

# INSTALACIÓN EXPERIMENTAL PARA EL ESTUDIO DE SISTEMAS ZEOLITICOS DE ALMACENAMIENTO TÉRMICO

DOLADO BIELSA, Pablo <sup>(1)</sup>; MIRANDA ALCALDE, Inés <sup>(1)</sup>

MARÍN HERRERO, José María <sup>(1)</sup>; ZALBA NONAY, Belén <sup>(1)</sup>; LÁZARO FERNÁNDEZ, Ana <sup>(1)</sup>

MALLADA VIANA, Reyes <sup>(2)</sup>; PINA IRITIA, María P. <sup>(2)</sup>

dolado@unizar.es

<sup>(1)</sup> I3A – Universidad de Zaragoza, España

<sup>(2)</sup> INA – Universidad de Zaragoza, Zaragoza, España

## RESUMEN

El almacenamiento termoquímico por adsorción ha demostrado poseer una serie de ventajas que le confieren un gran potencial comparado con el almacenamiento térmico sensible o latente [1]. El grupo GITSE de la Universidad de Zaragoza, basándose en los trabajos de [2] ha diseñado y construido dos instalaciones experimentales (escala de laboratorio) para estudiar el comportamiento térmico de sistemas de almacenamiento termoquímico. Los primeros estudios realizados se han llevado a cabo en un lecho fijo de zeolita empleando vapor de agua como pareja de trabajo. Se han realizado series de ensayos modificando algunos parámetros y variables relevantes (temperatura, humedad relativa, caudal de entrada, diámetro de partícula, altura del lecho ocupado). En la Fig. 1 se muestran los resultados de dos ensayos realizados empleando zeolita con diferente tamaño de partícula.

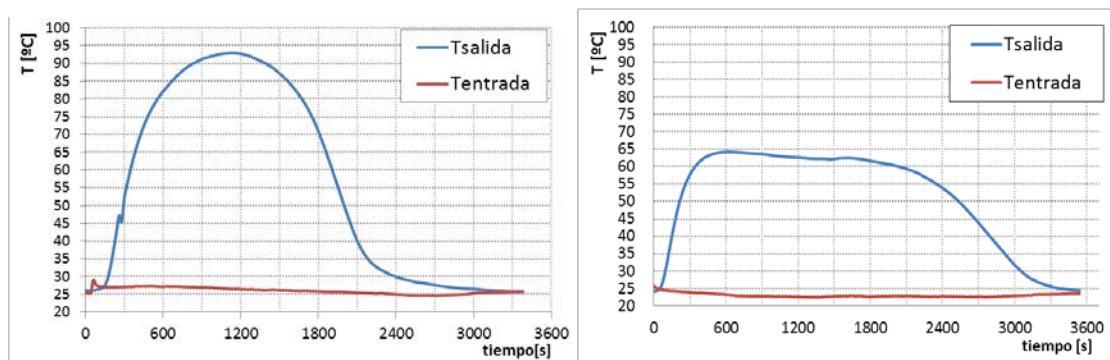


Figura 1: Evolución térmica durante la fase de adsorción para dos tamaños de partícula 1,6-2,0 mm (izq.), 2,5-5,0 mm (dcha.)

La respuesta térmica del sistema (en términos de calor liberado, salto térmico y tiempo de respuesta), se ve fuertemente afectada por muchos de estos parámetros y variables, pero muestra un gran potencial y adaptabilidad para ser una tecnología útil para aprovechamiento de calores residuales.

**Palabras clave:** Almacenamiento termoquímico de energía, Adsorción, Zeolitas.

## 1. Introducción

El potencial del almacenamiento termoquímico (TCS, del inglés *Thermo Chemical Storage*), tanto para procesos de sorción como de reacción química, es una opción muy interesante para el almacenamiento de energía térmica gracias a una serie de ventajas que presenta frente a las tecnologías de almacenamiento sensible y latente (alta densidad energética y volumen reducido de almacenamiento o pérdidas de calor despreciables durante el almacenamiento). Actualmente sigue siendo una tecnología con un bajo nivel de desarrollo y todavía es necesario seguir investigando tanto en los materiales TCS [3] como en su implementación en el sistema. Existen ya materiales para sistemas TCS que han sido ensayados en condiciones de trabajo muy variadas tanto para adsorción (silicagel, zeolitas, sales, estructuras órgano-metálicas, materiales compuestos zeolita-sal) como para absorción y para reacción química. Aunque hay algunos informes que revelan aspectos prometedores tanto técnicos como económicos de estos sistemas (Tabla 1), todavía hay algunos obstáculos que deben abordarse. Los autores son conscientes del estado de madurez de la tecnología TCS, casi al 100% en nivel de I+D [4], de algunos de los puntos críticos (costes, estabilidad, cinética, complejidad del sistema) así como del potencial de esta tecnología, en particular para aprovechamiento de calores residuales. Por todo ello se considera relevante cualquier avance en la caracterización de este tipo de sistemas y en las soluciones particulares que permitan mejorar el diseño y/o los componentes del reactor con una implementación especial (por ejemplo con técnicas como el *washcoating*).

Tabla 1. Parámetros típicos de los sistemas de almacenamiento de energía térmica (TES, del inglés *Thermal Energy Storage*) [4]

Sistemas TES	Capacidad (kWh/t)	Potencia (MW)	Eficiencia (%)	Periodo de almacenamiento (h, d, m)	Coste (€/kWh)
Sensible (agua caliente)	10-50	0,001-10	50-90	d/m	0,1-10
PCM	50-150	0,001-1	75-90	h/m	10-50
Reacciones químicas	120-250	0,01-1	75-100	h/d	8-100

Para avanzar al siguiente nivel de madurez tecnológica en sistemas de TCS basados en adsorción, existen una serie de cuestiones aún no resueltas que deben ser afrontadas: el diseño del reactor (relacionado con la mejora de la transferencia de calor y de masa), la eficiencia energética durante el proceso de humidificación, la optimización de la regeneración del proceso para un sistema integrado y una serie de aspectos relacionado con el material. Este trabajo contribuye hasta cierto punto en los aspectos relacionados con el estudio de la transferencia de calor y la respuesta térmica de diferentes reactores.

## 2. Metodología

### 2.1. Instalación Experimental

Con el fin de estudiar el comportamiento térmico de reactores TCS para adsorción y desorción, se han diseñado dos instalaciones experimentales [5]. La primera está diseñada para realizar estudios rápidos y preliminares de los materiales. Está compuesta por instrumentación sencilla (bombas de pecera, sistema calefactor casero por resistencia y tubo, borboteador, rotámetro) que permite obtener resultados aproximados y cualitativos. La segunda instalación consta de instrumentación más precisa, tanto para medida como para control, gracias a un mezclador de evaporación controlada (*Controlled Evaporation Mixing*, CEM) y sus correspondientes controladores de flujo másico. Esta instalación es la que se ha empleado en los experimentos mostrados en adelante, salvo en los correspondientes al apartado 3.4.

## 2.2 Descripción

La instalación experimental cuantitativa está basada en Hongois y cols. [2] y en los resultados preliminares obtenidos con la instalación cualitativa. Ambas instalaciones experimentales han sido diseñadas para trabajar como sistemas abiertos de intercambio de calor entre una corriente de aire y el material de TCS contenido en un reactor. La corriente de aire transporta diferentes cantidades de agua consiguiendo humedades relativas (HR) en todo el rango (de 0 a 100 %) a la entrada del correspondiente reactor. Se instalaron diversos sensores de temperatura (termopares tipo T) y HR ( $\pm 0,1$  K,  $\pm 0,8$  % HR) para caracterizar el proceso. La instalación puede operar en un rango de temperatura que va desde ambiente hasta  $200^{\circ}\text{C}$  y con un caudal de aire de hasta  $10 \text{ l}_r/\text{min}$ . Para asegurar el control de la temperatura de la corriente de entrada al reactor, se adecuó un traceado térmico en la sección entre el CEM y el reactor. Frente a la instalación sencilla, el sistema CEM de la instalación cuantitativa aporta: precisión controlada para el flujo de gas ( $\pm 0,8$  %) y el flujo de líquido mezclado ( $\pm 0,2$  %), respuesta rápida, alta reproducibilidad, flujo de vapor muy estable, selección flexible de la relación gas/líquido.

## 3. Resultados experimentales: reactores y materiales

Con el objetivo de estudiar la respuesta térmica en función del diseño del reactor, se han realizado ensayos con diferentes configuraciones y se ha analizado el efecto de algunas variables y parámetros relevantes. Se han estudiado cuatro disposiciones: lecho fijo con flujo axial, lecho fijo con flujo cuasi-radial, pequeño bloque con *washcoating* de zeolita y alimentación directa de agua líquida (en lugar de vapor). También se han estudiado diferentes zeolitas y un material compuesto zeolita-sal.

### 3.1. Lecho fijo: granos de zeolita

Para la el sistema de lecho fijo se trabaja con un reactor cilíndrico de vidrio con una camisa de vacío que lo rodea para reducir las pérdidas de calor a través de las paredes. El diámetro interno del tubo es de  $2,04 \text{ cm}$  y permite una altura máxima de lecho de  $15 \text{ cm}$  (Fig. 2, izq.). Se ha estudiado la respuesta del sistema ante variaciones de caudal de aire, tamaño de partícula y HR.

Se realizaron ensayos variando el caudal de aire en un rango entre  $4$  y  $9 \text{ l/min}$ , con HR del  $100\%$  en todos los casos. La Fig. 2 (dcha.) muestra la temperatura de la corriente de salida de los diferentes ensayos en los que el resto de condiciones se mantuvieron prácticamente constantes (diámetro de partícula en rango de  $1,6$  a  $2,5 \text{ mm}$ ; altura del lecho de  $3,5 \text{ cm}$ ; masa de zeolita  $7,5 \text{ g}$ ;  $100\%$  HR en la entrada;  $T_{\text{entrada}} 25^{\circ}\text{C}$ , aprox.).

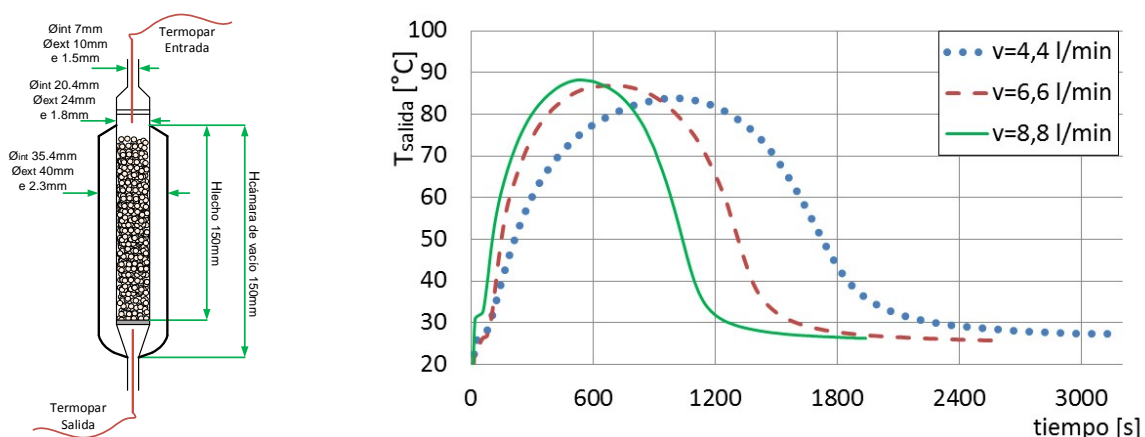


Figura 2: Dimensiones del reactor de lecho fijo (izq.) y Evolución de la temperatura de salida para diferentes caudales de entrada (dcha.).

Conforme el caudal de entrada aumenta, la evolución de la temperatura con el tiempo alcanza un pico más estrecho y elevado correspondiendo con una adsorción es más rápida y la temperatura máxima alcanzada es más elevada. Sin embargo, con esta configuración estudiada en este trabajo, parece

haberse alcanzado un punto de diseño en el que trabajar con caudales de aire mayores no contribuiría de forma significativa a alcanzar temperaturas más elevadas a la salida ni saltos térmicos más amplios.

Posteriormente se realizaron ensayos modificando la HR de la corriente de entrada, el resto de las condiciones se mantuvieron fijas (caudal de 8 l/min, diámetro de partícula en rango de 1,6 a 2,5 mm; altura del lecho de 3,5 cm; masa de zeolita 7,5 g; 100 % HR en la entrada;  $T_{\text{entrada}}$  25 °C, aprox.). La Fig. 3 (izq.) muestra la temperatura de la corriente de salida de estos ensayos.

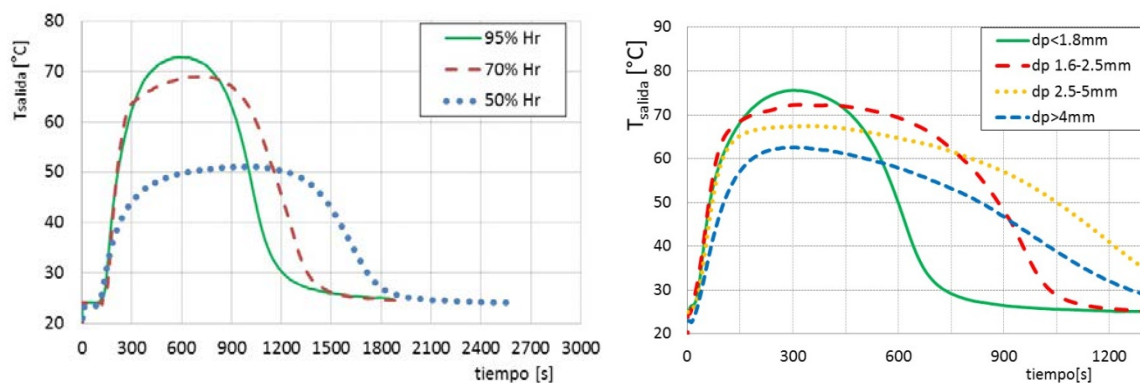


Figura 3: Evolución de la temperatura de salida para diferentes HR en la corriente de entrada (izq.) y para diferentes distribuciones de tamaños de partícula (dcha.).

En un siguiente paso se ha estudiado el efecto del tamaño de partículas del lecho. La Fig. 3 (dcha.) muestra la temperatura de salida de esos ensayos, en los que el resto de las condiciones se han mantenido constantes (altura de lecho 3 cm; masa de zeolita 5,8 g; flujo de aire 8 l/min;  $T_{\text{entrada}}$  25 °C aprox.). Cuando se trabaja con el diámetro de partícula menor, tanto el salto térmico como la temperatura máxima alcanzada son más elevados. Al ir disminuyendo el diámetro de partícula, el potencial de adsorción del lecho aumenta debido a que la resistencia externa a la transferencia de masa (que se encuentra en la superficie externa de cada grano de zeolita) se reduce a medida que la superficie total externa aumenta.

Finalmente, se ha estudiado la variación de la sección del reactor. Se han empleado reactores con diámetros internos de 2, 5 y 10 cm. Salvo la cantidad de zeolita, el resto de condiciones se han mantenido constantes (diámetro de partícula en rango 1,6 a 2,5 mm; altura del lecho 0,5 cm; 100 % HR; caudal de aire 8 l/min;  $T_{\text{entrada}}$  25°C, aprox.). La Fig. 4 (izq.) muestra la temperatura de salida en esos ensayos.

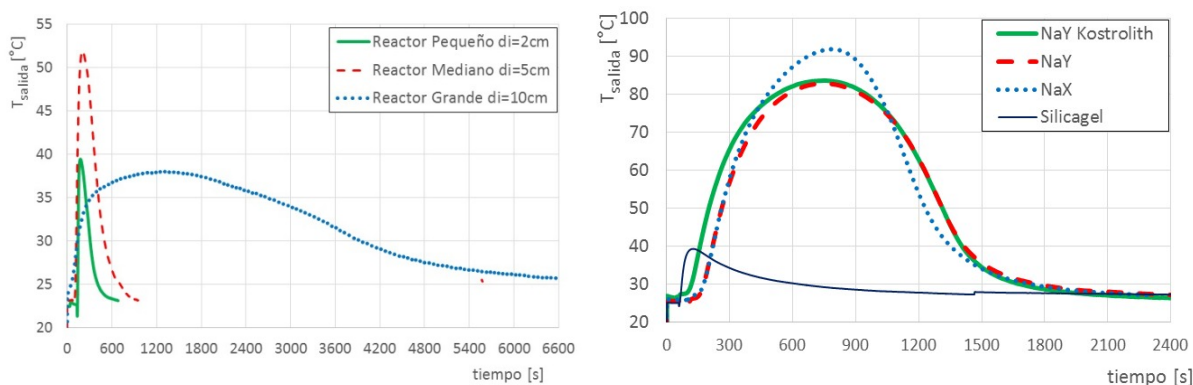


Figura 4: Evolución de la temperatura de salida para reactores con diferentes diámetros (izq.) y para diferentes zeolitas y silicagel (dcha.).

A simple vista la diferencia en la respuesta térmica es notable. Sin embargo, este estudio paramétrico aun no siendo suficientemente significativo para extraer conclusiones definitivas (ya que, por ejemplo, al mantener la altura del lecho, la cantidad de zeolita es completamente diferente en los tres casos) es ya indicativo de puntos de diseño relevantes. Por ello, en un trabajo futuro se realizará un diseño de

experimentos orientado a conseguir una superficie de respuesta que tenga en cuenta al menos tres factores: la cantidad de zeolita, la altura del lecho y el flujo de aire.

### 3.2. Zeolita y material compuesto zeolita-MgSO<sub>4</sub>

Se han realizado ensayos con tres zeolitas distintas: zeolita NaY del proveedor Chemiewerk Bad Köstritz (Köstrolith®) y zeolitas NaY y NaX de Tosoh Corporation. Además, se han realizado ensayos con silicagel. Todos los ensayos se han realizado en el mismo reactor. La Fig. 4 (dcha.) muestra la respuesta térmica obtenida con estos 4 materiales. La zeolita NaX muestra mejores resultados en términos de temperatura máxima alcanzada y salto térmico; las tres zeolitas muestran una tendencia similar en cuanto a la evolución y forma de la temperatura de salida.

Para mejorar el comportamiento del material se han realizado ensayos con material compuesto zeolita y MgSO<sub>4</sub>. El material compuesto que se prepara se beneficia de la mayor entalpía de adsorción de la sal, que se embebe en algunos de los poros de la zeolita (que actúa como material soporte y también como material adsorbente). El material compuesto fue preparado empleando el método “mojado”. Esto supone la impregnación de la zeolita en una disolución de MgSO<sub>4</sub> (MgSO<sub>4</sub>·7H<sub>2</sub>O disuelto en agua destilada). La zeolita utilizada fue la faujasita NaY del proveedor CWK-Köstrolith, con un diámetro de partícula en el rango 1,6 y 2,5 mm. La zeolita se secó durante 1h a 300 °C para deshidratarla por completo antes de iniciar la síntesis del material compuesto. Para preparar la disolución de la sal se calculó la cantidad requerida de MgSO<sub>4</sub>·7H<sub>2</sub>O, teniendo en cuenta las 7 moléculas de agua que se iban a perder cuando el material compuesto estuviese completamente seco. La zeolita se sumergió en la disolución, donde permaneció durante 2 h. Transcurrido este tiempo, el exceso de disolución fue retirado por filtración. Finalmente, la zeolita impregnada se secó en un horno durante 8 h a 200 °C. Esta temperatura se consideró suficiente para conseguir deshidratar por completo tanto la sal como la zeolita. Con este método se sintetizó una muestra de 60 mg de material compuesto zeolita-MgSO<sub>4</sub>, el cual contenía un 5,5 % en peso de MgSO<sub>4</sub>. Una vez preparado se han realizado ensayos con este material compuesto empleando el reactor de lecho empacado mencionado anteriormente. Siguiendo el mismo procedimiento, también se sintetizó material compuesto NaX-MgSO<sub>4</sub> con un contenido en sal del 9 % en peso.

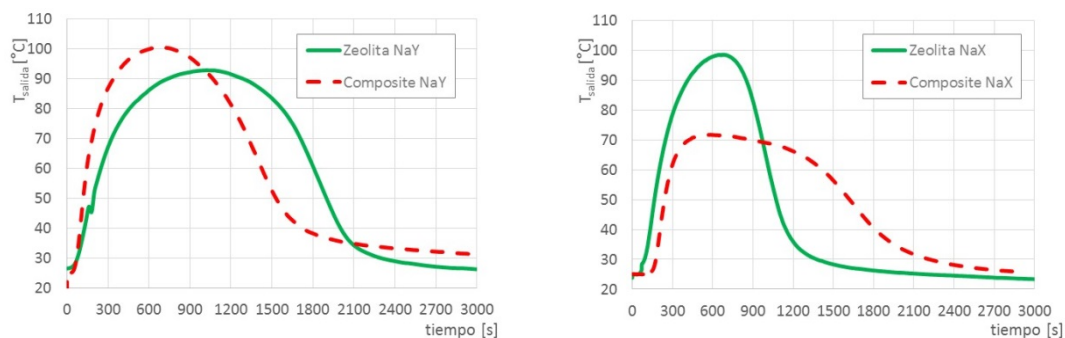


Figura 5: Evolución de la temperatura de la salida para zeolita NaY y su correspondiente material compuesto (izq.) y para zeolita NaX y su correspondiente material compuesto (dcha.).

La Fig. 5 (izq.) muestra la evolución de la temperatura de salida del ensayo con zeolita NaY y el de su correspondiente material compuesto. Tan solo por haber incorporado un 5,5 % en peso de sal se obtiene una mejora significativa (en términos de tiempo de respuesta y salto térmico). De acuerdo a la literatura, se espera que el óptimo se encuentre con un 15 % en peso de sal [2]. Sin embargo, este análisis no es general tal y como se observa en la respuesta del compuesto NaX (Fig. 5, dcha.): mientras que la respuesta térmica del material compuesto con zeolita NaY mejora, al material compuesto con zeolita NaX le sucede lo contrario. Por tanto, se deduce que la síntesis de un material compuesto no siempre va a merecer la pena, ya que existe una interacción entre la sal y el soporte zeolítico que condicionará su nuevo comportamiento, siendo adecuado en la zeolita NaY pero no en la NaX. Se está investigando en las causas de este comportamiento.

### 3.3. Washcoating de zeolita

Otra técnica interesante debido a las ventajas que ofrece frente a los lechos fijos es la aplicación de la zeolita mediante la técnica *washcoating* (reducción de la pérdida de carga, mejora de la transferencia de masa y de calor). El sistema TCS que se estudió en este caso estaba compuesto por una estructura soporte de cordierita similar a un ladrillo (6 cm de longitud, sección cuadrada de 1,2 x 1,2 cm, con canales internos también de sección cuadrada de 1 mm de lado) que por inmersión en un barro de zeolita se impregnó aproximadamente con 1 g de zeolita alcanzando espesores de micras repartido de forma más o menos homogénea sobre toda la superficie del ladrillo. La estructura, envuelta con fibra de vidrio en las caras longitudinales, se situó en el interior de un tubo de vidrio (que actúa como reactor). El caudal de aire fue de 2,3 l/min, una HR del 85% y temperatura ambiente (25 °C) a la entrada.

En la Fig. 6 se aprecia que el *washcoating* mejora notablemente los tiempos de respuesta en comparación con el reactor de lecho fijo con gránulos de zeolita, con tiempos inferiores a 1 minuto hasta alcanzar la temperatura máxima (superior a 80 °C y un salto térmico de más de 55 °C). Ambos ensayos se han realizado con la misma cantidad de zeolita y las mismas condiciones en la corriente de entrada. Estos resultados muestran una diferencia significativa entre las dos soluciones (tanto en tiempo de respuesta como en la forma de la curva de la temperatura) lo que añadido a la implementación singular de la zeolita (como un recubrimiento) amplía las posibilidades de integración en distintas aplicaciones y hacen conveniente profundizar en la experimentación con la solución en *washcoating*.

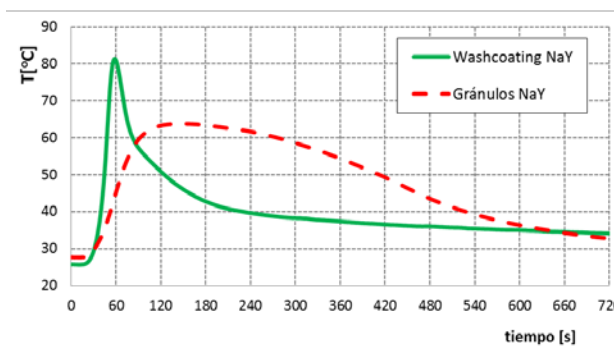


Figura 6: Evolución de la temperatura de salida para *washcoating* y para lecho fijo en flujo axial.

### 3.4. Lecho fijo en flujo cuasi-radial

Se han realizado ensayos con distintas configuraciones de reactor en flujo cuasi-radial (Fig. 7, izq.) con el fin de comparar su comportamiento frente al lecho fijo con flujo axial. Para implementar de forma sencilla este tipo de flujo se ha empleado un borboteador como reactor y se han configurado tres diseños: sin aislamiento, con aislamiento, y con aislamiento y reducción de sección. La Fig. 7 (dcha.) muestra la temperatura de salida de 3 ensayos (manteniendo constantes diámetro de partícula (1,6-2,5 mm), 100% HR a la entrada, caudal de entrada 8 l/min y  $T_{\text{entrada}}$  25 °C aprox.) en los que, para los dos diseños sin reducción de sección la cantidad de zeolita fue 17 g y para el de sección reducida 8,8 g.

Como era de esperar, con el aislamiento el comportamiento térmico mejora notablemente. Además, con una sección reducida del lecho se consigue una respuesta con forma de pico en la temperatura de salida, frente a las otras configuraciones que presentan una pendiente mucho más suave y con una larga cola durante más tiempo. Esta disposición de flujo cuasi-radial muestra resultados interesantes por lo que se continuará profundizando en su estudio tratando de mejorar el diseño implementando un flujo totalmente radial y optimizando la configuración para conseguir maximizar la temperatura de salida y, con ello, aumentar el salto térmico.

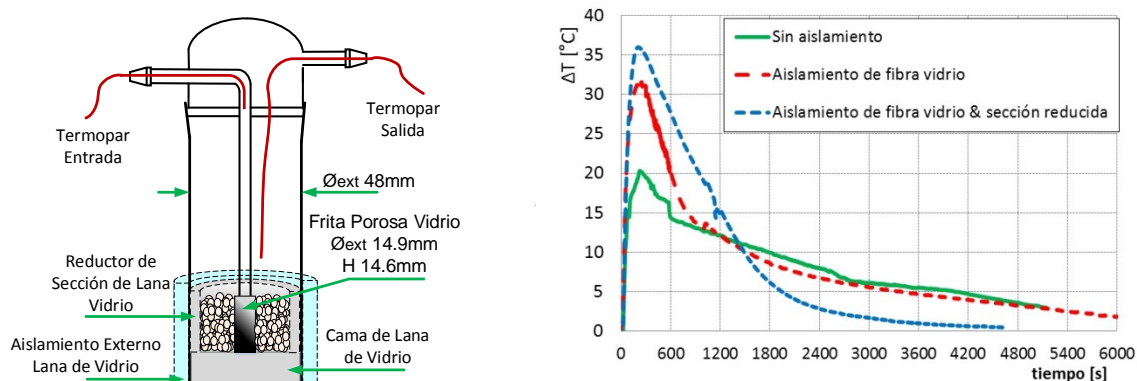


Figura 7: Configuración y dimensiones del reactor cuasi-radial con sección reducida (izq.) y Evolución de la temperatura de salida para las 3 configuraciones de reactor cuasi-radial (dcha.).

### 3.5. Agua líquida en el flujo de entrada

Otra opción de diseño consiste en inyectar agua líquida directamente sobre la zeolita, lo que permite conseguir una respuesta instantánea del sistema en términos de calor liberado (siendo incluso capaz de hacer hervir el agua). Puesto que la respuesta instantánea es una opción muy interesante para muchas aplicaciones, se va a profundizar en esta línea estudiando el comportamiento de un reactor similar con nebulización de agua.

### 3.6. Balance energético y pérdidas de calor del sistema

Se han comparado los valores de energía intercambiada durante el proceso de adsorción teóricos de acuerdo a la ecuación  $E_{Teórica} = \Delta h_{adsorción} \cdot m_{adsorbida}$  con los obtenidos experimentalmente por medio de un balance energético a la corriente de aire ( $E_{Exp} = \sum \dot{v}_{aire} \cdot \rho_{aire} \cdot c_{p,aire} \cdot \Delta T \cdot \Delta t$ ). La tendencia general es que, para un caudal de aire fijo, la energía intercambiada decrece conforme se reduce la altura de lecho. Si la cantidad de zeolita puesta en juego es menor, el calor liberado y la duración del proceso son menores. Si el proceso es más rápido, las pérdidas de calor son menores, por lo que la diferencia entre los valores de energía determinado por las dos ecuaciones anteriores se reduce. Por otro lado, para una longitud de lecho fija, la energía teórica almacenada es la misma. Sin embargo, la energía determinada experimentalmente disminuye con el caudal de aire. Para un incremento del caudal, el proceso es más rápido, favoreciendo la reducción de pérdidas de calor a través de las paredes del reactor, por lo que la diferencia entre los dos valores de energía disminuye. Se ha realizado un estudio preliminar para estimar las pérdidas de calor a través de las paredes del reactor. A pesar de que el reactor fue diseñado con una cámara de vacío, existe un puente térmico en la unión inferior entre el tubo externo y el interno. Estas pérdidas se han estimado teniendo en cuenta las correlaciones de convección natural y radiación, y midiendo la temperatura en la superficie externa del reactor. Ninguna de las correlaciones encaja exactamente con la situación real (ni superficie isoterma ni flujo de calor uniforme) pero ha servido para una primera estimación. A la vez que se medían las temperaturas en la pared externa, las pérdidas de calor a través de la pared del reactor han sido estimadas para cada instante de tiempo: para el conjunto de experimentos realizados se han estimado en un rango entre un 22% y un 38% del total de la energía intercambiada. Es decir que, a pesar de la cámara de vacío, es necesario un mejor diseño del reactor y/o de los materiales que lo conforman.

## 4. Conclusiones

En este trabajo se ha mostrado el comportamiento térmico de diferentes sistemas TES aire-agua-zeolita basados en el proceso de adsorción. Se han ensayado diferentes diseños de reactores y materiales de almacenamiento. El equipo experimental permite operar en sistema abierto, a presión atmosférica, con temperaturas de hasta 200°C, con caudales de aire en un rango entre 0,05 y 10 l<sub>n</sub>/min y con humedades relativas en todo el rango. Se han realizado estudiado reactores cilíndricos de lecho fijo empleando diferentes tipos de zeolitas (faujasita NaY, NaX, material compuesto zeolita-MgSO<sub>4</sub>) bajo diferentes condiciones de operación (HR, tamaño del lecho, flujo de aire, diámetro interno del

reactor). Se ha comprobado que los materiales compuestos también pueden mejorar el funcionamiento de los sistemas TCS, no siendo una solución siempre posible para todos los tipos de zeolita: el material compuesto NaY-MgSO<sub>4</sub> mejora su comportamiento térmico, pero no así el compuesto de zeolita NaX. Por otro lado, se han implementado diseños particulares como el *washcoating* o introducción directa de agua líquida (para un lecho empaquetado) mostrando ambos diseños una respuesta rápida en términos de máxima temperatura alcanzada. Finalmente, se han realizado experimentos en configuración de flujo cuasi-radial ampliando el abanico de posibilidades de respuesta de este tipo de sistemas.

Como trabajo futuro se va a comparar el comportamiento térmico obtenido con el de otras instalaciones experimentales similares en términos de balance de energía al sistema de TCS. También, debido a su relevancia en el balance de energía y a los gradientes térmicos encontrados en la sección de salida del reactor, se va a mejorar la toma de medidas de temperatura: usando múltiples sensores en una misma sección o bien implementando e integrando una termopila para determinar mejor la diferencia de temperaturas entre la entrada y la salida del lecho, midiendo también diferentes temperaturas en la superficie externa del reactor. Una vez que hayan realizado el suficiente número de ensayos, se aportará una correlación empírica para cada instalación en particular relacionada con la altura del lecho, el flujo de aire y la energía intercambiada (o bien con las pérdidas de calor). En paralelo también se está trabajando en el desarrollo de modelos numéricos que permitan simular el comportamiento térmico de estos sistemas de almacenamiento termoquímico.

## 5. Agradecimientos

Los autores agradecen al Ministerio Español de Economía y Competitividad la financiación de este trabajo en el marco de los proyectos ENE2011-28269-C03-01 y ENE2011-22722 y la colaboración dentro del marco del Annex 29-Task 42 de la Agencia Internacional de la Energía. Finalmente, nuestro reconocimiento al Servicio General de Apoyo a la Investigación-SAI de la Universidad de Zaragoza.

## 6. Referencias

- [1] ABEDIN, A.H. ROSEN, M.A.. A Critical Review of Thermochemical Energy Storage Systems. The Open Renewable Energy Journal, 2011, vol. 4, pp. 42-46.
- [2] HONGOIS, S. KUZNIK, F. STEVENS, P. RADULESCU, M. ROUR, J.J.. Development and characterisation of a new MgSO<sub>4</sub>-zeolite composite for long-term thermal energy storage. Solar Energy Materials and Solar Cells, 2011, vol. 95, pp. 1831-1837.
- [3] European Technology Platform on Renewable Heating and Cooling, 2012, Strategic Research Priorities for Cross-cutting Technology.
- [4] IEA-ETSAP and IRENA© Technology Brief E17 – January 2013, Thermal Energy Storage, Technology Brief, Disponible en: [www.irena.org/Publications](http://www.irena.org/Publications). [Consulta: 23 marzo 2015]
- [5] DOLADO, P. MIRANDA, I. URIETA, J.S. CORONAS, J. LÁZARO, A.. “Packed bed zeolite experimental setup to study TCS systems up to 200°C”. En Actas Eurosun 2014 (Aix-les Bains, Francia, 16 al 19 de Septiembre 2014).