

ESTUDIO EXPERIMENTAL DEL FLUJO PRODUCIDO POR DISTINTOS TUBOS DISTRIBUIDORES EN EL INTERIOR DE UN TANQUE DE ACUMULACION DE CALOR ESTRATIFICADO EN TEMPERATURA.

Luis Cardón¹, Nicolás Vargas, Nahuel Ortíz, Nicolás Rivera, Tomás Concha

¹ INENCO-Universidad Nacional de Salta-Facultad de Ciencias Exactas. Departamento de Física
e-mail: cardonluis2008@gmail.com

Recibido 14/08/19, aceptado 23/10/19

RESUMEN: En este trabajo se describe un equipo experimental para el estudio del funcionamiento hidrodinámico de tubos de alimentación estratificadores para tanques de acumulación de calor en agua de uso en sistemas solares activos combinados. El funcionamiento del tubo estratificador está íntimamente relacionado al proceso de mezclado que ocurre en el tanque de acumulación. Se ha estudiado el modo en el que el fluido distribuido por el tubo entra en un tanque previamente estratificado y la evolución de la termoclina inicial durante la simulación de la carga de un tanque de acumulación experimental. Se ha encontrado que para los flujos de alimentación del ensayo y los diseños de tubos estratificadores empleados, la entrada del fluido al seno del tanque ocurre por varios de los orificios de entrada, generando una termoclina más suave que la esperada.

Palabras clave: acumulación de calor, tanques de agua, tubo estratificador, chorros, plumas

INTRODUCCIÓN

Los tubos de distribución de flujo (tubos distribuidores o estratificadores, o *manifolds en inglés*) que se utilizan para la carga y descarga en tanques de acumulación de calor, se diseñan con el propósito de facilitar la manutención de la estratificación en temperatura dentro del tanque. Esto favorece la eficiencia general del sistema en el que opera el tanque. Estos tubos se han usado desde hace más de cuatro décadas y han encontrado su camino en la ingeniería de los tanques de agua para la acumulación de calor en sistemas solares combinados (provisión de agua caliente y calefacción). Básicamente consisten en un tubo vertical perforado que ingresa en el tanque de acumulación de agua caliente. Algunos de estos distribuidores han sido estudiados en la literatura y otros han sido patentados (Shah et al., 2005). La física de estos aparatos establece que la profundidad a la cual la corriente de entrada distribuida por el tubo entra en el tanque, debe ser aquella para la cual la densidad de la corriente entrante alcanza el valor de la densidad del agua en el recipiente (Duffie y Beckman, 2014). No obstante, los principios de diseño de distribuidores que realicen cabalmente su cometido no son del todo conocidos o de dominio público. El presente estudio pretende echar luz sobre los aspectos constructivos que conduzcan a nuevos diseños efectivos.

Para ello se ha construido un montaje experimental cuyo componente principal es un recipiente de vidrio que se utiliza como tanque de acumulación de calor. En él se han ensayado, hasta el momento, varios tipos de tubos distribuidores. El ensayo comienza con la preparación de un tanque estratificado. El tanque se carga con agua fría en su mitad inferior y con agua caliente en la otra mitad, produciéndose así una termoclina bien marcada. Durante el ensayo, el tanque se alimenta por el distribuidor con agua tibia, de manera que ésta debería entrar al tanque en algún punto por abajo de la termoclina. Simultáneamente el tanque se desagota por el lado frío. El experimento requiere la medición de los flujos de entrada y salida, de la temperatura del agua de aquellos y del perfil de temperatura en el tanque.

Bajo condiciones de flujo neto constante se establece una velocidad descendente para la termoclina. A ella se le suma la velocidad que deviene de la destrucción de la estratificación. Los perfiles de temperatura medidos muestran el proceso de degradación de la estratificación. Una visualización realizada con la adición de fluoresceína en el flujo entrante, permite mostrar el proceso de distribución de flujo logrado por el tubo distribuidor. A diferencia de otras visualizaciones descritas en la bibliografía, se ha observado que el flujo entrante ocurre por varios de los orificios de salida del tubo, en un rango de varios centímetros. El programa de investigación de este fenómeno tendría que permitir diseñar un tubo distribuidor que entregue el fluido a la altura óptima de acuerdo a su densidad, con un mínimo de mezclado en las capas adyacentes de fluido en el tanque.

DESCRIPCION DEL EQUIPO

Se ha construido un pequeño banco de ensayo para estudiar diversos tipos de tubos estratificadores. La Figura 1 muestra un esquema general y la Figura 2 muestra una fotografía del mismo.

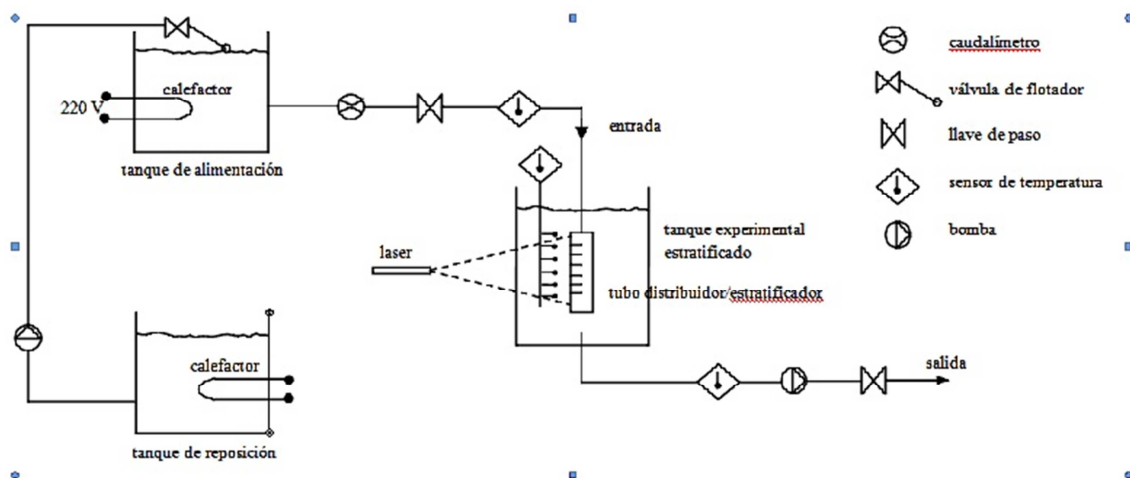


Figura 1: Esquema general del banco de ensayo

El banco consta de un elemento principal, el tanque de acumulación, para lo que se ha usado un tanque de vidrio de base cuadrada de 49 cm de lado y 60.5cm de altura. En la zona central del tanque se introduce el tubo estratificador. También centrado, se dispone de una boca de succión por donde se descarga el tanque. Durante el experimento, se ingresa agua por el tubo estratificador, mientras se succiona en la misma medida. Para la alimentación del tanque se ha dispuesto un tanque a mayor altura, que produce una diferencia de presión estática de aproximadamente 80 cm de agua al comienzo del experimento. El tanque de alimentación dispone de un calefactor que permite elevar la temperatura del agua al nivel deseado. Un tanque adicional, también calefaccionado, permite mantener el nivel de agua en el primero durante el transcurso del ensayo y consecuentemente mantener el caudal de alimentación. El caudal producido en estas condiciones, que se controla mediante una llave de paso al comienzo del experimento, varía en un rango entre 0 y 6 litros/minuto. El caudal máximo obtenido coincide con el que puede recircular una bomba de 30W en un circuito colector-piso radiante. Los sistemas solares de agua caliente activos con tanque de acumulación y flujo de entrada directo, se han estudiado en un rango de 6-25 litros/minutos. González-Altozano et al. (2015), Moncho-Esteve et al (2017) los ha estudiado en el rango 6-16 litros/minutos. Para desagotar el tanque de ensayo, se dispone una pequeña bomba de lavarropas, cuyo flujo también se controla mediante una llave de paso. La principal dificultad del ensayo bajo estas condiciones es ajustar el caudal de entrada y salida a valores similares. Los caudales de entrada y salida se miden con medidores de caudal de tipo turbina, de media pulgada, YF-520, de fabricación china. Los caudalímetros viene precalibrados; no obstante, se llevó a cabo una calibración por medición de volumen y cronometrado.



Figura 2: Banco de ensayo: el tanque, el estratificador y el tubo de succión. Arriba, el sistema de alimentación.



Figura 3: Estratificadores bajo estudio. De derecha a izquierda: rejillas delgadas (A), rejillas anchas (B) y orificios circulares, (C). A la izquierda, peine de termocuplas.

Los tubos estratificadores ensayados se han construido de tubo de PVC blanco de 6 cm de diámetro, a los que se les ha perforado ranuras de distintos tipos en uno de sus lados: rectangulares y circulares. Se muestran en la Figura 3. En los experimentos realizados se usaron tubos con ranuras colocadas lateralmente para favorecer el desarrollo bidimensional de los chorros y facilitar la interpretación del flujo resaltado por la visualización que se muestran en las Figuras 7 a 9. De todas maneras, la literatura menciona el uso de tubos con entrada lateral, por ejemplo el distribuidor patentado del tanque SOLVIS (Shah et al. 2005). En una etapa posterior, se utilizarán perforaciones distribuidas en forma radial en todo el tubo. El tubo está construido de manera de facilitar su cambio de un experimento a otro. Se ha experimentado con dos tubos estratificadores con orificios de tipo ranura rectangular. El primero con ranuras delgadas de unos dos milímetros de ancho por 3.5 cm de largo, cuyos resultados se describen como ensayo A. En el segundo, denominado ensayo B, se trabajó con ranuras menos delgadas, de 1 cm de ancho y el mismo largo. Las ranuras están dispuestas, cada 5 cm entre centros, y la ranura superior se ubica a 7 cm de la superficie del agua en el tanque.

Un aspecto importante del experimento es la visualización de la entrada de fluido desde el tubo estratificador al tanque. Para ello, el agua de entrada al tanque ha sido adicionada con solución de fluoresceína sódica que permite una muy buena visualización iluminada con luz natural pero mejor aún con luz azul. La fluoresceína tiene un pico de absorción de luz en los 550nm y un pico de emisión en los 500nm que caracteriza un fuerte color verde. Para obtener un corte transversal claro del flujo entrante se ha iluminado con una haz plano de luz láser azul (de 50 mW que emite en los 405nm) que intersecta verticalmente en la zona central del tubo. El haz plano se produce mediante una lente consistente en una varilla de vidrio.

Para registrar el perfil de temperaturas dentro del tanque, se ha construido un peine con 9 termocuplas ubicadas cada 4 cm; la primera de ellas, a 10 cm del borde superior del tanque. El peine se muestra en el interior del tanque en la Figura 2 y fuera de él en la Figura 3. Estas temperaturas, así como la temperatura del agua de los flujos de entrada y salida y la temperatura ambiente se registran mediante un medidor desarrollado a tal efecto.

EL ENSAYO

Se realizaron varios ensayos de los cuales se describen solo dos, diferenciados principalmente por el uso de dos tubos estratificadores distintos. En el ensayo denominado A se usó el estratificador de ranuras delgadas, mientras que en ensayo B se usó el estratificador de ranuras más gruesas. Durante el ensayo se observó el estado de estratificación del tanque y se visualizó el flujo saliente del tubo estratificador. La descripción general del ensayo es la misma para cualquiera de los dos.

El ensayo comienza con la creación de una estratificación inicial en el tanque principal. Se llena con

agua fría la mitad inferior del tanque y se mide su altura. Ésta, será aproximadamente la posición de la termoclina. Luego se continúa el llenado de la mitad superior con agua caliente y se mide la altura total del agua en el tanque. Luego de establecer el flujo de entrada y salida e igualarlos en la medida de lo posible, se controla la altura de agua del tanque como para tener un registro de cuánto afecta el desbalance de flujos. Una vez concluido el llenado del tanque, comienza el registro de temperaturas en profundidad para obtener el perfil de temperatura.

La parte activa del ensayo comienza con la alimentación de agua caliente a un nivel de temperatura menor que la temperatura inicial de la parte superior del tanque. Simultáneamente se succiona la misma cantidad de agua del fondo frío del tanque. Teóricamente, en esas condiciones, el tubo distribuidor debería producir un flujo de entrada por la apertura coincidente con la temperatura del tanque inferior a la temperatura de entrada. Debido a la flotación, el mezclado debiera ocurrir hacia arriba, calentando la zona fría inmediata inferior a la termoclina. Como describiremos más abajo el comportamiento observado es más complejo. El proceso de carga del tanque dura hasta que todo el tanque se encuentra a la temperatura de alimentación. Bajo el supuesto que el flujo de entrada ocurre siempre por debajo de la zona caliente, el comportamiento general esperado durante la carga del tanque es el siguiente: la termoclina, más o menos marcada, debería trasladarse hacia abajo con la velocidad resultante de caudal de entrada que fluye por el área transversal del tanque. Cuando ésta alcanza el fondo del tanque, éste se ha cargado de energía en la máxima cantidad posible, reemplazando toda el agua fría por agua a la temperatura de entrada.

Los ensayos comienzan con el llenado del tanque. Por ejemplo, en el ensayo B, el tanque se llenó con 35,3 cm de agua fría y luego con 24.6 cm de agua caliente. El perfil de temperatura luego de llenado del tanque se muestra en la Figura 4. Una vez iniciada la carga/descarga del tanque debe regularse los flujos y a partir de entonces se da por comenzada la experiencia.

El ensayo termina cuando se vacía el tanque de alimentación. Durante este tiempo, aproximadamente 8 minutos, el perfil de temperatura no cambia notablemente. El tanque de reserva de alimentación y la pequeña profundidad del tanque, no permitieron apreciar el descenso de la termoclina debido al efecto de flujo tapón que ocurre sólo por la alimentación y extracción simultáneas. Una vez suprimida la alimentación, se siguió la evolución libre del tanque hasta la homogeneización de la temperatura.

DESCRIPCION DE LA TERMOCLINA INICIAL

En la Figura 4 se muestra el perfil inicial que se consigue luego del llenado del tanque (datos del ensayo B). Se puede describir por una curva sigmoidea cuya parte central corresponde a la termoclina, es decir a la zona de gradiente elevado de temperatura.

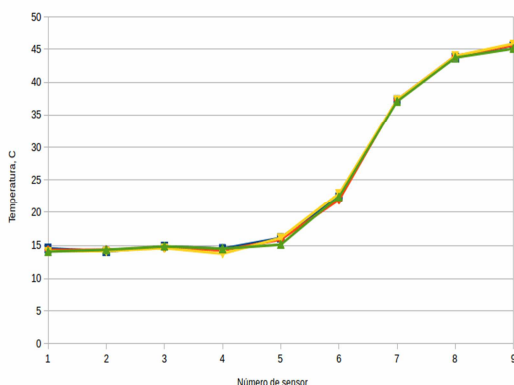


Figura 4. El perfil de temperatura al inicio y durante el ensayo B

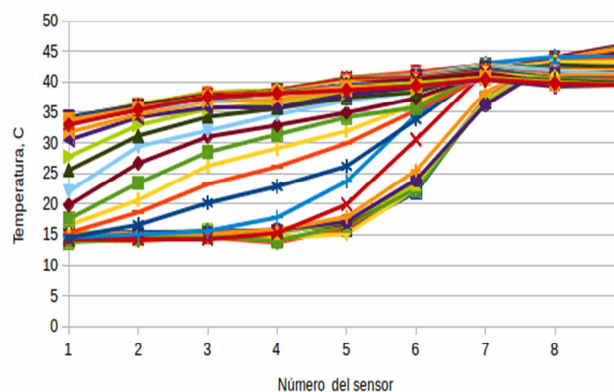


Figura 5. La evolución (parametrizada en el tiempo) del perfil de temperatura durante el ensayo B.

El perfil se presenta solo a los efectos de mostrar cualitativamente la estratificación inicial conseguida, ya que el estudio del efecto de la inyección solo se puede apreciar con una experiencia más prolongada que nuestro equipo experimental actual no posibilita. La evolución durante el ensayo y posterior se muestra la Figura 5

RESULTADOS DE LA VISUALIZACIÓN

Se realizaron varias experiencias de visualización que se perfeccionaron hasta que se puso a punto el equipo experimental. De ellas se describen aquí con mayor detalle las denominadas A y B que solo se diferencian por el ancho de la rendija del distribuidor, 2 mm y 1cm respectivamente. No hemos investigado todavía el efecto del caudal ni el efecto de la temperatura de entrada. Las experiencias de carga del tanque fueron filmadas a los efectos de comprender el flujo producido por el tubo estratificador. La visualización permite distinguir dos aspectos. Por un lado, muestra las características del flujo de entrada en la cercanía de la boca del distribuidor. Este aspecto se aprecia cuando se ilumina con un haz plano de luz laser. Por otro, muestra cómo el flujo introducido se distribuye y permanece en el tanque, lo que se aprecia mejor con iluminación natural homogénea. La Figura 6 muestra en mayor detalle una vista de frente de las ranuras del distribuidor. La Figura 7 muestra una imagen de los chorros de salida cuando se los ilumina en forma transversal al flujo. En esta imagen, obtenida en las experiencias preliminares, es difícil distinguir las características del flujo con esta iluminación.



Figura 6: Acercamiento a las rejillas delgadas del tubo estratificador.

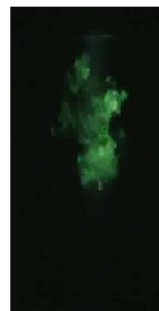


Figura 7: Visualización de una sección transversal de las plumas emergentes de la rejilla en los primeros instantes de un ensayo.

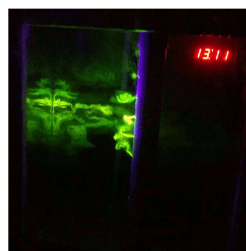


Figura 8: Visualización de la sección longitudinal de las plumas emitidas en los primeros instantes de ensayo A.

La imagen de la Figura 8 muestra los instantes iniciales del ensayo A. En este ensayo la fluoresceína se incorporó al flujo de alimentación, luego de la medición de temperatura del mismo, pudiendo enfriarlo en alguna medida, por lo que sólo nos interesa de este ensayo sus aspectos cualitativos.

Para este ensayo, inicialmente se estableció un perfil bien estratificado, con una temperatura máxima en la parte superior del tanque de 49.23 °C y una temperatura mínima en la parte inferior de 18.38 °C, con una termoclina localizada aproximadamente a los 25 cm del borde del tanque. Luego de estabilizar los flujos de entrada y salida, la estratificación se ha deteriorado muy poco con extremos

entre 45.6 °C y 24 °C. La temperatura del flujo de alimentación fue de alrededor de 40 °C. La imagen muestra cuatro chorros o plumas de mayor fuerza, surgentes de las cuatro ranuras centrales entre 17 y 32 cm de profundidad, caracterizados por un corto tronco laminar, antes de convertirse en una voluta turbulenta. Dado que se ilumina con un haz plano no es posible estimar la longitud de la corriente laminar o si las volutas se extienden más allá de lo que se aparenta en la figura, aspectos que quedan por estudiar. Los chorros eventualmente rebotan en la pared del recipiente, aunque lo que se observa en la imagen sólo es el reflejo de las plumas. No se aprecia flotabilidad, salvo en la pluma inferior por lo que se puede suponer que ingresa más caliente que el seno del fluido. La visualización permite observar que el flujo entrante no supera cierto nivel, lo que confirma que todavía prevalece una zona caliente en la parte superior del tanque.

El experimento confirma que los tubos distribuidores estratificadores prácticos distribuyen el flujo en una zona menos localizada de la que se supuso con anterioridad. Las razones de este comportamiento deben buscarse en los procesos de mezclado que ocurren en el interior del tubo distribuidor que queda fuera del alcance de la visualización.

El ensayo B se hizo el tubo difusor de bocas más anchas. Establecido el perfil, a los tres minutos hubo un arranque del ensayo con primera descarga de corta duración, localizada en la cuarta boca, a 27.5 cm de profundidad, como se muestra en la Figura 9 a. La mancha de colorante permaneció estable hasta el comienzo del ensayo a las 12:32 minutos. El perfil de temperatura para ese instante se muestra en la Figura 4. El ensayo se interrumpió para equalizar los flujos de entrada y salida para reiniciarse nuevamente

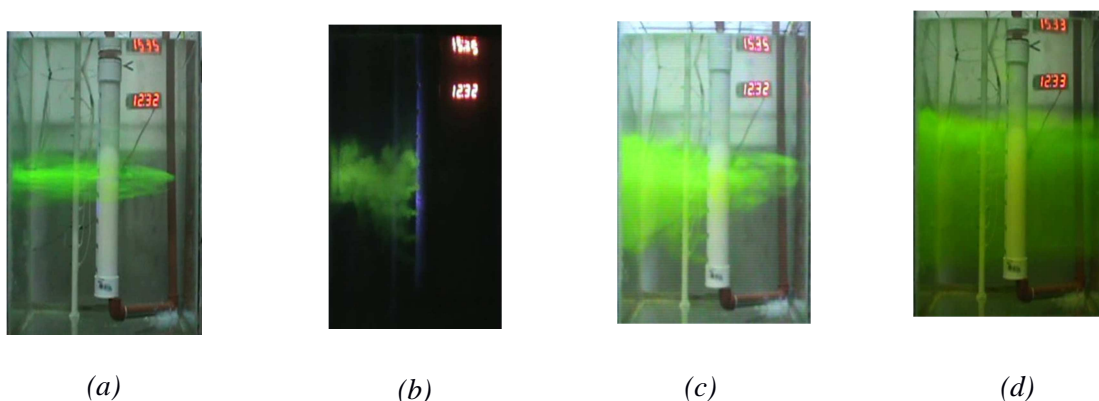


Figura 9: (a) falso arranque (b) flujo por cinco bocas inferiores (c) efecto de los chorros en el mezclado (d) zona fría ya mezclada

El ensayo recomenzó cuando se pudieron restablecer los flujos de entrada y salida y se abrió la válvula de entrada, admitiendo un caudal de 6 litros/minuto. La Figura 9 b, muestra flujo por las cinco bocas inferiores del tubo localizadas a 22, 27, 32 y 42 cm. Las tres primeras se pueden caracterizar como jets de flotabilidad neutra, mientras que las dos inferiores como plumas ascendentes. La figura 9 c muestra que el efecto de los chorros localiza el mezclado en la zona comprendida entre los 22 y 33 cm de profundidad. La Figura 9 d muestra que a los tres minutos toda la zona fría ha sido mezclada como lo muestra la tintura. El ensayo continuó seis minutos más, sin cambios significativos.

En ambos casos se observó que el flujo entra en el tanque por varias rendijas simultáneamente. La posición de rendija activa más alta corresponde, aproximadamente, a la posición donde se igualan las densidades de alimentación y del tanque. Tres o cuatro rendijas se activan por debajo de ese nivel, de manera que se tiene flujo entrante en una zona de aproximadamente 15-20cm. El flujo que entra con características de chorro o pluma se distribuye por toda la parte afectada del tanque y se mezcla con el fluido allí presente.

CONCLUSIONES

Se construyó un banco de ensayo para el estudio de la estratificación en tanques de agua para el almacenamiento de energía y se desarrolló una metodología para el estudio de la interacción del flujo que los tubos distribuidores estratificadores producen en la termoclina.

Se midieron los perfiles de temperatura en el tanque y se observó el flujo mediante la visualización con el agregado de fluoresceína. Mediante la iluminación con un haz de luz laser plano se pudo observar las plumas o chorros salientes del distribuidor, que pueden describirse como chorros neutros o flotantes según la altura, con un corto tronco laminar para desarrollar en seguida volutas turbulentas. Con iluminación natural ambiental se observó el grado de mezclado global en el tanque. Salvo la zona aledaña a los chorros, no se observa turbulencia en el seno del fluido. Los ensayos realizados permiten concluir que el flujo de alimentación a dada temperatura ingresa al tanque por casi todas las bocas del tubo distribuidor localizadas a lo largo de unos 20cm por debajo de la zona de fluido más caliente. El mezclado se realiza, originado por las plumas ingresantes y por su rebote en las paredes del tanque y posterior recirculación, sólo en la zona fría del tanque, preservando así la calidad de la energía acumulada en la zona caliente.

AGRADECIMIENTOS

Queremos expresar nuestro agradecimiento al Sr. Carlos Fernández por su colaboración en la construcción del equipo y al Lic. Carlos Martínez por su ayuda durante las primeras experiencias de visualización.

REFERENCIAS

- Shah, Louise Jivan, Elsa Andersen and Simon Furbo. (2005). Theoretical and experimental investigation of inlet stratifiers for solar storage tanks. *Applied Thermal Engineering*, Vol 25 pp. 2086-2099.
- Duffie, John A. y William A. Beckman. (2014). *Solar engineering of thermal processes*. 4Th Edition. Wiley.
- Toyoshima Maski y Seiji Okawa. (2013). An effect of a horizontal buoyant jet on the temperature distribution inside a hot water storage tank. *International Journal of Heat and Fluid Flow*, Vol. 44 pp. 403-413.
- Al-Amin M.F., Sun Shuyu y Salam Amgad. (2014). Simulation of buoyancy-induced turbulent flow from a hot horizontal jet. *Journal of Hydronamics*, 26(1), pp. 104-113.
- Saloux E. y J.A. Candanedo. (2019). Modelling stratified thermal energy storage tanks using an advanced flowrate distribution of the received flow. *Applied Energy*, 214, pp. 34-45.
- González-Altozano, Pablo, María Gasque, Federico Ibáñez, Rosa Penélope Gutiérrez-Colomer. (2015). New methodology for the characterization of thermal performance in a hot water storage tank during charging. *Applied Thermal Engineering*, 84, pp. 196-205
- Moncho-Esteve, Ignacio José, María Gasque, Pablo González-Altozano. (2017). Simple inlet devices and their influence on thermal stratification in a hot water storage tank. *Energy and Building*, 150, pp. 625-638.

EXPERIMENTAL STUDY OF THE FLOW PRODUCED BY DIFFERENT MANIFOLDS INSIDE A HEAT STORAGE TANK STRATIFIED IN TEMPERATURE.

ABSTRACT This paper describes an experimental equipment for the study of the hydrodynamic behavior of a feeding stratifier manifolds for water heat storage tanks for use in combined active solar systems. The operation of the manifold is closely related to the mixing process that occurs in the storage tank. The way in which the fluid distributed by the tube enters a previously stratified tank and the evolution of the initial thermocline during the simulation of the loading process, has been studied. It has been found that for the tested feed streams and the stratifier tube designs that were used, the

fluid enters the tank through several of the inlet holes, generating a smoother thermocline than that expected.

Keywords: heat storage, storage tank, manifolds, jets, plumes