Ide@Sostenible

Espai de reflexió i comunicació en Desenvolupament Sostenible

Any 3 Nº 14 Març del 2006

Departament de Projectes d'Enginyeria
UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE CATALUNYA

Estudi sobre el sistema d'emmagatzematge d'Aigua Calenta Sanitària en un sistema solar tèrmic

Daniel García Almiñana[a] , *Albert Castell*[b] , *Luisa F. Cabeza*[b]

[a] Escola Tècnica Superior d'Enginyeries Industrial i Aeronàutica de Terrassa (ETSEIAT), Colom 11 - 08222 Terrassa (daniel.garcia@upc.edu)

[b] Grup de Recerca en Energia Aplicada, Universitat de Lleida, Jaume II 69 - 25001 Lleida (acastell@diei.udl.es; lcabeza@diei.udl.es)

OBJECTE

L'objecte d'aquest projecte és el disseny d'una instal·lació solar tèrmica per al subministrament d'Aigua Calenta Sanitària (ACS) a un edifici de 24 habitatges situat a la ciutat de Lleida. La instal·lació constarà d'un sistema d'acumulació tèrmica innovador utilitzant materials de canvi de fase (PCM) i de la posterior experimentació i estudi de la millora de la transferència de calor del PCM a l'aigua mitjançant aletes.

JUSTIFICACIÓ

Un dels principals problemes de la societat actual és la gran demanda d'energia, conseqüència en gran part de la indústria i el transport, però també per l'augment del nivell de vida dels països desenvolupats.

Per tal de satisfer aquesta demanda, fins ara s'utilitzava energia elèctrica o dels combustibles fòssils, però hi ha altres fonts d'energia aplicables. Per tal de satisfer aquesta demanda a nivell domèstic es poden utilitzar energies renovables, com per exemple l'energia solar. En el cas de la producció d'Aigua Calenta Sanitària (ACS) el sistema de captadors solars tèrmics és una solució viable tècnica i econòmicament.

En els darrers anys, la societat ha pres consciència de la importància de la conservació del medi ambient. Els problemes derivats de les emissions dels gasos d'efecte hivernacle i gasos destructius de la capa d'ozó han generat un nou problema que ha de ser tractat adequadament per tal de trobar-hi una solució.

Les emissions derivades de la producció d'energia mitjançant combustibles fòssils és en gran part la causa dels problemes ambientals anteriorment esmentats. Per tant, la substitució d'aquestes fonts d'energia per altres de no contaminants sembla l'única opció per fer front al conflicte.

Un altre factor important és el constant increment del preu del petroli. Aquest problema es deu bàsicament a dos fets: la concentració dels recursos en zones molt concretes i l'increment de la demanda energètica i el conseqüent esgotament de les reserves de combustible.

L'ús d'energia solar contribueix a la reducció d'emissions de CO_2 i aporta solucions al constant increment de preu i esgotament dels combustibles fòssils.

D'altra banda, l'ús d'aquesta nova font d'energia comporta una sèrie de nous problemes a solucionar. El més important és la diferència temporal entre l'oferta d'energia i la demanda d'aigua calenta. Aquesta diferència fa necessari l'ús de sistemes d'emmagatzematge d'ACS.

Aquests sistemes presenten uns determinats rendiments deguts a les pèrdues de calor cap al medi, i suposen també un problema d'espai. El volum d'acumulació d'aigua necessari per cobrir les demandes diàries és considerablement gran tenint en compte el preu del terreny en l'actualitat, frenant així la implantació d'aquests nous sistemes.

L'ús d'un innovador sistema d'acumulació tèrmica mitjançant Materials de Canvi de Fase (PCM) permet reduir en gran mesura els volums d'acumulació, mantenint o fins i tot incrementant la capacitat d'emmagatzematge.

No obstant la gran capacitat per acumular energia dels PCM, cal tenir en compte i millorar la transferència de calor entre el material i l'aigua. Aquesta transferència ha de ser suficientment ràpida per tal que el sistema es pugui adaptar a les demandes dels usuaris. Actualment la limitació radica en la transferència de calor per convecció dins el dipòsit, per la qual cosa s'ha analitzat un sistema d'aletes per millorar aquest fenomen.

DESCRIPCIÓ DE LA INSTAL·LACIÓ SOLAR

El circuit solar té la funció d'aportar una part de l'energia tèrmica necessària per la producció d'ACS de l'edifici. Per tant, aquest sistema consta de dos circuits, el primari, on es situen el captadors solars, i el secundari, connectat en sèrie amb el circuit de producció d'ACS del sistema ja existent.

La instal·lació solar funciona amb un sistema d'acumulació i producció auxiliar centralitzats. Aquest sistema consisteix en un gran dipòsit (LAPESA MV-3500-SB o similar, amb capacitat per 3.500 L) on s'acumula l'ACS necessària per satisfer la demanda de tot l'edifici. Aquest dipòsit està connectat al circuit primari del sistema solar, que actua com a font d'energia principal. L'aigua que surt del dipòsit pel seu consum passa per la caldera on, en cas que sigui necessari s'acaba d'escalfar fins a la temperatura adequada.

Pel que fa al circuit primari, consta de 24 captadors solars tèrmics (Takama T-2 INOX, amb una superfície útil de 2,593 m^2) situats al teulat de la casa i dividits en dos files de 12 captadors cada una. Tots els captadors es connecten en paral·lel. El fluid del circuit primari es tracta d'una barreja d'aigua amb propilenglicol (amb una proporció del 30,4% de propilenglicol i una temperatura de congelació de –13,4ºC) per tal d'evitar la congelació durant els mesos més freds de l'any. Un cop escalfat, aquest fluid es transporta fins al dipòsit acumulador on, mitjançant un serpentí interior cedeix la calor a l'aigua de consum. Un cop transferida l'escalfor el fluid torna als captadors. Per tal d'equilibrar les pèrdues de càrrega del circuit primari s'utilitza el sistema de retorn invertit. Per la circulació del fluid del circuit primari s'utilitza una bomba (Grundfos CHV 4-60 o similar, amb un cabal de 60 l/min i 4 bar de pressió).

Pel correcte funcionament del circuit primari s'hi ha instal·lat un vas d'expansió (25 l) per absorbir les variacions de volum del fluid i un dipòsit de reompliment (Lapesa GX-300-R o similar, amb capacitat per 300 l) per poder buidar el circuit.

Pel circuit secundari hi circula l'aigua destinada al consum que s'emmagatzema en el dipòsit acumulador esmentat anteriorment.

BREU DESCRIPCIÓ DELS PCM

La majoria de sistemes per emmagatzemar energia que es poden trobar en el mercat utilitzen aigua com a medi. Per tal de millorar el rendiment d'aquests sistemes es pot augmentar la densitat energètica del material o es pot reduir el cost del material.

Un sistema efectiu i utilitzat és l'estratificació dels dipòsits acumuladors. No obstant això, aquest no és l'únic sistema per millorar el rendiment del dipòsit acumulador. L'ús d'altres materials com a medi d'emmagatzematge és una aplicació que s'està estudiant actualment. Dins aquests sistemes s'hi troben les tecnologies d'acumulació per calor latent i per energia química.

La quantitat de calor necessària per augmentar un grau la temperatura d'un material (calor sensible) és molt inferior a la que cal subministrar en el cas del calor latent. Els canvis produïts en els diferents materials deguts al calor latent es donen a una temperatura determinada que és característica de cada material.

Un material de canvi de fase (PCM) és aquell que experimenta un canvi d'estat (sòlid ↔ líquid ↔ gasós) a una temperatura determinada.

L'interès d'aquest tipus de materials es troba en que durant el canvi de fase la temperatura es manté constant, mentre que el material va absorbint energia. Aquest fet suposa una major densitat energètica per part d'aquests materials en comparació amb qualsevol altre. Un altre aspecte molt positiu és la menor temperatura a la qual s'acumula l'energia, aconseguint per tant unes pèrdues menors. Per aquest motiu s'ha considerat el seu ús en dipòsits d'aigua calenta.
Amb aquestes millores s'aconsegueix que l'aigua del dipòsit es mantingui a una temperatura pròxima a la d'ús durant un període de temps considerablement major sense la necessitat d'aportació d'energia. També s'aconsegueix un ràpid rescalfament de l'aigua fins a la temperatura d'ús en cas que el dipòsit es buidi completament.
Els canvis de fase poden ser:

- De gas a líquid, o a l'inrevés.
- De sòlid a gas, o a l'inrevés.
- De sòlid a líquid, o a l'inrevés.

Dels canvis de fase definits anteriorment, el que requereix una major aportació d'energia és el de sòlid a gas. Semblaria doncs el canvi més interessant, no obstant això, aquest canvi suposa també una variació en el volum del material, que passa d'ocupar un volum totalment definit (en estat sòlid) a ocupar un volum en expansió (en estat gasós) que genera unes pressions excessivament elevades al mòdul de PCM. Per aquest motiu, el canvi de fase de sòlid a gas no és apropiat per les aplicacions desitjades.

Pel que es refereix al canvi de fase de líquid a gas, el problema de l'expansió del volum del material persisteix tot i que no de manera tant marcada com en el cas anterior. No obstant això, la seva aplicació tampoc és apropiada.

Finalment el canvi de fase de sòlid a líquid és el que requereix una menor quantitat d'energia, presentant unes variacions de volum molt menors que en els casos anteriors, fet que permet el seu ús en diverses aplicacions.

Tot i que l'aigua és el medi més habitual per emmagatzemar energia degut a les seves propietats tèrmiques i al seu baix cost, petites quantitats de PCM poden provocar una millora significativa del rendiment del sistema d'emmagatzematge.

Les aplicacions dels PCM es poden dividir doncs en dos grans grups:

- Emmagatzematge tèrmic: Permet acumular energia durant un període de temps major i reduir el cost de les instal·lacions de suport.
- Protecció tèrmica: Permet millorar l'aïllament tèrmic en edificis i altres aplicacions.

DESCRIPCIÓ DEL SISTEMA D'ACUMULACIÓ AMB PCM

El nou sistema pretén utilitzar PCM per aprofitar la gran capacitat d'acumulació d'energia en forma de calor latent. Aquests materials tenen una temperatura de fusió que es troba dins el rang de temperatures de l'aigua del dipòsit acumulador. Aquest fet permet utilitzar el canvi de fase d'aquests materials, podent reduir així el volum dels dipòsits acumuladors.

El material utilitzat per tal d'incrementar la densitat tèrmica de l'acumulador de la instal·lació solar és l'acetat sòdic trihidratat amb grafit (Figura 1). La composició del PCM és aproximadament del 90% en volum de $NaOAc \cdot H_2O$ i el 10% de grafit. Les propietats d'aquest material es presenten a continuació:

- Densitat: 1,35 – 1,4 kg/l
- Punt de fusió: 58ºC
- Capacitat calorífica: 2,5 kJ/kg·K
- Entalpia: 180 – 200 kJ/kg
- Conductivitat tèrmica: 2 – 5 W/m·K

Figura 1 Acetat sòdic trihidratat amb grafit

En el cas de la instal·lació solar a dimensionar, el dipòsit instal·lat està especialment preparat per afavorir l'estratificació de l'aigua, motiu pel qual la seva ubicació és vertical. El nou sistema amb PCM ha de respectar aquesta estratificació per tal de mantenir les millores que això comporta, afegint-hi les millores derivades de l'ús del nou material. Per aquest motiu els mòduls de PCM s'hauran de situar a la part superior del dipòsit i la seva distribució serà uniforme per tota la superfície del dipòsit per tal d'escalfar en tots els punts l'aigua de servei.
Pel que es refereix a la quantitat de PCM a utilitzar, el Grup de Recerca en Energia Aplicada (GREA) ha realitzat una sèrie d'experiments consistents en introduir entre un 2% i 6% del volum del tanc en mòduls de PCM. Els resultats mostren que de les 3 opcions estudiades la més interessant és la que utilitza un 6% del volum del tanc. Per aquest motiu s'ha decidit introduir al sistema d'acumulació de la instal·lació un volum de PCM similar al dels experiments. Els mòduls de PCM tindran unes dimensions de 20 cm de diàmetre per 67 cm de longitud, afavorint així la transferència de calor amb l'aigua. El volum de cada mòdul serà de 21 l i s'utilitzaran 6 mòduls. En la Figura 2 es mostra l'esquema dels mòduls de PCM.

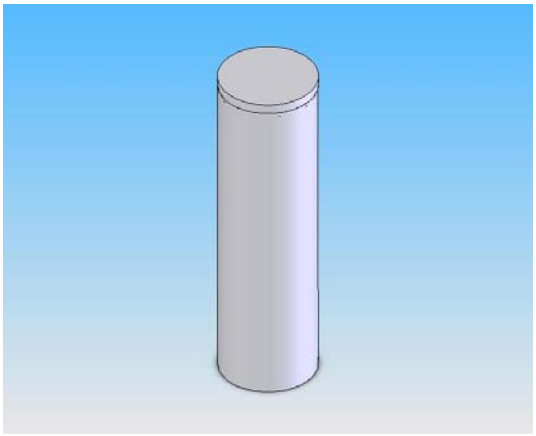

Figura 2 Mòdul de PCM.

Les millores aconseguides amb la introducció del PCM (una capacitat d'acumulació d'energia molt superior) permeten reduir el volum del dipòsit acumulador. El volum de PCM utilitzat té una capacitat d'acumular energia suficient per permetre eliminar completament el dipòsit d'acumulació d'aigua calenta. No obstant això, el dipòsit acumulador utilitzat en el sistema amb PCM té una capacitat de 2000 l d'aigua (Lapesa MV-2000-SB o similar), ja que es considera necessari mantenir com a mínim la meitat del volum d'acumulació sense PCM.

El sistema de funcionament de la instal·lació solar és anàleg a l'explicat anteriorment, amb l'única diferència que el sistema d'emmagatzematge té un volum inferior i una capacitat superior.

DESCRIPCIÓ DEL SISTEMA D'ACUMULACIÓ AMB MÒDULS DE PCM I ALETES

El PCM és capaç d'emmagatzemar gran quantitat d'energia, però també cal tenir present que aquesta energia s'ha de cedir a l'ACS per tal de poder consumir-la. En aquest procés, i donat que s'utilitza un PCM impregnat en grafit, la principal limitació del sistema en l'actualitat és la transferència de calor per convecció natural del mòdul de PCM a l'aigua. Per aquest motiu s'estudia la adhesió d'aletes en el mòdul per tal de poder millorar aquesta transferència.
S'han realitzat una sèrie d'experiments consistents en:

- Refredament d'un mòdul amb PCM de dimensions 88 mm de diàmetre i 315 mm d'alçada dins un dipòsit d'aigua.
- Refredament d'un mòdul amb PCM de dimensions 88 mm de diàmetre i 315 mm d'alçada amb aletes externes i verticals de 20 mm dins un dipòsit d'aigua.
- Refredament d'un mòdul amb PCM de dimensions 88 mm de diàmetre i 315 mm d'alçada amb aletes externes i verticals de 40 mm dins un dipòsit d'aigua.

Els resultats obtinguts en els experiments realitzats demostren una important reducció en el temps de refredament del PCM (i per tant d'escalfament de l'aigua). Aquest efecte es deu tant a l'increment de la superfície de transferència de calor, com a l'increment del coeficient de transferència de calor per convecció natural. En la Figura 3 es presenta la comparació dels resultats obtinguts utilitzant els diferents mòduls estudiats.

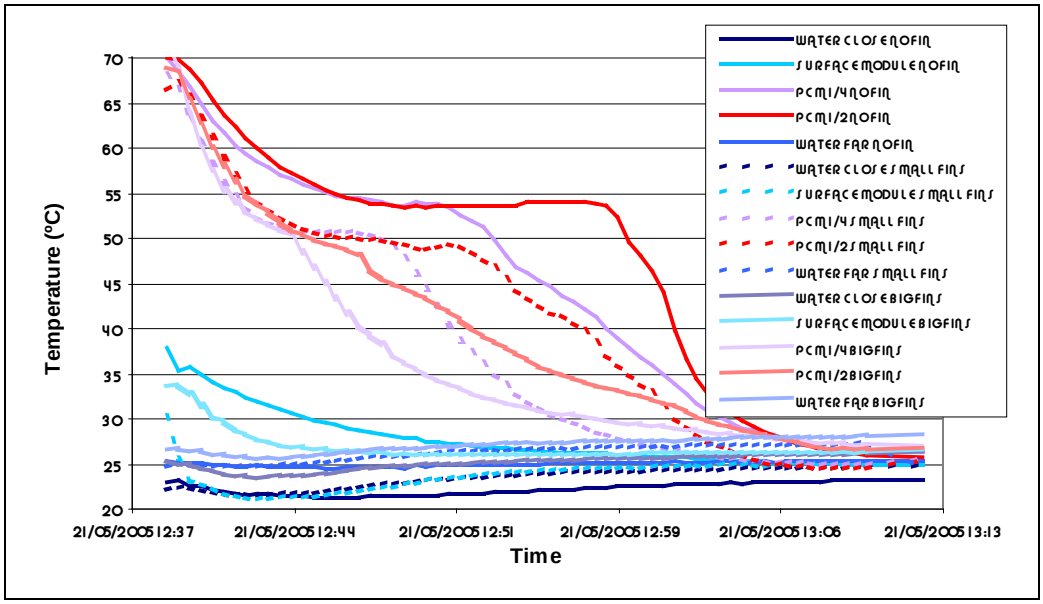

Figura 3 Comparació dels resultats obtinguts amb els 3 tipus de mòduls.

Els resultats obtinguts han permès dimensionar els mòduls amb aletes a utilitzar en la instal·lació solar i que es mostren en la Figura 4. A la Taula 1 es mostren les dimensions dels mòduls i les aletes.

Amb l'ús de mòduls amb aletes s'aconsegueix una transferència de calor entre el PCM i l'aigua molt més ràpida. Aquesta millora permet que el sistema sigui capaç d'adaptar-se millor a demandes continues ja que un cop s'ha consumit l'ACS disponible en el dipòsit, el PCM tarda menys estona en rescalfar l'aigua, i per tant se'n disposa abans.

Paràmetre	Valor
Diàmetre mòdul (m)	0,2
Longitud mòdul (m)	0,67
Volum d'un mòdul (l)	21
Nombre de mòduls	6
Volum de PCM (l)	126
Nombre d'aletes	8
Alçada aletes (mm)	670
Longitud aletes (mm)	91
Gruix aletes (mm)	2

Taula 1 Dimensions dels mòduls amb aletes.

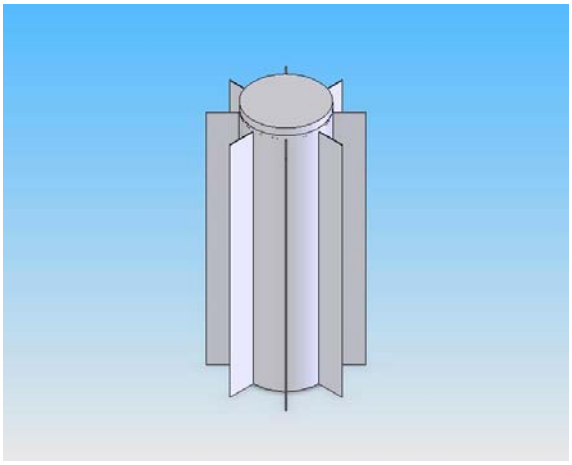

Figura 4 Mòdul de PCM amb aletes verticals.

La reducció de temps estimada en l'escalfament de l'aigua utilitzant els mòduls amb aletes es d'entre un 25 i un 60%. La comparació s'ha fet tenint en compte un salt de temperatures similar en tots els experiments. Aquest salt es troba sempre entre 60ºC i 45ºC aproximadament, ja que és durant aquest rang de temperatures quan es produeix el canvi de fase, i per tant quan el PCM allibera més energia, i també és la temperatura d'ús de l'ACS.

ESTUDI DE VIABILITAT ECONÒMICA I ELECCIÓ FINAL DEL TIPUS D'INSTAL·LACIÓ

S'ha fet un estudi de viabilitat econòmica de les diferents alternatives per poder determinar la millor alternativa per la instal·lació solar. En la Taula 2 es mostra la inversió inicial necessària per cada una de les tres alternatives plantejades. S'observa que la inversió necessària per la instal·lació solar convencional és superior que en el cas d'utilitzar PCM. Això es degut a que l'estalvi en el cost del dipòsit (model de menor volum) és superior al cost del PCM i els mòduls.

Instal·lació	Inversió inicial (€)
Solar tèrmica convencional	43.145
Solar tèrmica amb PCM	40.082
Solar tèrmica amb PCM i aletes	40.407

Taula 2 Inversió inicial per cada alternativa estudiada.

L'estudi del període de retorn de les diferents instal·lacions mostra un millor comportament amb l'ús de PCM dins el tanc. En la Figura 5 es presenten els resultats obtinguts sense tenir en compte cap tipus de subvenció, mentre que en la Figura 6 s'ha considerat una subvenció de 222 €/m^2 de captació solar, subvenció tipus que poden obtenir aquestes instal·lacions.

Segons els resultats obtinguts es considera que la millor alternativa per la instal·lació solar a dimensionar és la que utilitza mòduls de PCM amb aletes dins el dipòsit acumulador d'ACS. Aquesta instal·lació requereix una inversió inicial inferior que en el cas d'una instal·lació solar convencional, i pràcticament igual que en el cas d'utilitzar mòduls de PCM sense aletes. Les millores en l'emmagatzematge d'energia i la transferència de calor d'aquesta a l'aigua justifiquen l'ús d'aletes en els mòduls.

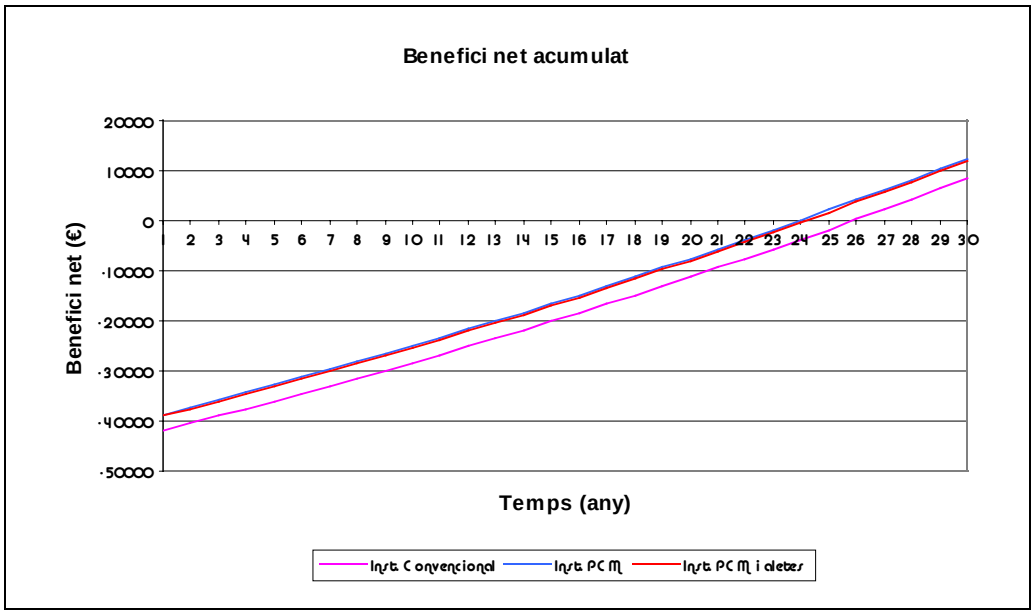

Figura 5 Benefici net acumulat dels diferents tipus d'instal·lacions.

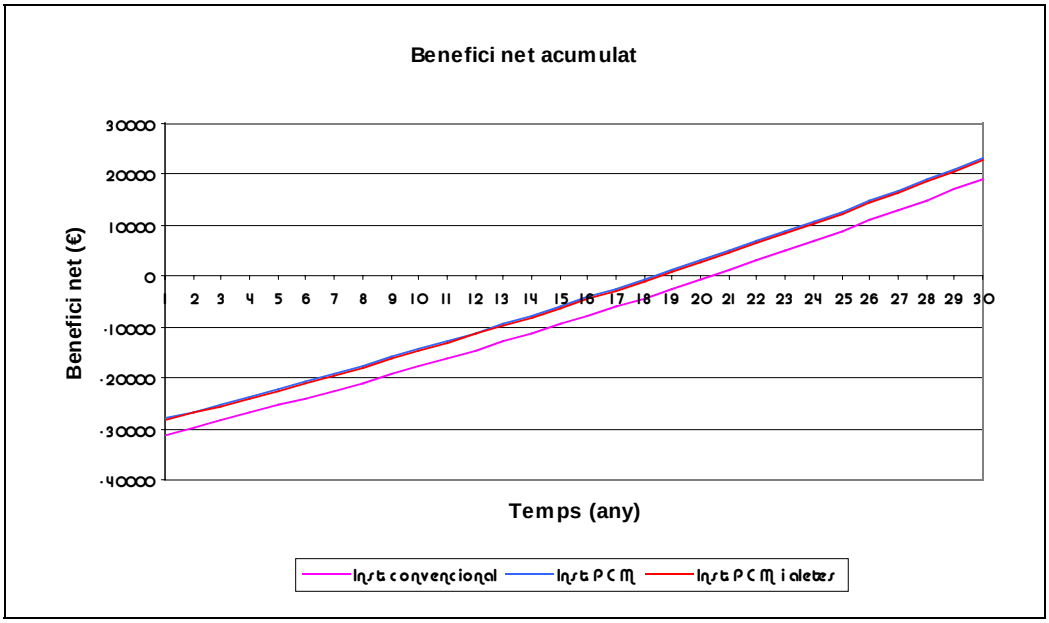

Figura 6 Benefici net acumulat dels diferents tipus d'instal·lacions amb la màxima subvenció.

REFERÈNCIES BIBLIOGRÀFIQUES

L.F. Cabeza, M. Ibáñez, C. Solé, J. Roca, M. Nogués, Experimentationwith a water tank including a PCM module. Solar Energy Materials and Solar Cells, in press (2006).

M. Ibáñez, L.F. Cabeza, C. Solé, J. Roca, M. Nogués, Modelization of a water tank including a PCM module. Applied Thermal Engineering, in press (2006).

M. Nogués, L.F. Cabeza, J. Roca, J. Illa, B. Zalba, J.M. Marín, S.Hiebler, H. Mehling, Efecto de la Inserción de un Módulo de PCM en un Depósito de ACS. Anales de la Ingeniería Mecánica, vol 1 (2002) 398-402.

L.F. Cabeza, H. Mehling, S. Hiebler, F. Ziegler, Heat transfer enhancement in water when used as PCM in thermal energy storage, Applied Thermal Engineering 22 (2002) 1141-1151.

Esmail M.A. Mokheimer, Performance of annular fins with different profiles subject to variable heat transfer coefficient, Int. J. Heat and Mass Transfer 45 (2002) 3631-3642.

D.R. Harper, W.B. Brown, Mathematical Equations for Heat Conduction in the Fins of Air-Cooled Engines, National Advisory Committee for Aeronautics, Report no. 158, 1922.

E. Schmidt, die Warmeübertragung durch Rippen, Zeit. V.D.I. 70 (1926) 885-889, see pp. 947-951.

R. Focke, Die Nadel als Kühlelemente, Forsch. Geb. Ingenieurw. 13 (1942) 34-42.

W.M. Murray, Heat dissipation through an annular disk or fin of uniform thickness, J. Appl. Mech. Trans. ASME 60 (1938) A-78.

W.H. Carrier, S.W. Anderson, the resistance to heat flow through finned tubing, Heat. Piping air cond. 10 (1944) 304-320.

Avrami Melvin, J.B. Little, Diffusion of heat through a rectangular bar and the cooling and insulating effect of fins, I. The steady state, J. Appl. Phys. 13 (1942) 225-264.

K.A. Gardner, Heat exchanger tube sheet temperature, Refiner Nat. Gasoline Manuf. 21 (1942) 71-77.

K.A. Gardner, Efficiency of extended surface, Trans. ASME, J. Heat Transfer 67 (1945) 621-631.

A. Ullmann, H. Kalman, Efficiency and optimized dimensions of annular fins of different cross-section shapes, Int. J. Heat Mass Transfer 32 (6) (1989) 1105-1110.

R. Karaback, The effect of fin parameter on the radiation and free convection from a finned horizontal cylindrical heater, Energy Convers. Mgmt. 33 (11) (1992) 997-1005.

A. Campo, L. Harrison, Prediction of safe tip temperature in uniform annular fins for the design of thermal exchange equipment via symbolic mathematics, Int. Commun. Heat Mass Transfer 21 (4) (1994) 531-538.

P. Razelos, K. Imre, The optimum dimensions of circular fins with variable thermal parameters, Trans. ASME, J. Heat Transfer 102 (1980) 420-425.

K. Laor, H. Kalman, Performance and optimum dimensions of different cooling fins with a temperature dependent heat transfer coefficient, Int. J. Heat Mass Transfer 39 (9) (1996) 1993-2003.

S.M. Zubair, A.Z. Al-garni, J.S. Nizami, The optimal dimensions of circular fins with variable profile and temperature-dependent thermal conductivity, Int. J. Heat Mass Transfer 39 (16) (1996) 3431-3439.

H.C. Unal, Determinationof the temperature distribution in an extended surface with a non-uniform heat transfer coefficient, Int. J. Heat Mass Transfer 28 (12) (1985) 2270-2284.

A.K. Sen, S. Trinh, An exact solution for the rate of heat transfer from rectangular fin governed by a power law-type temperature dependence, Trans. ASME, J. Heat Transfer 108 (1986) 457-459.

A. Campo, R.E. Stuffle, Symbolic mathematics for calculation of thermal efficiencies and tip temperatures in annular fins of uniform thickness, int. j. Heat Mass Transfer 40 (2) (1996) 490-492.

Lien-Tsaiyu, Cha'o Kuang Chen, Application of the taylor transformation to the transient temperature response of an annular fin, Heat Transfer Eng. 20 (1) (1999) 78-87.

H. Mehling, L.F. Cabeza, S. Hippeli, S. Hiebler, PCM-module to improve hot water heat stores with stratification. Renewable Energy 28 (2003) 699-711.

L.F. Cabeza, M. Nogues, J. Roca, J. Illa, S. Hiebler, H. Mehling, PCM-module to improve hot water heat stores with stratification: first tests in a complete solar system, in: R. Dománski, M. Jaworski, M. Rebow, ed., 9th International Conference on Thermal Energy Storage, vol. 1 (Institute of Heat Engineering, 2003) 273-278.

Copyright 2006. Número de Registre B-30620-2003. Ide@Sostenible. Drets reservats. Qualsevol impressió, publicació en WWW u altre medi, així com la seva distribució electrònica i/o comercial requereix autorització del Consell Editorial. El contingut dels articles és responsabilitat de l'autor.