

CIRCUITO TERMO-HIDRÁULICO EQUIVALENTE DE UN SISTEMA DE ALMACENAMIENTO TÉRMICO EN SALES FUNDIDAS CON GENERADOR DE VAPOR INTEGRADO EN CIRCULACIÓN NATURAL

Rivas E.*, Muñoz-Antón J.*

* Departamento de Ingeniería Energética, Escuela Técnica Superior de Ingenieros Industriales (ETSII) – Universidad Politécnica de Madrid (UPM), C/ José Gutiérrez Abascal 2, 28006, (Madrid) España esther.rivas.ramos@alumnos.upm.es

<https://doi.org/10.34637/cies2020.1.5097>

RESUMEN

En este trabajo se propone el uso de la correlación de Swapnalee y Vijayan, apta para NCLs (del inglés *Natural Circulation Loops*) monofásicos de diámetro constante, d , en estado estacionario cuyo régimen de flujo sea el de transición, para el cálculo del caudal en circulación en un diseño novedoso de NCL consistente en un tanque de almacenamiento térmico en sales fundidas con un generador de vapor integrado. El sistema, conocido como TES-SG (*Thermal Energy Storage with integrated Steam Generator*), ya ha sido estudiado previamente a escala de prototipo y en modo descarga, tanto desde el punto de vista experimental como numérico, lo que ha permitido aplicar la metodología de Vijayan para calcular los números adimensionales necesarios para resolver el problema.

Su expresión es: $Re = 1.216 \left(Gr_m \frac{L_{tot}}{d} \right)^{0.387}$, donde Re es el número de Reynolds, Gr_m es el número de Grashof modificado y $\frac{L_{tot}}{d}$ es un parámetro geométrico típico de este sistema. Con esta correlación se comete un error relativo medio menor del 0.4 % en el cálculo de Re .

PALABRAS CLAVE: Tanque de Almacenamiento Térmico con Generador de Vapor integrado, Sales Fundidas, Dinámica de Fluidos Computacional, Circulación natural, Régimen de Flujo en Transición, Correlación

ABSTRACT

This work proposes the use of the Swapnalee and Vijayan's correlation, suitable for single-phase NCLs (*Natural Circulation Loops*) with constant diameter, d , in steady state whose flow regimen is in transition, for calculating the induced mass flow rate in a new NCL design consisting on a thermal energy storage tank with an integrated steam generator. The system, known as TES-SG (*Thermal Energy Storage with integrated Steam Generator*), has already been studied at prototype scale operating in discharge mode, from both the experimental and numerical point of view, which has allowed to apply the Vijayan's methodology for calculating the dimensionless numbers necessary to solve the problem.

Its expression is: $Re = 1.216 \left(Gr_m \frac{L_{tot}}{d} \right)^{0.387}$, where Re is the Reynolds number, Gr_m is the modified Grashof number and $\frac{L_{tot}}{d}$ is a typical geometric parameter of this system. With this correlation, a mean relative error less than 0.4 % is made in the Re calculus.

KEYWORDS: Thermal Energy Storage system with integrated Steam Generator (TES-SG), Molten Salts (MS), Computational Fluid Dynamic (CFD), Natural Circulation, Transition Flow Regime, Correlation

INTRODUCCIÓN

Los denominados NCLs (*Natural Circulation Loops*) son circuitos en los que se tiene una fuente y un sumidero de calor conectados entre sí mediante dos ramas (la caliente y la fría), y dónde el sumidero está situado a mayor altura que la fuente. Esta configuración crea un gradiente de densidad en el fluido de trabajo del circuito que, en presencia de la gravedad, genera la aparición de un gradiente de presión en el mismo. Dicho gradiente induce la circulación del fluido (circulación natural) desde la fuente hasta el sumidero sin necesidad de partes móviles en el circuito. Es decir, los NCLs son sistemas de circulación pasiva. Si, además, si la diferencia de temperaturas entre las ramas caliente y fría del circuito se mantiene en el tiempo, la circulación natural permanece constante.

Por todo esto, los NCLs se encuentran en numerosas aplicaciones industriales. Por ejemplo: en dispositivos de calentamiento solar, sistemas de refrigeración, enfriamiento de motores de combustión interna, turbinas de gas, reactores nucleares, etc.

Los NCLs pueden ser monofásicos y bifásicos, según que el fluido de trabajo permanezca en fase líquida o coexistan dos fases, líquido/vapor, en cierta proporción a lo largo del circuito. Atendiendo a la orientación de la fuente y el sumidero, se clasifican en:

- HHHC (*Horizontal heater and horizontal cooler*), donde tanto la fuente como el sumidero están en horizontal
- HHVC (*Horizontal heater and vertical cooler*), donde la fuente está orientada en horizontal y el sumidero en vertical
- VHHC (*Vertical heater and horizontal cooler*), donde ambos están en vertical y
- VHVC (*Vertical heater and vertical cooler*), donde la fuente está vertical y el sumidero en horizontal.

Este estudio se focaliza en un diseño novedoso de NCL monofásico para aplicaciones industriales de calor de proceso y/o generación de electricidad conocido como TES-SG (*Thermal Energy Storage with integrated Steam Generator*), (Rinaldi et al., 2015). Dicho diseño consiste en un tanque de almacenamiento térmico en sales fundidas con un generador de vapor integrado que, durante las descargas, induce una circulación natural en las sales fundidas que transporta calor desde la rama caliente del circuito (el tanque) hasta la rama fría (el generador de vapor), Fig. 1.

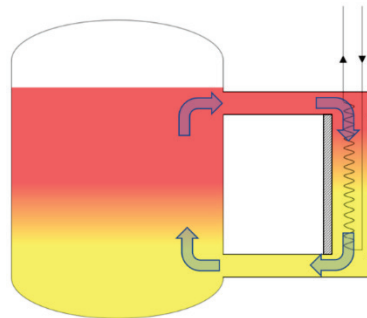


Fig. 1: Esquema de funcionamiento del TES-SG en modo descarga.

Para determinar la capacidad de transferencia de calor de este sistema durante tales procesos es esencial conocer el caudal de sales fundidas que circula a través del generador, el cual es desconocido *a priori*.

Estudios previos sobre NCLs monofásicos (Vijayan et al., 2000 y Vijayan, 2002) en cualquier orientación y operando en estado estacionario han establecido que, siempre que el factor de fricción a lo largo del circuito, ff , pueda expresarse como:

$$ff = p Re^{-b}$$

el caudal adimensional en circulación puede obtenerse, de forma generalizada, a partir de la siguiente expresión:

$$Re = c \left(\frac{Gr_m}{d/L_{eff,Tot}} \right)^r$$

donde d es el diámetro del circuito, Re es el número de Reynolds (o caudal adimensional), Gr_m es el número de Grashof modificado (o transferencia de calor adimensional), $L_{eff,Tot}$, la longitud equivalente del circuito ($L_{eff,Tot} = L_{Tot} \cdot F_{eff}$, siendo L_{Tot} la longitud total del circuito y F_{eff} un factor que da cuenta de las posibles pérdidas de carga concentradas a lo largo del mismo), y c y r dos constantes relacionadas con la naturaleza del flujo de la siguiente forma:

$$c = (2/p)^r$$

$$r = 1/(3 - b)$$

Vijayan, empleando datos experimentales de diferentes tipos NCLs cuyas condiciones de operación estaban comprendidas entre: $400 < Gr_m \frac{L_{eff,Tot}}{d} < 2 \cdot 10^{14}$ y $3.5 < Re < 2 \cdot 10^5$, encontró que, para flujos completamente laminares ($p = 64$ y $b = 1$) o completamente turbulentos ($p = 0.316$ y $b = 0.25$), sus valores eran: $c = 0.1768$ y $r = 0.5$ en el primer caso y $c = 1.96$ y $r = 0.364$ en el segundo. Además, apuntó que para flujos en transición cabría esperar un cambio continuo tanto en c como en r . Es decir, valores comprendidos entre $(0.1768 - 1.96)$ y $(0.364 - 0.5)$ respectivamente.

Posteriormente Swapnalee y Vijayan (2011) verificaron esta hipótesis utilizando los datos experimentales de un NCL simple en las cuatro orientaciones posibles y cuyas condiciones de operación estaban comprendidas entre: $6.7 \cdot 10^6 < Gr_m \frac{L_{eff,Tot}}{d} < 2.17 \cdot 10^{10}$ y $428 < Re < 10100$. Así, dedujeron, que para flujos en transición ($p = 1.2063$ y $b = 0.416$) sus valores eran: $c = 1.216$ y $r = 0.387$.

En este trabajo se presenta la equivalencia entre un TES-SG y un NCL simple basándonos en investigaciones previas de un prototipo de TES-SG, (Gaggioli et al., 2014, 2015, 2016; Rivas et al., 2014, 2018; Rivas & Rojas, 2016; Rivas & Muñoz-Antón,

2020). El ajuste de la correlación generalizada propuesta por Swapnalee y Vijayan (2011) para el cálculo del caudal en circulación en NCLs a los resultados obtenidos en el presente trabajo para el prototipo durante sus descargas demuestra dicha equivalencia. Este resultado podría utilizarse para escalar correctamente el prototipo, contribuyendo a su potencial despliegue tecnológico.

DISPOSITIVO EXPERIMENTAL

El dispositivo experimental utilizado es un TES-SG a escala de prototipo perteneciente al centro de investigación de la Casaccia - ENEA (Italia). Para más información sobre la configuración del prototipo se puede consultar la siguiente referencia: Fabrizi et al., 2011.

El funcionamiento del modo ‘descarga’ del dispositivo es el siguiente:

1) Se bombea agua a presión en el interior de la matriz de tubos helicoidales. El intercambio de calor con las sales fundidas a través de las paredes de dichos tubos permite transformar el agua inyectada en vapor sobrecalentado, húmedo o agua subenfriada a la salida del generador, dependiendo de las condiciones térmicas del tanque.

2) El sumidero de energía que representa la matriz de tubos helicoidales induce un movimiento continuo de las sales fundidas calientes del tanque a través del generador, entrando por su parte superior y saliendo, ya frías, por la inferior. Es decir, que éstas se mueven por gravedad al aumentar de peso mientras ceden calor al agua-vapor que fluye por el interior de los tubos.

Este fenómeno se conoce como circulación natural. El caudal de sales movilizadas depende del equilibrio entre la fuerza motriz (que a su vez depende de la diferencia de densidad entre las sales calientes y frías) y las pérdidas de carga al atravesar el generador. El proceso ocasiona que las sales fundidas del tanque se estratifiquen (ver la Fig. 1).

Notar que, dicha estratificación cambia a medida que evoluciona la descarga del sistema, al irse agotando la fuente de energía que representan las sales fundidas calientes del tanque. Este cambio causa la ralentización de la circulación natural a través del generador como consecuencia de la paulatina disminución de la fuerza motriz que impulsa a las sales (que es función de la diferencia de alturas entre las columnas de sales fundidas calientes del tanque y generador de vapor, ΔL). Por ejemplo, en la Fig. 2, $\Delta L_{7050s} > \Delta L_{10650s}$ y, por tanto, $\dot{m}_{7050s} > \dot{m}_{10650s}$.

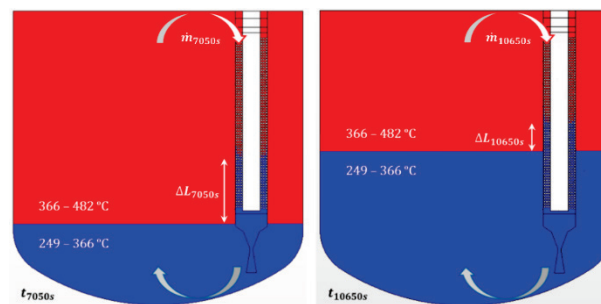


Fig. 2. Resultados numéricos de los campos de temperaturas en el prototipo de ENEA en dos instantes de tiempo diferentes (t_{7050s} (izquierda) y t_{10650s} (derecha)) de uno de sus ensayos de descarga (Fuente: Rivas et al., 2018). Las flechas indican la entrada / salida de sales fundidas.

METODOLOGÍA

Los resultados numéricos obtenidos en la simulación CFD (*Computational Fluid Dynamic*) realizada en el trabajo de Rivas et al. (2018) proporcionan una descripción completa y detallada de uno de los ensayos de descarga del prototipo de ENEA, el del día 29 de octubre de 2012, ver Fig. 3. Ésta, se llevó a cabo en tres fases:

- la primera (desde los 1640 s hasta los 5250 s) comprende la zona transitoria de inicio de la descarga durante la cual se procede a atemperar progresivamente el circuito agua-vapor, aumentando secuencialmente el caudal y la presión en el mismo con el fin de minimizar el choque térmico que sufre el generador de vapor integrado hasta alcanzar los parámetros nominales del ensayo:
- la segunda (desde los 5250 s hasta los 11350 s) comprende la zona cuasi-estacionaria de la descarga durante la cual el generador de vapor integrado opera en condiciones cuasi-estacionarias y
- la tercera (desde los 11350 s hasta los 12050 s) que comprende la zona transitoria de finalización de la descarga durante la cual se procede a disminuir gradualmente el caudal y la presión en el circuito agua-vapor con el fin de obtener una parada segura del sistema.

Este estudio se centra en la segunda fase, la zona cuasi-estacionaria, concretamente en su parte central (desde los 7050 s hasta los 11350 s). Esta zona está lo suficientemente alejada de las zonas transitorias como para no verse afectada por ellas. Se han seleccionado cinco instantes de tiempo equiespaciados entre sí, denotados como t_i con $i = 7050$ s, 7950 s, 8850 s, 10650 s, 11350 s, ver Fig. 3.

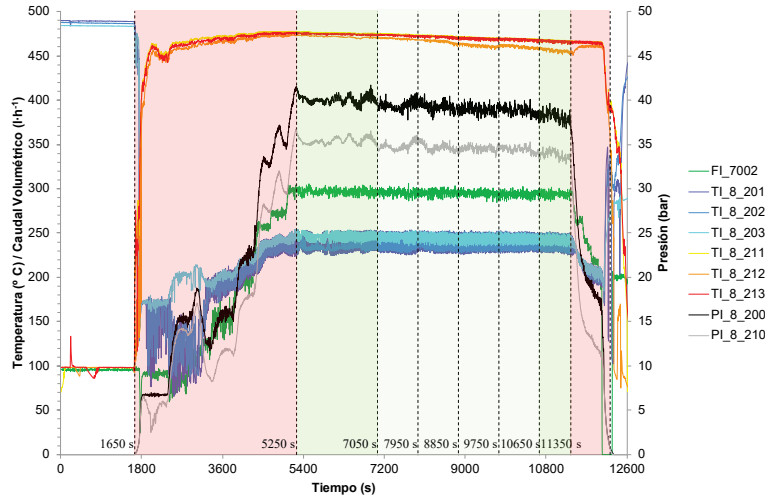


Fig. 3. Ensayo de descarga del día 29/10/2012: medidas asociadas al circuito agua-vapor. En rojo, los transitorios de inicio y finalización y, en verde claro, la parte central de la zona cuasi-estacionaria.

Desde el punto de vista de las sales fundidas, se puede asumir que cada t_i representa, de forma idealizada, a un NCL simple de tipo VHVC operando en estado estacionario con diferente ΔL_i (diferencia de alturas entre columnas de sales fundidas calientes en t_i), pero con características geométricas idénticas, como son: la longitud efectiva (o de intercambio de calor) y el diámetro medio del generador de vapor.

Considerando además que los modelos 1-D son válidos para describir su comportamiento, cómo se puede comprobar en trabajos previos sobre este tipo de sistemas (Zvirin, 1982), y bajo las hipótesis descritas en Vijayan et al. (2000) y Vijayan (2002), que se resumen en que:

- el calentamiento viscoso y la conducción axial son despreciables
- las pérdidas térmicas al exterior también lo son
- la aproximación de Boussinesq es válida

es posible aplicar la metodología generalizada de Vijayan a cada t_i para el cálculo de los números adimensionales globales del sistema.

Previamente, es necesario calcular las diferencias de alturas entre columnas de sales fundidas calientes, ΔL_{t_i} , para lo que se emplea la siguiente expresión (Fabrizi et al., 2011):

$$\Delta L_{t_i} = \left(\frac{P_{hot} - P_{cold}}{\bar{\rho} g \bar{\beta} (T_{hot} - T_{cold})} \right)_{t_i}$$

donde P_{hot} y P_{cold} son las presiones de la fuente y el sumidero que, en este caso, se toman a la entrada y salida del generador, al igual que las temperaturas T_{hot} y T_{cold} . Es decir, en la simulación CFD, se toman dónde están ubicados los termopares denotados por TI_8_111 y TI_8_110 respectivamente (consultar referencia: Fabrizi et al., 2011). Las propiedades térmicas de las sales, $\bar{\rho}$ y $\bar{\beta}$, se evalúan a la temperatura media: $\left(\frac{T_{hot} + T_{cold}}{2} \right)$.

Posteriormente, se definen $L_{eff, Tot}$ y d para el prototipo de ENEA. Dado que en el generador de vapor las pérdidas de carga totales, ΔP_{Tot} , vienen dadas por:

$$\Delta P_{Tot} = \Delta P_{con} + \Delta P_{dis}$$

siendo ΔP_{con} la contribución de las pérdidas de carga concentradas (a la entrada y salida del generador) y ΔP_{dis} la de las pérdidas de carga distribuidas (a lo largo de la matriz de tubos helicoidales); y que, en este caso, es razonable considerar que $\Delta P_{con} \ll \Delta P_{dis}$ (Idelchik, 1986), se puede asumir que $F_{eff} \approx 1$ y, por tanto, que $L_{eff, Tot} \approx L_{Tot}$. Los parámetros geométricos característicos L_{Tot} y d se fijan a los valores:

$$L_{Tot} = 1.206 \text{ m},$$

$$d = 0.0186 \text{ m},$$

correspondientes con la longitud efectiva y el diámetro medio del generador de vapor respectivamente. Este último se calcula a partir de la expresión del diámetro hidráulico (Bergman et al., 2017):

$$d = \frac{4S}{p}$$

donde S es la sección de paso de las sales fundidas a través del generador de vapor y p el perímetro efectivo en términos de intercambio de calor por convección entre las sales fundidas y los tubos helicoidales.

Por último, se calculan los números adimensionales globales de Reynolds, Re_{t_i} , y Grashof

modificado, Gr_{m, t_i} , tal y como propone Vijayan et al. (2000); Vijayan (2002):

$$Re_{t_i} = \frac{d}{S} \left(\frac{\dot{m}}{\bar{\mu}} \right)_{t_i} \quad Gr_{m, t_i} = \frac{d^3}{p L_{Tot}} \left(\frac{\bar{\rho}^2 g \bar{\beta} \Delta L \dot{Q}}{\bar{\mu}^3 \bar{C}_p} \right)_{t_i}$$

donde, g es la gravedad, \dot{m} el caudal de sales fundidas en circulación y \dot{Q} la potencia puesta en juego. Las propiedades térmicas de las sales, $\bar{\mu}$ y \bar{C}_p , también se evalúan a la temperatura media: $\left(\frac{T_{hot} + T_{cold}}{2}\right)$.

RESULTADOS

En la Fig. 4 se muestra el número de Re frente a Gr_m en todos los t_i considerados, que equivale a los siguientes rangos de condiciones de operación: $1.7 \cdot 10^6 < Gr_m \frac{L_{eff,tot}}{d} < 3 \cdot 10^6$ y $318 < Re < 400$. También se incluyen los resultados obtenidos de aplicar al prototipo de ENEA, por un lado, las correlaciones de Vijayan para flujos completamente laminares o completamente turbulentos y, por otro, la correlación de Swapnalee, para flujos en transición.

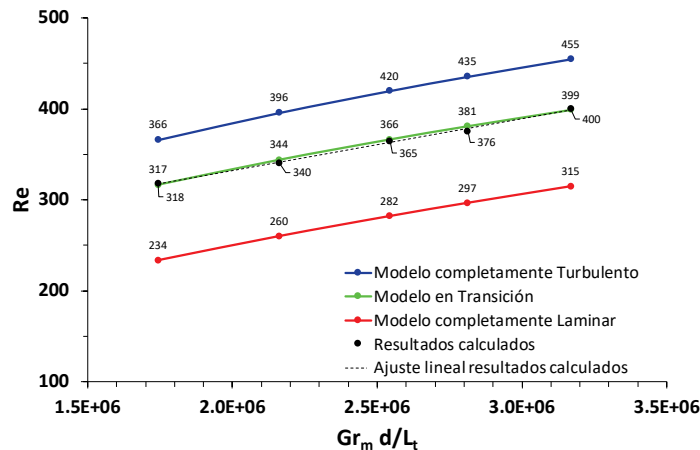


Fig. 4: Comparación entre los resultados calculados y los modelados.

Como se puede apreciar en la figura, el modelo para flujos en transición se ajusta a los resultados obtenidos (sobreevalora Re menos de un 0.4 % de error relativo medio). Por lo tanto, el funcionamiento del TES-SG durante sus descargas responde al de un NCL.

Además, tales resultados ponen de manifiesto que existe una relación cuasi-proporcional entre el caudal másico adimensional que circula por el generador (número de Re) y la transferencia de calor adimensional intercambiado en el mismo (número de Gr_m), según el ajuste en la Fig. 4. Considerando que esta última depende de los efectos locales de la configuración y geometría de la matriz de tubos helicoidales, tal relación fundamenta el estudio local de la transferencia de calor que se hace en Rivas & Rojas, 2016 y Rivas et al., 2018.

CONCLUSIONES

En este trabajo se ha estudiado el fenómeno de la circulación natural en un NCL innovador empleando, como punto de partida, una simulación CFD no estacionaria. Los resultados numéricos obtenidos han sido contrastados con los datos experimentales del TES-SG a escala de prototipo del ENEA durante una de sus descargas.

Concretamente, se ha adaptado a este sistema la metodología generalizada propuesta por Vijayan et al. (2000) y Vijayan (2002) para el cálculo de los números adimensionales globales de Re y Gr_m , observándose que entre ambos números adimensionales existe una relación funcional potencial, tal y como sucede en los NCLs.

Se ha comprobado que la correlación de Swapnalee & Vijayan, apta para NCLs simples en régimen de transición, se aproxima a los resultados calculados con un error relativo medio inferior al 0.4 %. Estos resultados también pueden contribuir a delimitar qué valores de Re comprenden de la región de transición en este tipo de sistemas ya que en la bibliografía no existe un consenso.

REFERENCIAS

Bergman, T. L., Lavine, A. S., Incropera, F. P., y DeWitt, D. P. (2017). *Fundamentals of Heat and Mass Transfer*. Wiley, 8th edición.

Fabrizi F., Gaggioli W., Rinaldi L., Rocca C., Surace R. (2011). *Progettazione e realizzazione di uno scambiatore di calore prototipico per reattori refrigerati a sodio con circuito intermedio a sali fusi*. Tech. Rep. NNFISS – LP3 – 027. ENEA.

Gaggioli W., Fabrizio F., Fontana F., Rinaldi L., Tarquini P. (2014). *An innovative concept of a thermal energy storage system based on a single tank configuration using stratifying molten salts as both heat storage medium and heat transfer fluid, and with an integrated steam generator*. *Energy Procedia* 49, pp. 780-789. DOI: 10.1016/j.egypro.2014.03.085.

Gaggioli W., Fabrizi F., Tarquini P., Rinaldi L. (2015). Experimental validation of the innovative thermal energy storage based on an integrated system 'storage tank/steam generator'. *Energy Procedia* 69, pp. 822-831. DOI: 10.1016/j.egypro.2015.03.091.

Gaggioli W., Ascenzi P. Di, Rinaldi L., Tarquini P., Fabrizi F. (2016). Effects assessment of 10 functioning years on the main components of the molten salt PCS experimental facility of ENEA. *AIP Conf. Proc.* vol. 1734, p. 070009. AIP Publishing LLC. DOI: 10.1063/1.4949156.

Idelchik, I. E. (1986). *Handbook of hydraulic resistance*. Washington, DC, Hemisphere Publishing Corp., 1986, 662 p. Translation.

Rinaldi L., Fabrizi F., Alemberti A., Gaggioli W., Aliotta S., Barbensi A., Tarquini P. (2015). Thermal Energy Storage Tank with Integrated Steam Generator. *EP* 2652272 B1 (2015-10-28).

Rivas E., Rojas E., Bayón R., Gaggioli W., Rinaldi L., Fabrizi F. (2014). CFD model of a molten salt tank with integrated steam generator. *Energy Procedia* 49, pp. 956-964. DOI: 10.1016/j.egypro.2014.03.103.

Rivas E. and Rojas E. (2016). Heat transfer correlation between molten salts and helical-coil tube bundle steam generator. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 93, pp. 500-512. DOI: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2015.10.013.

Rivas E., Muñoz-Antón J. and Rojas E. (2018). Nueva correlación para el diseño de un tanque de almacenamiento térmico en sales fundidas con generador de vapor integrado. Libro de Actas del XVI Congreso Ibérico y XII Congreso Iberoamericano de Energía Solar. 20-22 junio 2018 Madrid, España. Asociación Española de Energía Solar, pp. 483-490. ISBN: 978-84-86913-14-4.

Rivas E. and Muñoz-Antón J. (2020). Dryout study of a helical coil once-through steam generator integrated in a thermal storage prototype. *Applied Thermal Engineering*, 170, 115013. DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2020.115013.

Swapnalee B.T. and Vijayan P.K (2011). A generalized flow equation for single phase natural circulation loops obeying multiple friction laws. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 54, pp. 2618-2629. DOI: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2011.01.023.

Vijayan, P., Bade, M., Saha, D., Sinha, R., y Venkat Raj, V. (2000). A generalized correlation for the steady state flow in single-phase natural circulation loops. Technical Report BARC-2000/E/021, Bhabha Atomic Research Centre.

Vijayan P. K. (2002). Experimental observations on the general trends of the steady state and stability behavior of single-phase natural circulation loops. *Nuclear Engineering and Design*, 215, pp. 139-152. DOI: 10.1016/S0029-5493(02)00047-X.

Zvirin, Y. (1982). A review of natural circulation loops in pressurized water reactors and other systems. *Nuclear Engineering and Design*, 67(2): 203-225.