

INFLUENCIA EN EL RANURADO INTERNO DE UN TUBO RECEPTOR SOBRE LA GENERACIÓN DIRECTA DE VAPOR, DEFORMACIÓN Y ESFUERZOS TÉRMICOS

Data de aceite: 02/05/2024

V.M. Maytorena

Universidad de Sonora, DIQyM-UNISON,
Blvd. Luis Encinas y Rosales S/N,
Hermosillo, Sonora
* Autor de correspondencia

S. Moreno

Universidad de Sonora, DIQyM-UNISON,
Blvd. Luis Encinas y Rosales S/N,
Hermosillo, Sonora

R.L. Duran

Universidad de Sonora, DIQyM-UNISON,
Blvd. Luis Encinas y Rosales S/N,
Hermosillo, Sonora

J.F. Hinojosa

Universidad de Sonora, DIQyM-UNISON,
Blvd. Luis Encinas y Rosales S/N,
Hermosillo, Sonora
* Autor de correspondencia

tubos son representativos de los receptores tubulares externos empleados en sistemas de torre central, que operan mediante la generación directa de vapor (DSG), bajo una concentración solar no uniforme, alcanzando un valor máximo de 0.93 MW/m^2 . Además, se analiza un flujo másico subenfriado de 0.678 kg/s a 472 K y una presión de 4.5 MPa . La comparativa abarca los campos de temperatura, gradientes térmicos en la pared del tubo, estados de subenfriamiento y sobrecalentamiento, detección del punto de inicio de la ebullición nucleada y de la generación neta de vapor, así como las deformaciones y esfuerzos térmicos para cada sistema. Los resultados revelan que el tubo ranurado consigue una reducción significativa tanto en los gradientes térmicos como en la temperatura máxima, logrando disminuciones del 27% y 130 K , respectivamente; los esfuerzos térmicos se reducen en un 33%, las caídas de presión en un 20%, y se mantiene la calidad del vapor en la salida (11%). Se concluye que las ranuras, dispuestas estratégicamente en el interior del tubo, ofrecen una solución viable para operar el receptor tubular con mayor seguridad estructural y eficiencia térmica, sin comprometer la generación de vapor. Esto contribuye al aumento de la

RESUMEN: Este estudio se centra en el análisis de una estrategia pasiva mediante el uso de ranuras, con el objetivo de atenuar los gradientes térmicos presentes en los tubos receptores solares estándar, lisos, y de esta manera, mejorar su estabilidad estructural. La investigación comprende la comparación entre dos tubos: uno liso, de tipo convencional, y otro ranurado. Estos

durabilidad de estas tecnologías solares.

PALABRAS-CLAVE: Tubo ranurado, Receptor tubular, Torre solar, Generación directa de vapor, Estrés térmico, Deformación.

INFLUENCE OF THE INTERNAL GROOVE OF A RECEIVING TUBE ON THE DIRECT GENERATION OF STEAM, DEFORMATION AND THERMAL STRESSES

ABSTRACT: This study focuses on the analysis of a passive strategy through the use of grooves, aimed at mitigating the thermal gradients present in standard, smooth solar receiver tubes, thereby improving their structural stability. The research involves a comparison between two tubes: one smooth, of conventional type, and another grooved. These tubes are representative of the external tubular receivers used in central tower systems, which operate through direct steam generation (DSG), under non-uniform solar concentration, reaching a maximum value of 0.93 MW/m². Additionally, a subcooled mass flow of 0.678 kg/s at 472 K and a pressure of 4.5 MPa are analyzed. The comparison encompasses temperature fields, thermal gradients in the tube wall, states of subcooling and superheating, detection of the onset of nucleate boiling and net vapor generation, as well as deformations and thermal stresses for each system. The results reveal that the grooved tube achieves a significant reduction in both thermal gradients and maximum temperature, with decreases of 27% and 130 K, respectively; thermal stresses are reduced by 33%, pressure drops by 20%, and the quality of the vapor at the outlet is maintained (11%). It is concluded that grooves, strategically placed inside the tube, offer a viable solution for operating the tubular receiver with greater structural safety and thermal efficiency, without compromising steam generation. This contributes to the increased durability of these solar technologies.

KEYWORDS: Grooved tube, Tubular receiver, Solar tower, Direct steam generation, Thermal stress, Deformation

INTRODUCCIÓN

Ante la urgencia de mitigar las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) y los consiguientes desafíos ambientales, se hace imprescindible la reducción en el uso de combustibles fósiles, promoviendo en su lugar el desarrollo y adopción de tecnologías basadas en energías renovables. Dentro de este contexto, la energía solar emerge como una alternativa prometedora para la producción de electricidad limpia, destacando su potencial a través de sistemas fotovoltaicos y de energía solar concentrada (CSP, por sus siglas en inglés) (Praveen et al., 2018; Awan, 2019). Entre las tecnologías CSP, las de torre central, cilindroparabólicas, Fresnel lineales y discos Stirling se posicionan como las principales (González-Roubaud, Pérez-Osorio y Prieto, 2017), siendo las plantas de potencia de torre central con generación directa de vapor (DSG, por sus siglas en inglés) identificadas recientemente como una de las opciones más prometedoras dentro del ámbito CSP (Saghafifar, Mohammadi y Powell, 2020). La DSG facilita la transformación directa del agua en vapor sobrecalentado al pasarla por tubos receptores expuestos a la energía solar concentrada, vapor que luego impulsa las

turbinas del ciclo de potencia Rankine (Prieto et al., 2018). Sin embargo, esta modalidad de operación puede inducir gradientes térmicos significativos y diferencias de temperatura entre las caras irradiadas y no irradiadas de los tubos, originando estrés térmico y deformaciones (Montoya et al., 2018; Wan et al., 2018; Maytorena et al., 2021).

Para mejorar la eficiencia térmica y reducir los riesgos estructurales asociados a los receptores tubulares, se han explorado soluciones como la incorporación de hoyuelos, ranuras y aletas en la superficie interna de estos tubos (Bellos, Tzivanidis y Tsimpoukis, 2018; Bilal Awan et al., 2020; Peng, Li y Liang, 2020). Dado este contexto, el presente estudio propone analizar el impacto de introducir ranuras en un tubo receptor convencional, liso, perteneciente a un sistema de torre central con DSG. El objetivo es evaluar cómo estas modificaciones pueden contribuir a la reducción de la temperatura y los gradientes térmicos en el tubo receptor, así como a la mejora en el desempeño estructural y la prolongación de la vida útil de estas tecnologías solares.

METODOLOGÍA

Definición del problema físico

Se eligió como objeto de estudio un tubo que simula ser un receptor tubular externo operando bajo el sistema de DSG. Este tubo está elaborado con la aleación HAYNES® 230®, característica por su alta resistencia y durabilidad, y presenta una longitud total (L) de 10 metros.

El diseño inicial se basa en un tubo con una superficie interna sin modificaciones, conocido como tubo liso. Este modelo cuenta con un espesor de pared de 5 mm (t) y un radio externo (r_o) de 12.7 mm. En la Figura 1, se realiza una comparativa visual entre el tubo liso tradicional y el diseño innovador propuesto: el tubo ranurado. Las ranuras incorporadas al tubo ranurado se caracterizan por tener una profundidad de 2 mm y están dispuestas sobre la pared interna del tubo en un arco que comprende desde los 270° hasta los 90°. Este diseño específico asegura que el tubo ranurado mantenga un espesor mínimo de pared (t_{\min}) de 3mm. Además, incorpora tres bordes transversales con un área de 4 mm² cada uno, que podrían funcionar eficazmente como aletas longitudinales proporcionando soporte estructural adicional. Estos bordes están dispuestos de manera equidistante, cada uno separado por un ángulo $\Delta\theta$ de 45°.

Esta configuración busca no solo mejorar la eficiencia térmica del sistema DSG mediante una distribución más uniforme del calor, sino también reforzar la resistencia y estabilidad estructural del tubo bajo condiciones de operación exigentes.

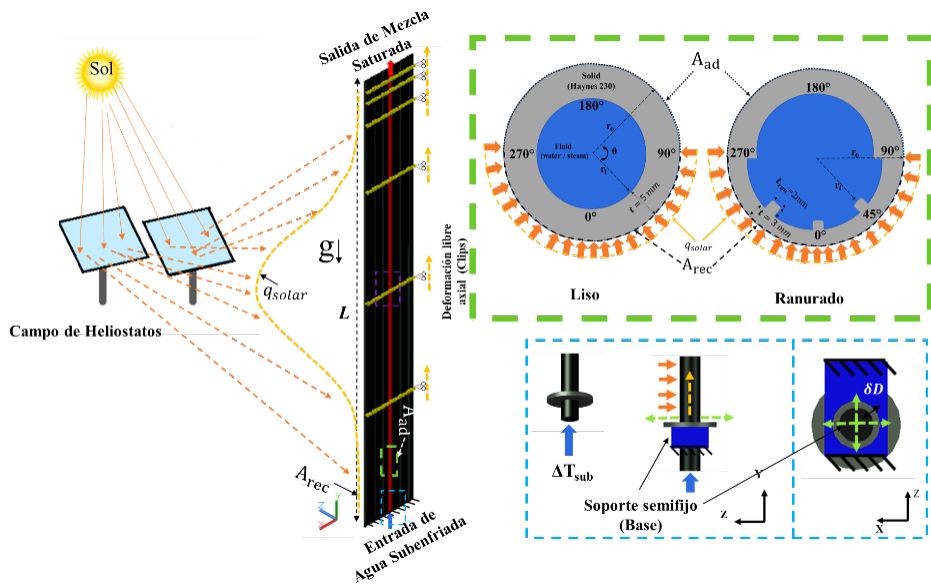


Fig. 1. Esquema del sistema físico: Receptores tabulares externos

Para cada receptor, el agua se introduce desde la parte inferior bajo condiciones de subenfriamiento ($\Delta T_{\text{sub}} \approx 60\text{K}$), manteniendo una presión de 4.5 MPa y un caudal de 0.678 kg/s. Se asume un flujo solar neto (q_{solar}) de 0.8 MW/m² en promedio, el cual es simétrico, pero no uniforme, alcanzando un pico de 0.935 MW/m² en $L=5\text{m}$. Este flujo solar incide sobre el área designada para la recepción (A_{rec}), que corresponde al 50% de la superficie total del tubo receptor, mientras que la parte restante se considera adiabática (A_{ad}), tal como se detalla en la Figura 1.

Los receptores analizados están fijados mediante seis clips de 1 pulgada de longitud y 3 pulgadas de largo con un espesor de 2 mm, distribuidos estratégicamente a lo largo de L (en las posiciones 2.5m, 5.0m, 7.5m, 9.0m, 9.5m, 9.75m, y 10m) y ubicados en la zona A_{ad} a $\theta=180^\circ$. Estos clips restringen el movimiento del tubo a desplazamientos axiales en sus puntos de fijación (Y). El soporte base facilita la expansión térmica ilimitada del tubo y permite una deformación máxima de 2 mm (δD) en el plano ZX, limitando las deformaciones del tubo a la dirección del flujo de agua (Y+), como se muestra en la Figura 1 (marco azul punteado, en la esquina inferior derecha). Finalmente, el soporte superior solo restringe la deformación en la dirección Z. Las propiedades termofísicas del agua/vapor fueron tomadas de (Maytorena and Hinojosa, 2019a) y las propiedades mecánicas de (Maytorena et al., 2021).

Modelos matemáticos, independencias de malla y algoritmos de solución

Para el modelado del cambio de fase se implementó un enfoque euleriano bifásico, fundamentado en las ecuaciones de continuidad, cantidad de movimiento y energía para cada fase (líquida y de vapor). Además, se incorporó el modelo de ebullición en la pared RPI modificado como término fuente, representando el flujo de calor en la pared interna de los tubos. Estos modelos son descritos con amplitud en Maytorena and Hinojosa (2019b). En cuanto al análisis estructural, se basó en el modelo de un tubo cilíndrico hueco, considerando la influencia de los campos de temperatura y los puntos de anclaje, descrito exhaustivamente en Maytorena et al. (2021). Los sistemas modelados fueron analizados en geometrías tridimensionales (3D) y bajo condiciones de estado estacionario. La resolución de los modelos matemáticos se llevó a cabo mediante el uso de ANSYS FLUENT para la dinámica de fluidos computacional (CFD) y ANSYS Static Structural para el análisis por elementos finitos (FEA), ambos en su versión 16.

Comparación con datos experimentales (validación)

Para validar el modelo de cambio de fase (generación directa de vapor), se empleó un experimento documentado por Bartolemei y Chanturiya (1967). Dicho experimento utilizó una tubería de acero dispuesta verticalmente (de superficie lisa), con un diámetro interior/ exterior de 15.4 mm/25.4 mm y una longitud de 2 m. Se aplicó un flujo de calor uniforme de 0.57 MW/m² a la tubería. El agua fue introducida en la parte inferior de la tubería a un flujo másico de 900 kg/m²s (G) y un subenfriamiento (ΔT_{sub}) de 60 K.

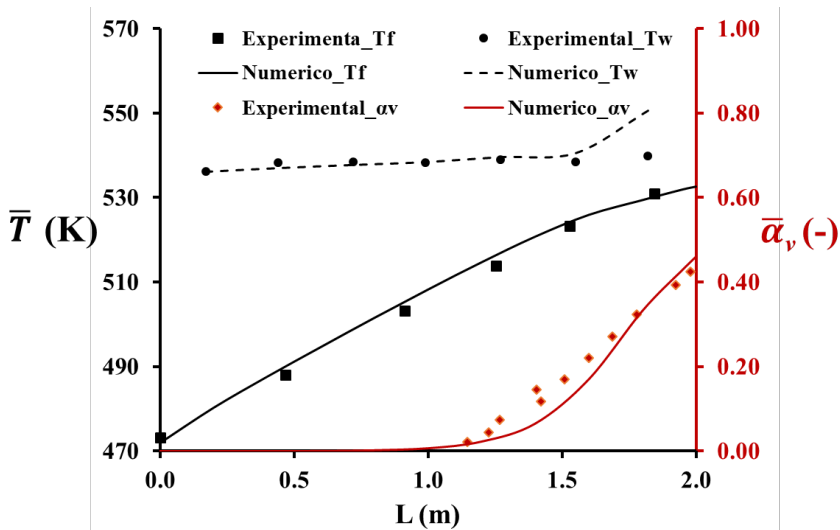


Fig. 2. Comparación entre los puntos experimentales y los perfiles numéricos de $\bar{\alpha}_v$ y \bar{T}_f .

La comparativa entre los resultados experimentales y numéricos relacionados con el proceso de cambio de fase se ilustra en la Figura 2. En esta figura, es posible apreciar cómo la fracción volumétrica promedio de vapor ($\bar{\alpha}_v$) logra replicar los valores y la tendencia observada en los experimentos, evidenciando un alto grado de correlación con un $R^2=0.98$ (representado por una línea roja sólida). Por otro lado, los datos numéricos referentes a la temperatura media del fluido (\bar{T}_f) (indicados por una línea negra sólida) demuestran un ajuste aún más preciso y un comportamiento coherente con un $R^2=0.99$. Los valores experimentales tanto para ($\bar{\alpha}_v$) como para \bar{T}_f fueron extraídos del estudio realizado por Mali, Vinod y Patwardhan en 2017.

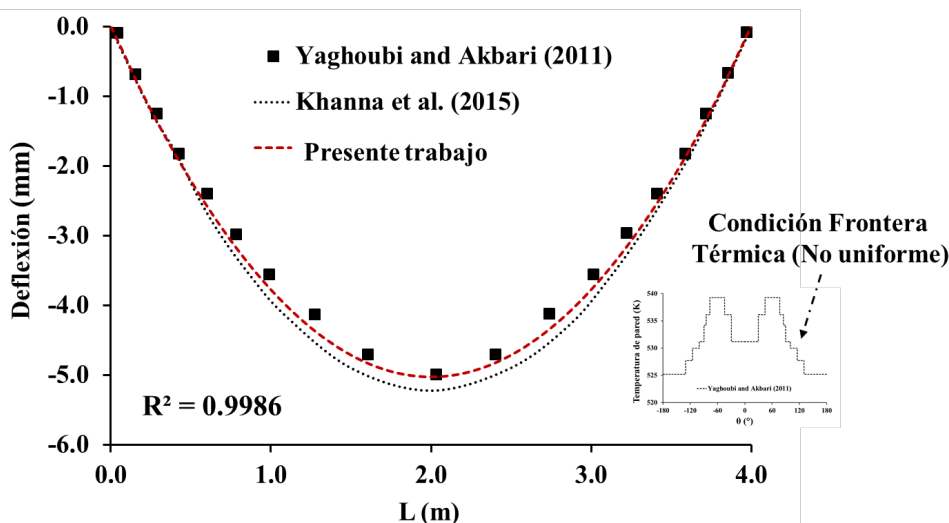


Fig. 3. Comparación entre los puntos experimentales y los perfiles numéricos para la deflexión del tubo receptor.

En lo que concierne a las temperaturas de la pared interna del tubo (T_{pared}) se utilizaron los datos experimentales provistos por Zhang et al., en 2018. Los valores numéricos obtenidos, representados mediante una línea negra punteada, exhibieron una diferencia porcentual promedio inferior al 1% respecto a los datos experimentales, logrando replicar con éxito el comportamiento observado en los experimentos.

Adicionalmente, en la Figura 3 se detalla la validación del análisis estructural, para el cual se modeló el sistema experimental descrito por Akbari Moosavi y Yaghoubi en 2012. Los resultados numéricos alcanzaron un coeficiente de correlación $R^2=0.99$ en comparación con los datos reportados por Akbari Moosavi y Yaghoubi. Las condiciones específicas del experimento se basaron en la documentación de Khanna, Singh y Kedare en 2015.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Las ranuras del tubo liso aumentaron el área transversal de flujo en 21%, redujeron la masa del tubo en 12%, incrementaron su área interfacial en 46%, disminuyeron el G en 17% y la caída de presión en 20%. Los cambios en la geometría modifican el flujo, la fenomenología en la generación de vapor, los campos de temperatura y su estabilidad estructural. Enseguida se hace una comparación entre los dos receptores.

Efecto de las ranuras en el campo de temperaturas

El primer análisis aborda los contornos de temperatura para ambos receptores, evaluados en cuatro planos transversales a lo largo de su longitud, tal como se muestra en la Figura 4. Se observa que las temperaturas más elevadas se localizan en el área de recepción (A_{rec}), especialmente en $\theta=0^\circ$. Los contornos de temperatura ilustran cómo disminuye la temperatura del tubo tanto hacia el flujo del fluido como a través de sus paredes. Es notable también que, en $\theta=180^\circ$, las temperaturas del tubo y del fluido se igualan aproximadamente en el interior del tubo para todas las posiciones analizadas.

Entre los dos diseños de receptores, el receptor con ranuras logra temperaturas más bajas, evidenciando una mejora significativa en la distribución de las temperaturas a lo largo de la sección adiabática. Además, este diseño favorece la uniformidad de las temperaturas en la zona interna del tubo perteneciente al A_{rec} , contribuyendo así a un mejor manejo del calor en el sistema.

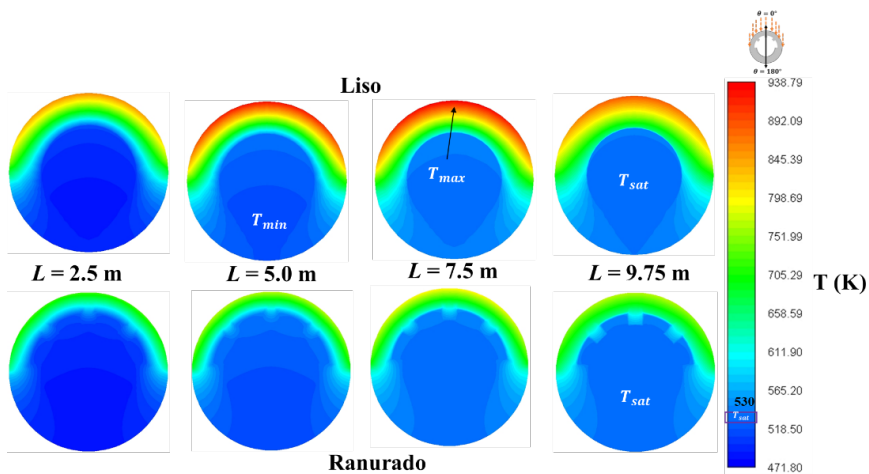


Fig. 4. Contornos de temperatura (K) para diferentes posiciones: tubo liso (a), tubo ranurado (b).

En la Figura 5, se exponen los perfiles de temperatura registrados en r_0 y $\theta=0^\circ$, en función de la longitud L , para cada tipo de receptor (representados en color negro). Estos perfiles evidencian un incremento en la temperatura conforme aumenta L , alcanzando un pico en la zona de valores máximos (T_{max}), para luego experimentar un descenso. Las temperaturas máximas (T_{max}) registradas fueron aproximadamente de 939 K y 807 K, en $L \approx 7.47\text{m}$ y 8.12m , para el tubo liso y el tubo ranurado, respectivamente. Adicionalmente, en la misma Figura 5 (ilustrado en color rojo), se presentan los perfiles de los gradientes de temperatura ($\Delta T/t$), correspondientes a las diferencias entre las temperaturas externas e internas del tubo en $\theta=0^\circ$. Se observa que los gradientes de temperatura ($\Delta T/t$) disminuyen debido a la influencia de las ranuras, variando desde un gradiente máximo de 72 K/mm a 50 K/mm, y modificando su punto de aparición en L desde 5 m a 7.8 m, para el tubo liso y el tubo ranurado, respectivamente. Esta modificación representa una reducción media relativa de los gradientes térmicos de aproximadamente el 27%.

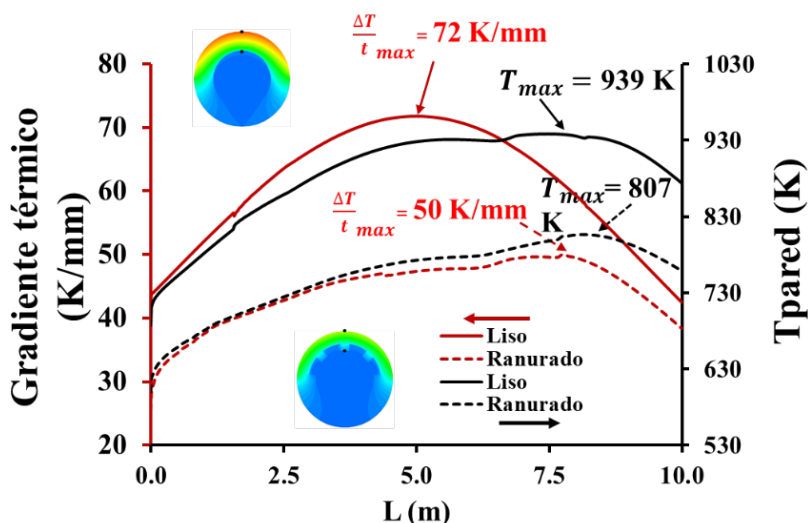


Fig. 5. Comparación entre los perfiles de las temperaturas máximas (Negro) y sus gradientes térmicos (rojo).

En el estudio de los fenómenos de ebullición, dos variables térmicas clave son el ΔT_{pared} y el ΔT_{sub} . El ΔT_{pared} refleja el sobrecalentamiento con respecto a la temperatura de saturación (T_{sat}) en la que se encuentra la capa de fluido adherida a la pared interna del tubo. Por otro lado, el ΔT_{sub} representa la temperatura por debajo de T_{sat} , es decir, el estado de subenfriamiento del fluido. La Figura 6 muestra los perfiles representativos de ΔT_{pared} para cada receptor, derivados de las temperaturas interfaciales máximas y mínimas. Para el tubo liso, se obtuvieron perfiles con las temperaturas del fluido en r_{int} para $\theta=0^\circ$ y $\theta=180^\circ$, mientras que, para el sistema ranurado, se consideraron en $r=9.7\text{mm}$ para $\theta=11.25^\circ$ y $r=7.7\text{mm}$ para $\theta=180^\circ$.

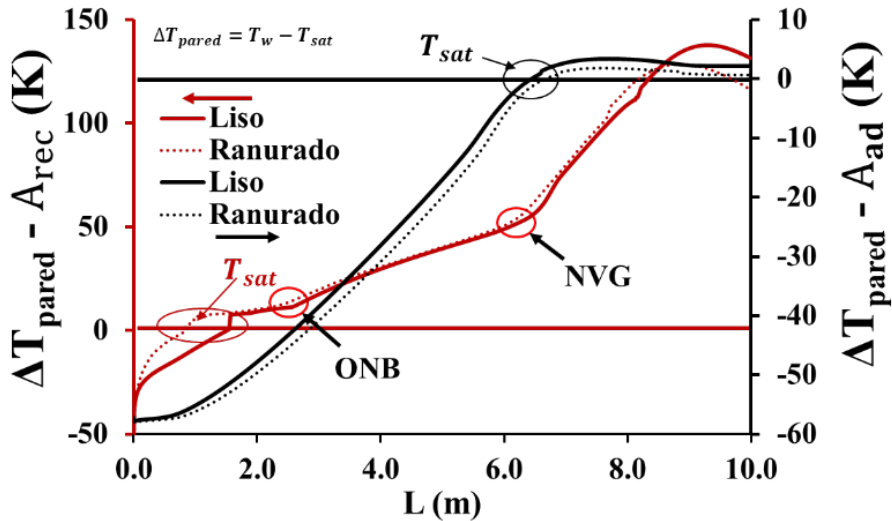


Fig. 6. Perfiles de ΔT_{pared} orientados a A_{rec} y A_{ad}

En cuanto a los ΔT_{pared} orientados hacia A_{rec} (representados en color rojo), se observa que el tubo ranurado supera T_{sat} a una distancia de $L=0.8m$, mientras que el tubo liso lo hace a una distancia de $L=1.5m$. Esto indica que el tubo ranurado alcanza condiciones propicias para la generación de vapor a una distancia menor que el tubo liso. En ambos tubos, una vez que el fluido alcanza el estado sobrecalentado, se observa un incremento abrupto en la temperatura de aproximadamente 7 K. Posteriormente, este incremento se suaviza hasta alcanzar un $\Delta T_{pared} \approx 11K$, punto a partir del cual el incremento se intensifica nuevamente hasta alcanzar un $\Delta T_{pared} \approx 55K$. En este punto, la pendiente cambia drásticamente hasta alcanzar los valores máximos de 138 K y 128 K para el tubo liso y ranurado, respectivamente. Estos cambios de pendiente están directamente relacionados con la generación de vapor y los fenómenos de nucleación de ebullición (ONB, por sus siglas en inglés) y generación de vapor en masa (NVG, por sus siglas en inglés).

La zona de nucleación de ebullición, conocida como ONB, se define como el punto de inicio de la ebullición nucleada. Este fenómeno ocurre en el momento en que la temperatura del líquido cerca de la pared calentada excede de manera significativa la temperatura de saturación (T_{sat}), según lo descrito por Ahmadi, Ueno y Okawa en 2012. Esta etapa es crítica en el proceso de transferencia de calor, ya que marca el comienzo de una eficiente eliminación de calor debido a la formación de burbujas de vapor en la superficie calentada.

Otro fenómeno crucial que se inicia aguas arriba de la zona ONB es donde se observa un rápido aumento en la fracción volumétrica del vapor, conocido como la generación neta de vapor (NVG, por sus siglas en inglés), según describen Ahmadi, Ueno y Okawa en 2012.

En relación con los perfiles de ΔT_{pared} orientados hacia A_{ad} (mostrados en la Figura 6 en color negro), se destaca que los valores máximos de ΔT_{pared} son aproximadamente de 3.4 K y 1.8 K para el tubo liso y ranurado, respectivamente. Mediante un análisis exhaustivo de los datos experimentales presentados en la Figura 2, se determinó que, bajo las condiciones de operación específicas, el ΔT_{pared} mínimo necesario para inducir la ebullición en la pared es de aproximadamente 10 K. Esto permite concluir que las paredes orientadas hacia A_{rec} son responsables de la generación de vapor en las tecnologías CSP+DSG convencionales, y que esta capacidad generativa de vapor disminuye a medida que nos alejamos de A_{rec} , llegando a secciones de la pared interna que no contribuyen a la generación de vapor.

Para ilustrar el estado de subenfriamiento en ambos sistemas, se examina el ΔT_{sub} en el seno del fluido. Los perfiles correspondientes se muestran en la Figura 7, indicando la posición en la que el fluido alcanza la temperatura de saturación (T_{sat}), lo que puede interpretarse como el punto en el que ocurre el fenómeno NVG. El tubo liso alcanza la saturación aproximadamente a $L=6.1\text{m}$, mientras que el ranurado lo hace a $L=6.4\text{m}$.

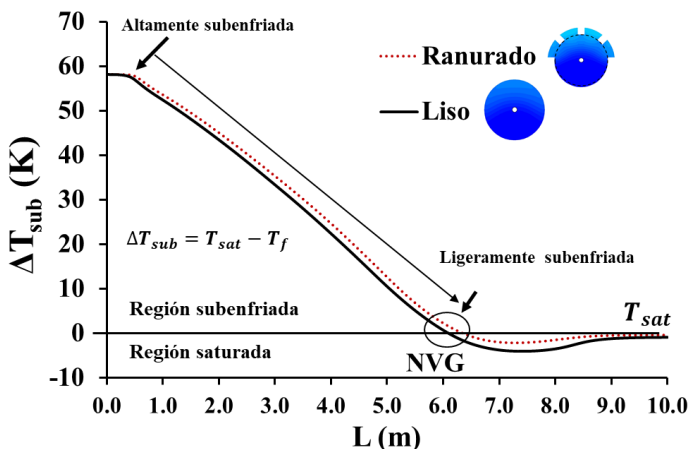


Fig. 7. Perfiles de ΔT_{sub} .

Efecto de las ranuras en la generación directa de vapor

En la Figura 8 se exhiben los contornos de la fracción volumétrica de vapor (α_v) para ambos sistemas. De manera general, se destaca que, en todos los planos analizados, las fracciones volumétricas de vapor más elevadas se localizan en la pared que mira hacia A_{rec} , mientras que los valores más bajos se encuentran próximos a la pared orientada hacia A_{ad} . Esto corrobora las observaciones previas, sugiriendo que una vez que la pared interna orientada hacia A_{ad} alcanza la temperatura de saturación (T_{sat}), su función se limita a actuar como un contenedor de vapor; es decir, no contribuye a la generación adicional de vapor, pero tampoco interviene en la condensación de las burbujas de vapor. Específicamente, se nota que, en los planos estudiados, el sistema con ranuras desarrolla fracciones volumétricas de vapor (α_v) superiores en comparación con el sistema liso.

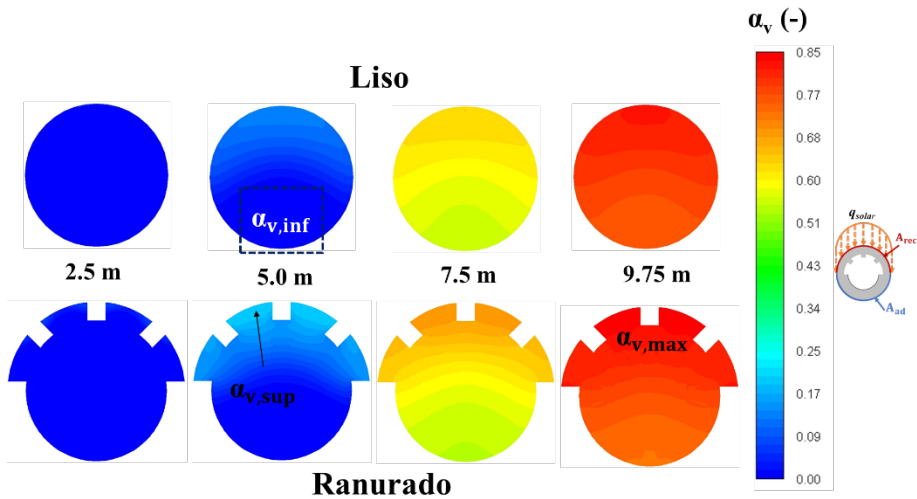


Fig. 8. Contornos de α_v para diferentes posiciones (-): tubo liso (a), tubo ranurado (b).

La Figura 9 proporciona una visión clara sobre la primera región en la que se manifiesta el fenómeno ONB para cada sistema, mediante la comparación de los perfiles de fracción volumétrica de vapor en puntos estratégicos de la pared interna de cada sistema. Resulta evidente que el sistema ranurado alcanza primero el fenómeno ONB, corroborando las hipótesis basadas en la variable ΔT_{pared} . Según las modelaciones, el sistema ranurado inicia la generación de vapor alrededor de los 1.5 m, mientras que el sistema con tubo liso lo hace cerca de los 2 m. Interesantemente, ambos sistemas alcanzan una fracción volumétrica de vapor máxima aproximada de $\alpha_v \approx 0.82$, indicando que, a pesar de las diferencias en el punto de inicio del fenómeno ONB, la capacidad máxima de generación de vapor es similar en ambos sistemas.

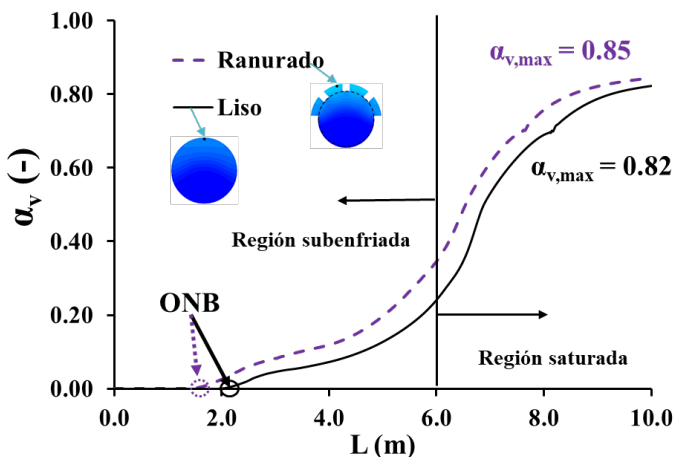


Fig. 9. Comparación de los perfiles de la α_v en la pared interna.

En la comparativa de la fracción volumétrica promedio de vapor ($\overline{\alpha}_v$) y la calidad de vapor promedio (\overline{x}_v), representadas en perfiles en la Figura 10, se observa que ambos receptores exhiben un comportamiento promedio equivalente, aunque localmente presentan diferencias, como se ha discutido previamente. Las máximas \overline{x}_v y $\overline{\alpha}_v$ alcanzadas por los sistemas son de aproximadamente 0.11 y 0.8, respectivamente. Adicionalmente, se incorporan las topologías de flujo según la clasificación de Li et al., 2011. En la Figura 10, se destaca que, para $L > 8.5\text{m}$, el flujo bifásico en ambos sistemas adopta una topología de tipo “mist flow”, caracterizada por una fase líquida dispersa en forma de pequeñas gotas dentro de un flujo continuo de vapor.

La velocidad media de salida para la fase de vapor se registró en 24.8 m/s y 20.5 m/s para el sistema liso y el sistema ranurado, respectivamente. A pesar de las diferencias en velocidad, ambos sistemas mantuvieron el mismo coeficiente de deslizamiento de fase ($S=v_v/v_l$), lo que sugiere una dinámica de flujo similar en términos de la relación entre las velocidades de las fases gaseosa y líquida hacia la salida del sistema.

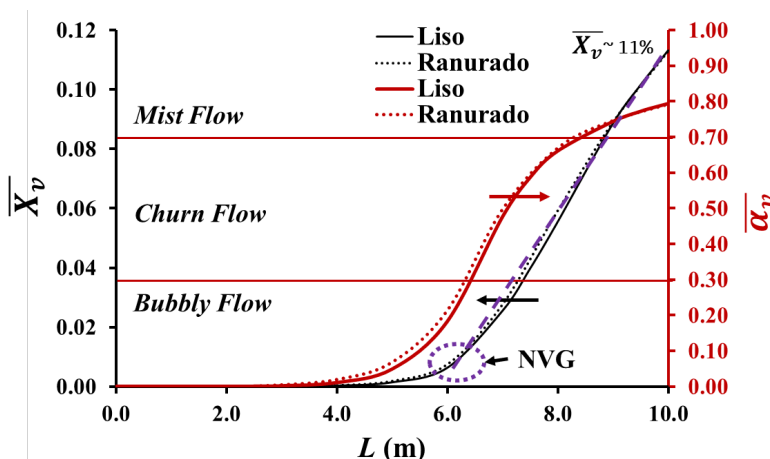


Fig. 10. Comparación de los perfiles promedio de la \overline{x}_v y la $\overline{\alpha}_v$.

Deformaciones y Esfuerzos Térmicos

Tomando en cuenta los campos de temperatura de los tubos analizados, los puntos de sujeción (clips y soportes), y las limitaciones en las deformaciones admisibles, se llevó a cabo un análisis estructural detallado. En la Figura 11, se muestra una comparación de las deformaciones direccionales en el eje Z, utilizando datos de la superficie externa del tubo en r_0 y $\theta=0^\circ$, tal como se indica mediante la línea amarilla en el gráfico. Los resultados revelan que ambos sistemas experimentan deformaciones leves en relación con la longitud L . Las deformaciones máximas registradas son de 0.25 cm, ubicadas en la dirección de $\theta=180^\circ$ en $L \approx 6.4\text{m}$, lo cual representa un 0.03% respecto a la longitud total del tubo.

Un aspecto notable es que, en los puntos de sujeción, la deformación analizada presenta valores mayores a cero, lo cual probablemente se debe a los efectos de las expansiones térmicas en dichos puntos, como se muestra en las Figuras 4 y 5. En estos puntos de muestreo, las temperaturas fluctúan entre aproximadamente 720 K y 940 K. Este análisis subraya la importancia de considerar las expansiones térmicas y sus efectos en los puntos de sujeción durante el diseño y evaluación estructural de sistemas sometidos a altas temperaturas.

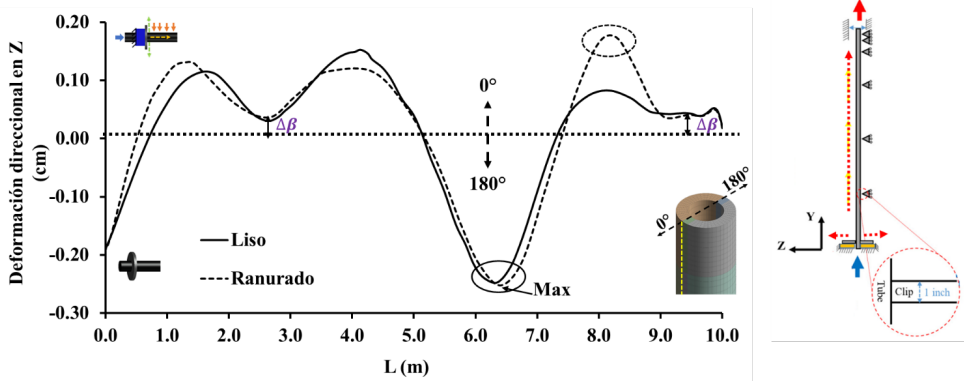


Fig. 11. Comparación de la deformación direccional Z.

Finalmente, se lleva a cabo una comparación de los esfuerzos térmicos (von-Mises) entre los tubos estudiados, como se muestra en la Figura 12. Los valores indicados en esta figura son promedios calculados en las alturas correspondientes a los clips, en r_0 y $\theta=0^\circ$. Los criterios de Ultimate Tensile Strength (UTS) y Yield Strength (YS) se evaluaron a una temperatura de 450°C , según Hrutkay y Kaoumi (2014). Se observa que ambos sistemas exceden el valor de YS, indicando que las deformaciones desarrolladas son permanentes.

El análisis revela que el tubo liso supera el valor de UTS en $L=5\text{m}$. Este hallazgo sugiere que el tubo podría experimentar fallas en esta sección, manifestándose potencialmente en forma de grietas, fisuras, entre otros. Además, se señala que el sistema liso opera en el límite del UTS en toda esa sección del tubo (769 MPa), lo cual indica que no sería adecuado utilizar un grosor de 5 mm para esta aplicación específica.

Por otro lado, el tubo ranurado muestra una disminución media relativa del 33% en los esfuerzos térmicos en comparación con el tubo liso, alcanzando un valor medio de 515 MPa. Esto resulta en un factor de seguridad de 1.55 respecto al UTS. Tal reducción en los esfuerzos térmicos sugiere que el diseño con ranuras es considerablemente más adecuado para soportar las condiciones operativas sin alcanzar el límite de resistencia del material, mejorando así la integridad estructural y la vida útil del sistema bajo las condiciones de operación dadas.

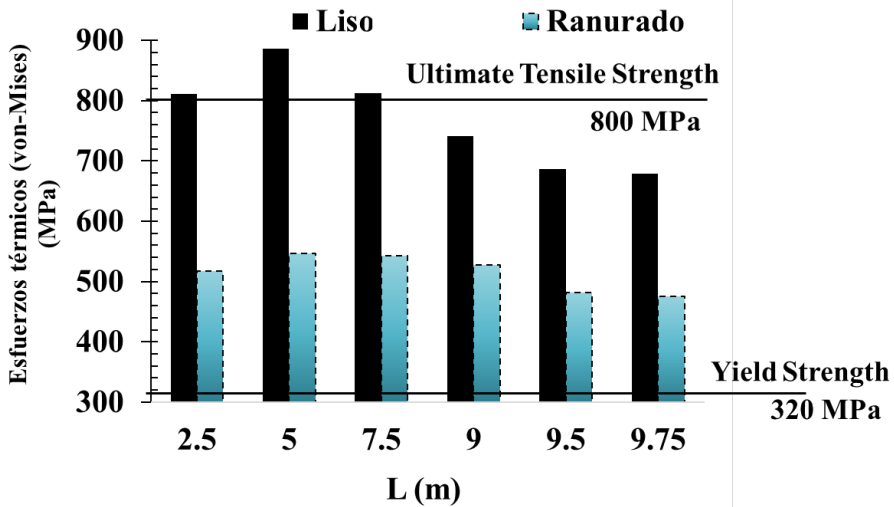


Fig. 12. Comparación de los esfuerzos térmicos en ro y $\theta=0^\circ$, tomados a las alturas de los clips.

CONCLUSIONES

La metodología de modelado implementada ha demostrado ser una herramienta robusta y confiable para predecir el comportamiento durante el cambio de fase, así como los aspectos térmicos, hidrodinámicos y estructurales de los diseños de receptores tubulares bajo consideración. Esta estrategia global asegura predicciones precisas que son fundamentales para la optimización y el diseño eficiente de estos sistemas.

El análisis reveló que el tubo ranurado representa una solución prometedora para mejorar la seguridad estructural de los receptores tubulares en las condiciones operativas evaluadas, sin comprometer la capacidad de generación de vapor. Este diseño ofrece el beneficio adicional de reducir significativamente las temperaturas dentro del tubo receptor, lo cual no solo mejora la eficiencia térmica al minimizar las pérdidas energéticas por radiación y convección, sino que también potencia las propiedades mecánicas del material, reforzando así la seguridad estructural del sistema. Aunque las simulaciones indicaron que ambos receptores producen la misma cantidad de vapor, la implementación de ranuras podría, en la práctica, incrementar la producción de vapor bajo las mismas condiciones operativas debido a la optimización del flujo térmico.

La adopción de estrategias pasivas para la mitigación de gradientes de temperatura resulta en una notable disminución de los esfuerzos térmicos, lo que evidencia la importancia de la ingeniería detallada en el diseño de estos sistemas. Además, se demostró que las deformaciones pueden ser efectivamente controladas mediante un diseño cuidadoso y una adecuada disposición de los clips o tecnologías similares, permitiendo una mayor flexibilidad y resistencia estructural bajo variadas condiciones de operación.

Otro hallazgo clave es que las paredes internas del tubo distantes del área de recepción de energía solar (q_{solar}) no contribuyen significativamente a la generación de vapor, señalando una oportunidad para optimizar aún más los sistemas receptores que operan con tecnología DSG. Este insight ofrece una vía para mejorar los diseños actuales, maximizando la eficiencia y seguridad operativa, mientras se exploran nuevos horizontes en la tecnología de generación de vapor solar.

REFERENCIAS

- Ahmadi, R., Ueno, T. and Okawa, T. (2012) 'Bubble dynamics at boiling incipience in subcooled upward flow boiling', *International Journal of Heat and Mass Transfer*, pp. 488–497. doi: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2011.09.050.
- Akbari Moosavi, S. M. and Yaghoubi, M. (2012) 'Three Dimensional Thermal Expansion Analysis of an Absorber Tube in a Parabolic Trough Collector', *Mechanical Engineering*, (February 2022), pp. 0–7.
- Awan, A. B. (2019) 'Performance analysis and optimization of a hybrid renewable energy system for sustainable NEOM city in Saudi Arabia', *Journal of Renewable and Sustainable Energy*.
- Bartolemei, G. G. and Chanturiya, V. M. (1967) 'Experimental study of true void fraction when boiling subcooled water in vertical tubes', *Thermal Engineering*, pp. 123–128.
- Bellos, E., Tzivanidis, C. and Tsimpoukis, D. (2018) 'Enhancing The Performance Of Parabolic Trough Collectors Using Nanofluids And Turbulators', *Science Trends*. doi: 10.31988/scitrends.21596.
- Bilal Awan, A. *et al.* (2020) 'Commercial parabolic trough CSP plants: Research trends and technological advancements', *Solar Energy*, pp. 1422–1458. doi: 10.1016/j.solener.2020.09.072.
- González-Roubaud, E., Pérez-Osorio, D. and Prieto, C. (2017) 'Review of commercial thermal energy storage in concentrated solar power plants: Steam vs. molten salts', *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, pp. 133–148. doi: 10.1016/j.rser.2017.05.084.
- Hrutkay, K. and Kaoumi, D. (2014) 'Tensile deformation behavior of a nickel based superalloy at different temperatures', *Materials Science and Engineering A*, pp. 196–203. doi: 10.1016/j.msea.2014.01.056.
- Khanna, S., Singh, S. and Kedare, S. B. (2015) 'Explicit expressions for temperature distribution and deflection in absorber tube of solar parabolic trough concentrator', *Solar Energy*, pp. 289–302. doi: 10.1016/j.solener.2015.01.044.
- Li, H. *et al.* (2011) 'Prediction of Boiling and Critical Heat Flux Using an Eulerian Multiphase Boiling Model', pp. 463–476. doi: 10.1115/IMECE2011-65539.
- Mali, C. R., Vinod, V. and Patwardhan, A. W. (2017) 'Comparison of phase interaction models for high pressure subcooled boiling flow in long vertical tubes', *Nuclear Engineering and Design*, pp. 337–359. doi: 10.1016/j.nucengdes.2017.09.010.

- Maytorena, V. M. *et al.* (2021) 'Analysis of the direct steam generation, thermal stresses, and deformations in a tubular receiver of a solar tower', *Journal of Renewable and Sustainable Energy*, 13(5). doi: 10.1063/5.0066123.
- Maytorena, V. M. and Hinojosa, J. F. (2019a) 'Effect of nonuniform concentrated solar flux on direct steam generation in vertical pipes of solar tower receivers', *Solar Energy*, pp. 665– 676. doi: 10.1016/j.solener.2019.03.047.
- Maytorena, V. M. and Hinojosa, J. F. (2019b) 'Threedimensional numerical study of direct steam generation in vertical tubes receiving concentrated solar radiation', *International Journal of Heat and Mass Transfer*, pp. 413–433. doi: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2019.03.101.
- Montoya, A. *et al.* (2018) 'Numerical model of solar external receiver tubes: Influence of mechanical boundary conditions and temperature variation in thermoelastic stresses', *Solar Energy*, pp. 912–922. doi: 10.1016/j.solener.2018.09.068.
- Peng, H., Li, M. and Liang, X. (2020) 'Thermal-hydraulic and thermodynamic performance of parabolic trough solar receiver partially filled with gradient metal foam', *Energy*. doi: 10.1016/j.energy.2020.119046.
- Praveen, R. P. *et al.* (2018) 'Performance analysis and optimization of a parabolic trough solar power plant in the middle east region', *Energies*, 11(4), pp. 1–18. doi: 10.3390/en11040741.
- Prieto, C. *et al.* (2018) 'Thermal energy storage evaluation in direct steam generation solar plants', *Solar Energy*, pp. 501– 509. doi: 10.1016/j.solener.2017.11.006.
- Saghafifar, M., Mohammadi, K. and Powell, K. (2020) 'Design and analysis of a dual-receiver direct steam generator solar power tower plant with a flexible heliostat field', *Sustainable Energy Technologies and Assessments*. doi: 10.1016/j.seta.2020.100698.
- Wan, Z. *et al.* (2018) 'Numerical study on thermal stress and cold startup induced thermal fatigue of a water/steam cavity receiver in concentrated solar power (CSP) plants', *Solar Energy*, pp. 430–441. doi: 10.1016/j.solener.2018.05.087.
- Zhang, X. *et al.* (2018) 'Investigation on the Subcooled Boiling in Vertical Pipe With Uncertainties From Boundary Conditions by Using FLUENT', *Frontiers in Energy Research*, 6. doi: 10.3389/fenrg.2018.00023.