

MODELADO TERMODINÁMICO DE SISTEMAS EUTECTICOS SÓLIDO-LÍQUIDO PARA EL ESTUDIO DE NUEVOS MATERIALES DE CAMBIO DE FASE

DIARCE, Gonzalo ⁽¹⁾; CAMPOS-CELADOR, Álvaro ⁽²⁾; GONZÁLEZ-PINO, Iker ⁽²⁾; PÉREZ-IRIBARREN, Estibaliz ⁽²⁾; TERÉS-ZUBIAGA, Jon ⁽²⁾.

gonzalo.diarce@ehu.es

⁽¹⁾ Universidad del País Vasco UPV/EHU, Departamento de Ingeniería Minera, Metalurgia y de Ciencia de los Materiales

⁽²⁾ Universidad del País Vasco UPV/EHU, Departamento de Máquinas y Motores Térmicos

RESUMEN

Los sistemas de almacenamiento térmico latente se basan en el empleo de los llamados materiales de cambio de fase (PCMs). Éstos últimos almacenan energía mediante el cambio de fase sólido-líquido y son capaces de ofrecer densidades energéticas entre 5 y 14 veces más elevadas que los materiales para almacenamiento de calor sensible. Estas características hacen de los PCMs materiales muy interesantes respecto a los habitualmente empleados para almacenamiento térmico.

Una de las soluciones que se ha venido investigando ampliamente para encontrar mejores PCMs es el desarrollo de mezclas eutécticas de materiales. Mediante el uso de mezclas eutécticas es posible la obtención de nuevos PCMs con temperaturas de fusión ajustables a la aplicación deseada. Sin embargo, la mayoría de los estudios realizados hasta la fecha se han basado en trabajos experimentales de prueba y error. Dicha metodología resulta difícil y costosa, sobre todo si no se posee conocimiento previo en la materia, o experiencia con materiales similares a los que se pretenden estudiar. Es conveniente y adecuado disponer de valores que sirvan como estimación inicial.

En base a ello, el presente trabajo se basa en el modelado termodinámico de sistemas eutécticos binarios, con el fin de evaluar y comprender mejor aquellos aspectos prácticos de interés para el desarrollo de nuevos PCMs. Se realizó un estudio paramétrico básico para comprender el efecto que las propiedades de los compuestos originales de la mezcla tienen en el comportamiento de la misma. Las variables a estudio fueron la entalpía de cambio de fase, el peso molecular y la temperatura de cambio de fase de los compuestos puros.

En relación a la influencia de la entalpía de fusión, se observó que a mayor entalpía de cambio de fase, menor es la pendiente de la línea de *liquidus* obtenida. El mismo efecto se apreció en base al peso molecular: cuanto mayor es la masa del compuesto, menor pendiente alcanza la línea de *liquidus*. Por último, el efecto de la temperatura de cambio de fase fue el siguiente: a menor temperatura de cambio de fase, mas baja es la temperatura eutéctica resultante. Sin embargo, la influencia de la temperatura de fusión en la pendiente de la línea de *liquidus* es notablemente menor.

De los resultados se deduce que, si se parte de un compuesto de elevada entalpía de cambio de fase, a menos que tenga un peso molecular bajo, su línea de *liquidus* tenderá a ser muy plana. Ello hace que, si pretendemos unirlo con un material de entalpía también alta (para que el compuesto resultante no pierda densidad energética), entonces no conseguiremos una depresión apreciable en la temperatura de fusión del compuesto eutéctico. Lo más conveniente, en todo caso, sería juntarlo con un compuesto con el peso molecular más bajo posible. El método empleado se puede usar como punto de partida en potenciales investigaciones experimentales, con el consiguiente ahorro de esfuerzo y tiempo en el trabajo a realizar.

Palabras clave: PCM; eutéctico; modelado.

1. Introducción

La actual situación energética y medioambiental a nivel mundial revela la urgente necesidad de un empleo más racional y eficiente de la energía. Los sistemas de almacenamiento de energía térmica pueden contribuir a ello, ya que permiten desacoplar la producción y la demanda. Los sistemas de almacenamiento térmico latente (abreviados LHTES, de sus siglas en inglés), se basan en el empleo de los llamados materiales de cambio de fase (PCMs). Éstos últimos almacenan energía mediante el cambio de fase sólido-líquido y son capaces de ofrecer densidades energéticas entre 5 y 14 veces más elevadas que los materiales para almacenamiento de calor sensible [1]. Estas características hacen de los PCMs materiales muy interesantes respecto a los habitualmente empleados para almacenamiento térmico.

Para poder ser empleado como PCM, un material ha de cumplir, entre otras, las siguientes características:

- Temperatura de cambio de fase adecuada para el proceso en que se quiera almacenar la energía.
- Entalpía de cambio de fase elevada para permitir gran densidad de almacenamiento.
- Bajo precio, para que resulte competitivo frente a otras opciones de almacenamiento térmico.
- Estabilidad (cambio de fase reproducible) durante el nº de ciclos que se requieran en la aplicación a que se destine.
- Conductividad térmica elevada, tanto en sólido como en líquido.
- Compatibilidad con los materiales en contacto con el PCM (que no haya corrosión).
- Velocidad de cristalización adecuada, para poder recuperar la energía térmica rápidamente en el intervalo de tiempo requerido por la aplicación.
- Requisitos de seguridad medioambientales o de otro tipo: Baja toxicidad, biocompatibilidad, no alergénico, no inflamable, autoextinguible, no explosivo, etc.

La realidad es que el número de potenciales materiales que cumplen todas las características es muy escaso. Así, normalmente el primer criterio que se tiene en cuenta para seleccionar un PCM es la temperatura de cambio de fase y a continuación se verifica que la entalpía es adecuada. A partir de dicho punto, los candidatos generalmente empiezan a no cumplir todos los requisitos: Es difícil encontrar un PCM que reúna todos los condicionantes físicos, técnicos y económicos.

Una de las soluciones que se ha venido investigando ampliamente para encontrar mejores PCMs es el desarrollo de mezclas eutécticas de materiales. Cuando dos o más materiales se mezclan y forman un sistema, su comportamiento es diferente al de los compuestos originales. En función de cómo interactúen, formaran diferentes tipos de sistemas. Entre los sistemas más comunes dentro del equilibrio sólido-líquido se encuentra el tipo eutéctico, que se caracteriza por presentar una temperatura de fusión invariante, y más baja que aquellas de los componentes que lo originan. Por tanto, es posible la obtención de nuevos PCMs con temperaturas de fusión ajustables a la aplicación deseada.

Tal y como se refleja en estados del arte de PCMs publicados hasta la fecha [1] son numerosos los estudios relacionados con este tipo de sistemas en la literatura (ver [2,3], por ejemplo). Sin embargo, la mayoría de los estudios realizados se basan en trabajos experimentales de prueba y error. Dicha metodología resulta difícil y costosa, sobre todo si no se posee conocimiento previo en la materia, o experiencia con materiales similares a los que se pretenden estudiar. Es conveniente y adecuado disponer de un punto de partida; de valores que sirvan como estimación inicial.

En base a ello, el presente trabajo se basa en el modelado termodinámico de sistemas eutécticos binarios, con el fin de evaluar y comprender mejor aquellos aspectos prácticos de interés para el desarrollo de nuevos PCMs. Se ha aplicado el equilibrio de fases sólido-líquido para modelar el comportamiento de diferentes mezclas de PCMs y los resultados se han contrastado con datos experimentales. Se ha efectuado un estudio paramétrico sencillo para evaluar la influencia que las propiedades de los compuestos de partida (temperatura de cambio de fase, entalpía, etc.) tienen en el compuesto eutéctico resultante. Con los resultados obtenidos, se han elaborado recomendaciones a seguir a la hora de desarrollar nuevos PCMs.

2. Métodos empleados

2.1. Teoría del equilibrio sólido-líquido para sistemas eutécticos binarios.

Para modelar los diagramas de fases se empleó la teoría del equilibrio termodinámico sólido-líquido, basada en la energía libre de Gibbs en exceso. Se trata de conceptos sencillos y ampliamente reportados en libros de Termodinámica Química [4]. Según el fundamento teórico, el equilibrio sólido-líquido de una mezcla viene definido por la ecuación 1. En la misma, \hat{f}_i , representa la fugacidad de cada compuesto i , en las fases sólida (s) y líquida (l) presentes en el sistema.

$$\hat{f}_i^l = \hat{f}_i^s \quad (\text{Eq. 1})$$

Introduciendo los denominados coeficientes de actividad, la ecuación 1 deriva en la ecuación 2. En ella, γ^l y γ^s son los coeficientes de actividad en las fases líquida y sólida respectivamente, y describen la desviación de los componentes del sistema en relación a una mezcla ideal en equilibrio; x es la fracción molar en el líquido y z la fracción molar en el sólido. Por último, f representa la fugacidad de los compuestos puros en las fases sólida (s) y líquida (l). El subíndice i se refiere a cada uno de los compuestos presentes en el sistema.

$$x_i \gamma_i^l f_i^l = z_i \gamma_i^s f_i^s \quad (\text{Eq. 2})$$

Se demuestra [4], que la relación entre las fugacidades de los compuestos puros en los estados sólido y líquido, representada por ψ en la ecuación 3, se puede definir del modo mostrado en la ecuación 4. En la misma, ΔH_i^{sl} representa la entalpía de fusión másica del compuesto puro; P_{mi} es la masa molecular del compuesto; T_m es su temperatura de fusión; T es la temperatura de equilibrio del sistema (variable que se pretende calcular para cada una de las composiciones de la mezcla); ΔC_{pi}^{sl} es la diferencia entre el calor específico del sólido y del líquido y finalmente, R es la constante ideal. El término denominado I es un término de segundo orden, y está relacionado con la variación del calor específico con la temperatura, por lo que se puede despreciar. Del mismo modo, los resultados mostraron que la diferencia entre el calor específico del sólido y del líquido no tiene influencia apreciable en el cálculo del diagrama de fases, y fue descartada para el cálculo de las temperaturas de equilibrio en el presente trabajo (no así para el cálculo de las entalpías eutécticas; ver más abajo). De este modo, combinando las ecuaciones 2, 3 y 4, se obtienen las relaciones mostradas en las ecuaciones 5 y 6.

$$\psi_i = f_i^s / f_i^l \quad (\text{Eq. 3})$$

$$\psi_i = \exp\left(\frac{\Delta H_i^{sl} P_{mi}}{RT_{mi}} \left(\frac{T - T_{mi}}{T}\right) + \left(\frac{\Delta C_{pi}^{sl} P_{mi}}{R}\right) \left(\ln \left(\frac{T}{T_{mi}}\right) - \left(\frac{T - T_{mi}}{T}\right)\right) + I\right) \quad (\text{Eq. 4})$$

$$x_i \gamma_i^l = z_i \gamma_i^s \psi_i \quad (\text{Eq. 5})$$

$$x_i \gamma_i^l / z_i \gamma_i^s = \exp\left(\frac{\Delta H_i^{sl} P_{mi}}{RT_{mi}} \left(\frac{T - T_{mi}}{T}\right)\right) \quad (\text{Eq. 6})$$

Para sistemas eutécticos, en los que los compuestos presentes son inmiscibles en la fase sólida, la fracción molar z , es igual a la unidad. Además, es aceptable asumir que los coeficientes de actividad en el estado sólido pueden despreciarse, por lo que toman un valor de 1. En consecuencia, se alcanza la ecuación 7.

$$z_i \gamma_i^s = 1 \quad (\text{Eq. 7})$$

Así, de las ecuaciones 6 y 7, se llega a la ecuación 8.

$$x_i \gamma_i^l = \exp\left(\frac{\Delta H_i^{sl} P_{mi}}{RT_{mi}} \left(\frac{T - T_{mi}}{T}\right)\right) \quad (\text{Eq. 8})$$

En una mezcla binaria se dispone de dos ecuaciones independientes, una por cada compuesto presente en el sistema, siendo también dos las incógnitas a evaluar: composición y temperatura, que son las que definirán el diagrama de fases. Sin embargo, como se observa en la ecuación 8, las variables desconocidas son cuatro: la composición de la fase líquida, x , la temperatura de equilibrio, T y los coeficientes de actividad de la fase líquida de cada uno de los dos compuestos presentes en el sistema, γ^j . Por tanto, es necesario disponer de metodologías y/o suposiciones adicionales para determinarlos.

En la literatura se puede encontrar diferentes métodos de cálculo para ello, habitualmente basados en ecuaciones empíricas o semi-empíricas, como por ejemplo el procedimiento UNIFAC [5]. Otra opción comúnmente empleada es la de asumir que los compuestos forman una mezcla ideal, o lo que es lo mismo, que los coeficientes de actividad toman el valor de 1. Una vez que los coeficientes de actividad dependen específicamente de los compuestos que forman el sistema, el método UNIFAC se consideró inadecuado para el presente estudio, ya que se pretende estudiar la influencia de los parámetros (P_m , ΔH^{sl} y T_m) de un modo genérico. Además, los sistemas empleados para validar el método (ver Sección 3.1) mostraron un comportamiento cercano al ideal. Por tanto, se consideró adecuado adoptar dicha suposición para el trabajo aquí descrito.

Por otro lado, el enfoque de energía libre de Gibbs en exceso de una mezcla se puede emplear también para predecir la entalpía resultante de un compuesto eutéctico. Del modo que se muestra en la ecuación 9, la entalpía de una muestra (H^{mix}) está comprendida por la suma de la entalpía en exceso de la muestra y la entalpía de una mezcla ideal.

$$H^{mix} = H^e + H^{ideal} \quad (\text{Eq. 9})$$

Por los motivos mencionados más arriba, se consideró adecuado trabajar con mezclas consideradas ideales, por tanto, se omitió el término correspondiente a la entalpía en exceso en la ecuación. Así, se obtuvo la ecuación 10. En la misma, x es la fracción molar para cada compuesto i presente en la mezcla; ΔH^{sl} representa la entalpía de fusión de cada uno de los mencionados i compuestos; ΔC_p^{sl} es la diferencia entre el calor específico del sólido y el del líquido; T_m es la temperatura de fusión de los i compuestos puros y T_{eut} es la temperatura de fusión de la mezcla eutéctica resultante.

$$\Delta H_{mix}^{sl(T_{eut})} = \sum x_i (\Delta H_i^{sl} + \Delta C_{p,i}^{sl} (T_{m,i} - T_{eut})) \quad (\text{Eq. 10})$$

Es importante destacar en este punto que la metodología utilizada no sirve para predecir si dos compuestos formarán un diagrama de fases de tipo eutéctico u otro diferente. La metodología descrita, tal y como se indica en la ecuación 7, asume que la fracción molar de los compuestos en la fase sólida es 1, por lo que ya se presupone que el sistema que formarán es eutéctico. Para conocer previamente qué tipo de diagrama de fases se prevé encontrar es necesario el uso de metodologías más complejas, que están fuera del alcance del presente trabajo.

2.2. Métodos experimentales para la determinación de los diagramas de fases empleados en la validación del modelo usado.

Los diagramas de fases empleados para la validación del modelo, mostrados en la Sección 3.1, fueron determinados experimentalmente mediante Calorimetría Diferencial de Barrido (DSC). El equipo empleado fue un Perkin Elmer DSC7. La velocidad empleada para el programa de temperaturas fue de 1K/min, considerada suficiente para alcanzar el estado de equilibrio. La descripción detallada sobre la metodología seguida se puede consultar en [6].

3. Resultados

3.1. Validación del modelo empleado para la determinación de los diagramas de fases.

El equilibrio termodinámico entre fases es una metodología que se encuentra ampliamente contrastada. Existen incluso grupos de investigación que se dedican exclusivamente a la determinación experimental de este tipo de sistemas, y a emplear dichos datos para el ajuste de los parámetros necesarios para la metodología UNIFAC arriba mencionada [5]. A pesar de ello, se consideró adecuado validar el método empleado con valores experimentales. Una vez a que el presente estudio se incluye dentro de un proyecto con el objetivo de desarrollar nuevos PCMs en un rango de temperaturas de entre 50 y 90 °C, se buscaron materiales que pudieran resultar en mezclas con esa temperatura de fusión. Los compuestos más adecuados para ello fueron los polialcoholes.

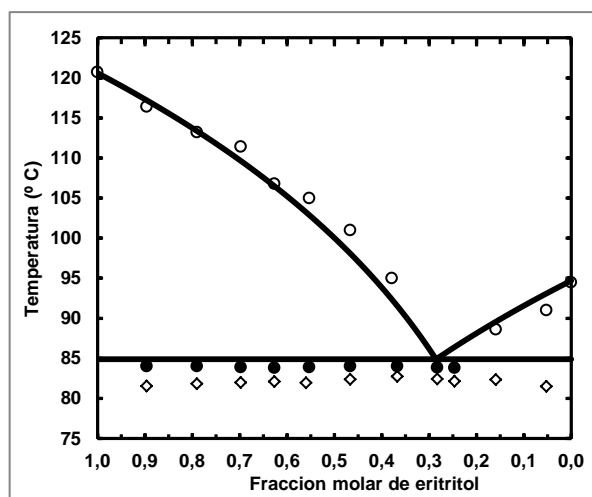


Figura 1. Diagrama de fases eritritol-xilitol. (○)–Temperatura de liquidus experimental; (◇)– Temperatura eutéctica (onset) experimental; (●)– Temperatura eutéctica (equilibrio) experimental; — Diagrama de fases obtenido mediante simulación.

En la Fig. 1 se presenta, a modo de ejemplo, el sistema formado por eritritol y xilitol, que fue obtenido experimentalmente mediante DSC [6]. Tal y como se observa, los resultados alcanzados a través de la simulación (representados por la línea continua) se ajustan de modo adecuado a los determinados experimentalmente. Los valores numéricos del error se presentan en la Tabla 1, junto con resultados obtenidos para el sistema formado por eritritol y sorbitol, que fue establecido experimentalmente de modo análogo. Se observa que la diferencia entre la temperatura eutéctica determinada experimentalmente y la obtenida mediante simulación es de 1.0 °C para el sistema eritritol-xilitol, y de 1.3 °C para el de eritritol-sorbitol. El método se puede considerar por tanto adecuado para los objetivos del presente trabajo.

Tabla 1. Temperaturas de fusión de los compuestos eutécticos determinados experimentalmente vs temperaturas calculadas.

Sistema binario. Componentes		Temperatura de fusión eutéctica (experimental) (°C)	Temperatura de fusión eutéctica (calculada) (°C)	Diferencia entre la temperatura eutéctica experimental y calculada (°C)
1	2			
Eritritol	Xilitol	83.9	84.9	1.0
Eritritol	Sorbitol	86.6	85.3	1.3

De igual modo, en la Tabla 2 se presentan los resultados obtenidos en relación a la entalpía de fusión de las composiciones eutécticas de los sistemas a estudio (0.25 de fracción molar de eritritol en el sistema eritritol-xilitol y 0.52 de fracción molar de eritritol en el sistema eritritol-sorbitol).

Tabla 2. Entalpías de cambio de fase de los compuestos eutécticos determinadas experimentalmente vs entalpías calculadas.

Sistema binario		Entalpía de fusión de la composición eutéctica (experimental) (kJ/kg)	Entalpía de fusión de la composición eutéctica (calculada, incluyendo ΔC_p^{sl}) (kJ/kg)	Entalpía de fusión de la composición eutéctica (calculada, despreciando ΔC_p^{sl}) (kJ/kg)
1	2			
Eritritol	Xilitol	248.7	247.9	262.8
Eritritol	Sorbitol	172.8	169.8	191.8

De nuevo, el ajuste de los resultados se puede considerar adecuado para el objetivo pretendido. El error relativo es del 0.3% para el sistema eritritol-xilitol y del 1.75% en el sistema eritritol-sorbitol. Adicionalmente, se realizaron simulaciones despreciando el término correspondiente a la diferencia del calor específico entre los estados sólido y líquido. Como se puede calcular de la Tabla 2, el error se eleva hasta valores del 5.7% y 11.0% para los sistemas a estudio. Así, al contrario de lo que ocurre para la determinación de las temperaturas de equilibrio (visto arriba), se concluye que el término relativo al cambio del calor específico entre el sólido y el líquido no es despreciable para el cálculo de las entalpías de cambio de fase a la temperatura eutéctica. Esto es importante, ya que se trata de un valor experimental que del que ocasionalmente no se dispone, y que se tiende por tanto a despreciar.

3.2. Influencia de las propiedades de los compuestos originales en el sistema eutéctico resultante.

Se realizó un estudio paramétrico básico para comprender el efecto que las propiedades de los compuestos originales de la mezcla tienen en el comportamiento de la misma. Las variables a estudio fueron la entalpía de cambio de fase, el peso molecular y la temperatura de cambio de fase de los compuestos puros. Para ello, se tomaron como referencia valores de PCMs habitualmente empleados [1], como sigue: El diagrama de fases de partida se realizó con dos materiales con una temperatura de cambio de fase de 80 °C, una entalpía de cambio de fase de 150 J/g y un peso molecular de 150 g/mol. Una vez obtenido el diagrama de fases resultante, se simuló el efecto que tendría cambiar la entalpía de uno de los compuestos del sistema a valores de 250J/g y de 350 J/g, manteniendo el resto de parámetros constantes. Los resultados se muestran en la Fig. 2.

Se procedió de modo equivalente con la influencia del peso molecular. El diagrama de fases de partida fue el mismo que para el análisis de la entalpía mencionado. A partir del mismo, y dejando el resto de las propiedades constantes, se simuló el efecto de usar un material con un P_m de 50 g/mol y de 300 g/mol. Los resultados se encuentran en la Fig. 3. Por último, se realizó el mismo estudio pero variando la temperatura de fusión a valores de 50 °C y 100 °C, además de los 80 °C inicialmente considerados. Los diagramas de fases resultantes se ilustran en la Fig. 4.

En relación a la influencia de la entalpía de fusión, se observa que a mayor entalpía de cambio de fase, menor es la pendiente de la línea de *liquidus* obtenida (Fig. 2). El mismo efecto se aprecia en base al peso molecular (Fig. 3), cuanto mayor es la masa del compuesto, menor pendiente alcanza la línea de *liquidus*. Por último, el efecto de la temperatura de cambio de fase es el esperado: a menor temperatura de cambio de fase, mas baja es la temperatura eutéctica resultante. Sin embargo, la influencia de la temperatura de fusión en la pendiente de la línea de *liquidus* es notablemente menor.

De los resultados se pueden extraer conclusiones interesantes. En primer lugar, se deduce que, si se parte de un compuesto de elevada entalpía de cambio de fase, a menos que tenga un peso molecular bajo, su línea de *liquidus* tenderá a ser muy plana. Ello hace que, si pretendemos unirlo con un material de entalpía también alta (para que el compuesto resultante no pierda densidad energética), entonces no conseguiremos una depresión apreciable en la temperatura de fusión del compuesto eutéctico. Lo más conveniente, en todo caso, sería juntarlo con un compuesto con el peso molecular más bajo posible.

Además de ello, se puede concluir que, si el compuesto de mayor entalpía en el sistema es, a su vez, el que mayor temperatura de fusión presenta, entonces la composición eutéctica resultante será significativamente más rica en el compuesto de menor temperatura de fusión. En esos casos, la temperatura y entalpías del eutéctico serán cercanos al dicho compuesto. Lo cual, en un caso extremo, puede derivar en un diagrama de fases monotéctico.

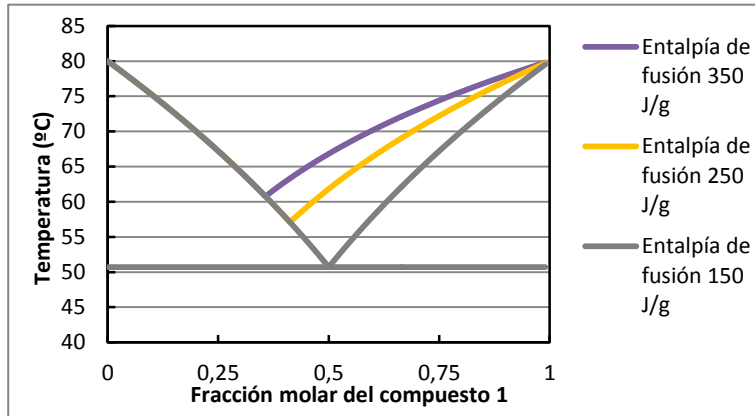


Figura 2. Influencia de la entalpía de fusión en la línea de *liquidus* de un diagrama de fase sólido-líquido.

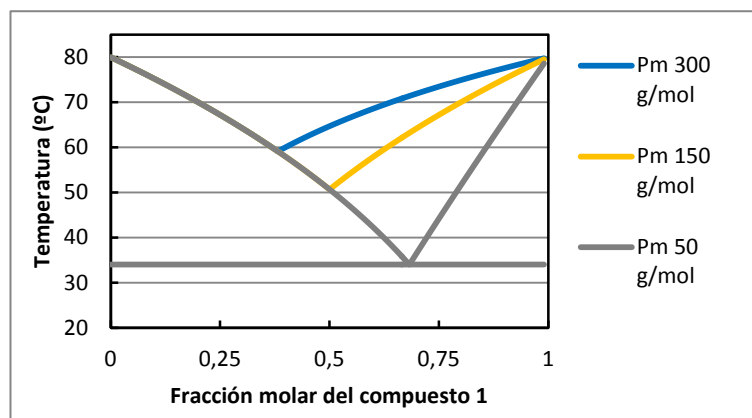


Figura 2: Influencia del peso molecular en la línea de *liquidus* de un diagrama de fase sólido-líquido.

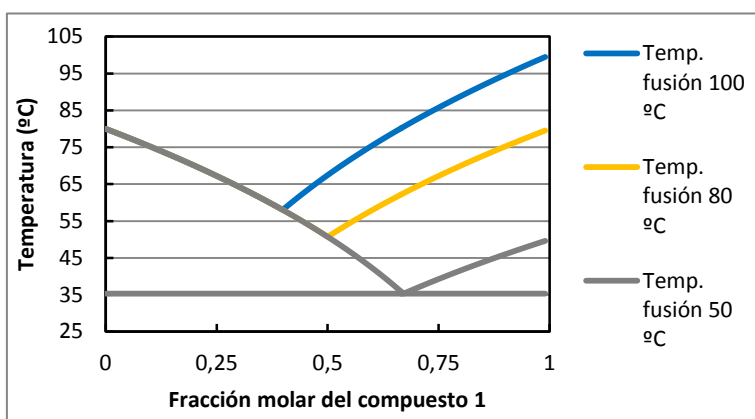


Figura 4: Influencia de la temperatura de fusión en la línea de *liquidus* de un diagrama de fase sólido-líquido.

8. 4. Conclusiones

El presente trabajo se basa en el modelado termodinámico de sistemas eutécticos binarios, con el fin de evaluar y comprender mejor aquellos aspectos prácticos de interés para el desarrollo de nuevos PCMs. Se ha aplicado el equilibrio de fases sólido-líquido para modelar el comportamiento de diferentes mezclas eutécticas de PCMs y los resultados se han contrastado con datos experimentales, obteniendo una correspondencia adecuada.

El modelo empleado se ha usado para observar la influencia que la entalpía de cambio de fase, el peso molecular y la temperatura de cambio de fase de los compuestos puros tienen en el compuesto eutéctico resultante. A mayor entalpía de fusión, menor es la pendiente de la línea de *liquidus* obtenida. Igualmente, a mayor peso molecular, menor pendiente alcanza la línea de *liquidus*. Por último, a menor temperatura de cambio de fase, más bajo es el eutéctico resultante, pero sin afectar apreciablemente a la pendiente de la línea de *liquidus*. En consecuencia, se deduce que si se parte de un compuesto de elevada entalpía de cambio de fase, y no se quiere perder densidad energética, es adecuado buscar un compuesto de bajo peso molecular, o la depresión de la temperatura de fusión será mínima. El modelo aquí presentado puede implementarse fácilmente en cualquier entorno de programación, y servir como punto de partida para el estudio de nuevos PCMs en base a mezclas eutécticas.

9. Agradecimientos

El presente trabajo forma parte del proyecto MicroTES ENE2012-38633, del Ministerio de Economía y Competitividad Español, que cuenta con fondos FEDER. El autor Gonzalo Diarce quiere agradecer la financiación recibida a través del programa Predoc de Formación de Personal Investigador del Gobierno Vasco (convocatoria 2012). Se agradece también el apoyo del Laboratorio de Control de Calidad en la Edificación del Gobierno Vasco. La línea de investigación aquí presentada se coordina además a nivel internacional desde la Task 42/ 29 de la IEA.

10. Referencias

- [1] ZALBA, B., et al. *Review on Thermal Energy Storage with Phase Change: Materials, Heat Transfer Analysis and Applications*. Revista Applied Thermal Engineering, 2003, vol. 23. pp. 251-283.
- [2] COSTA, M.C., et al. *Solid - Liquid Equilibrium of Binary Fatty Acid Mixtures*. Revista Journal of Chemical Engineering Data, 2007, vol. 53. pp. 30-36.
- [3] HE, B., et al. *Liquid-solid phase equilibrium study of tetradecane and hexadecane binary mixtures as phase change materials (PCMs) for comfort cooling storage*. Revista Fluid Phase Equilibria, 2003 vol. 212. pp. 97-109.
- [4] SMITH, J.M., et al. *Introduction to Chemical Engineering Thermodynamics*. Nueva York: McGraw-Hill, 2005.
- [5] JAKOB, A., et al. *Solid-liquid equilibria in binary mixtures of organic compounds*. Revista Fluid Phase Equilibria, 1995, vol. 113. pp. 117-126.
- [6] DIARCE, G., et al. *Eutectic mixtures of sugar alcohols for thermal energy storage in the 50–90°C temperature range*. Revista Solar Energy Materials and Solar Cells, 2015, vol 134. pp. 215–26.