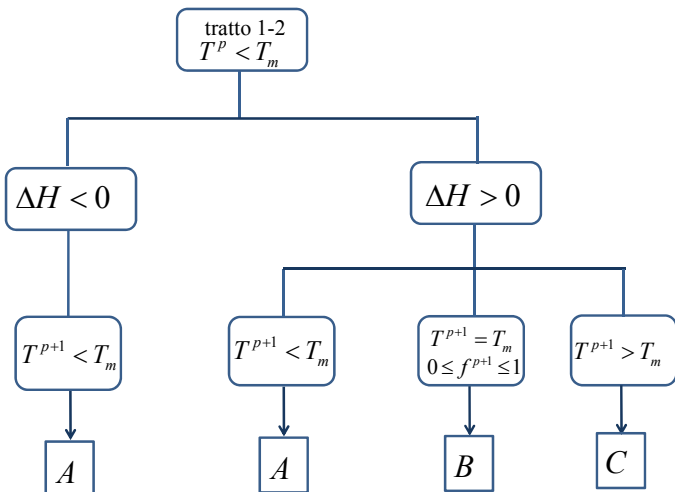


Fig.2: Punto iniziale nello stato solido

A) $\Delta H = \rho_s c_s V (T^{p+1} - T^p)$

B) $\Delta H = \rho_s c_s V (T_m - T^p) + \bar{\rho} L V f^{p+1}$

C) $\Delta H = \rho_s c_s V (T_m - T^p) + \bar{\rho} L V + \rho_l c_l V (T^{p+1} - T_m)$

dove:

ρ_s e ρ_l rappresentano la densità della sostanza rispettivamente in fase solida e in fase liquida;

$\bar{\rho}$ è la densità della sostanza durante il cambiamento di fase;

c_s e c_l rappresentano il calore specifico a pressione costante del materiale rispettivamente in fase solida ed in fase liquida;

V è il volume di controllo;

L è il calore latente di fusione;

pedici

0,1,2... : posizione del nodo;

apici

p: istante di tempo considerato.

Caso 2): Condizione iniziale della sostanza (all'istante p) rappresentato da un punto appartenente al tratto 2-3 ($T^p = T_m$)

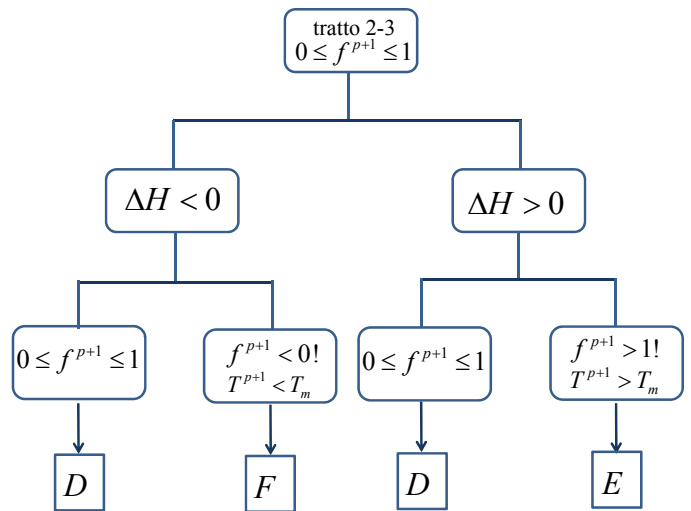


Fig.3: Punto iniziale durante la transizione.

D) $\Delta H = \bar{\rho} L V (f^{p+1} - f^p)$

E) $\Delta H = \rho_s c_s V (T_m - T^p) + \bar{\rho} L V f^{p+1}$

F) $\Delta H = \rho_s c_s V (T_m - T^p) + \bar{\rho} L V + \rho_l c_l V (T^{p+1} - T_m)$

Caso 3): Condizione iniziale della sostanza (all'istante p) rappresentato da un punto appartenente al tratto 3-4 ($T^p > T_m$)

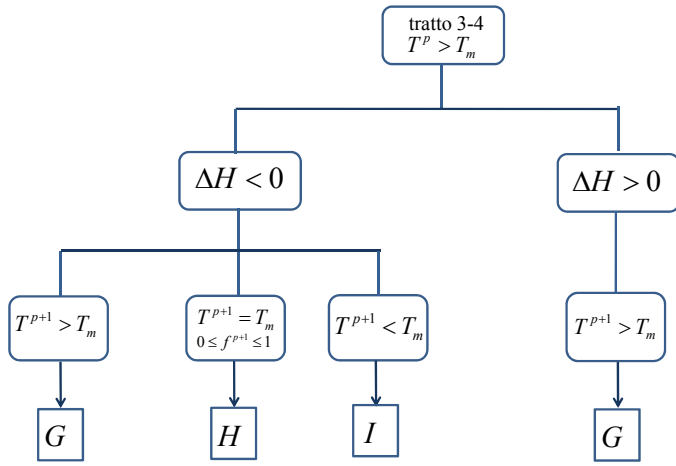


Fig.4: Punto iniziale nello stato liquido

$$G) \Delta H = \rho_l c_l V (T^{p+1} - T^p)$$

$$H) \Delta H = \rho_l c_l V (T_m - T^p) + \bar{\rho} L V (f^{p+1} - 1)$$

$$I) \Delta H = \rho_l c_l V (T_m - T^p) - \bar{\rho} L V + \rho_s c_s V (T^{p+1} - T_m)$$

Per gli strati valgono i seguenti bilanci energetici:
nodi superficiali:

$$\dot{E}_{in} = \dot{E}_{add} + \dot{E}_{cond} = \frac{\Delta H}{\Delta t} \quad (1)$$

nodi interni confinanti con il silicio:

$$\dot{E}_{in} = \dot{E}_{cond} + \tau \alpha \dot{E}_{sole} A = \frac{\Delta H}{\Delta t} \quad (2)$$

nodi interni:

$$\dot{E}_{in} = \dot{E}_{cond} = \frac{\Delta H}{\Delta t} \quad (3)$$

in cui :

\dot{E}_{in} è il flusso di energia entrante nello strato elementare;

\dot{E}_{add} è il flusso di energia scambiato per convezione ed irraggiamento;

\dot{E}_{cond} è il flusso di energia scambiato per conduzione con gli strati contigui;

\dot{E}_{sole} è il flusso di energia solare;

τ è la trasmittanza globale del vetro;

α è l'assorbanza globale del silicio.

Per meglio interpretare quanto fin ora descritto si consideri, ad esempio, il Caso1 con $\Delta H > 0$. Come già illustrato, in tali condizioni, all'istante p la sostanza si trova allo stato solido (punto nel tratto 1-2), all'istante $p+1$ la sostanza potrebbe trovarsi:

A) allo stato solido (punto nel tratto 1-2);

B) nelle condizioni di cambiamento di fase (punto nel

tratto 2-3).

C) allo stato liquido (punto nel tratto 3-4);

In relazione allo schema di discretizzazione spaziale di Fig.5, ad ogni istante t si considerino noti la temperatura dell'aria T_{aria} che lambisce la superficie ed il coefficiente di scambio adduttivo h_c .

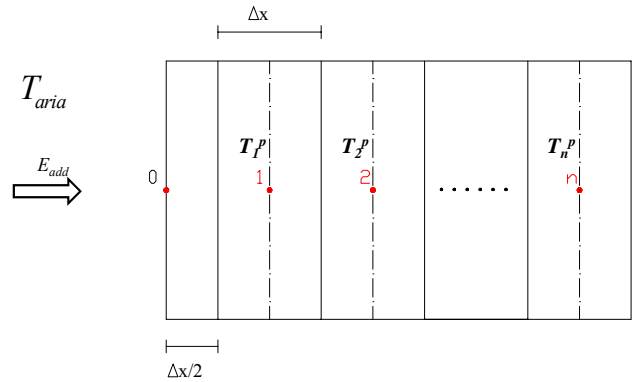


Fig.5 Schema di trasmissione del calore lungo una superficie discretizzata

Per ogni nodo si può quindi ricavare, al variare delle condizioni in cui può venirsi a trovare la sostanza, la temperatura o la frazione di liquido all'istante $p+1$.

A titolo di esempio nel seguito vengono riportate le risoluzioni di alcuni casi per nodo superficiale e per nodo interno caratterizzato dalla presenza del silicio.

Nodo superficiale

Esplicitando i termini che definiscono l'Eq.(1) nel modo seguente:

$$\begin{cases} \dot{E}_{in} = \rho c A \frac{\Delta x}{2 \Delta t} (T_0^{p+1} - T_0^p) \\ \dot{E}_{add} = h_c A \frac{\Delta x}{2 \Delta t} (T_{aria}^p - T_0^p) \\ \dot{E}_{cond} = 2 \frac{(\lambda_0 \lambda_1) A}{\Delta x (\lambda_0 + \lambda_1)} (T_1^p - T_0^p) \end{cases} \quad (4)$$

dove:

A è la superficie investita dal flusso di calore;

$\Delta x/2$ è lo spessore del nodo in esame;

λ è la conducibilità termica della sostanza.

è quindi possibile ricavare il valore della temperatura o della frazione di liquido, nell'istante $p+1$.

Caso 1-A con $\Delta H > 0$

In tal caso l'Eq.(1) viene eguagliata a:

$$\Delta H = \rho_s c_s V (T_0^{p+1} - T_0^p) = \rho_s c_s \frac{\Delta x}{2} A (T_0^{p+1} - T_0^p)$$

Quando non si è in presenza di cambiamento di fase, la variazione nel tempo della frazione di liquido è nulla ed è possibile esplicitare la temperatura all'istante attuale $p+1$ come:

$$T_0^{p+1} = T_0^p + 2 \frac{\Delta t h_c}{\rho_s c_s \Delta x} (T_{aria}^p - T_0^p) + 4 \frac{\Delta t (\lambda_0 \lambda_1)}{\rho_s c_s \Delta x^2 (\lambda_0 + \lambda_1)} (T_1^p - T_0^p) \quad (5)$$

Caso 1-B con $\Delta H > 0$

La temperatura della sostanza nell'istante $p+1$ è nota ed è pari a T_m mentre la frazione di liquido f^{p+1} è compresa tra 0 ed 1; la variazione di entalpia viene espressa come:

$$\begin{aligned} \Delta H &= \rho_s c_s V (T_m - T_0^p) + \bar{\rho} L V f_0^{p+1} = \\ &= \rho_s c_s \frac{\Delta x}{2} A (T_m - T_0^p) + \bar{\rho} L \frac{\Delta x}{2} A f_0^{p+1} \end{aligned}$$

che sostituita nell'Eq.(1) ed esplicitando in funzione della frazione di liquido diviene:

$$\begin{aligned} f_0^{p+1} &= 2 \frac{h_c \Delta t}{\rho L \Delta x} (T_{aria}^p - T_0^p) + \\ &+ 4 \frac{\lambda_0 \lambda_1}{(\lambda_0 + \lambda_1)} \frac{\Delta t}{\rho L \Delta x^2} (T_1^p - T_0^p) - \rho_s c_s \frac{(T_m - T_0^p)}{\bar{\rho} L} \end{aligned} \quad (6)$$

Nodo interno-strato di silicio

Nel caso in specie il bilancio energetico verrà scritto considerando anche la presenza del flusso $\tau \alpha E_{sole}$ dovuto alla radiazione solare. Data la sottigliezza dello strato (circa 0,3 mm) e la notevole conducibilità termica del materiale, il silicio è considerato come una superficie virtuale, indicata con S_i , posta a separazione del vetro e del materiale di supporto delle celle. Il fenomeno termico può essere descritto dalla Fig.6:

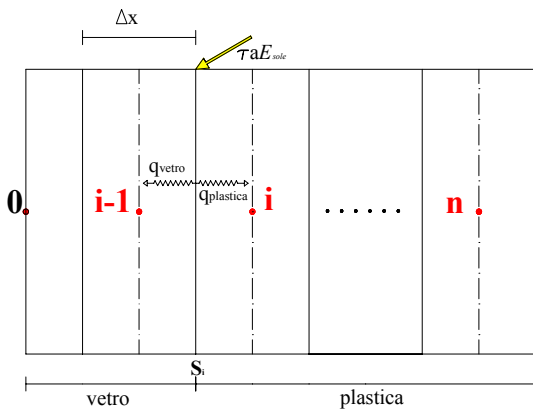


Fig.6 Schema di trasmissione del calore per un nodo interno lungo una superficie discretizzata

in cui il flusso $\tau \alpha E_{sole}$ si ripartisce in due aliquote, una pertinente lo strato elementare di vetro q_{vetro} e l'altra pertinente lo strato elementare di plastica $q_{plastica}$, ciascuna proporzionale alle rispettive conducibilità termiche, ovvero:

$$\begin{aligned} \tau \alpha E_{sole} A &= q_{vetro} + q_{plastica} \\ q_{vetro} &= \frac{\lambda_{vetro}}{\lambda_{vetro} + \lambda_{plastica}} \tau \alpha E_{sole} A \\ q_{plastica} &= \frac{\lambda_{plastica}}{\lambda_{vetro} + \lambda_{plastica}} \tau \alpha E_{sole} A \end{aligned} \quad (8)$$

L'Eq.(2) scritta per il nodo interno di uno strato di plastica con una superficie interessata da presenza di silicio può in generale essere riscritta come:

$$\dot{E}_{in} = \dot{E}_{cond,(i-1)} + \dot{E}_{cond,(i+1)} + q_{plastica} = \frac{\Delta H}{\Delta t} \quad (8)$$

dove:

$$\begin{cases} \dot{E}_{cond,(i-1)} = \frac{2(\lambda_i \lambda_{i-1}) A}{(\lambda_i + \lambda_{i-1}) \Delta x} (T_{i-1}^p - T_i^p) \\ \dot{E}_{cond,(i+1)} = \frac{2(\lambda_i \lambda_{i+1}) A}{(\lambda_i + \lambda_{i+1}) \Delta x} (T_{i+1}^p - T_i^p) \end{cases} \quad (9)$$

Analogamente la determinazione della temperatura o della frazione di liquido all'istante $p+1$ dipenderà dalle condizioni della sostanza nell'istante finale.

Caso 1-A con $\Delta H > 0$

Sostituendo nell'Eq.(8) i termini definiti nell'Eq.(9) ed il corrispondente valore ΔH ed esplicitando in funzione della temperatura all'istante $p+1$, per il generico nodo interno i si ottiene:

$$\begin{aligned} T_i^{p+1} &= T_i^p + 2 \frac{\Delta t (\lambda_i \lambda_{i-1})}{(\lambda_i + \lambda_{i-1}) \rho_s c_s \Delta x} (T_{i-1}^p - T_i^p) + \\ &+ 2 \frac{\Delta t (\lambda_i \lambda_{i+1})}{\rho_s c_s \Delta x^2 (\lambda_i + \lambda_{i+1})} (T_{i+1}^p - T_i^p) + \\ &+ \tau \alpha E_{sole} \frac{\Delta t \lambda_{plastica}}{\rho_s c_s \Delta x (\lambda_{plastica} + \lambda_{vetro})} \end{aligned} \quad (10)$$

Quindi con la procedura prima descritta è possibile determinare per qualsiasi condizione iniziale in cui si trova la sostanza e per qualsiasi condizione finale in cui può venirsi a trovare, l'equazione in grado di fornire la temperatura o la frazione di liquido all'istante $p+1$.

VERIFICA DEL MODELLO MATEMATICO

La verifica del modello matematico presentato è stata effettuata tramite il test di Voeller e Cross [3]. Tale test prevede l'applicazione del modello ad un caso specifico in geometria monodimensionale in cui una sostanza pura a 2 °C occupa un semi piano infinito. Al tempo $t = 0$ la superficie del

mezzo nel punto di ascissa $x = 0$ si considera a temperatura fissata di -4°C che è al di sotto del punto di cambiamento di fase della sostanza fissato a $T_m = 0^\circ\text{C}$. Per $t > 0$ la superficie di separazione tra fase solida e liquida si va spostando all'interno del semipiano. Il test consiste nel determinare la posizione della superficie di separazione tra fase solida e liquida al variare del tempo $x = X(t)$. La soluzione analitica a questo problema classico [4] è descritta dall'equazione:

$$X(t) = 2\beta(\alpha t)^{1/2} \quad (11)$$

dove α è la diffusività termica e la costante β può essere determinata dalla equazione:

$$\frac{e^{-\beta^2}}{\text{erf}(\beta)} - \frac{[T(x,0) - T_m]}{[T_m - T(0,t)] \text{erfc}[\beta]} = \frac{\beta L \sqrt{\pi}}{c_p [T_m - T(0,t)]} \quad (12)$$

La temperatura in ogni punto è data da:

$$T = \begin{cases} \frac{T_m - T(0,t)}{\text{erf}(\beta)} \text{erf}\left(\frac{x}{2\sqrt{\alpha t}}\right) + T(0,t), & x < X(t) \\ T_m & \text{per } x = X(t) \\ T(x,0) - \frac{T(x,0) - T_m}{\text{erfc}(\beta)} \text{erfc}\left(\frac{x}{2\sqrt{\alpha t}}\right), & x > X(t) \end{cases}$$

Se si impongono i seguenti dati:

$$\begin{cases} T_m = 0^\circ\text{C} & T(\infty, t) = 2^\circ\text{C} & T(x, 0) = 2^\circ\text{C} \\ T(0, t) = -4^\circ\text{C} & \lambda = 2 \frac{\text{W}}{\text{mK}} \\ c = 2.5 \cdot 10^6 \frac{\text{J}}{\text{kgK}} & \rho = 1 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} & L = 100 \cdot 10^6 \frac{\text{J}}{\text{kg}} \end{cases}$$

il cambiamento di fase per $x = 0.25\text{m}$ avviene dopo circa 453600 secondi. Il modello prima descritto è stato in grado di determinare correttamente tale tempo.

Per maggiore chiarezza nella Fig.7 viene mostrato il confronto tra l'andamento della temperatura ottenuta con la soluzione analitica di Voller e Cross e l'andamento della temperatura risultante dalla soluzione numerica proposta.

In particolare, il grafico fa riferimento alla temperatura di un punto posto a 25 cm dalla superficie di un piano semifinito; l'intervallo di tempo scelto per la discretizzazione è pari a 30 secondi.

Se si ipotizza un tempo di risoluzione inferiore a 30 secondi la soluzione numerica si avvicina maggiormente alla soluzione analitica, ma i tempi di calcolo rendono poco agevole

l'utilizzo del modello.

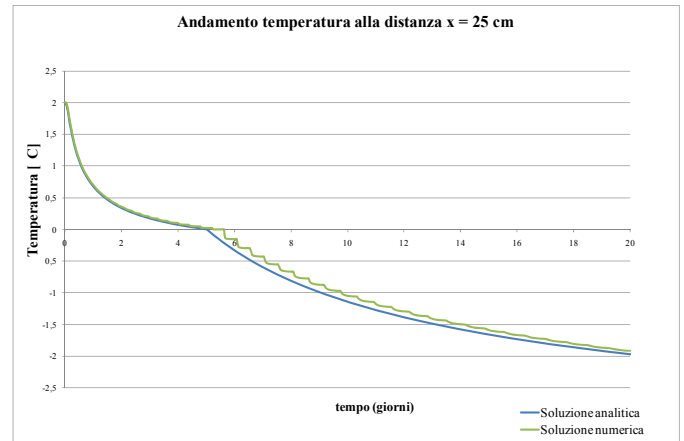


Figura 7: Confronto dell'andamento di temperatura ottenuto per la soluzione analitica e la soluzione numerica

RISULTATI

Il modello sopra sinteticamente descritto è stato implementato in un software appositamente sviluppato in ambiente Microsoft.NET. E' stato quindi applicato al caso di un pannello fotovoltaico accoppiato a MCF (Paraffina) dalle caratteristiche indicate in Tab.1.

Tab.1 Proprietà dei PCM-Paraffine

	RT27	RT35
Temperatura cambiamento di fase [°C]	26-28	29-32
Densità stato solido [kg/l]	0.87	0.88
Densità stato liquido [kg/l]	0.75	0.76
Entalpia di passaggio di fase [kJ/kg]	179	157
Calore specifico stato solido [kJ/kgK]	2.1	2.1
Conducibilità termica [W/mK]	0.2	0.2

Gli spessori e le caratteristiche termo fisiche dei vari materiali costituenti il pannello sono riportati in Tab.2 e Tab.3.

Tab.2 Spessori dei materiali costituenti il pannello PV

Elementi costituenti un modulo	mm
Vetro	4
Silicio	-
Plastica pannello	1
PCM	70
Plastica PCM	1.6

Tab.3 Caratteristiche dei materiali costituenti il pannello PV

	Conducibilità	Densità	Calore specifico
	W/mK	kg/m3	J/kgK
Vetro	0.1	1760	1255
Silicio	-	-	-
Plastica pannello	1.3	2200	840
Plastica PCM	1.3	2200	840

CONCLUSIONI

Il modello, applicato a tale sistema considerando dati meteo climatici tipici di tre giornate del mese di luglio a Palermo, ha dato luogo ai risultati indicati dalla Fig.8 e dalla Fig.9.

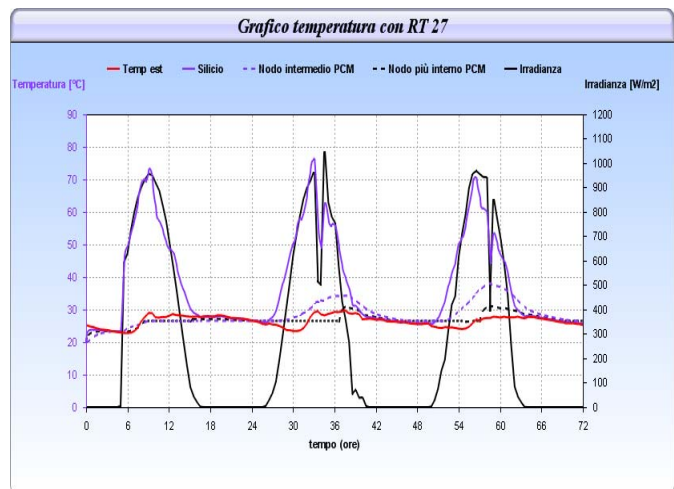


Figura 8: Modello applicato a paraffina RT27

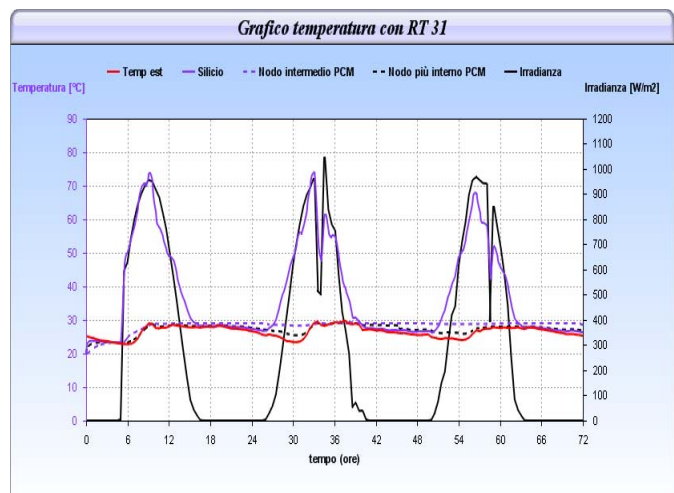


Figura 9: Modello applicato a paraffina RT31

In particolare nei grafici prima illustrati è possibile visualizzare contemporaneamente sia i dati di input, quali la radiazione solare e la temperatura dell'aria esterna, sia i dati di output della simulazione ovvero le temperature ai nodi e la temperatura dello strato di silicio.

Si evince come in entrambi i casi la temperatura simulata dello strato di silicio raggiunga una temperatura di picco superiore ai 70°C. Da valori siffatti di temperatura sembrerebbe che la soluzione tecnologica di accoppiare MCF a sistemi fotovoltaici non sia particolarmente efficace.

Per confermare sperimentalmente quanto apprezzato numericamente si è deciso di effettuare una verifica sperimentale in situ. È stata dunque messa a punto una "test facility" collocata presso il DREAM che ha permesso di dare il via ad una campagna di monitoraggio per il rilievo contemporaneo delle temperature di due pannelli fotovoltaici identici, uno dei quali accoppiato a MCF.

È stato sviluppato un modello alle differenze finite in grado di prevedere il comportamento termico di un pannello accoppiato a materiale a cambiamento di fase. Il modello è stato dapprima testato con una soluzione analitica disponibile per un caso semplificato e successivamente è stato applicato ad un pannello fotovoltaico con materiale a cambiamento di fase costituito da paraffina. I dati prodotti dal modello sono verosimili e presso il DREAM è in fase di esecuzione una validazione sperimentale in campo aperto.

Non può essere trascurato il fatto che le condizioni necessarie a determinare un calcolo convergente verso soluzioni accettabili richiede, per le caratteristiche termofisiche e geometriche dei materiali oggetto del nostro studio, una discretizzazione temporale non superiore a 0,1 secondi ed una discretizzazione lungo lo spessore non superiore ad 1 millimetro. Le condizioni predette rendono poco agevole l'utilizzo del software ai fini pratici; infatti, modellare il sistema per un tempo pari a soli tre giorni implica l'interpolazione a tratti di 144 valori di temperatura dell'aria, radiazione solare e velocità del vento, per generare 2.592.000 valori di input. Infine la risoluzione delle equazioni discretizzate, se consideriamo uno spessore totale del sistema di circa 12 cm, va ripetuta per ognuno degli oltre 120 nodi implicando oltre 300 milioni di risoluzioni.

Allo scopo di rendere più agevole il calcolo, utilizzando condizioni meno stringenti, è in fase di sviluppo uno schema di risoluzione alle differenze finite basato sul metodo di Crank-Nicholson, che sebbene sia di più elevata complessità per quello che riguarda la codifica dell'algoritmo, permette di applicare delle condizioni iniziali meno onerose dal punto di vista del tempo di calcolo.

Per testare l'efficacia del modello numerico di simulazione impiegato è in corso una verifica in campo effettuata con l'ausilio di un apposito impianto sperimentale utile ad ottenere il monitoraggio contemporaneo di due pannelli identici, uno dei quali è accoppiato ad un sistema di accumulo termico con MCF.

NOMENCLATURA

a	assorbanza globale del silicio;
A	superficie investita dal flusso di calore [m ²];
c_s	calore specifico a pressione costante in fase solida [J/kgK];
c_l	calore specifico a pressione costante in fase liquida [J/kgK];
E_{add}	flusso di energia per adduzione [J/s];
E_{ass}	flusso di energia assorbita dal sistema [J/s];
E_{cond}	flusso di energia per conduzione [J/s];
E_{in}	flusso di energia in ingresso al sistema [J/s];
E_{sole}	flusso di energia solare [J/s];
f	frazione di liquido;
h_c	coefficiente di scambio termico adduttivo [W/m ² K];
L	calore latente di fusione [J/kg];
Q	flusso di calore che investe una superficie [W/m ²];
q	aliquota di flusso radiante [J/s]
t	tempo [s];

T	temperatura dello strato elementare [K];
T_m	temperatura di cambiamento di fase della sostanza [K];
T_{aria}	temperatura dell'aria [K];
V	Volume dello strato elementare [m ³]
$X(t)$	funzione del tempo che fornisce la posizione della superficie di separazione tra fase liquida e solida [m];
α	diffusività termica [m ² /s]
β	costante;
λ	conducibilità termica [W/mK]
$\bar{\rho}$	densità della sostanza durante la transizione di fase [kg/m ³];
ρ_s	densità della sostanza allo stato solido [kg/m ³];
ρ_l	densità della sostanza allo stato liquido [kg/m ³]
τ	trasmissione globale del vetro; variazione di entalpia del solido in equilibrio con il liquido [J/kg];
Δh	variazione di entalpia [J/kg];
Δx	spessore del generico nodo [m]
<i>pedici ed apici</i>	
i	ordine spaziale del generico nodo;
p	istante di tempo

BIBLIOGRAFIA

1. M.J. Huang, P.C. Eames, and B. Norton Phase change materials for limiting temperature rise in building integrated photovoltaics Solar Energy. 80, 9, 2006, 1121-1130
2. M. J. Huang, P. C. Eames and B. Norton, Thermal regulation of building-integrated photovoltaics using phase

change materials, International Journal of Heat and Mass Transfer 47, 2715-2733, 2004

3. E. V.R. Voller and M. Cross, Accurate Solutions of Moving Boundary Problems Using Enthalpy Method. Int. J. Heat Mass Transfer 24 (1981).

4. L. Rubenstein, The Stefan Problem, Transactions in Mathematics Monograph No. 27. American Mathematical Society, 1971

SUMMARY

The diffusion of photovoltaic panels presents a significant growth in the market of renewable energy technology. In order to maximize the yield of energy conversion efficiency of the photovoltaic panel decreasing the temperature, some authors have proposed to use a heat storage system based on Change Phase Materials to limit temperature fluctuations of the panel. The work aims to develop an algorithm able to provide the change in temperature of a photovoltaic panel coupled with changing phase material. The determination of the temperatures distribution has been addressed by using the of finite differences method. The energy conservation equations for each nodal point have been defined. These equations have been developed for "Internal" nodes and for "Surface" nodes. To better address the changing phase in the case of internal nodes, the enthalpy conservation equations in the case of isothermal phase change were written. Finally, the finite difference equations were formulated with explicit scheme respect to the time variable.

The comparison with analytical solutions available in some special cases allowed to verify the reliability and validity of the approach.