

MODELIZACIÓN NUMÉRICA EN RÉGIMEN DINÁMICO DE UN DEPÓSITO DE ALMACENAMIENTO DE ENERGÍA TÉRMICA MEDIANTE ESTRATIFICACIÓN CON TERMOCLINA

FERNÁNDEZ GARCÍA, Francisco Javier⁽¹⁾; LANGA CABALEIRO, Raquel⁽¹⁾

FOLGUERAS DÍAZ, M. Belén⁽¹⁾

javierfernandez@uniovi.es

⁽¹⁾Universidad de Oviedo, Escuela Politécnica de Ingeniería Gijón, Departamento de Energía

RESUMEN

El estudio describe la modelización mediante técnicas de dinámica de fluidos computacional (CFD) de un depósito de agua de grandes dimensiones destinado al almacenamiento de energía térmica en forma de calor sensible, que forma parte del proceso productivo real de una industria alimentaria. El agua es almacenada a diferentes temperaturas en un único depósito, aprovechando y favoreciendo su estratificación. Este tipo de sistemas son diseñados de modo que las temperaturas de las corrientes de carga y descarga son aproximadamente constantes, por lo que en el depósito aparece un salto brusco en la temperatura del agua almacenada, llamado termoclina. Varios fenómenos físicos provocan una reducción en la cantidad de energía almacenada, entregando en la descarga una cantidad de energía menor que la aportada durante la carga. La reducción en la temperatura de almacenamiento y la pérdida de estratificación producen una pérdida de la calidad de dicha energía, resultando de interés la aplicación de técnicas de análisis exergético. Se ha simulado el depósito en régimen variable, tomando dimensiones y condiciones de operación de la instalación real. Se estudia el espesor de la termoclina, e índices de eficiencia en la estratificación basados en análisis energético y exergético durante procesos de carga, descarga y almacenamiento. El análisis exergético ha permitido detectar la pérdida de estratificación incluso en periodos muy cortos, confirmando ser una herramienta de utilidad en el estudio de sistemas de almacenamiento de energía térmica.

Palabras clave: Simulación numérica, almacenamiento de energía térmica, estratificación con termoclina.

1. Introducción

La importancia de las tecnologías de almacenamiento de energía térmica se pone de manifiesto en aplicaciones en las que puede existir diferencia entre disponibilidad y demanda de energía, tanto en forma de no simultaneidad temporal como de diferencia entre la capacidad de producción de energía térmica y su demanda. Estas características se encuentran claramente presentes en tecnologías de aprovechamiento de energía solar térmica, tanto para su aprovechamiento final en forma calor como para su transformación en energía eléctrica en plantas termosolares.

En instalaciones de cogeneración es habitual que existan desfases temporales y de capacidad entre las necesidades del proceso en el que se realiza el aprovechamiento térmico y la producción de energía eléctrica para autoconsumo o venta a la red de distribución. En estos casos la instalación de un sistema de almacenamiento de energía térmica puede aumentar la rentabilidad de la inversión necesaria, determinando en ocasiones la viabilidad económica del proyecto.

Las estrategias utilizadas para almacenar energía térmica consisten en hacer variar la energía interna de un material acumulado, ya sea en forma de calor latente de cambio de fase [1] o de variación de su temperatura, en forma de calor sensible [2]. Cuando el almacenamiento de calor sensible se realiza en un único depósito, se aprovecha la estratificación que provoca que el fluido se encuentre de forma estable en capas o estratos más elevados en el interior del depósito a medida que su temperatura es más alta. Si las temperaturas caliente y fría de diseño son aproximadamente constantes, se produce un salto único y pronunciado en el perfil de temperatura del fluido a una altura del depósito que dependerá de su nivel de carga. El salto abrupto de temperatura se llama termoclina y da nombre al tipo de sistemas de acumulación de energía térmica sensible que se analiza en este estudio.

Actualmente los sistemas de termoclina para acumulación de energía térmica en forma de calor sensible despiertan interés en plantas termosolares de generación eléctrica. En estos casos las temperaturas de acumulación son elevadas y los fluidos de transferencia y acumulación son sales hidratadas fundidas [3] o aceites térmicos [4]. El elevado precio de estos fluidos hace recomendable la utilización de materiales sólidos de relleno, más baratos y con elevada capacidad calorífica, formando acumuladores de lecho compacto. Cuando la acumulación se puede llevar a cabo a temperaturas más bajas, el agua es la sustancia más recomendable al ser barata, disponible, estable y con muy elevada capacidad calorífica, prescindiéndose en tal caso de los materiales de relleno.

Se han utilizado técnicas de Dinámica de Fluidos Computacional (CFD) para simular un depósito de acumulación por termoclina de grandes dimensiones, instalado en una planta de cogeneración incorporada al proceso productivo de una industria alimentaria. Un depósito de agua presurizado proporciona un nivel térmico adecuado para el secado de materia prima.

El modelo plantea varios niveles de dificultad para el cálculo numérico: las velocidades del fluido en la sección principal del depósito son extremadamente bajas, por lo que en estas zonas los fenómenos dominantes son de flotación y convección natural junto con fenómenos de pared. Por el contrario, en las entradas debe resolverse un flujo con un componente forzado mucho más importante. La simulación de una acumulación es por definición dinámica, con largos periodos temporales de evolución del sistema, lo que unido a la necesidad de un mallado suficientemente fino para describir con precisión todos los fenómenos y al gran tamaño del sistema, lleva al límite la capacidad de cálculo incluso para un modelo 2D.

2. Objetivos

Mediante técnicas de dinámica de fluidos computacional se modelizará un depósito de acumulación de energía térmica con termoclina. Se identificarán los fenómenos físicos y los aspectos más relevantes en el comportamiento de esta instalación a fin de que sean considerados de forma adecuada en el modelo. Se tomarán las dimensiones y condiciones de operación a partir de los datos de diseño y del sistema de adquisición de datos de la planta. Se obtendrán los valores de las propiedades termofísicas

relevantes de las sustancias y materiales presentes. Se definirán de forma adecuada el mallado y las condiciones de contorno en el espacio y en el tiempo necesarios para el cálculo.

La estratificación es deseable en el funcionamiento de estos depósitos de acumulación y define en gran medida su correcto funcionamiento. Se prestará especial atención a la identificación de los factores que tienen influencia sobre este fenómeno, asegurando que se encuentran correctamente incorporados al modelo de cálculo numérico.

Existen múltiples índices de calidad utilizados para el análisis del funcionamiento de los sistemas de acumulación con termoclina. La selección de los índices adecuados, así como la definición de las técnicas de cálculo que permitan evaluarlos a partir de los resultados del modelo numérico, formarán parte esencial de este estudio.

Partiendo de valores iniciales tomados del registro de datos de la instalación, se realizarán los cálculos correspondientes a la evolución del sistema durante un periodo de tiempo significativo y se comprobarán los valores de los índices de eficiencia de la estratificación analizando su capacidad para evaluar la eficacia del sistema en la acumulación de energía térmica.

3. Método de trabajo

3.1. Descripción de la instalación

El depósito cilíndrico vertical con extremos en forma de casquetes semielipsoidales tiene una altura total de 25.3 m y un diámetro de 6.8 m (ver Figura 1). Su construcción es en chapa de acero de 12 mm de espesor con un aislamiento térmico de 100 mm de espesor. En su interior contiene dos dobles difusores de forma octogonal, uno de ellos en la parte baja y otro en la parte alta. La disposición de dobles difusores con entradas dirigidas hacia las paredes del depósito es una solución comúnmente aceptada en este tipo de depósitos. El objetivo es minimizar la pérdida de estratificación debida a la mezcla producida por los flujos entrantes.

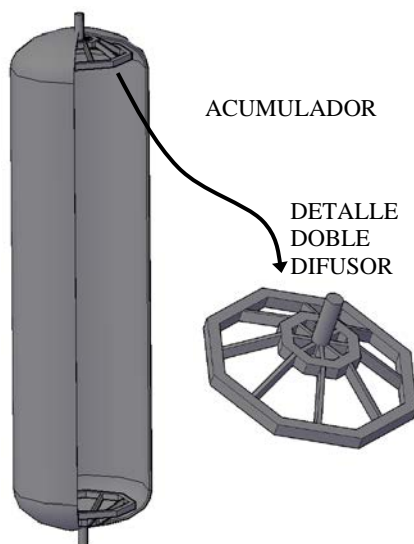


Figura 1: Depósito acumulador con detalle del doble difusor superior.

El sistema de adquisición de datos registra el perfil de temperatura en el interior del depósito mediante 21 sondas de temperatura distribuidas uniformemente a lo largo de la zona cilíndrica del depósito. Los conductos superior e inferior actúan como tuberías de entrada o salida dependiendo de que el proceso sea de carga o de descarga. Se registra la temperatura en ambos conductos, el caudal desplazado y la presión en la parte baja del depósito.

3.2. Condiciones de operación

En la zona fría el agua se encuentra a una temperatura entorno a los 50°C, en la zona caliente el agua se encuentra a temperaturas cercanas a los 120°C. El circuito se encuentra presurizado a 5 bar en su parte baja, evitando el cambio de fase en el agua caliente.

Durante el proceso de **carga** el depósito recibe una entrada de agua a alta temperatura que entra en el volumen de acumulación a través del difusor superior. Durante el proceso de **descarga** se invierte el sentido de circulación del flujo de agua, entrando a baja temperatura a través del difusor inferior. También resulta de interés el mantenimiento de la energía acumulada durante los periodos en los que no se produce carga ni descarga, o periodos de **almacenamiento**.

3.3. Estratificación

El mantenimiento de la estratificación es esencial en tanques de almacenamiento de energía térmica por termoclina. El principal motivo de pérdida de estratificación en estos depósitos es la mezcla producida por las corrientes de entrada durante los procesos de carga y descarga [2]. Por otro lado, los fenómenos de transferencia de calor generan corrientes convectivas que producen mezcla y la consiguiente pérdida de estratificación. Las vías principales de transmisión de calor son: hacia el entorno a través de la pared del tanque y de su aislamiento térmico; entre las zonas de alta y baja temperatura en forma de conducción axial a través de la pared metálica del depósito y de difusión térmica en la propia termoclina.

3.4. Índices de eficiencia en la estratificación

Existen diversos modos de evaluar la eficiencia del almacenamiento de energía en los sistemas de termoclina. El modo más sencillo podría ser la representación gráfica de la evolución del perfil de temperatura en el depósito, adimensionalizando salto térmico y posición. Existen índices que no tienen en cuenta información sobre la historia del proceso y otros que comparan un proceso de almacenamiento real con uno teórico. El estudio de Bahnfleth y Song [5] utiliza cuatro indicadores de eficiencia diferentes sobre un mismo caso, aunque existen muchos más métodos de evaluación de la estratificación [6]. Sobre los resultados obtenidos mediante el modelo de cálculo se analizarán tres parámetros: espesor de la termoclina, un índice de eficiencia en la estratificación basado en el análisis energético y un índice de eficiencia basado el análisis exergético. Se puede afirmar que estos dos análisis se plantean basándose en el Primer y Segundo Principios de la Termodinámica respectivamente.

Espesor de la termoclina

Se determinará mediante la diferencia de altura entre la posición en la que la temperatura se encuentra por debajo de la temperatura máxima en un valor del 5% y la correspondiente a una temperatura que supera a la temperatura más baja en un 5%, porcentajes sobre el salto máximo de temperaturas en el depósito, tal como se representa gráficamente en la Figura 2.

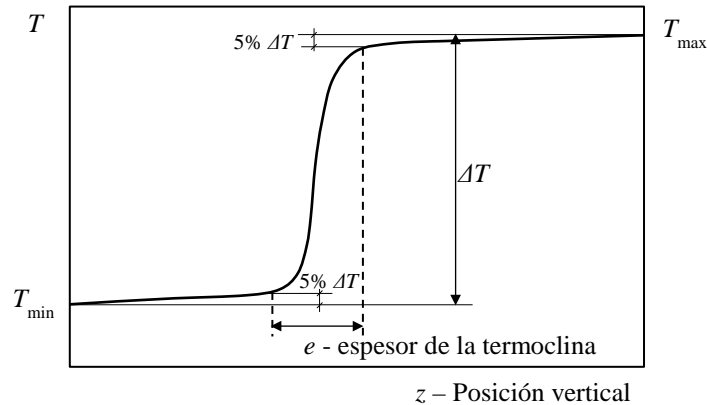


Figura 2: Determinación del espesor de la termoclina sobre el perfil de temperatura.

Índice de eficiencia en la estratificación basado en el análisis energético (1^{er} Principio)

Es habitual que los parámetros de eficiencia de almacenamiento de energía analicen un ciclo completo de carga y descarga, comparando la energía almacenada durante la carga con la que devuelve el sistema durante la descarga. En estos casos el índice de eficiencia se define mediante consideraciones de cantidad de energía cargada-devuelta.

Se utilizará un índice que permita evaluar la estratificación en un instante dado. Para su formulación en periodos de la carga, se considera que se está aportando un caudal de agua a temperatura máxima T_{max} y se compara la cantidad de energía que se acumulará siguiendo el perfil existente con la que se almacenaría si la salida se produjera a temperatura mínima. El volumen de líquido considerado es el comprendido entre el fondo del acumulador y la posición en la que la temperatura supera a la mínima en un 20% del salto térmico máximo, tal como se indica en la Figura 3.

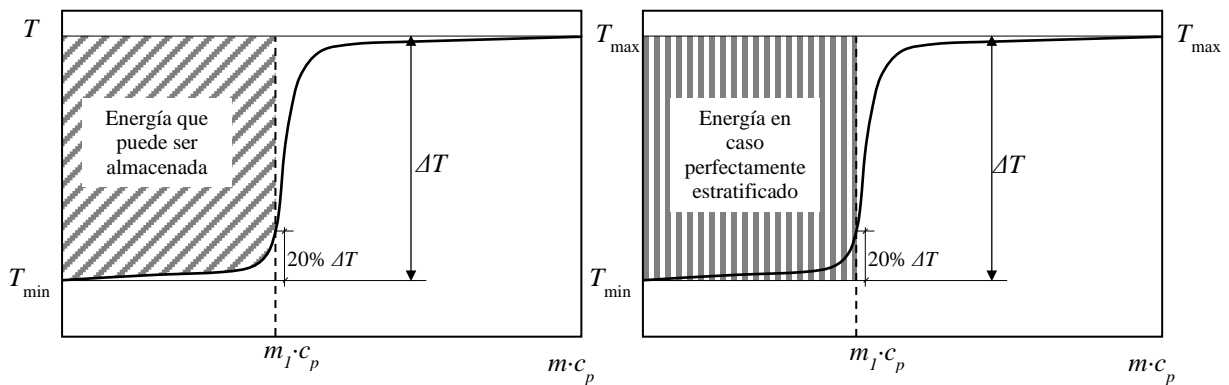


Figura 3: Determinación del parámetro de rendimiento energético en la estratificación en la carga.

$$\eta_{1P,carga} = \frac{\int_0^{z(T_{min}+20\% \Delta T)} c_p \cdot (T_{max}-T) \cdot dm}{m_1 \cdot c_p \cdot (T_{max}-T_{min})} \tag{1}$$

De forma equivalente, para la descarga se define una eficiencia energética en la estratificación mediante la cual se compara la cantidad de energía que se podría obtener al enviar agua al depósito a temperatura T_{min} , en el caso con perfil real y en un caso perfectamente estratificado con la zona caliente a temperatura T_{max} . Se analiza la zona del depósito desde la altura en la que la temperatura es inferior a T_{max} en un 20% de la diferencia máxima de temperatura hasta su punto más alto y conteniendo la cantidad de agua almacenada m_2 . El análisis es análogo al detallado gráficamente para la carga en la Figura 3.

$$\eta_{1P,descarga} = \frac{\int_{z(T_{max}-20\% \Delta T)}^{z_{max}} c_p \cdot (T-T_{min}) \cdot dm}{m_2 \cdot c_p \cdot (T_{max}-T_{min})} \tag{2}$$

El índice de eficiencia así definido se basa en consideraciones energéticas y analiza la calidad de la estratificación en la zona baja del acumulador cuando el proceso analizado es de carga y en la zona alta del acumulador cuando se utiliza el parámetro de la descarga. Se han definido estos índices con el fin de poder analizar mediante la energía acumulada un perfil en un instante determinado, frente a otros parámetros de análisis basados en el primer principio que evalúan ciclos completos de carga-descarga.

Índice de eficiencia en la estratificación basado en análisis exergético (2º Principio)

Se analiza la exergía contenida en el medio almacenado, considerando que el líquido se encuentra en su estado muerto cuando su temperatura es la ambiental, T_{amb} (no se tiene en cuenta el posible aprovechamiento de su energía potencial). Si se hace funcionar un ciclo térmico teórico con la eficiencia de Carnot tomando como foco caliente el líquido acumulado hasta enfriarlo a temperatura ambiente, se obtiene el valor de la exergía, A del líquido:

$$A = \int_{T_{amb}}^T m \cdot c_p \cdot \left(1 - \frac{T_{amb}}{T}\right) \cdot dT \cong m \cdot c_p \cdot \left((T - T_{amb}) - T_{amb} \cdot \ln\left(\frac{T}{T_{amb}}\right) \right) \quad (3)$$

Mediante la integración de un término dA correspondiente a un diferencial de masa dm en toda la altura del depósito se obtiene la exergía contenida en el acumulador. Se evalúa dicha exergía con el perfil de temperatura calculado y en dos casos extremos que contienen la misma cantidad de energía. Estos casos son denominados *totalmente estratificado* y *totalmente mezclado* y se representan en la Figura 4.

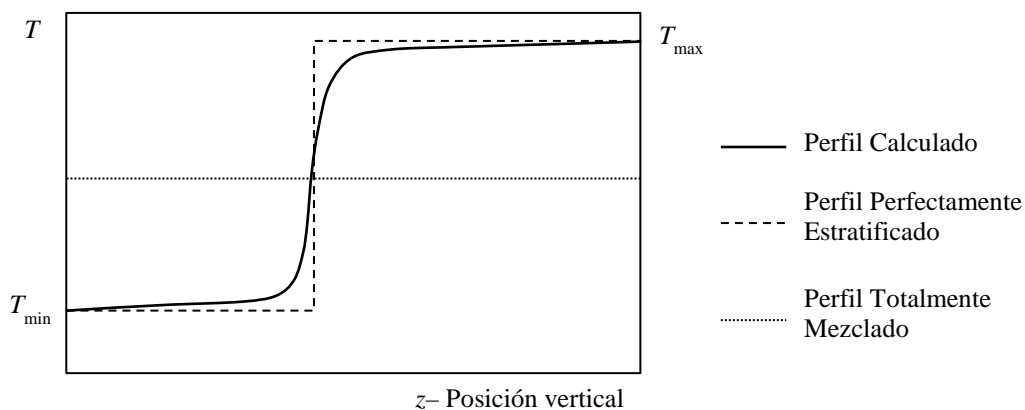


Figura 4: Perfiles: calculado, totalmente mezclado y perfectamente estratificado.

Estos perfiles teóricos representan los casos con mayor y menor nivel de estratificación conteniendo la misma cantidad de energía que el perfil calculado. La calidad de la estratificación desde el punto de vista del segundo principio de la termodinámica se evalúa mediante un rendimiento que compara la exergía del depósito en estas tres situaciones: $A_{calculado}$, $A_{estratificado}$, $A_{mezclado}$:

$$\eta_{2P} = \frac{A_{calculado} - A_{mezclado}}{A_{estratificado} - A_{mezclado}} \quad (4)$$

Para el cálculo de los índices de eficiencia en la estratificación basados en el primer y segundo principios de la termodinámica η_{1P} y η_{2P} , se consideran valores constantes con la temperatura del calor específico y de la densidad del agua, por lo que ambas propiedades podrían eliminarse en numerador y denominador de las ecuaciones (1), (2) y (4) simplificando a un análisis de temperatura y volumen de líquido acumulado.

3.5. Condiciones de contorno, propiedades termofísicas

Sobre un modelo bidimensional que aprovecha la simetría axial del problema, el espacio se divide mediante un mallado de unas 170000 celdas. La evolución temporal se analiza mediante pasos temporales de 1 segundo. La condición de contorno en el tiempo consiste en un perfil inicial de temperatura a lo largo del depósito que coincide con las temperaturas registradas por el sistema de adquisición de datos en el instante inicial y un campo de velocidades tomado de una solución previa en régimen permanente. En las entradas se fija el caudal másico y la temperatura de entrada del fluido, fijándose la presión en las salidas. En las paredes del depósito se incluye la conducción en el acero y en el aislante térmico, con condición de contorno en el exterior del material aislante de convección natural ($h=3.6\text{W/m}^2\text{K}$) hacia el ambiente. Como valor de la temperatura ambiente T_{amb} se toma 23°C . El mismo valor servirá como temperatura para el cálculo de exergías en la obtención del índice de eficiencia en la estratificación basado en el Segundo Principio.

Se resuelven las ecuaciones conservativas: ecuación de continuidad, ecuaciones de conservación de la cantidad de movimiento incluyendo el término fuente de la aceleración de la gravedad en la dirección axial, y la conservación de la energía.

3.6. Variación de la densidad del agua con la temperatura

La densidad varía en función de la temperatura para la simulación en el modelo CFD, ya que este efecto causa las fuerzas de flotación, muy importantes en estos sistemas. El valor de la densidad del agua $\rho(t)$ en función de la temperatura (escala Celsius) se obtiene a partir del ajuste mediante una sencilla función polinómica de datos obtenidos del NIST [7].

$$\rho(t) = 1004 - 0.1912 \cdot t - 2.64 \cdot 10^{-3} \cdot t^2 \quad (5)$$

3.7. Casos calculados

Se resuelve un caso de carga, un caso de descarga y un caso de almacenamiento. Durante la carga se introduce un caudal de $34.52\text{m}^3/\text{h}$ de agua a una temperatura de 127°C por la parte alta del depósito; durante la descarga se introduce un caudal de $19.32\text{m}^3/\text{h}$ de agua a una temperatura de 50.2°C por la parte baja del depósito; en el almacenamiento el caudal es nulo. Los tres casos se calculan durante un periodo de 1 hora. La Figura 5 representa los perfiles iniciales de temperatura en los tres casos calculados.

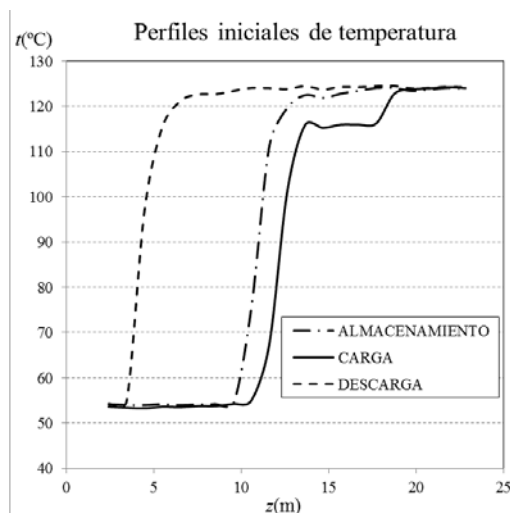


Figura 5: Perfiles iniciales de temperatura en los tres casos calculados.

4. Resultados

La evolución de los tres índices de eficiencia de la estratificación, representada en la Figura 6, centra el interés de la presentación de resultados. El índice basado en el análisis energético sólo se calcula para los ensayos de carga y descarga.

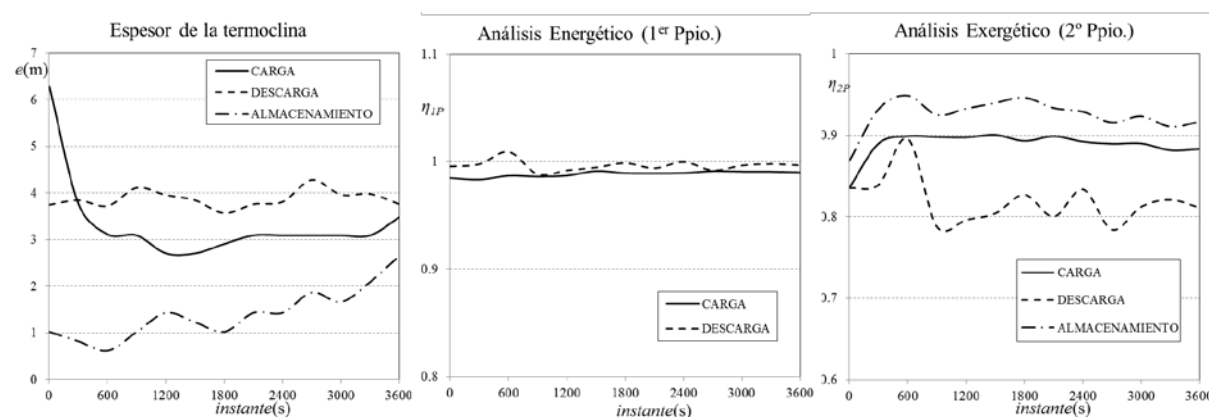


Figura 6: Espesor de la termoclina, índices de eficiencia en la estratificación basados en análisis energético y en análisis exergético.

El espesor de la termoclina aumenta durante el almacenamiento y se mantiene aproximadamente constante durante la carga y la descarga. Su elevado valor inicial en el caso de la carga se debe a que este parámetro capta el doble escalonamiento inicial que se puede apreciar en la Figura 5. El análisis basado en el Primer Principio ofrece poca información, con valores cercanos a la unidad y presentando incluso un valor en la descarga superior a la unidad. El índice de eficiencia de la estratificación basado en el análisis exergético ofrece una información más precisa sobre la calidad de la energía almacenada, representando con mayor precisión variaciones en el perfil de temperaturas y pequeños cambios en la estratificación del fluido.

5. Conclusiones

Se desarrolla un modelo de cálculo CFD que permitirá simular con precisión el almacenamiento de energía térmica en grandes depósitos acumuladores con termoclina, contándose para ello con información de proceso de una planta real. Se han analizado y procesado los datos necesarios para entrada y comprobación de resultados a partir de la información del sistema de adquisición de datos de planta. Se ha avanzado en la comprensión de los fenómenos físicos implicados en este tipo de sistemas y se han ajustado parámetros de cálculo necesarios para alcanzar soluciones válidas.

La estratificación es el fenómeno físico deseado y promovido en estas instalaciones y las define en gran medida. Se han analizado parámetros que indican la medida en la que se produce y por lo tanto la calidad en el almacenamiento de energía. Observando los patrones de funcionamiento en una instalación real se concluye que los índices basados en ciclos completos de carga-descarga pueden no ser los más adecuados para el análisis en instalaciones reales, donde se suceden periodos de cargas y descargas parciales con almacenamientos cortos. Se ha modificado y adaptado una expresión del índice de eficiencia en la estratificación basado en el análisis energético de manera que permite extender este tipo de análisis al funcionamiento real de la planta.

Para el cálculo del índice de eficiencia en la estratificación basado en el análisis exergético se tiene en cuenta todo el perfil de temperaturas a lo largo del depósito y su valor responde a un conjunto más amplio de aspectos relacionados con la calidad del almacenamiento de energía. Este parámetro ha de estar en todo caso entre los analizados con vista a la comprensión y optimización del comportamiento de los sistemas de acumulación de energía térmica con termoclina.

6. Referencias

- [1] Abduljalil A. Al-abidi, Sohif Bin Mat, K. Sopian, M.Y. Sulaiman, Abdulrahman Th. Mohammed, CFD applications for latent heat thermal energy storage: a review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2013, vol. 20, pp. 353-363.
- [2] ZURIGAT, Y. H. GHAJAR, A. J. Heat transfer and stratification in sensible heat storage systems, en DINCER, I. ROSEN, M. A. *Thermal energy storage systems and applications*. John Wiley & Sons, 2002, pp. 259-301.
- [3] YANG, Z. GARIMELLA, S. V. Thermal analysis of solar thermal energy storage in a molten-salt thermocline. *Solar Energy*, 2010, vol. 84, pp. 974-985.
- [4] COCCO, D. SERRA, F. Performance comparison of two-tank direct and thermocline thermal energy storage systems for 1MWe class concentrating solar power plants. *Energy*, 2015, Inpress, <http://dx.doi.org/10.1016/j.energy.2014.12.067>.
- [5] BAHNFLETH, W. P. SONG, J. Constant flow rate charging characteristics of a full-scale stratified chilled water storage tank with doubling slotted pipe diffusers. *Applied Thermal Engineering*, 2005, vol. 25, pp. 3067-3082.
- [6] HALLER, M. Y. CRUICKSHANK, C. A. STREICHER, W. HARRISON, S. J. ANDERSEN, E. FURBO, S. Methods to determine stratification efficiency of thermal energy storage processes-Review and theoretical comparison. *Solar Energy*, 2009, vol. 83, pp. 1847-1860.
- [7] <http://www.nist.gov>