

DISEÑO DE UN TANQUE DE TEMPLE DIRECTO POR MEDIO DE SIMULACIONES EN ELEMENTOS FINITOS EN COSMOSFLOWWORKS.

Direct Quench Tank's design by Finite Elements in Cosmosfloworks.

RESUMEN

En el siguiente artículo se presenta el estudio del diseño de un tanque para temple directo agitado por propeller por medio de simulaciones en elementos finitos. El estudio analiza una gran cantidad de tanques de los cuales se presentan los más representativos. Su desarrollo se divide en dos etapas, la primera donde se analiza el comportamiento del fluido y la segunda en que se simula la transferencia térmica de aquellos tanques que presenten una alta reducción del flujo turbulento. El estudio usó en CosmosFloWorks versión 2007, con el cual se analizaron las curvas de fluido y la caída de temperatura de la probeta en los tanques seleccionados.

PALABRAS CLAVES: SolidWorks, COSMOSFloWorks, FEM, Temple, Tanque de Temple.

ABSTRACT

In the next article show the results direct quench tank's design shaken by propeller by simulation of FEM. The study analyzes a great amount of tanks of which they appear most representatives. Its development is divided in two stages, first where the behavior of fluid is analyzed and second the thermal transference simulation of those tanks that display a reduction of the turbulent flow. The study is in COSMOSFloWorks 2007, with which the curves of fluid and the fall of temperature in the specimen in the selected tanks were analyzed.

KEYWORDS: SolidWorks, COSMOSFloWorks, FEM, Quench, Quenching Tank.

LUIS CARLOS FLOREZ GARCIA

Ingeniero Mecánico, M.Sc.
Profesor Auxiliar
Facultad de Ingeniería Mecánica
Universidad Tecnológica de Pereira
luiscar@utp.edu.co

OSCAR FABIÁN HIGUERA COBOS

Ingeniero Metalúrgico, M.Sc.
Profesor Auxiliar
Facultad de Ingeniería Mecánica
Universidad Tecnológica de Pereira
osfahico@utp.edu.co

JOSE LUIS TRISTANCHO REYES

Ingeniero Metalúrgico, M.Sc.
Profesor Auxiliar
Facultad de Ingeniería Mecánica
Universidad Tecnológica de Pereira
josestris@utp.edu.co

Grupo de Investigaciones en Materiales Avanzados (GIMAV-UTP)

Grupo de Investigación en Procesos de Manufactura y Diseño de Máquinas.

Universidad Tecnológica de Pereira

1. INTRODUCCIÓN

Los programas computacionales que aplican la discretización de problemas continuos son una herramienta normalmente conocida bajo el nombre de "programas de FEM" (Método de Elementos Finitos por sus siglas en inglés) [7]. Estos, permiten simular el comportamiento estático, dinámico, térmico, magnético y de fluidos de sistemas físicos complejos permitiendo realizar estudios analíticos antes de finalizar un diseño o tomar alguna decisión. Para nuestro caso, debido a que se estudió el comportamiento de un tanque para temple directo se realizó una simulación térmica y de fluidos.

El siguiente artículo busca seleccionar un tanque que realice un temple de forma rápida, garantizando un comportamiento del fluido de forma laminar para generar una alta transferencia de calor [5] [6]. El volumen de líquido requerido es 11 litros de agua como medio templante y se escogió además, un propeller

mecánico vertical, porque reduce los costos inherentes que requerirían un propeller colocado horizontalmente. Además, da la opción de ser utilizado fácilmente, si es necesario, en otros tanques que se encuentren en el mismo sitio. El estudio se realizó por medio de modelos en 3D simulados en COSMOSFloWorks 2007 SP3.0 Build: 498, debido a que es el programa licenciado para el estudio de fluidos en la Universidad Tecnológica de Pereira.

2. FUNDAMENTOS TEORICOS

2.1. Temple. El temple de aceros es el proceso de rápido enfriamiento de partes metálicas desde la temperatura de austenización, típicamente dentro del rango de 815 a 870 °C. Fundamentalmente su objetivo es enfriar el material (acero), lo suficientemente rápido para formar microestructuras como bainita o más frecuentemente martensita. La función básica del temple es controlar la

rata de transferencia de calor de la superficie de la pieza aceros.

- **Temple Directo.** Se efectúa enfriando directamente la pieza desde la temperatura de austenización en un medio templante, generalmente agua o aceite. Esta es una de las técnicas más usadas.

2.2 Análisis de Elementos Finitos. La mayoría de los programas de elementos finitos divide el espacio en un conjunto de poliedros. Para el caso de COSMOSFloWorks, programa de elementos finitos para el análisis de fluidos, toma la región de estudio y la divide en celdas cúbicas. Las celdas pueden contener fluido o, como se observa en la Figura 1, elementos sólidos (en rojo) o una combinación de las dos que contiene una parte de sólido y una parte de fluido (celdas verdes). Estas se refinan si se considera necesario, el refinamiento de la malla se hace fraccionando una celda en otras ocho y así sucesivamente.

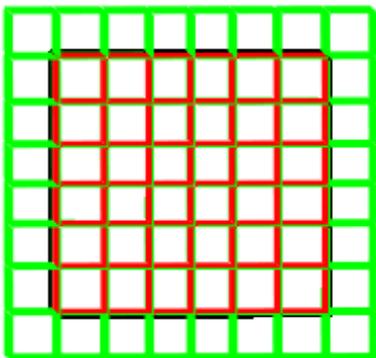


Figura 1. Modelo en forma de cubo, dividido en celdas.

- **Ecuaciones gobernantes del sistema.** El sistema de ecuaciones que gobiernan la simulación de fluidos laminar y turbulento en el COSMOSFloWorks son los de Navier-Stokes, las cuales formulan leyes de flujo de fluidos de masa (1), momento (2) y conservación de la energía. En un sistema de coordenadas cartesianas se podrían apreciar de la siguiente forma: [2]

$$\frac{\partial p}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i}(p u_i) = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial p u_i}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j}(p u_i u_j) + \frac{\partial p}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j}(\tau_{ij} + \tau_{ij}^R) + S_i \quad (2)$$

El fluido laminar ocurre cuando el valor del número de Reynolds tiene un valor bajo, cuando este número excede un valor crítico el fluido se convierte en turbulento, por lo que se pueden presentar los dos. Para predecir un flujo turbulento el programa usa las ecuaciones de Navier-Stokes y Favre, donde los efectos de un fluido turbulento afectan los parámetros a considerar.

- **Transferencia de Calor.** La transferencia de calor en el programa se puede estudiar tanto en el fluido como en los sólidos. La transferencia de calor en el fluido se describe por la ecuación de conservación de la energía, donde el flujo de calor es definido por la ecuación (3), que describe tanto flujo laminar como turbulento. Pr es el número de Prandtl, h entalpia, μ coeficiente de viscosidad dinámica y μ_t coeficiente de viscosidad turbulenta, que para flujo solamente laminar es $\mu_t = 0$.

$$q_i = \left(\frac{\mu}{Pr} + \mu_t \right) \frac{\partial h}{\partial x_i} \quad \text{para } i = 1, 2, 3 \quad (3)$$

El fenómeno de conductividad térmica en un cuerpo sólido isotrópico es descrito por la ecuación (4), donde e es energía interna específica, Q_H calor específico extraído por unidad de volumen y λ conductividad térmica. [3]

$$\frac{\partial p e}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial x_i} \right) + Q_H \quad (4)$$

- **Condiciones de Frontera.** Permite generar las diferentes condiciones de entrada y salida de fluido en un sistema; en este estudio no existen entradas ni salidas de flujo. Asimismo se puede configurar las condiciones de las paredes que están en contacto con el fluido, las cuales pueden ser pared real, pared externa y pared ideal.

La primera opción permite seleccionar la rugosidad y/o la temperatura de la pared que está en contacto con el fluido. Además, permite simular condiciones de elementos que generen movimiento rotacional o lineal en el fluido. La pared externa permite especificar el coeficiente de transferencia de calor y la temperatura externa o solamente la temperatura de la pared. [4]

3. DESARROLLO DE LA SIMULACION

3.1. Estudio. Como objetivo principal se buscó realizar el diseño por medio de elementos finitos de un tanque de temple directo para realizar pruebas de laboratorio. El criterio de diseño consiste en obtener un flujo laminar que aumente la transferencia de calor y de esta forma incrementar la eficiencia del temple.

El estudio inició con diferentes formas del tanque comprobando el direccionamiento del fluido y su comportamiento. Para cada caso el tanque se modificó con diferentes soportes o aditamentos y se estudió por medio del programa el comportamiento del fluido hasta llegar a un estado estable. A continuación, se seleccionaron las tres mejores opciones, además del tanque con que se iniciaron los diseños, sin ninguna modificación, para usarlo como punto de comparación. Se procedió a modelar el temple con los cuatro tanques y una pieza cilíndrica la cual consta de varias probetas

apiladas cuyas dimensiones fueron escogidas según la norma ASTM. [11]

Como parámetros para el diseño se tuvieron en cuenta los siguientes:

- El primer tanque se escogió de sección rectangular, que permite introducir la probeta en diferentes posiciones formas y tamaños dentro del tanque; además permite un fácil acceso para mantenimiento y limpieza.
- El medio templante que se seleccionó es agua.
- El equipo de agitación es un propeller horizontal el cual es fácil de remover para realizarle mantenimiento, además de permitir la reutilización del fluido, es un elemento de bajo costo y de reducidas dimensiones; además, no requiere tubería al contrario de otros sistemas de agitación,
- El modelamiento no tuvo en cuenta aditivos aceleradores, presencia de óxidos o contaminantes.
- Se buscó optimizar posición de la pieza y espacio suficiente para obtener una buena circulación del fluido templante y una máxima transferencia de calor.
- Las condiciones bajo las cuales trabaja el baño deben ser uniformes para mantener la circulación del fluido de forma adecuada, evitando alterarlo para no generar turbulencia.

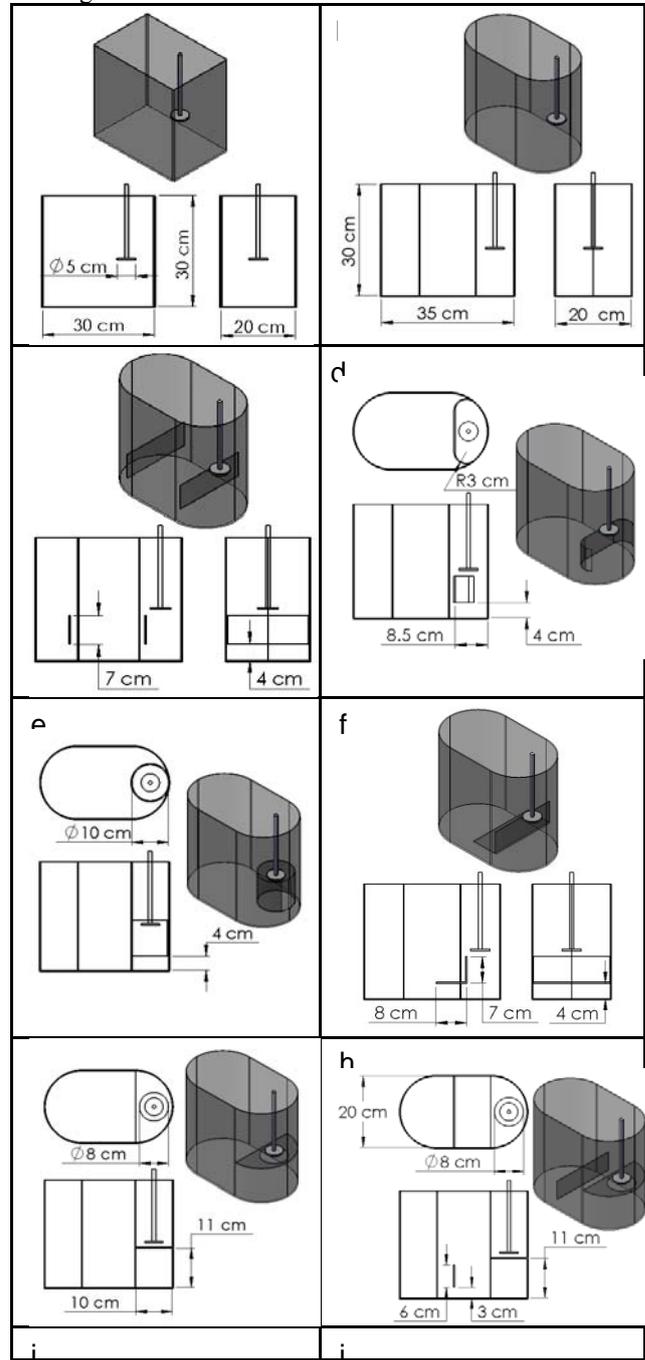
3.2 Modelo Inicial. Debido a que el tanque no es de uso industrial los parámetros principales para basar el diseño fueron el peso de la probeta, su tamaño y forma, que afectaban el comportamiento del flujo del fluido. El volumen del tanque se calculó mediante (5) para una pieza de 1,3 kg de masa.

$$V_{\text{Tanque}} = 8,3 \text{ L/kg} \times \text{masa [kg]} \quad (5)$$

El propulsor tiene un diseño simple, consta de un rotor y unas aspas al final de este, cumple la función de impulsar el fluido. Debido a la forma del tanque, tamaño y medio templante, la velocidad con que se impulsa el fluido debe ser aproximadamente 2 m/s para evitar que se generen burbujas de aire en el agua.

3.3 Propiedades de la Simulación para la primera etapa del estudio. La primera parte del estudio consistió en una serie de simulaciones para cada configuración del tanque, donde se analizaron los comportamientos del fluido cuando alcanzaba un estado estable. En la Figura 2 se observan algunos de los tanques simulados más representativos. Estas variaciones se fueron generando a medida que se estudiaba el comportamiento del fluido una vez que se

alcanzaba el estado estable. Las dimensiones y posiciones de los diferentes aditamentos para direccionar el flujo en la Figura 2, fueron determinadas debido a un comportamiento laminar del fluido para cada una de las configuraciones mostradas.



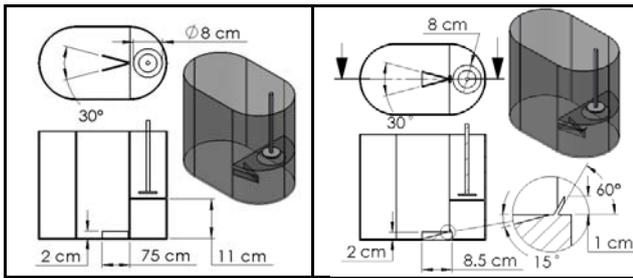


Figura 2. Algunos de los tanques de temple directo modelados en FloWorks con capacidad de 11 Litros.

El estudio se inició con una forma rectangular sin ningún tipo de aditamento, como se observa en la Figura 2a, donde se aprecian las dimensiones del tanque. Estas formas permiten tener una amplia y bien definida zona de trabajo, además de otra zona donde se encuentre el propeller [1].

- **Mallado.** Para todos los modelos de tanques el mallado de esta primera etapa es de calidad 5 en el programa, con una optimización en las paredes delgadas y refinamiento en los bordes. El contacto que realiza el fluido con las piezas sólidas, tales como las paredes del tanque, el propeller y el eje del propeller, incide en el movimiento del fluido, en otras palabras, cualquier cambio de la forma del sólido afecta al fluido.

En la Figura 3 se aprecia el mallado para la primera opción, las celdas en los bordes y existen fronteras entre el fluido y los elementos sólidos, tienen un menor tamaño aumentando la cantidad de celdas en estas zonas que son más influyentes para el estudio. Este tiene 53318 celdas de fluido, 33166 celdas solidas y 15499 celdas parciales.

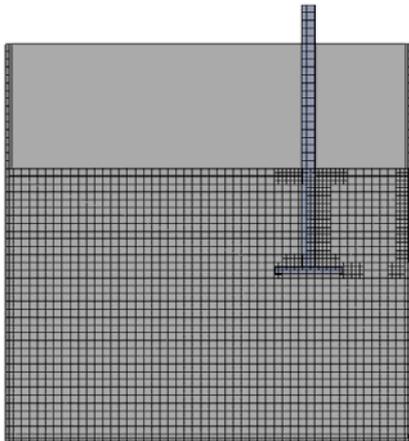


Figura 3. Mallado con refinamiento del primer tanque (i).

- **Condiciones Iniciales.** Como condición inicial se estableció como fluido templante agua para un volumen de 11 Litros. El material del tanque se consideró de acero inoxidable, cuyas propiedades a tener en cuenta en esta primera parte del estudio fueron la rugosidad de las paredes [9], el coeficiente de transferencia de calor y la temperatura inicial. En cuanto al propeller, además de

lo anterior, se modeló como un elemento agitador de empuje axial a una velocidad de 2 m/s. Debido al tipo de fluido templante y al tamaño del tanque, aumentar esta velocidad desproporcionadamente genera burbujas de aire en la superficie que se mezclan con el fluido. [1]

3.4 Propiedades de la Simulación para la segunda etapa del estudio. En esta segunda parte se analizó el tiempo de temple de una probeta de sección circular en los tanques seleccionados en la primera etapa del estudio.

En cuanto al mallado la calidad es de 6, incrementándolo en un grado, también se optimizaron las paredes delgadas y el refinamiento en los bordes. Se obtuvieron 60346 celdas de fluido, 54182 celdas solidas y 26561 celdas parciales, como se puede apreciar en la Figura 4.

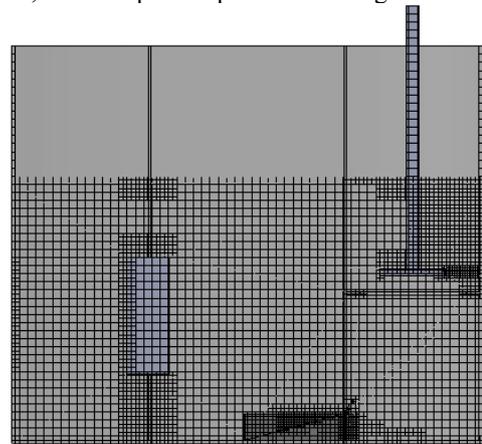


Figura 4. Mallado con refinamiento del tanque j con probeta.

Para estudiar la eficiencia del temple se simuló una probeta cilíndrica SAE 1040, con un volumen de 70,384 cm³ y un área de superficie de 104,5084 cm² [8]. Esta se situó en posición vertical dentro del tanque, a 5 cm de la base y donde existía flujo laminar. Como condiciones iniciales del estudio, además de las anteriormente mencionadas en la primera etapa, se simuló una temperatura inicial de 850 °C para la probeta.

Se realizó, además una simulación física de la conductividad térmica de sólidos [10], teniendo en cuenta los efectos de la transición del fluido de laminar a turbulento y viceversa, además de la gravedad y la variación en el tiempo, para realizar el estudio comparativo. La cantidad de datos en cada estudio se pueden observar en la Tabla 1, este valor varía de acuerdo a la cantidad de celdas y variación de los resultados entre un momento analizado y el siguiente.

Tanque	Nº de datos
a	2657
d	9520
f	14248
j	9044

Tabla 1. Cantidad de datos obtenidos en la simulación de 50 segundos físicos para los tanques con probeta.

4. DESARROLLO Y RESULTADOS

4.1. Primera etapa del Estudio. Tras simular el comportamiento del fluido en cada uno de los tanques se buscó el posicionamiento de los aditamentos y sus dimensiones para mejorar el estado del flujo en cada uno de ellos. Para buscar un flujo laminar se analizó como se iniciaba el flujo turbulento, su comportamiento a través del tiempo y su posición final en el tanque cuando alcanzaba un estado estable. Este análisis introdujo nuevas ideas y variaciones para las formas y posiciones de los aditamentos. Generando más simulaciones para las diferentes dimensiones y posiciones que podría tener los aditamentos en cada tanque.

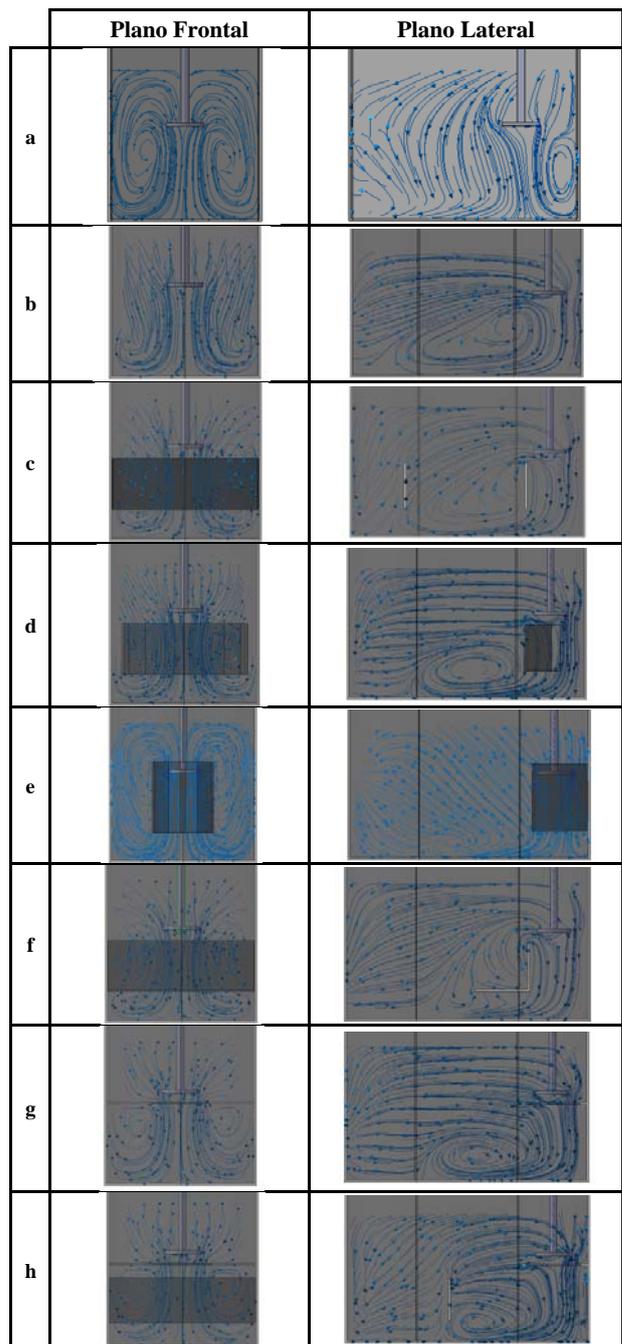
En la Figura 5, se pueden apreciar los resultados de las direcciones del flujo una vez alcanzado el estado estable, para cada uno de los tanques mostrados en la Figura 2.

- **Ejemplo de análisis.** Como se puede apreciar en la Figura 5a, en el plano frontal se observan dos remolinos a los costados del propeller, este tipo de flujo se buscó eliminarlo. Para esto se cambió la forma del tanque, Figura 2b, observando un progreso del comportamiento del flujo, Figura 5b plano frontal, pero seguía generando un flujo turbulento, Figura 5b plano lateral. Nótese que el tratamiento a seguir fue de mejoramiento continuo hasta llegar a un tanque donde redujo el comportamiento turbulento del fluido.

El diseño del tanque j es una mejora del tanque i y esta a su vez es una mejora del tanque g. Nótese que el tanque i de la Figura 2 tiene un ángulo en la base de 30°; este diseño fue modificado con una rampa entre los ángulos. Luego de simulaciones se probó una arista a la salida de la rampa que permitió encontrar las dimensiones y ángulo donde se presentan mejoras en el comportamiento del fluido. Finalmente, se ensayó el redondeo de la arista obteniendo óptimos resultados para esta primera parte del estudio.

- **Tanques seleccionados.** De acuerdo a los resultados observados en la Figura 5, se procedieron a seleccionar los tanques que pasarían a la segunda etapa del estudio. Se eligieron los tanques de acuerdo al comportamiento del flujo, de tal forma que cumplieran con la hipótesis de que el flujo laminar tardara más tiempo recorriendo el tanque, disminuyendo el tiempo de enfriamiento de la probeta lo que, a su vez, aumentaría la transferencia de calor. De acuerdo a esto los tanques seleccionados fueron los d, f y j, también se tomo el primer tanque como punto de comparación.

4.2 Segunda etapa del estudio. Los tanques seleccionados se simularon por un tiempo físico de 50 segundos. En la Figura 6 se observa la variación de la temperatura promedio de la probeta con respecto al tiempo físico simulado para cada uno de los tanques. El resultado fue el esperado de acuerdo a la hipótesis presentada en este artículo.



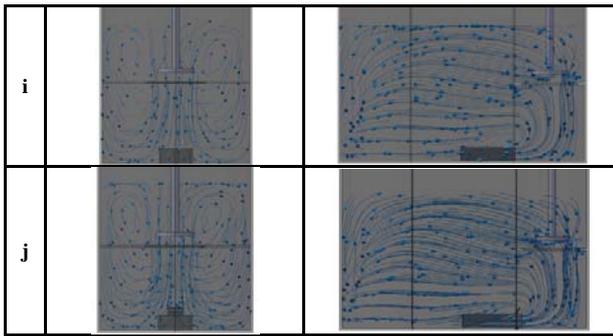


Figura 5. Comportamiento del fluido en algunos de los tanques simulados, para la primera etapa del estudio.

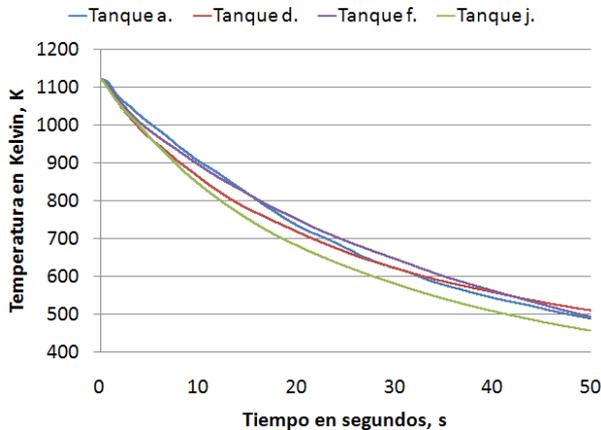


Figura 6. Temperatura promedio de la probeta para cada tanque.

5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

- El tanque j fue aquel que mejor comportamiento tuvo comprobándose que al incrementar el recorrido del fluido por el tanque, este tiene mayor tiempo para enfriarse, aumentando la transferencia de calor y templando la probeta más rápidamente, cumpliendo así con la hipótesis de este estudio.
- Las variaciones del tiempo de enfriamiento entre un tanque otro son apreciables, a pesar de que comparten muchas propiedades, tales como el medio templante, el volumen del fluido, las condiciones iniciales, el propeller y la velocidad generada por este en el fluido.
- Los tanques fueron diseñados basándose, además de lo anteriormente mencionado, en una fabricación sencilla, de bajo costo, para uso de laboratorio, para un fácil mantenimiento con uso de agua como medio templante.
- El equipo de agitación no es el más idóneo, pero si cumple con los requerimientos de proyectar un fluido a la velocidad simulada, la reducción de costos, fácil mantenimiento y el uso rápido de este en otros tanques. Se proyecta como estudio el uso de más propellers con

diferentes posiciones, además de diferentes sistemas de agitación.

- La simulación de elementos finitos es una herramienta que ayuda a predecir el comportamiento de múltiples modelos físicos, en nuestro caso diferentes tanques. Debido a esto, también ahorra costos de fabricación permitiendo la selección de un prototipo virtual para su posterior fabricación y verificación con pruebas de campo.

6. BIBLIOGRAFÍA

Referencias de Libros:

- [1] ASM international, Metal Handbook, Heat Treating: Quenching Systems. Vol. 4, 1991.
- [2] ROACHE, P.J. Fundamentals of Computational Fluid Dynamics. Hermos Publishers, Albuquerque, New Mexico, USA.
- [3] COSMOSFloWorks Fundamentals: Fluid Flow Simulation Software, Cosmos 2006, SolidWorks.
- [4] Introducing COSMOSFloWorks: Fluid Flow Simulation Software, Cosmos 2006, SolidWorks
- [5] HOLMAN P. J. Transferencia de Calor 8^a Edi. McGraw Hill. 1998.
- [6] STREETER Victor, WYLER Benjamin. Mecánica de los Fluidos. 6^a Edi. McGraw Hill. Mexico D.F. 1975.
- [7] ZIEBKIEWICZ O. C. The Finite Element Method. 3rd Edition. McGraw Hill. England. 1980.

Referencias de publicaciones periódicas:

- [8] Peter Fernandes, K. Narayan Prabhu, Effect of section size and agitation on heat transfer during quenching of AISI 1040 steel. Journal of Materials Processing Technology 183 (2007).
- [9] K. Narayan Prabhu, Peter Fernandes. Effect of surface roughness on metal/quenchant interfacial heat transfer and evolution of microstructure. Materials and Design 28 (2007) 544–550.
- [10] B.L. Ferguson *, Z. Li, A.M. Freborg. Modeling heat treatment of steel parts. Computational Materials Science 34 (2005) 274–281.

Normas:

- [11] E-3. Standard guide for preparation of metallographic specimens. ASTM Standard. 2001.
- [12] E7. Standard terminology relating to metallography. ASTM Standard. 2000.