

**CARACTERIZACIÓN TÉRMICA DEL REACTOR SOLAR MULTITUBULAR M&M****Romero-Paredes H.\*, Santamaria-Padilla A.\*\*, Arancibia-Bulnes C.A.\*\*\*, Villafán Vidales H.I.\*\*\***

\*Departamento de Ingeniería de Procesos e Hidráulica, Universidad Autónoma Metropolitana – Iztapalapa, San Rafael Atlixco 186, Ciudad de México, 09340 DF, México. [hrp@xanum.uam.mx](mailto:hrp@xanum.uam.mx)

\*\*Posgrado en Energía y Medio Ambiente, Universidad Autónoma Metropolitana – Iztapalapa, San Rafael Atlixco 186, Ciudad de México, 09340 DF, México. [aspenergia@xanum.uam.mx](mailto:aspenergia@xanum.uam.mx)

\*\*\*Instituto de Energías Renovables, Universidad Nacional Autónoma de México, Privada de Xochicalco S/N, Temixco, Morelos, 62580, México. [caab@ier.unam.mx](mailto:caab@ier.unam.mx) y [hivv@ier.unam.mx](mailto:hivv@ier.unam.mx)

<https://doi.org/10.34637/cies2020.2.5152>

**RESUMEN**

El objetivo de este trabajo es la caracterización térmica de un reactor solar de cavidad multitubular (M&M) bajo radiación solar concentrada del horno solar del Instituto de Energías Renovables de la UNAM (HoSIER); concebido para realizar reacciones termoquímicas de producción de combustibles limpios como son el hidrógeno y gas de síntesis. Ha habido diversas propuestas de reactores solares, pero no se ha estudiado de manera experimental los efectos que tiene la distribución geométrica de los tubos dentro de la cavidad en su comportamiento térmico, en la inercia térmica ante los cambios de la irradiancia solar y con el flujo de aire dentro de los mismos. La caracterización se realizó en función del arreglo de los tubos en la cavidad, la estabilidad y homogeneidad de la temperatura entre los tubos y la evaluación de la inercia térmica del reactor en función de las variaciones de la irradiancia solar. Los resultados muestran que el arreglo propuesto tiene una buena estabilidad térmica y puede responder fácilmente ante cambios súbitos en la irradiancia solar. La diferencia mínima de temperatura alcanzada entre los tubos fue de 72°C cuando la temperatura del tubo central fue de 1200°C, equivalente a 6% de diferencia.

**PALABRAS CLAVE:** Reactor solar tubular, caracterización térmica, inercia térmica.

**ABSTRACT**

The main objective of this work is the thermal characterization of a multi-tubular cavity solar reactor (M&M) under concentrated solar radiation from the solar furnace of the Renewable Energy Institute of the UNAM (HoSIER); conceived to perform thermochemical reactions to produce clean fuels as the hydrogen and synthesis gas. There have been various proposals for solar reactors, but the effects of the geometric distribution of the tubes within the cavity on their thermal behavior, on thermal inertia with changes in solar irradiance and air flux inside them, have not been experimentally studied. The characterization was performed as a function of the tubes arrangements, the stability and the temperature homogeneity between tubes, and the thermal inertia evaluation as a function of solar irradiance. The results show that the proposed arrangement has good thermal stability and can easily respond to sudden changes in solar irradiance. The minimum temperature difference reached between the tubes was 72°C, when the central tube reaches 1200°C, equivalent to 6% difference.

**KEYWORDS:** Tubular solar reactor, thermal characterization, thermal inertia.

## INTRODUCCIÓN

Uno de los grandes retos para el uso de la energía solar concentrada en sistemas de generación de potencia, es hacer frente al carácter intermitente de la fuente y al ciclo día noche que se presenta. La generación continua de potencia es un factor preponderante para obtener mejores parámetros de rentabilidad en este tipo de instalaciones. El almacenamiento de la energía térmica ha sido estudiado ampliamente (Steinmann, 2015, Liu et al., 2016), para hacer frente a esa particularidad de la fuente, prevaleciendo las tecnologías de calor sensible. Una solución plausible es el almacenamiento termoquímico basado en los ciclos de reacciones endotérmicas y exotérmicas. Las primeras para almacenar la energía y la segunda para recuperar la energía almacenada (Pardo et al., 2014, Yan, Wang, Li, Wang, & Fred, 2015, Dizaji & Hosseini, 2018, Wu, Zhou, Doroodchi, Nellore, & Moghtaderi, 2018, Sunku Prasad, Muthukumar, Desai, Basu, & Rahman, 2019, Palacios, Barreneche, Navarro, & Ding, 2020). Otra solución ampliamente propuesta es la producción de vectores energéticos como son el hidrógeno o el gas de síntesis a partir de reacciones con ciclos termoquímicos o bien mediante la gasificación de materiales hidro-carbonosos (Glaser, 1958, Steinfeld, 2005). Para poder llevar a cabo esas reacciones es imprescindible contar con un receptor donde se éstas puedan llevar a cabo. Los reactores solares han sido concebidos desde los inicios de las propuestas para el almacenamiento termoquímico y la producción de hidrógeno y el craking de hidrocarburos gaseosos, como el metano presente en el gas natural. Son múltiples los diseños que se han propuesto para ese fin, ya sea con incidencia de radiación directa (M. Kogan & Kogan, 2003) (Trommer, Hirsch, & Steinfeld, 2004, A. Kogan, Kogan, & Barak, 2004, Hirsch & Steinfeld, 2004, Rodat, Abanades, & Flamant, 2009) o de forma indirecta (Dahl, Buechler, Weimer, Lewandowski, & Bingham, 2004). Recientemente se han propuesto una serie de reactores tubulares, principalmente para llevar a cabo el craking de metano (Rodat et al., 2009, Valdés-Parada, Romero-Paredes, & Espinosa-Paredes, 2011, Riahi, Atashkari, Mahmoudimehr, & Rodat, 2019) o reacciones para la producción de vectores energéticos (Valades-Pelayo, Arancibia-Bulnes, Villafan-Vidales, & Romero-Paredes, 2016, Tapia et al., 2019).

Para realizar la investigación de reacciones químicas solares susceptibles para el almacenamiento de energía térmica solar a elevada temperatura, la producción de hidrógeno y la producción de gas de síntesis a través de la gasificación de materiales hidro-carbonosos, se diseñó y construyó un reactor solar multitubular de cavidad cúbica que pudiera tener la posibilidad de llevar a cabo esas reacciones termoquímicas (patente en trámite MXa/2016)017256). El arreglo de los tubos dentro de la cavidad, reviste una gran importancia pues de ello depende la homogeneidad de la temperatura entre ellos y la estabilidad térmica. Previamente se simuló y se estableció la forma que debería tener el arreglo de los tubos dentro del cono de radiación solar en la cavidad (Valades-Pelayo et al., 2016). Para ello en este trabajo, el reactor solar se montó en el foco del concentrador solar HoSIER del Instituto de Energías Renovables de la UNAM, ubicado en Temixco, Morelos, México. Se probaron diferentes arreglos y se analizaron los perfiles de temperatura durante los procesos de calentamiento y enfriamiento. El arreglo optimizado durante la simulación mencionada, se tomó como base de partida para proponer otros arreglos que fueran similares. Así, se propusieron 4 arreglos diferentes que permitieran corroborar los resultados de la simulación y poder determinar la inercia térmica y los perfiles de temperatura respecto al tiempo en los procesos de calentamiento y enfriamiento.

## METODOLOGÍA

El Horno Solar del Instituto de Energías Renovables (HoSIER) está conformado por un heliostato, un atenuador de persianas para controlar la radiación que incide en el concentrador solar y ser proyectada en el reactor solar como se muestra en la Fig. 1. La Figura 2 muestra una vista lateral del interior del reactor cubico, donde se tienen distintas capas de aislamiento en alúmina con un espesor de una pulgada cada uno; tubos de acero inoxidable cedula 316 con un diámetro de una pulgada por los cuales se tiene la inyección de aire comprimido con un flujo de un 1 L/min en cada tubo. En la parte frontal del reactor se tiene un circuito de agua de enfriamiento con un flujo constante para mantener la ventana protegida de sobrecalentamiento. La cavidad está hecha de placas de fibra grafito; un compuesto que fue caracterizado previamente en sus propiedades termo-físicas (Macias et al., 2019). Ésta tiene una inyección de nitrógeno por la parte lateral para mantener una presión positiva respecto al medio ambiente y evitar la entrada de oxígeno del aire, que puede perjudicar este material a elevada temperatura. El flujo de nitrógeno establecido fue de 500 ml/min.

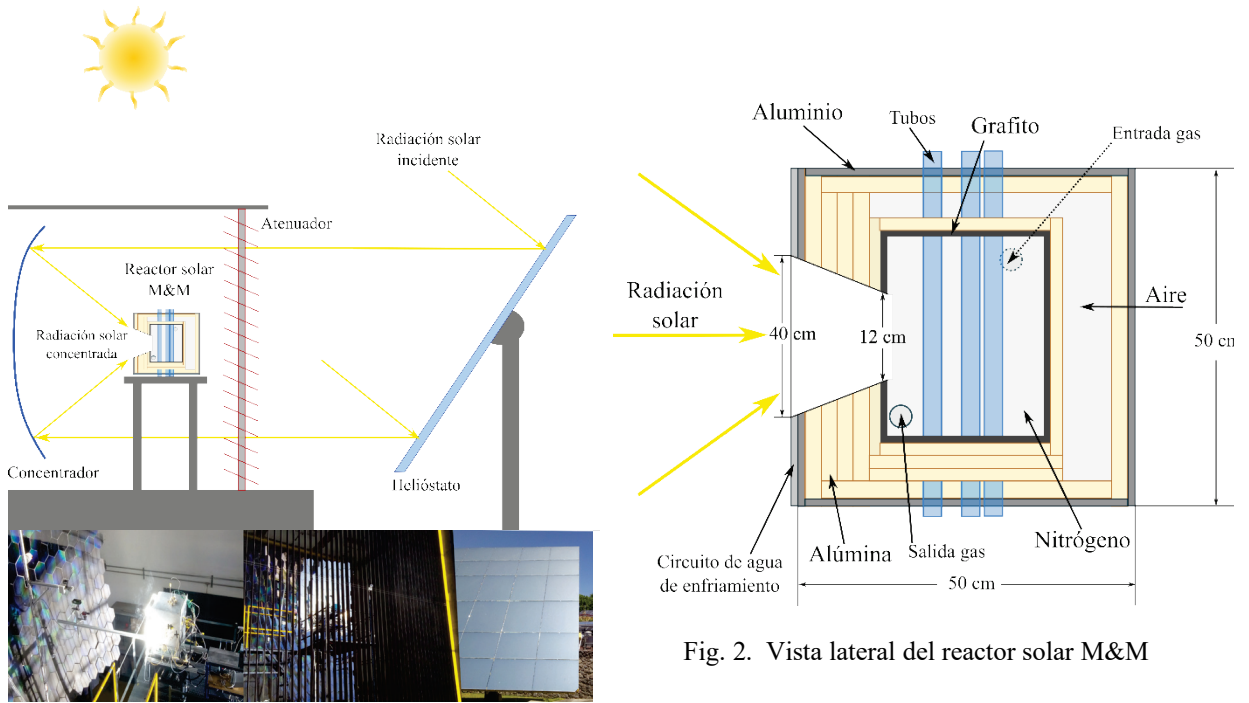


Fig. 1. Diagrama esquemático del HoSIER

El diseño de este reactor es flexible al número de tubos que se pueden emplear (hasta 9 tubos) y a distintos arreglos para ser evaluados. En la Figura 3 se muestran los distintos arreglos utilizando 5 tubos que fueron los que se evaluaron experimentalmente en el HoSIER.

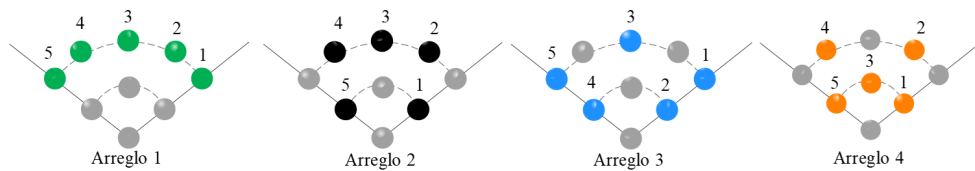


Fig. 3. Arreglo de tubos del reactor multitubular

Para la caracterización térmica del reactor M&M, éste se instrumentó con 26 termopares tipo K colocados estratégicamente como se muestra en la Fig. 4. El sistema de adquisición de datos se programó para hacer mediciones cada 10 segundos y así poder evaluar su comportamiento para los distintos arreglos propuestos.

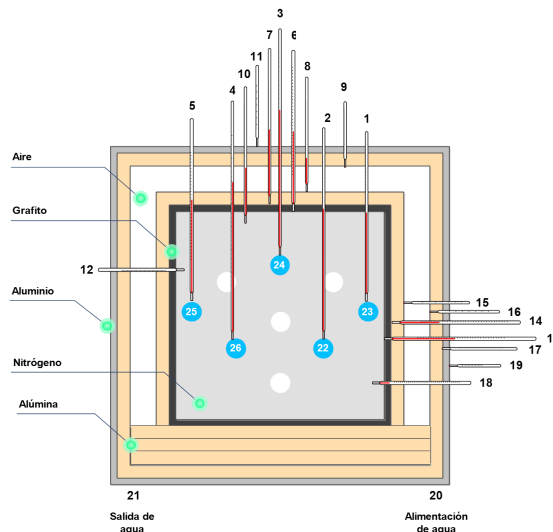


Fig. 4. Vista superior y distribución de termopares en el reactor M&M

Cada arreglo se estructuro dentro del cono de incidencia de la radiación solar y estos se fueron cambiando una vez que se terminó el set experimental para cada uno de ellos. El protocolo experimental consistió en lo siguiente:

1. Para el calentamiento del reactor, en primera estancia se propuso una rampa de calentamiento lenta, partiendo con apertura del atenuador en 20% manteniendo esa apertura por 10 minutos para después incrementar al 30, 40, 50, 70, 90 y 100% de apertura con el mismo intervalo de tiempo entre cada una de ellas. Esto se hizo con el objeto de probar el comportamiento del reactor contra los choques térmicos. Posteriormente se propuso una rampa de calentamiento rápida, partiendo con los mismos porcentajes de apertura, pero cada 2 minutos. La finalidad de esta segunda opción fue ver su comportamiento en condiciones extremas y poder reducir el tiempo de experimentación para cada arreglo de tubos.
2. Una vez alcanzado el 100% de apertura del atenuador, el reactor se mantiene sin modificar ningún parámetro hasta que tienda al equilibrio térmico. Para ello se monitorean las temperaturas interiores de los tubos y de la cavidad.
3. Inicialmente se realizaron diferentes juegos de apertura y cierre para identificar la magnitud de la inercia térmica y los efectos sobre esta cuando se simula el pasaje de nubes con el cierre parcial o total del atenuador. Por ello, cuando se ha alcanzado el 100% de apertura y se tiene una estabilidad en la temperatura, se realiza un cierre parcial del atenuador al 50%, y una vez que se estabiliza se vuelve a abrir el atenuador al 100%. Se deja que alcance de nuevo una estabilidad para ahora hacer cierres totales en los que se deja que el reactor disminuya en 250°C respecto a la temperatura máxima alcanzada, para después volver abrir súbitamente el atenuador al 100%. Esta última variación se repite con el objeto de corroborar que el comportamiento del reactor se mantiene y determinar que juego de apertura en el atenuador se empleara para cada arreglo propuesto.
4. Otro parámetro a evaluar es el flujo de aire que se inyecta en cada uno de los tubos para determinar el comportamiento del reactor con esta variable. Este flujo se estableció en 100, 200, 300 y 1000 ml/min/tubo. Para ello se propuso hacer una rampa de calentamiento rápida y una vez estable el reactor hacer un cierre total para dejar que disminuya la temperatura en 250°C y abrir súbitamente el atenuador al 100%. Cuando se vuelve a estabilizar el reactor, se hace la variación del flujo en los tubos y se repite el cierre total y apertura total. Algoritmo que se hace para cada flujo. Esto con la finalidad de determinar con que flujo se trabajará en todos los arreglos propuestos y los efectos que tiene ese flujo en la temperatura interior de los tubos.

A partir de las rutinas descritas, se estableció un régimen de calentamiento elevado, al establecer la apertura del atenuador en 20, 30, 40, 50, 70, 90 y 100% cada dos minutos. Habiendo alcanzado cierta estabilidad, se hace un primer cierre total del atenuador hasta que se enfría en 250°C el interior del tubo que alcanzó la máxima temperatura. Se reabre el atenuador al 100% hasta que se alcanza una cierta estabilidad térmica y se repite por una segunda vez el procedimiento. Se detectó que la variación del flujo de aire al interior de los tubos no presenta cambios significativos, por lo que se decidió mantener un flujo constante de 1000 ml/min/tubo. Este procedimiento fue empleado en todos los arreglos propuestos.

Se realizaron varias pruebas para cada uno de esos arreglos. El arreglo que presentó el mejor desempeño es el No. 3, el cual se muestra su montaje en el reactor M&M en la Fig 5. Los resultados obtenidos para este arreglo se mostrarán a detalle.

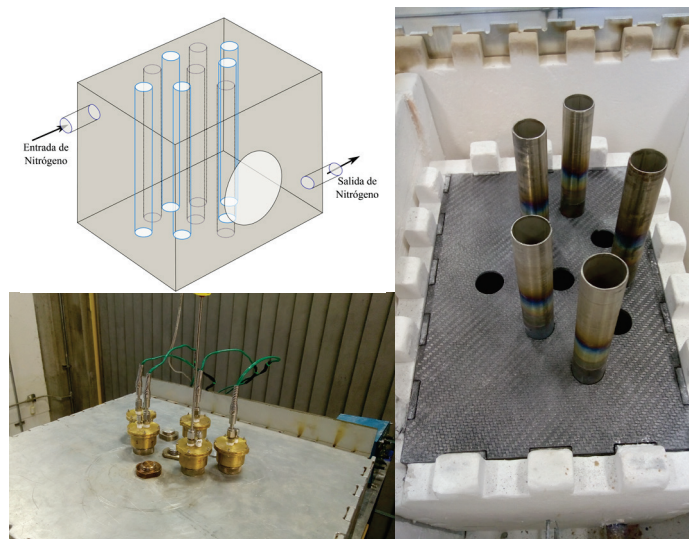


Fig. 5. Vista del arreglo 3 en el reactor M&M



RESULTADOS Y COMENTARIOS

En esta sección se presentan los resultados obtenidos durante las experiencias realizadas para caracterizar térmicamente el reactor solar M&M. De los cuatro arreglos propuestos, y mencionados en la metodología, se seleccionó aquel que presenta un mejor desempeño térmico, en este caso el arreglo 3.

Perfiles de Temperatura.

Acorde con los resultados obtenidos previamente de la simulación térmica del reactor (Valades-Pelayo et al., 2016) este arreglo es en el que se obtiene una mayor homogeneidad en la temperatura interna de los tubos. En la Figura 6 se presenta el arreglo seleccionado (Fig. 6a) junto con el resultado que arrojó la simulación (Fig. 6b) del arreglo de los tubos en el que se obtiene una temperatura más homogénea.

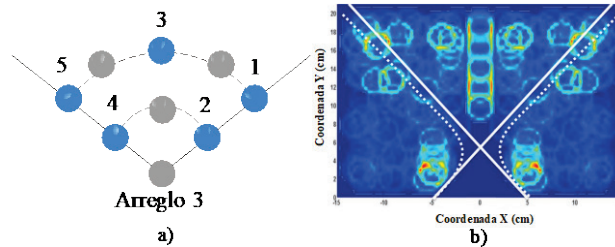


Fig. 6. Arreglo de tubos, a) arreglo No. 3, b) resultado de la simulación

En la Figura 7 se presenta el perfil de temperatura transitorio del interior los cinco tubos para el día que presentó una mayor homogeneidad en la irradiancia solar. Con objeto de poder apreciar la inercia térmica del reactor y al mismo tiempo simular los efectos que se tendrían en la temperatura interna de cada tubo con el paso de nubes, durante el proceso de calentamiento, se realizaron dos cierres completos del atenuador durante 2 a 3 minutos respectivamente hasta obtener una caída en la temperatura de 250 °C. En una primera vista, se observa que a la apertura del atenuador, el perfil de temperatura adquiere una pendiente casi vertical, esto es el incremento en la temperatura es muy rápida. Así también, la diferencia de temperaturas entre los tubos se va reduciendo conforme se va alcanzando mayor temperatura y se acerca al equilibrio térmico. Se puede apreciar que durante el apagado del reactor los tubos alcanzan rápidamente el equilibrio térmico logrando obtener casi la misma temperatura para todos los tubos. Al comparar este resultado con el obtenido con el arreglo 1 (Fig. 8), la diferencia de temperaturas en éste último es mayor para los tubos extremos y mismo en el equilibrio térmico simulado, con el cierre parcial del atenuador (50%), el que se mantuvo durante 35 minutos. Aún así, la diferencia de temperatura entre los tres tubos centrales y los dos extremos fue constante y se estabilizó en un gradiente de 100 °C.

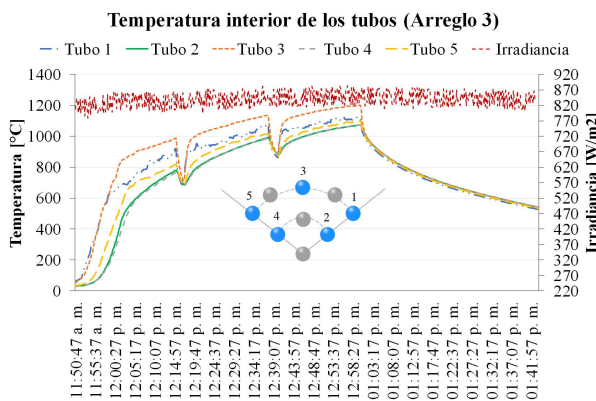


Fig. 7. Perfil de temperatura en el interior de los tubos del arreglo 3

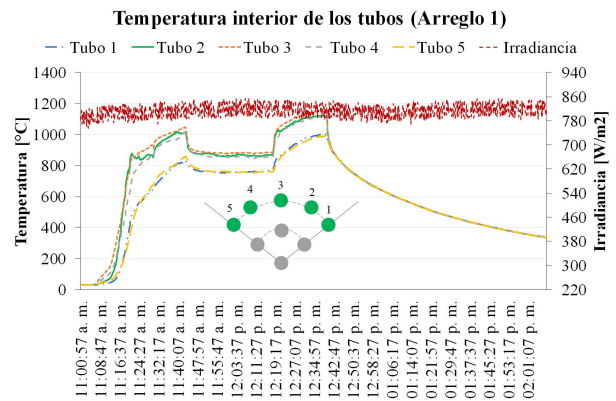


Fig. 8. Perfil de temperatura en el interior de los tubos del arreglo 1

Respecto al proceso de calentamiento para el arreglo 3, en el que se fue abriendo el atenuador paulatinamente, tal como se describió en la metodología, se observa una tasa continua de calentamiento del orden de 1.21 °C/seg para el tubo No 3. Los otros tubos mantienen un gradiente constante durante la primera rampa de calentamiento y van tomando un perfil casi paralelo respecto al tubo 3. En este proceso de calentamiento, el gradiente de temperatura entre los tubos crece muy rápidamente. Como era de esperarse. El tubo tres, quien recibe mayormente la radiación solar concentrada, incrementa rápidamente su temperatura mientras los demás tubos se calientan más lentamente.

Conforme evoluciona el calentamiento, esa diferencia de temperatura se va reduciendo hasta alcanzar un mínimo. La cavidad de grafito, ayuda a homogeneizar la temperatura en su interior y con ello logra pequeños gradientes entre los tubos. Se encontró que el gradiente de temperatura entre los tubos se va reduciendo conforme se va alcanzando el equilibrio térmico. En la Figura 9, se aprecia la evolución de la diferencia de temperatura entre los tubos 1, 2, 4 y 5 respecto al tubo 3. Se observa que al incrementar la temperatura y acercarse al equilibrio, ese gradiente de temperatura entre los tubos se va reduciendo paulatinamente. En las experiencias con este arreglo, se alcanzó un gradiente de 72 °C cuando la temperatura del tubo central llegó a los 1200 °C; esto representa una diferencia del 6%.

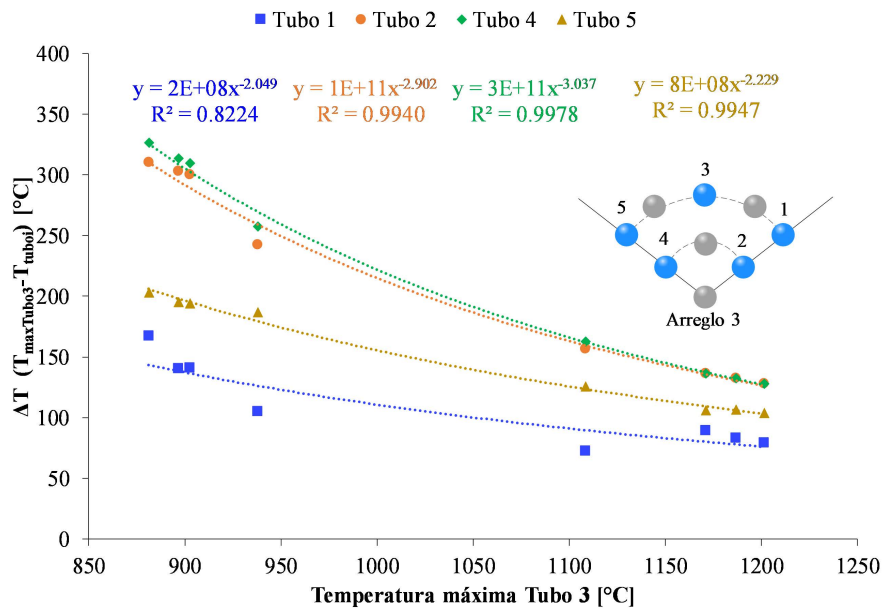


Fig. 9. Temperatura máxima tubo 3 vs la diferencia de temperatura entre tubo 3 y los tubos 1, 2, 4 y 5.

### Inercia Térmica

Para la evaluación de la inercia térmica se tomó primeramente en cuenta el perfil de temperatura de enfriamiento en cada arreglo. Se observó que el perfil era exactamente el mismo para cada caso y, tal como se observa en las Fig. 10a y 10b, durante el cierre del atenuador se observó la tasa de enfriamiento de los tubos que se presentó cuando el atenuador se mantuvo cerrado por el tiempo necesario hasta alcanzar un enfriamiento equivalente a 250°C del tubo central. Independientemente del arreglo de los tubos, el perfil de enfriamiento se conserva prácticamente igual. Tal como se puede prever, a mayor temperatura respecto al medio ambiente, la tasa de enfriamiento al inicio es mayor y conforme se va enfriando y se acerca a la temperatura del entorno, la curva se va haciendo asintótica y la temperatura de los tubos se va acercando a la temperatura del tubo central. Tomando en cuenta que las pérdidas más importantes en el reactor son por re-radiación y emisión de la cavidad hacia el exterior a través de la ventana, esa tasa de enfriamiento se debe mayormente a ese intercambio de calor. En la Figura 10c, se observa toda la curva de enfriamiento una vez que se ha concluido la corrida experimental. Es de notarse que los tubos extremos (1 y 5) son los que mantienen un gradiente mayor, en tanto los centrales (2, 3 y 4) prácticamente alcanzan la misma temperatura. En la Figura 10d, se aprecia la re-radiación hacia la apertura de la ventana. Si bien esta apertura es pequeña (12 cm de diámetro) aporta las pérdidas más importantes.

Si se compara con las pérdidas a través de las paredes del reactor, las cuales se encuentran debidamente aisladas, su contribución a ese enfriamiento es mínimo. En la Figura 11 se presenta el perfil de temperatura que se tiene a través de la pared posterior del reactor y una pared lateral. El hecho que el aislamiento del reactor haya sido concebido con una capa de aire estanca, ayudó enormemente a reducir de forma considerable esas pérdidas, las cuales se estimaron en 30 W promedio para cada pared. Se debe hacer notar que justamente el diferencial de temperatura más pequeño es debida a la capa de aire.

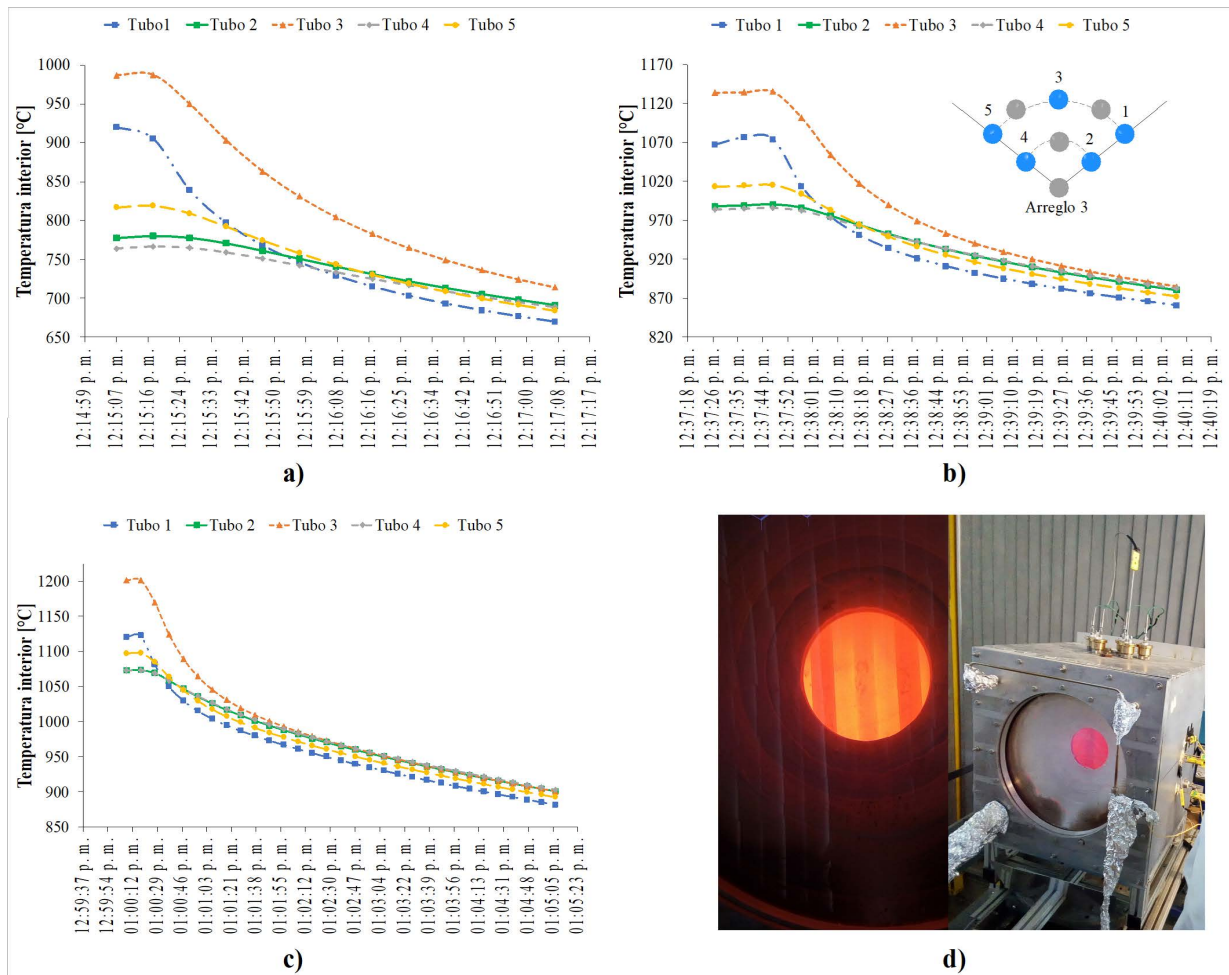


Fig. 10. Perfil de temperatura interior de los tubos del reactor solar M&M. a) durante el primer cierre total, b) al segundo cierre total, c) al fin del experimento, d) vista del reactor al concluir la corrida experimental.

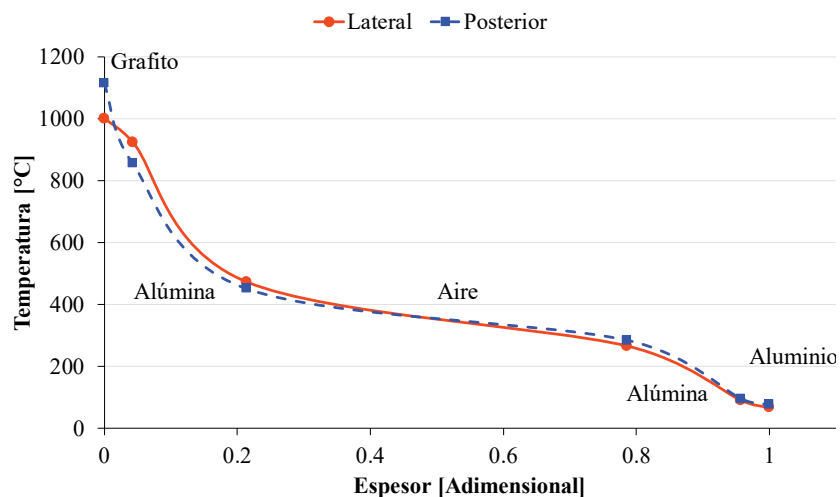


Fig. 11. Perfil de temperatura entre las capas de aislamiento del reactor solar M&M

### CONCLUSIONES

El reactor solar M&M se caracterizó térmicamente para determinar el comportamiento de la temperatura al interior de 5 tubos de acero inoxidable 316, cuando son sometidos a los procesos de calentamiento y enfriamiento en el foco del concentrador solar. Este mostró resultados muy interesantes. Se observó que el reactor es flexible a los cambios súbitos de irradiación solar, ya que en tiempos cortos se logra una buena estabilidad y recupera rápidamente la temperatura, y soporta los choques térmicos que pudieran presentarse debido a las condiciones climáticas del sitio.

De esta forma se simuló el paso de nubosidad, mediante el cierre temporal del atenuador, o bien, cuando se tenía un día despejado y se podría alcanzar niveles de irradiancia de hasta  $1000 \text{ W/m}^2$ . En los casos que se llegó a tener una irradiancia elevada, se hacía un cierre parcial del atenuador cuando el proceso que se deseaba llevar a cabo no requería de temperaturas elevadas ( $> 1200 \text{ }^\circ\text{C}$ ).

Con el arreglo No. 3, seleccionado por ser el que mantenía un gradiente menor entre los tubos, el comportamiento de la temperatura en el interior de los tubos, mostró una muy buena homogeneidad, con un gradiente de temperatura máximo de  $72^\circ\text{C}$  con respecto al tubo No 3, el cuál es el que alcanza la temperatura más elevada. El arreglo No. 3 fue el que presentó el mejor desempeño, ya que la distribución de la radiación fue más homogénea entre los tubos con respecto a los otros arreglos. Un parámetro importante que ayudó a mantener ese comportamiento homogéneo en el reactor, fue la cavidad fabricada con placas de fibra de grafito. Éstas permitieron tener ese comportamiento entre los 5 tubos.

Para la evaluación de la inercia térmica, se observó que el perfil era exactamente el mismo para cada caso. Al cierre del reactor e independientemente del arreglo, el perfil de enfriamiento se conserva constante. Las pérdidas más importantes en el reactor son por re-radiación y emisión de la cavidad hacia el exterior a través de la ventana. Por consiguiente la tasa de enfriamiento se debe mayormente a ese intercambio de calor. Además, al comparar éstas con las pérdidas a través de las paredes del reactor, las cuales se encuentran debidamente aisladas, la contribución conductiva es mínima.

La caracterización térmica experimental del reactor solar M&M, demuestra que puede ser empleado para distintos procesos y que se pueden alcanzar temperaturas suficientemente elevadas para llevar a cabo reacciones de producción de hidrógeno mediante reacciones termoquímicas RedOx, las reacciones de gasificación y cualquier otro tipo de reacciones termoquímicas. Debido a la flexibilidad del reactor, el arreglo y los materiales de los tubos se pueden adaptar a las necesidades particulares del proceso.

#### AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen el apoyo económico recibido a través del Centro Mexicano de Innovación en Energía Solar (CeMIE-Sol). Convocatoria 2013-02, del Fondo SECTORIAL CONACYT-SENER-SUSTENTABILIDAD ENERGÉTICA, dentro del Proyecto Estratégico No. 10, con título: "COSOLPI", por medio del cual fue posible apoyar la formación de recursos humanos a nivel posgrado. Los autores también agradecen el invaluable apoyo técnico proporcionado por el Ing. Jesús Quiñones Aguilar durante el montaje del reactor y las experiencias llevadas a cabo

#### REFERENCIAS

- Dahl, J. K., Buechler, K. J., Weimer, A. W., Lewandowski, A., & Bingham, C. (2004). Solar-thermal dissociation of methane in a fluid-wall aerosol flow reactor. *International Journal of Hydrogen Energy*, 29(7), 725–736. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2003.08.009>
- Dizaji, H. B., & Hosseini, H. (2018). A review of material screening in pure and mixed-metal oxide thermochemical energy storage (TCES) systems for concentrated solar power (CSP) applications. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 98(September), 9–26. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.09.004>
- Glaser, P. E. (1958). Engineering research with a solar furnace. *Solar Energy*, 2(2), 7–10. [https://doi.org/10.1016/0038-092X\(58\)90025-2](https://doi.org/10.1016/0038-092X(58)90025-2)
- Hirsch, D., & Steinfeld, A. (2004). Solar hydrogen production by thermal decomposition of natural gas using a vortex-flow reactor. *International Journal of Hydrogen Energy*, 29(1), 47–55. [https://doi.org/10.1016/S0360-3199\(03\)00048-X](https://doi.org/10.1016/S0360-3199(03)00048-X)
- Kogan, A., Kogan, M., & Barak, S. (2004). Production of hydrogen and carbon by solar thermal methane splitting. II. Room temperature simulation tests of seeded solar reactor. *International Journal of Hydrogen Energy*, 29(12), 1227–1236. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2003.12.002>
- Kogan, M., & Kogan, A. (2003). Production of hydrogen and carbon by solar thermal methane splitting. I. The unseeded reactor. *International Journal of Hydrogen Energy*, 28(11), 1187–1198. [https://doi.org/10.1016/S0360-3199\(02\)00282-3](https://doi.org/10.1016/S0360-3199(02)00282-3)



- Liu, M., Steven Tay, N. H., Bell, S., Belusko, M., Jacob, R., Will, G., ... Bruno, F. (2016). Review on concentrating solar power plants and new developments in high temperature thermal energy storage technologies. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 53, 1411–1432. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.09.026>
- Macias, J. D., Bante-Guerra, J., Cervantes-Alvarez, F., Rodriguez-Gattorno, G., Arés-Muzio, O., Romero-Paredes, H., ... Alvarado-Gil, J. J. (2019). Thermal Characterization of Carbon Fiber-Reinforced Carbon Composites. *Applied Composite Materials*, 26(1), 321–337. <https://doi.org/10.1007/s10443-018-9694-0>
- Palacios, A., Barreneche, C., Navarro, M. E., & Ding, Y. (2020). Thermal energy storage technologies for concentrated solar power – A review from a materials perspective. *Renewable Energy*, 156, 1244–1265. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2019.10.127>
- Pardo, P., Deydier, A., Anxionnaz-Minvielle, Z., Rougé, S., Cabassud, M., & Cognet, P. (2014). A review on high temperature thermochemical heat energy storage. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 32, 591–610. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2013.12.014>
- Riahi, A., Atashkari, K., Mahmoudimehr, J., & Rodat, S. (2019). The influences of major geometrical parameters on detailed radiative performance of a multi-tubular solar thermochemical reactor. *Applied Thermal Engineering*, 159(September 2018), 113793. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2019.113793>
- Rodat, S., Abanades, S., & Flamant, G. (2009). High-temperature solar methane dissociation in a multitubular cavity-type reactor in the temperature range 1823–2073 K. *Energy and Fuels*, 23(5), 2666–2674. <https://doi.org/10.1021/ef900037v>
- Steinfeld, A. (2005). Solar thermochemical production of hydrogen - A review. *Solar Energy*, 78(5), 603–615. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2003.12.012>
- Steinmann, W. D. (2015). Thermal energy storage systems for concentrating solar power (CSP) technology. *Advances in Thermal Energy Storage Systems: Methods and Applications*. Woodhead Publishing Limited. <https://doi.org/10.1533/9781782420965.4.511>
- Sunku Prasad, J., Muthukumar, P., Desai, F., Basu, D. N., & Rahman, M. M. (2019). A critical review of high-temperature reversible thermochemical energy storage systems. *Applied Energy*, 254(August), 113733. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2019.113733>
- Tapia, E., González-Pardo, A., Iranzo, A., Romero, M., González-Aguilar, J., Vidal, A., ... Rosa, F. (2019). Multi-tubular reactor for hydrogen production: CFD thermal design and experimental testing. *Processes*, 7(1), 1–15. <https://doi.org/10.3390/pr7010031>
- Trommer, D., Hirsch, D., & Steinfeld, A. (2004). Kinetic investigation of the thermal decomposition of CH<sub>4</sub> by direct irradiation of a vortex-flow laden with carbon particles. *International Journal of Hydrogen Energy*, 29(6), 627–633. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2003.07.001>
- Valades-Pelayo, P. J., Arancibia-Bulnes, C. A., Villafan-Vidales, H., & Romero-Paredes, H. (2016). Geometric optimization of a solar cubic-cavity multi-tubular reactor. *AIP Conference Proceedings*, 1734, 575–581. <https://doi.org/10.1063/1.4949089>
- Valdés-Parada, F. J., Romero-Paredes, H., & Espinosa-Paredes, G. (2011). Numerical simulation of a tubular solar reactor for methane cracking. *International Journal of Hydrogen Energy*, 36(5), 3354–3363. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2010.12.022>
- Wu, S., Zhou, C., Doroodchi, E., Nellore, R., & Moghtaderi, B. (2018). A review on high-temperature thermochemical energy storage based on metal oxides redox cycle. *Energy Conversion and Management*, 168(April), 421–453. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2018.05.017>
- Yan, T., Wang, R. Z., Li, T. X., Wang, L. W., & Fred, I. T. (2015). A review of promising candidate reactions for chemical heat storage. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 43, 13–31. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.11.015>