

Determinación del coeficiente global de transmisión de calor de un tanque cilíndrico de MCF con tubos circulares.

Domínguez M. ; García C. ; González F.; Arias J.M^a

Instituto del Frío. CSIC. C /Antonio Novias nº 10

Ciudad Universitaria .28040 Madrid España

dominguez@if.csic.es

Resumen:

Se estudia la transmisión de calor en un tanque cilíndrico que contiene un acumulador de frío con cambio de fase (MCF), formado por tubos de plástico circulares, enrollados en espiral por los cuales circula el agua de refrigeración, con objeto de determinar el coeficiente global de transmisión de calor , para facilitar el diseño de nuevos sistemas de acumulación.

El método seguido es la analogía eléctrica resuelta con ordenador, variando, en cada interacción de cálculo, los radios de las distintas capas de la discretización, tanto en la zona líquida, como en la sólida, determinando el espesor de la capa de cambio de fase, por balance térmico, imponiendo en la interfase que la temperatura sea la del cambio de fase.

Palabras clave: pcm, mcf, acumulación , cambio de fase, climatización, transmisión de calor

Nomenclatura

C Capacidad Eléctrica

C_i Capacidad eléctrica correspondiente al elemento i

c_l Calor específico de la fase líquida

c_s Calor específico de la fase sólida

D diámetro

D_{it} diámetro interior del tubo

D_{et} diámetro exterior del tubo

D_T diámetro total, incluido el acumulador

dt el incremento de tiempo de cálculo

e_t espesor del tubo

E_t distancia entre tubos

h coeficiente superficial o de película

h_{it} coeficiente superficial interior del tubo

k_l coeficiente de conductividad térmica de la fase líquida

k_s coeficiente de conductividad térmica de la fase sólida

L calor latente del acumulador de cambio de fase
R resistencia eléctrica
 R_i resistencia eléctrica del elemento i
 R_c resistencia eléctrica equivalente a una capacidad
r radio
 r_i radio del elemento i
 r_{it} radio interior del tubo
 r_{et} radio exterior del tubo
 r_s radio del frente de cambio de fase
 r_T radio total incluido el acumulador
s espesor de la capa del acumulador próxima al tubo (sólida o líquida)
t tiempo
T temperatura
 T_{ai} temperatura del acumulador inicial
 T_{cf} temperatura de cambio de fase del acumulador
 T_{wi} temperatura del agua inicial
 T_{wf} temperatura del agua final
 T_{we} temperatura del agua de entrada en el tanque acumulador
 T_{ws} temperatura del agua de salida en el tanque acumulador
 T_{wel} temperatura del agua de entrada en la unidad de longitud
 T_{wsl} temperatura del agua de salida en la unidad de longitud
 u_l unidad de longitud del tubo
U coeficiente global de transmisión de calor
 U_l coeficiente global por unidad de longitud
 V_{al} volumen del acumulador por unidad de longitud
 V_a volumen del acumulador
Y intensidad de la corriente
 Y_i intensidad de la corriente en la rama i
r densidad
 r_l densidad de la fase líquida
 r_s densidad de la fase sólida
.

1 Introducción

Se ha visto que los Materiales de Cambio de Fase (PCM) pueden servir en las instalaciones de climatización para la acumulación de calor o de frío. En el mercado se encuentran diversos sistemas de acumulación de frío empleando como material de cambio de fase el hielo, unos con tanques cilíndricos y bolas y otros con tubos por donde circula los fluidos secundarios, formándose el hielo por fuera, es decir, en anillos circulares. Con respecto a los materiales de los tanques y de los tubos, se están pasando de los metálicos a los de plástico.

Se considera, en estos momentos, en que se están desarrollando nuevos materiales de cambio de fase (PCM), que es interesante conocer teóricamente, la respuesta térmica de los tanques durante su carga y descarga, en función de la geometría de los tubos, de las propiedades termofísicas de los posibles materiales de cambio de fase a emplear, del espesor de las capas del material de cambio de fase y como no, de las temperaturas y caudales del agua.

El problema teórico, del estudio de transmisión de calor incluido el cambio de fase, es en general complejo y salvo algunos casos sencillos no tiene solución analítica y aun empleando métodos numéricos presenta problemas. Hace unos años lo abordamos para el caso unidireccional en la congelación del agua [4] y [5], empleando un método de cálculo de analogía eléctrica resuelta con ordenador, que presentamos en [2] y comprobamos sus resultados con soluciones analíticas en [1].

Las bases de la analogía eléctrica empleada, como puede verse en los anteriores trabajos indicados, es sustituir las capacidades o condensadores C , por resistencias eléctricas de valor

$$R_c = dt / (2 \cdot C) \quad (1)$$

Siendo dt el incremento de tiempo de cálculo. La otra particularidad importante que se introdujo, fue que se varia, antes de cada iteración, los espesores de las capas de discretización, en ambas zonas de las fases. Esta simplificación la empleamos por primera vez al estudiar el crecimiento por difusión de las fibras de carbono (3). En cada iteración se calcula el espesor que se cambia de fase y se suma y resta a los espesores de las zonas de cada una de las fases y se impone en dicha zona, que la temperatura sea precisamente la de cambio de fase.

Se pueden encontrar algunos trabajos sobre el tema de la transmisión de calor con cambio de fase para diversas geometrías, tales como, los indicados en [6] al [12]. También con algunos programas de cálculo, empleando los elementos finitos, pueden conocerse las variaciones de temperatura en función del tiempo durante el cambio de fase. En algunos catálogos de fabricantes de tanques, se pueden encontrar, para el caso del

hielo, diagramas relacionando, la potencia, los tiempos de carga y descarga. , en función del % del acumulador fundido y de las temperaturas del agua

Se ha pensado que, el conocer el coeficiente global de transmisión de calor por unidad de longitud de un tubo, en función de la fracción del material de cambio de fase que le rodea en cada momento, con respecto al total , en función de las propiedades termofísicas de los acumuladores y las geométricas de los tanques y de los propios tubos, es la forma mejor para potenciar el uso de estos sistemas de acumulación de calor o frío. El objetivo de este trabajo es presentar el nuevo método de cálculo de determinación de los tiempos de carga y descarga de tanques cilíndricos con tubos espirales con materiales de cambio de fase.

2 Planteamiento del modelo

En la figura nº 1 se ha representado un esquema del tanque y de los tubos que en forma de espiral se han previsto que permitan su carga y descarga. Por los tubos circulara agua a una temperatura inferior a la de cambio de fase durante la congelación o carga del acumulador y a una temperatura superior durante la descarga.

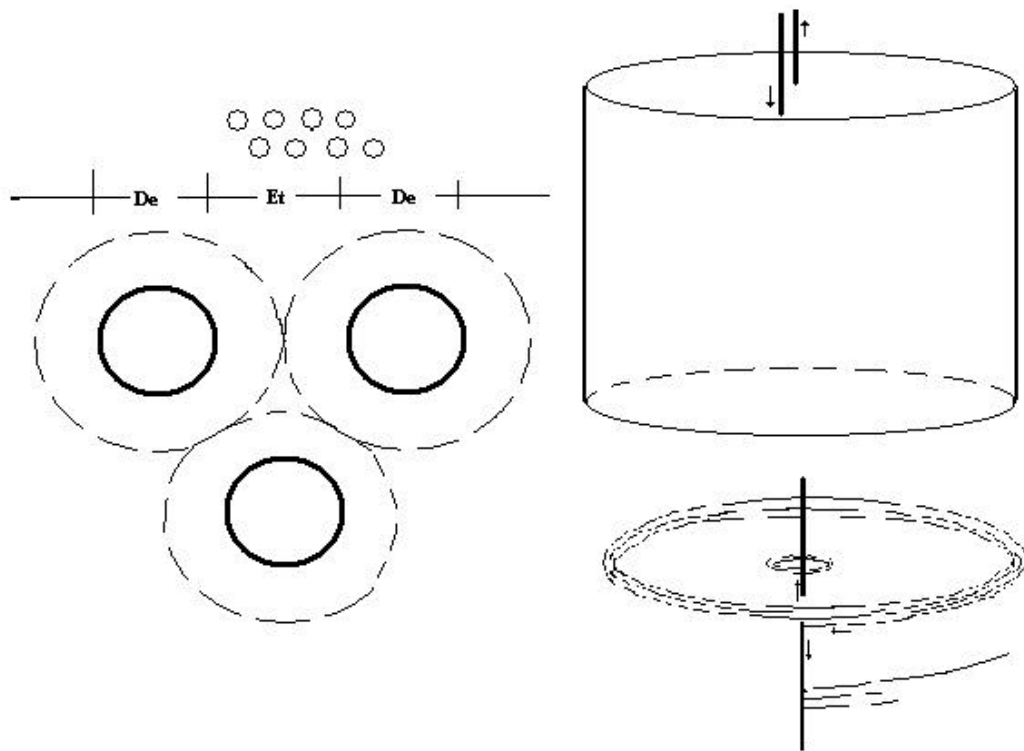


Figura nº 1 Tanque cilíndrico que contiene el acumulador con los tubos de plástico en forma espiral por donde circula el agua.

En la figura nº 2 , se puede ver un dibujo del modelo elemental estudiado. En la nomenclatura se identifican las magnitudes empleadas y en la tabla nº 1 las características termofísicas del acumulador considerado . Las geometrías estudiadas han sido tubos de diámetros interior de 26 mm y 20 mm , con espesores de 3 mm y las separaciones entre tubos entre 10 y 40 mm, con objeto de conseguir disminuir los tiempos de carga y descarga a los valores respectivos de 12 y 4 horas.

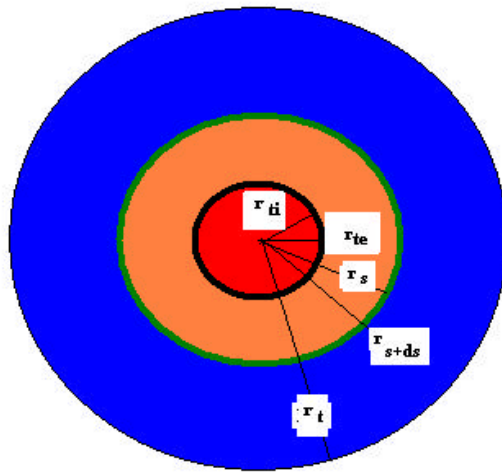


Figura nº 2 Esquema base de la simulación indicando los radios del tubo del frente de congelación y del acumulador

Tabla Nº 1

Temp. Cambio de fase	°C	7
Densidad	Kg/m ³	1.100
Calor latente	Kj/Kg	167,2
Coefficiente de Conductividad sólido	w/m.K	0,58
Coefficiente de Conductividad líquido	w/m.K	0,291
Calor específico sólido	J/Kg.K	1.756
Calor específico líquido	J/Kg.K	836

En la figura nº 3 se ha representado la malla eléctrica correspondiente, para 12 elementos en el acumulador, 5 correspondientes a cada fase, y dos a la interfase, en donde puede verse, que a las temperaturas les corresponden las diferencias de potencial, a las resistencias térmicas, las eléctricas, y a las capacidades térmicas, también las eléctricas. En las ecuaciones números 2 a la 11 se indican para facilitar la comprensión como serían las ecuaciones para el cálculo de las resistencias y en las 12 a la 22 las ecuaciones para las capacidades. En la malla de simulación real se tomaron 50 elementos para cada zona, en lugar de los 5 indicados para facilitar la representación..

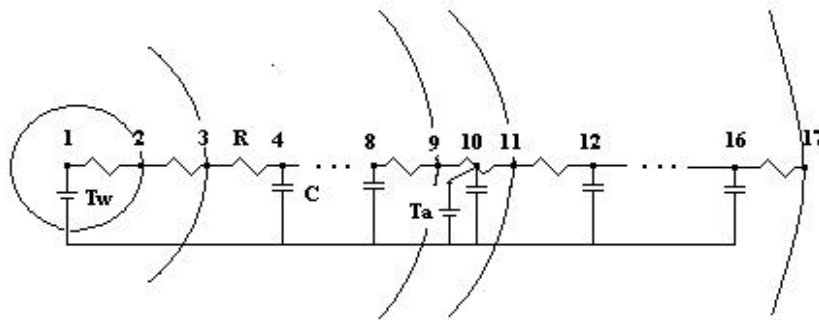


Figura nº 3 , malla eléctrica equivalente en la modelización del problema, los números corresponden a los nodos.

$$\mathbf{R}_1 = 1 / (h_w * p * \mathbf{D}_{it} * \mathbf{u}_1) \quad (2)$$

$$\mathbf{R}_2 = e_t / (l_t * p * (\mathbf{D}_{it} + e_t) * \mathbf{u}_1) \quad (3)$$

$$\mathbf{R}_3 = (s/10) / (k_l * p * (\mathbf{D}_{et} + s/10)) * \mathbf{u}_1 \quad (4)$$

$$\mathbf{R}_4 = (s/5) / (k_l * p * (\mathbf{D}_{et} + 2*s/10)) * \mathbf{u}_1 \quad (5)$$

$$\mathbf{R}_5 = (s/5) / (k_l * p * (\mathbf{D}_{et} + 4*s/10)) * \mathbf{u}_1 \quad (6)$$

$$\mathbf{R}_6 = (s/5) / (k_l * p * (\mathbf{D}_{et} + 6*s/10)) * \mathbf{u}_1 \quad (7)$$

$$\mathbf{R}_7 = (s/5) / (k_l * p * (\mathbf{D}_{et} + 8*s/10)) * \mathbf{u}_1 \quad (8)$$

$$\mathbf{R}_8 = (s/10) / (k_l * p * (\mathbf{D}_{et} + 9*s/10)) * \mathbf{u}_1 \quad (9)$$

$$\mathbf{R}_9 = \mathbf{R}_{10} = (ds/2) / (k_l * p * (\mathbf{D}_{et} + s + ds/2)) * \mathbf{u}_1 \quad (10)$$

$$\mathbf{R}_{11} = (e_a - s) / 10 / ((k_s * p * (\mathbf{E}_t - \mathbf{D}_t - 2*(e_t + s)) / 10) * \mathbf{u}_1) \quad (11)$$

$$\mathbf{R}_{12} = (e_a - s) / 5 / ((k_s * p * 2 * (\mathbf{E}_t - \mathbf{D}_t - 2*(e_t + s)) / 10) * \mathbf{u}_1) \quad (12)$$

$$\mathbf{R}_{13} = (e_a - s) / 5 / ((k_s * p * 4 * (\mathbf{E}_t - \mathbf{D}_t - 2*(e_t + s)) / 10) * \mathbf{u}_1) \quad (13)$$

$$\mathbf{R}_{14} = (e_a - s) / 5 / ((k_s * p * 6 * (\mathbf{E}_t - \mathbf{D}_t - 2*(e_t + s)) / 10) * \mathbf{u}_1) \quad (14)$$

$$\mathbf{R}_{15} = (e_a - s) / 5 / ((k_s * p * 8 * (\mathbf{E}_t - \mathbf{D}_t - 2*(e_t + s)) / 10) * \mathbf{u}_1) \quad (15)$$

$$\mathbf{R}_{16} = (e_a - s) / 5 / ((k_s * p * 9 * (\mathbf{E}_t - \mathbf{D}_t - 2*(e_t + s)) / 10) * \mathbf{u}_1) \quad (16)$$

Las resistencias van de los nodos correspondientes a su subíndice al correlativo siguiente.

Los valores de las capacidades se han calculado mediante las ecuaciones siguientes :

$$C_1=c_1*p*((D_{te}+s/10)^2-D_{te}^2)*u_1 \quad (17)$$

$$C_2=c_1*p*((D_{te}+3*s/10)^2-(D_{te}+s/10)^2)*u_1 \quad (18)$$

$$C_3=c_1*p*((D_{te}+5*s/10)^2-(D_{te}+3*s/10)^2)*u_1 \quad (19)$$

$$C_4=c_1*p*((D_{te}+7*s/10)^2-(D_{te}+5*s/10)^2)*u_1 \quad (20)$$

$$C_5=c_1*p*((D_{te}+9*s/10)^2-(D_{te}+7*s/10)^2)*u_1 \quad (21)$$

$$C_6=c_1*p*((D_{te}+s+ds)^2-(D_{te}+s)^2)*u_1 \quad (22)$$

$$C_7=c_s*p*((E_t-(D_{te}+2*s))/10)^2-(D_T-9*(D_{te}+2*s))/10)^2)*u_1 \quad (23)$$

$$C_8=c_s*p*(E_t-9*(D_{te}+2*s))/10)^2-(D_T-(7*(D_{te}+2*s))/10)^2)*u_1 \quad (24)$$

$$C_9=c_s*p*(E_t-7*(D_{te}+2*s))/10)^2-(D_T-5*(D_{te}+2*s))/10)^2)*u_1 \quad (25)$$

$$C_{10}=c_s*p*(E_t-5*(D_{te}+2*s))/10)^2-(D_T-3*(D_{te}+2*s))/10)^2)*u_1 \quad (26)$$

$$C_{11}=c_s*p*(E_t-(3*(D_{te}+2*s))/10)^2-(D_T+(D_{te}+2*s))/10)^2)*u_1 \quad (27)$$

3 Bases teóricas del método de simulación

Los métodos de cálculo numérico empleados en la simulación de la transmisión de calor se basan en hacer una discretización espacial fija y calcular en cada iteración de cálculo la distribución de las temperaturas en sus nodos y de los flujos de calor entre ellos, imponiendo las temperaturas o los flujos iniciales y en las zonas de contorno, los incrementos de tiempo y el tipo de elementos se escogen en cada ejemplo procurando evitar la inestabilidad y no caer en tiempo ni capacidades de memoria que hagan tediosos los cálculos. En el caso de cambio de fase el movimiento del frente es dinámico y complica grandemente, el tener que saber en cada iteración su estado, por ello hemos pensado que es preferible dejar variable el espesor de las capas. Se ha cambiado en cada iteración, en cada una de las dos fases, los valores de las conductividades térmicas en función de las temperaturas locales.

Dado que la geometría considerada es cilíndrica y hay transmisión de calor simétrica, el problema térmico se simplifica grandemente, al poder considerarlo unidireccional, ver la figura nº 3.

El programa se ha realizado en Visual Basic y se le ha introducido condicionantes para el cambio de las propiedades termofísicas según el estado del elemento, necesitando en el caso que los espesores de una fase sea nulo, para evitar que las resistencias lo sean se partir de unos valores muy pequeños, pero no nulos $x_0=0.00001\text{mm}$, después de la iteración primera en donde se ha cambiado de fase, se puede determinar el espesor de la capa ds que se ha descongelado o congelado, haciendo balance entre el flujo de calor que ha entrado en ella Y_{ent} y ha salido Y_{sal} , es decir, que el calor acumulado, será el producto de la diferencia de flujos por el tiempo, igual al calor latente de la capa por su masa. En este caso por unidad de longitud del tubo u , la masa será el área por el espesor y por la densidad, por tanto despejando se puede calcular el espesor de la capa ds mediante la ecuación

$$ds = (Y_{ent}-Y_{sal}) \cdot dt / (\rho \cdot (D_s-D_t) \cdot u \cdot r \cdot L) \quad (28)$$

Se ha partido de dividir por 50 ambas fases y se han guardado en una hoja *Excel* los valores del flujo de calor de entrada, los radios descongelados s y las temperaturas en los nodos 35, 52, 67, 80 102, para cada iteración. Se ha tomado dt de cálculo 0,5 milésimas del tiempo máximo previsto, 4 horas para la descarga y 16 h para la carga, con el cual se ha visto que es totalmente estable, la unidad de longitud u tomada en el tubo ha sido un metro.

4 Resultados de la simulación

En las figuras nº 4 y 5 se han representado las curvas obtenidas para la carga y descarga de un acumulador de cambio de fase a 8 °C, con tubos de 26 mm de diámetro interior y 32 exterior, con una separación de 25 mm entre tubos y un coeficiente de película del agua de 200 $\text{w/m}^2 \cdot \text{K}$.

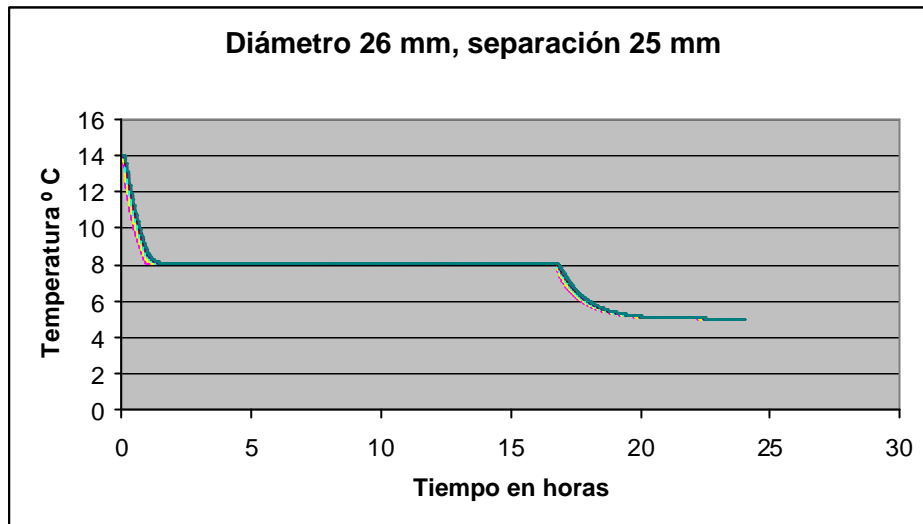


Figura nº 4 Variación de la temperatura durante la carga para un tubo de diámetro interior 25 mm y con 25 mm de separación entre tubos

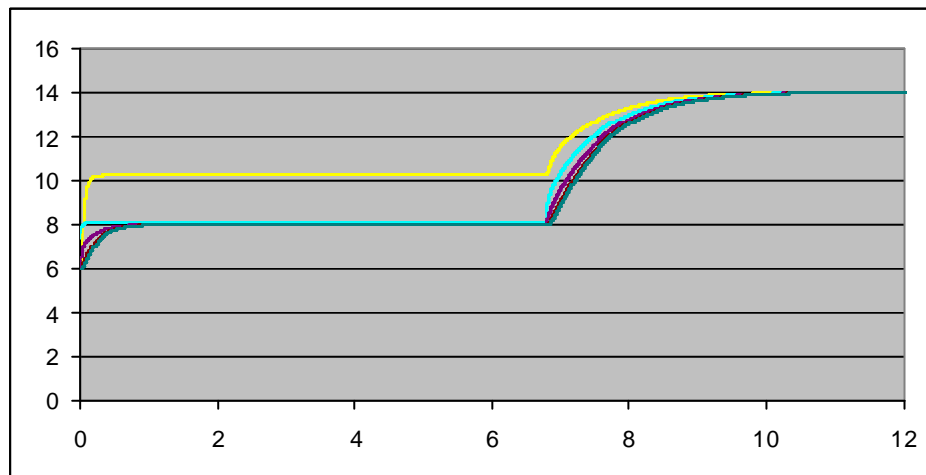


Figura nº 5 Variación de la temperatura durante la descarga para un tubo de diámetro interior 26 mm y con 25 mm de separación entre tubos

En la figuras nº 6 y 7 se han representan las curvas de descarga y carga para otro acumulador de 7 °C de temperatura de cambio de fase, con diámetros interiores de 20 mm y exteriores de 26 mm, separados los tubos 20 mm

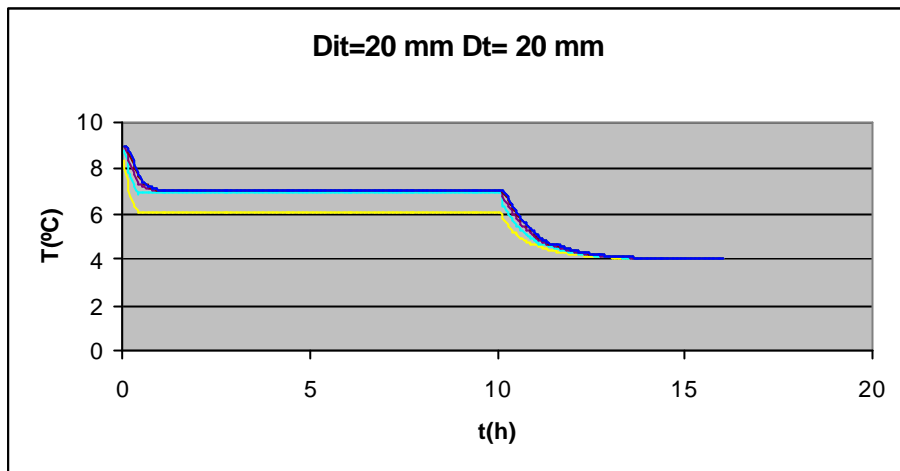


Figura nº 6 Variación de la temperatura durante la carga para un tubo de diámetro interior 20 mm y con 20 mm de separación entre tubos

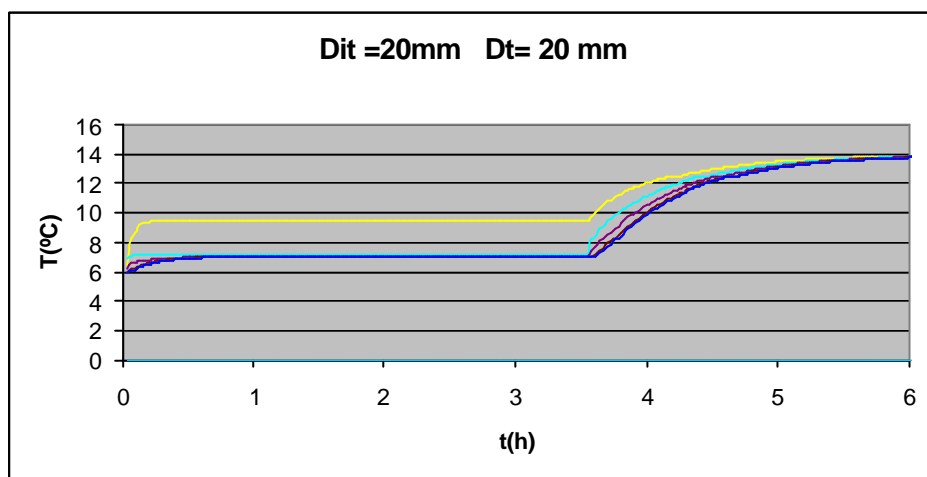


Figura nº 7 Variación de la temperatura durante la descarga para un tubo de diámetro interior 20 mm y con 20 mm de separación entre tubos

En la figura nº 8 se ha representado la variación de los tiempos de descarga con agua a 14 °C con tubos de diámetro interior 20 mm y exterior 26 mm , con coeficientes superficiales de $400 \text{ w/m}^2 \cdot \text{K}$, en función de la separación de los tubos.

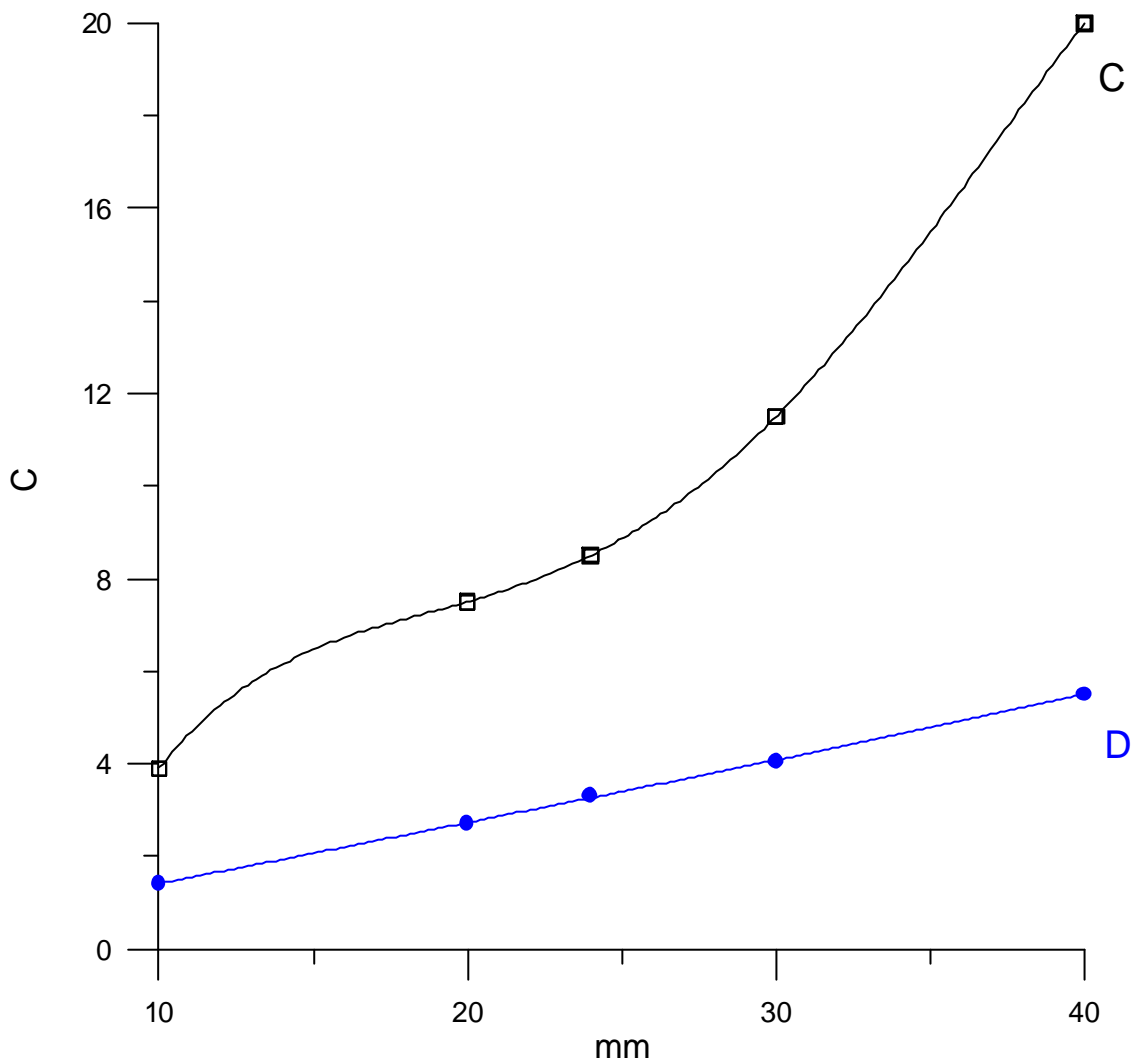


Figura nº 8 Variación del tiempo de descarga en función de la separación entre tubos para un tubo de 20 mm de diámetro interior.

Se define por U_1 , **el coeficiente global de transmisión por unidad de longitud del tubo**, que en este caso se calcula mediante la ecuación

$$U_1 = Y_1 / (T_{wd} - T_a) \quad (29)$$

Siendo Y_1 **el** flujo de calor de entrada al primer elemento, T_{wd} la temperatura del agua de descarga y T_a la temperatura de cambio de fase. En la figura nº 9 se ha representado su variación en función del espesor de la capa, que ha cambiado de fase en la descarga, se ve que es, pasado el primer momento de la descarga, constante, el valor medio de dicho

coeficiente es de $28.9 \text{ w/m}^2 \text{ K}$, para los tubos de 20 mm de diámetro y separaciones entre tubos del mismo orden.

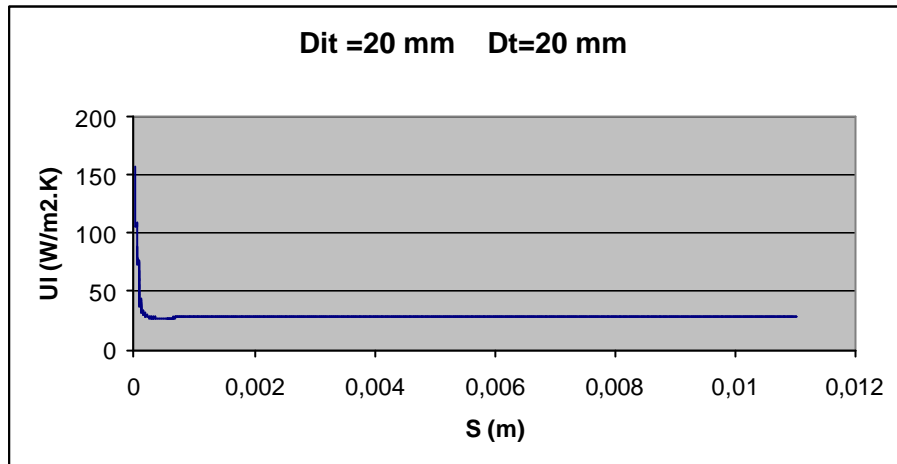


Figura n° 9 Variación del coeficiente global de transmisión, en función del espesor del acumulador descargado, para un tubo de 20 mm de diámetro interno con separación entre tubos de 22 mm

El Coeficiente global de transmisión de calor se puede ver que es muy grande al comenzar el proceso de carga o descarga, pasa por un mínimo relativo poco pronunciado y se estabiliza hasta que se termina el proceso de carga o descarga, el valor depende mucho de las propiedades termofísicas del acumulador y de la geometría de los tubos y sus separaciones.

7 Discusión.

En la tabla nº 3 se han recogido los tiempos de descarga y carga para diversos casos .

Tabla nº 2

Dit=20 Et=10	Carga	1,41
	Descarga	3,89
Dit=20 Et=20	Carga	2,7
	Descarga	7,5
Dit=20 Et=24	Carga	3,3
	Descarga	8,5
Dit=20 Et=30	Carga	4,06
	Descarga	11,5
Dit=20 Et=40	Carga	5,5
	Descarga	20

Se ha visto que las propiedades termofísicas influyen mucho en particular el valor del calor latente y el incremento de temperatura en que se pueda producir , en el caso del agua el incremento de temperatura del cambio de fase es nulo o pequeñísimo, pero en el resto de acumuladores puede ser grande hasta de varios grados. Los valores de los coeficientes de conductividad térmica del acumulador en sus dos fases tienen gran importancia debiéndose conocer con la mayor precisión.

Se puede desprender del estudio realizado , alguno de cuyos resultados hemos recogido, que, si se quiere variar los tiempos de carga y de descarga, así como la potencia de acumulación , se dispone de las variables básicas siguientes:

- Temperatura de cambio de fase
- Temperaturas del agua en la carga y en la descarga

- Diámetros del tubo
- Longitud de los tubos
- Separación entre tubos
- Diámetro, altura y número de los tanques
- La cantidad de acumulador.
- Propiedades termofísicas del acumulador. en particular: el calor latente y los coeficientes de conductividad de ambas fases.

Quedando otros de factores en segundo orden, tales como son:

- Caudales de agua o coeficiente de película
- Calores específicos del acumulador de ambas fases
- Coeficiente de conductividad y espesor del tubo

A parte de los problemas térmicos y relacionados íntimamente con ellos, hay otros importantes que se deben tener presente, que son: las pérdidas de carga y las variaciones de las temperaturas del agua a lo largo de los tubos. Colocando en paralelo los tanques y los circuitos, se podrá disminuir las pérdidas de carga mucho, no se debe llegar nunca al régimen laminar, lo que nos llevaría a velocidades mayores de 0,3 m/s en los tubos.

Los otros problemas importantes a tener presente son, los relacionados con las temperaturas del agua, tanto en la carga, que no podemos disminuir de 4 °C sino introducimos anticongelante, como en la descarga que no conviene sobre pase los 14 °C. La temperatura de 7 °C de cambio de fase, parece ser la más interesante en los estudios e instalaciones realizadas. Si se coloca el acumulador en el lazo de cierre del anillo primario, en las puntas máximas, la temperatura del agua fría a enviar a la instalación, será la resultante de la mezcla del agua del acumulador, próxima a los 7°C y el de las máquinas que puede estar sobre los 5 °C y tener la temperatura del deseado orden de 6°C.

Se ha visto que el coeficiente global de transmisión por unidad de longitud en los tubos, es del orden de 28 a 30 $w/m^2 \cdot K$, inferior al de 50 que se había obtenido en placas y en baterías metálicas con el acumulador entre las aletas, a pesar de ello por economía y por duración, se consideran el empleo de los tubos plásticos como más indicados.

Se piensa también que los tubos multicapa, con alma de aluminio pueden ser muy interesantes, pues permiten reducir los espesores sobre los plásticos y los costes de fabricación de los serpentines.

8 Conclusiones

- Se considera que la acumulación de calor aprovechando los cambios de fase es muy interesante y cada vez se empleara más, pudiendo acortar los tiempos de desarrollo y optimación de sistemas, estudios como el realizado, que permiten resolver el problema de la ecuación de transmisión de calor durante los cambios de fase.
- La resolución de estos problemas con la analogía eléctrica resuelta con ordenador con la suposición básica realizada que se emplea en el análisis de circuitos eléctricos , junto a la discretización variable del espacio, imponiendo la temperatura de cambio de fase en el frente de cambio de fase se había demostrado en un caso estudiado de solución analítica , transmisión plana, que conducía a buenos valores por lo que consideramos en la cilíndrica que dará valores próximos a la realidad.

9 References

- 1] V.M. Barragán, R. Fuentes, M. Domínguez and J.M. Arias , Testing the computer assisted solution of the electrical analogy in the temperature distribution on a square sheet with nonhomogeneous boundary conditions. *Anales de Física* **95** (2000), pp. 139–145.
- 2] Domínguez M, Pinillos JM, Arias J M, López N. Computerized electrical simulation of freezing processes. Proceedings of the XIX International Congress of Refrigeration, Holland, 1995, pp. 45–51.
- 3] A. Madroñero, M. Verdú, L. Frogen and M. Domínguez , A diffusion model for sword in sheath failure mode in vapour grown carbon fibbers. *Advanced Performance Materials* **4** (1997), pp. 305–315. [Full Text via CrossRef](#) | [Abstract + References in Scopus](#) | [Cited By in Scopus](#)
- 4] Domínguez, M.; De lorenzo S.; Gonzalez F.; De elvira C. Barragán M. Algunas posibilidades que presenta la analogía eléctrica resuelta con ordenador en el estudio de procesos de congelación. VIII encuentro del grupo especializado de termodinámica de las reales sociedades de física y química. 2002 junio. Jarandilla de la Vega (Cáceres, España) 47,48.
- 5] Barragán V.M.; Arias J.M^a; Dominguez M; Garcia C. Testing the computer assisted solution of the electrical analogy in heat transfer processes with a phase change which has an analytical solution. *International journal of refrigeration IIF*. VOL 25 N° 5 Ag 2002.552-537
http://www.sciencedirect.com/science?_ob=ArticleURL&_udi=B6V4R-466H8BW-4&_user=4225285&_coverDate=08%2F31%2F2002&_rdoc=1&_fmt=&_orig=search&_sort=d&_view=c&_acct=C000048559&_version=1&_urlVersion=0&_userid=4225285&_md5=a52304e301920cc2b699b516c9ac5a6b

- 6] Dusanberre G.M. A note on latent heat in digital computer calculations. ASME Paper no: 58- HT-7.
- 7] Neto H.M. Deterministic model for an internal melt ice-on-coil thermal storage tank. ASHRAE Transactions 1997; 103 (1).
- 8] T.B. Jekel, S.A. Mitchel and S.A. Klein , Modeling of ice-storage tanks. *ASHRAE Transaction* **99** 1 (1993), pp. 1016–1023.
- 9] R.K. Strand, C.O. Pedersen and G.N. Coleman , Development of direct and indirect ice-storage models for energy analysis calculations. *ASHRAE Transaction* **100** 1 (1994), pp. 1230–1244. [Abstract + References in Scopus](#) | [Cited By in Scopus](#)
- 10] M. Giangi, F. Stella and T.A. Kowalewski , Phase change problems with free convection: fixed grid numerical simulation. *Computing and Visualization in Science* **2**
- 11] Otis DR. Solving the melting problem using the electrical analogy to heat conduction. PhD thesis, Heat Transfer and Fluid Mechanics Institute, Stanford University, 1956.
- 12] Ismail K.A.R.; Jesus A.B.D. Modelling and solution of the solidification problem of PCM around a cold cylinder Numerical Heat transfer Part A. Applicators. Volume 36, Numer 1, 1 July 1999 pp 95-114(20)
- 13] <http://www.iberisa.com/cosmosm/geostar.htm>

Corresponding author . Fax: +34-91-5493627; email: dominguez@if.csic.es