

## DISEÑO DE UN SISTEMA DE ENFRIAMIENTO PARA TEMPLE DE ACEROS

### Design of a system of cooling for steel quenching

#### RESUMEN

El presente artículo describe el procedimiento para el diseño un sistema de enfriamiento para temple de aceros. Donde se tuvo en cuenta las variables de temperatura, agitación y tipo de medio de enfriamiento. Se determinó la confiabilidad del sistema a partir de la simulación del comportamiento del mismo, mediante el software COSMOS FloWorks, donde se considera que los resultados obtenidos están dentro de los límites permisibles de aceptación para su funcionamiento. Además se establecen los términos de referencia de los materiales para la construcción del sistema. Este trabajo busca dotar de un sistema para ensayos de temple de aceros al laboratorio de metalografía de la Universidad Tecnológica de Pereira.

**PALABRAS CLAVES:** *COSMOS FloWorks, temple de aceros, sistema de enfriamiento.*

#### ABSTRACT

The present article describes the procedure for design a system of cooling for steel quenching. Where considered the variables of temperature, agitation and type of cooling means. The trustworthiness of the system from the simulation of the behavior, by the software FloWorks COSMOS, where it is considered that the obtained results are within the permissible limits of acceptance for their operation. This work looks for to equip the laboratory of Metallographic of the Technological University of Pereira with means for tests of quenching steel.

**KEYWORDS:** *Quenching, cooling system, COSMOS FloWorks.*

#### 1. INTRODUCCIÓN

Hoy en día existe un incremento en la producción de máquinas y nuevos materiales que suplan los requerimientos tanto de la sociedad como de la industria. El tiempo de vida útil y confiabilidad de los productos manufacturados están determinados no solo por sus propiedades tribológicas (resistencia a la fricción y al desgaste) sino también por su dureza, tenacidad, elasticidad, resistencia a la corrosión. El tratamiento térmico de los materiales que se utilizan en la construcción de las máquinas es un factor importante en el funcionamiento y mejoramiento de las mismas.

El temple de aceros ha sido un proceso que siempre se ha llevado a cabo, por lo que se ha buscado la forma de mejorarlo y obtener las mejores características del material a partir de los medios y sistemas de enfriamiento.

#### 2. TRANSFERENCIA DE CALOR DURANTE EL PROCESO DE TEMPLE

El temple tiene como objetivo fundamental 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 [1]. La selección de un medio de enfriamiento depende de la capacidad de endurecimiento de la aleación en sí, del espesor y forma de la pieza y de las velocidades de enfriamiento requeridas para conseguir la microestructura deseada.

Los factores que deben ser considerados en el entendimiento del proceso son: naturaleza, propiedades térmicas del material y características de la película del medio formada por la interface del metal caliente.

Diferentes medios han sido utilizados para realizar temple de aceros. En la selección del fluido enfriador se deben tener en cuenta el tipo de acero, la forma, las dimensiones y la futura aplicación de la pieza. Es evidente que un conocimiento correcto del medio de enfriamiento es vital para poder evaluar factores como:

#### OSCAR FABIAN HIGUERA C.

Ingeniero Metalúrgico, M.Sc

Profesor Asistente

Universidad Tecnológica de Pereira

[osfahico@utp.edu.co](mailto:osfahico@utp.edu.co)

#### LUIS CARLOS FLOREZ G.

Ingeniero Mecánico, M. Sc.

Profesor Asistente

Universidad Tecnológica de Pereira

[luisscar@utp.edu.co](mailto:luisscar@utp.edu.co)

#### JUAN FELIPE ARROYAVE L.

Ingeniero Mecánico, M. Sc.

Profesor Auxiliar

Universidad Tecnológica de Pereira

[jfa@utp.edu.co](mailto:jfa@utp.edu.co)

flexibilidad del medio, facilidad de mantenimiento, estabilidad, seguridad, corrosividad, respuesta a la agitación, facilidad de limpieza, disponibilidad y costo. Entre los medios de enfriamiento se encuentra el agua, la salmuera, soluciones cáusticas, los aceites, soluciones poliméricas y gases.

La transferencia de calor durante el temple puede ser matemáticamente descrita en términos del coeficiente efectivo de transferencia de calor. Un medio de enfriamiento debe tener un alto coeficiente que produzca una velocidad tal que minimice la transformación de austenita a ferrita o perlita.

Las propiedades de transferencia de calor de la interfase metal caliente/medio templante puede ser descrita usando la relación de Grossman: [2].

$$H = \frac{h}{2k} \quad (1)$$

Donde  $k$  es la conductividad térmica del material,  $h$  el coeficiente de transferencia de calor y  $H$  es la severidad de temple.

La transferencia de calor del metal caliente en el medio está dada por: [3]

$$q = h \times A \times (T_2 - T_1) \quad (2)$$

Donde  $q$  es el flujo de calor entre la temperatura  $T_1$  y  $T_2$

La severidad de un medio templante depende de su habilidad para permitir la transferencia de calor en la superficie del metal caliente durante el temple.

Generalmente se consideran tres estados de la remoción de calor en la probeta a templar [4]:

**Etapa A** (Etapa de enfriamiento por capa de vapor). La capa de vapor se desarrolla y es mantenida mientras que la provisión de calor desde el interior de la pieza hasta la superficie exceda la cantidad de calor necesaria para evaporar el medio y mantener la fase de vapor. El enfriamiento durante esta etapa es relativamente lento debido a la cápsula de vapor que se forma y que actúa como aislante térmico, el enfriamiento ocurre por radiación a través de la película de vapor.

**Etapa B** (Etapa de enfriamiento por transporte de vapor). En ella se da la mayor rata de transferencia de calor. La película de vapor colapsa y alta extracción de calor es lograda en la superficie del metal.

**Etapa C** (Etapa de enfriamiento por líquido). Empieza cuando la temperatura del metal está por debajo del punto de ebullición del medio de enfriamiento. Bajo esta temperatura la ebullición se detiene y el enfriamiento

ocurre por conducción y convección en el medio. Esta etapa depende de la viscosidad del medio.

### 3. DISEÑO DE TANQUES DE ENFRIAMIENTO

El diseño del tanque se basa en factores como el peso de las piezas, tamaño, forma, espesor, grado del acero y propiedades requeridas. Algunas sugerencias prácticas para el diseño del tanque se listan a continuación:

- A partir del tiempo requerido para templar las piezas y el total de partes deseadas por hora, puede ser determinado el tamaño del tanque. El volumen del medio de enfriamiento se usa para seleccionar el tamaño de los enfriadores.
- Se debe proporcionar un espacio grande para el enfriamiento de la pieza, para obtener circulación del medio y máxima remoción de calor desde la pieza.
- Las piezas calientes y plásticas no deben chocar con colectores hasta que no hayan caído en suficiente medio de enfriamiento.
- El tanque debe ser accesible para mantenimiento y limpieza.
- Es importante proveer de buena ventilación para proteger de humos a los operarios.
- Se requieren materiales especiales de construcción para sistemas que emplean salmuera o soluciones cáusticas.
- Hasta donde sea posible, el sistema debe permitir flexibilidad y control de condiciones tales como tiempo del ciclo de temple, volumen de la circulación y uniformidad en las condiciones del baño.
- No se debe agitar el baño tan violentamente que permita la aparición de espuma. Este aire atrapado reduce la velocidad de transferencia de calor y en el aceite puede producir llamas.

### 4. DISEÑO DEL SISTEMA DE ENFRIAMIENTO PARA TEMPLE DE ACEROS

**4.1 Descripción del sistema.** El sistema de enfriamiento para temple de aceros está compuesto principalmente por dos tanques con control tanto de temperatura como de agitación. Los medios de enfriamiento que se trabajarán en ellos son agua y aceite, por fácil manutención y versatilidad. Para los medios de enfriamiento como el agua y el aceite se requiere agitación de más de 0,25 m/s para asegurar mejores propiedades en el temple. [1]

En el caso del temple en aceite, se requiere un control más riguroso de la temperatura, pues a diferencia del agua no se trabaja a temperatura ambiente, sino, a temperaturas entre 50 y 70°C. El calentamiento se realiza a través de resistencias y la temperatura se controla a partir de termostatos, que garantizan que el aceite se encuentre en este rango.

Para ambos medios se requiere de un solo agitador, debido a su forma compacta y sencilla, permite el cambio rápido de tanque a tanque. El colector o canastilla recibe y acoge el material templado hasta que este homogenice su temperatura.

## 4.2 Componentes del sistema

**4.2.1 Tanques de enfriamiento.** Son cilindros con capacidad para 25 litros, fabricados en acero ASTM A 588 Grado B. Este acero es de fácil consecución, bajo costo y en la mayoría de los ambientes, la resistencia a la corrosión atmosférica de este acero, es sustancialmente mejor que la de los aceros estructurales al carbono, con o sin adición de cobre [4].

Los tanques se diseñarán a partir del cálculo del volumen requerido mediante fórmulas empíricas.

### Para el caso del agua:

Volumen en galones= peso de la pieza en libras [1, 6].

### Para el caso del aceite:

Volumen en litros= Diez veces el peso en kilogramos.

Para el cálculo se pesó una probeta de de acero AISI SAE 4140. Las dimensiones utilizadas para la obtención del peso de la probeta son, 1 pulgada de diámetro y 1 pulgada de longitud. Estas dimensiones seguirán siendo las elegidas para las probetas utilizadas en el actual sistema de enfriamiento y se eligen por facilidad de operación de las mismas durante la preparación para su análisis según lineamientos de la norma ASTM E3.

El volumen para el agua se da por:

- Peso de la probeta = 109,2458 g = 0,240846 lb.  
La carga total es de diez probetas, por lo tanto el peso total es de 2,40846 lb.
- Volumen = 2,40846 galones = 9,11 L = 9117,0128 cm<sup>3</sup> (Lo cual equivale a una sección de aproximadamente 21 cm<sup>2</sup>).

El volumen para el aceite se da por:

- Volumen en litros = 10 x 0,1092458 kg. La carga es de diez probetas.
- Volumen en litros = 10 x 1,092458 = 10,92458 L = 10924.58 cm<sup>3</sup> (Lo cual equivale a una sección de aproximadamente 22,2 cm de diámetro).

Por lo calculado anteriormente se puede observar que con un volumen de 11 lt, es posible realizar el temple para esta carga de probetas, sin embargo para darle mayor flexibilidad al sistema se toma el volumen de los tanques de 25 lt. Las dimensiones de los tanques quedan:

- Diámetro: 31 cm
- Altura: 44,5 cm

**4.2.2 Agitación.** Se realiza a través de impulsores con diámetro de eje de 0.3125 pulgadas, los cuales se acoplan directamente al motor.

**4.2.3 Motor.** La capacidad del motor debe ser como mínimo de 1/10 HP. Por la potencia requerida para fluidos viscosos y deben obtenerse velocidades entre 4000 y 6000 rpm.

**4.2.4 Sistema de calentamiento.** Para el calentamiento del aceite se emplean de resistencias eléctricas de 1000 vatios.

**4.2.5 Control del sistema de calentamiento.** El control de temperatura se realiza a través de un termostato que regula el rango de temperatura en el tanque de 50 a 300°C, trabajando a un voltaje de 110V.

**4.2.6 Colector o canastilla.** Cilindro con capacidad para diez probetas de 1.28x10<sup>-5</sup> m<sup>3</sup> cada una, fabricada en acero inoxidable. Es la encargada de recibir el material al entrar al tanque contenedor del medio de enfriamiento.

**4.2.7 Estructura o base del sistema.** El material que se emplea para la construcción de la base del sistema, es un acero estructural, ASTM A36.

En la Figura 1 se observa un esquema del sistema de enfriamiento diseñado, el cual integra los componentes señalados anteriormente.



Figura 1. Esquema del sistema

## 5. ANÁLISIS DE TRANSFERENCIA DE CALOR.

Se realizaron los cálculos tanto para el agua como para el aceite. Para el agua se asumen propiedades como vapor de agua, pues la interfase para probeta-medio se encuentra durante gran parte del tratamiento térmico en este estado, además de obtenerse las condiciones críticas del tratamiento de temple por agua, cuando ésta se encuentra en condiciones de vapor, es decir cuando todo el enfriamiento se realiza por transferencia de calor a través de radiación y conducción. Para la última etapa donde la transferencia de calor se realiza por conducción,

su interfase es líquida y no representa una condición crítica por la poca diferencia de temperaturas y por ser una etapa menos drástica para el proceso.

Las siguientes ecuaciones y propiedades son requeridas para el cálculo del calor perdido por la probeta durante el tratamiento, que es a su vez es ganado por el medio

$$T_f = (T_w - T_\infty)/2 \quad (3)$$

Donde:  $T_f$  equivale a la temperatura filmica del proceso.

$T_w$ = Temperatura de la probeta [°F]

$T_\infty$ = Temperatura del medio [°F]

Para el agua.  $T_w = 950^\circ\text{C}$  ;  $T_\infty = 15^\circ\text{C}$ . A estas temperaturas las propiedades son:

$$K_f = 0,0355 \text{ BTU/h ft } ^\circ\text{F}, \quad P_r = 0,91, \quad \frac{g^2 \beta \Delta T}{\mu^2} = 23,6 \times 10^3$$

$P_r$  y  $m$ = coeficientes adimensionales para hallar el número de Nusselt ( $N_u$ ),  $g$  es la aceleración de la gravedad,  $\beta$  es el coeficiente de expansión térmica,  $\mu$  es la viscosidad y  $\delta$  es el espesor de la capa límite térmica

El Coeficiente para el cálculo de  $G_{r_f}$  : [5]

$$G_{r_f} = R \Delta T L^3 \quad (4)$$

$$N_{u_f} = \frac{hL}{k_f} \quad (5)$$

$$N_{u_f} = C G_{r_f} P_r f^m \quad (6)$$

Donde:  $k_f$ = Conductividad térmica del material [BTU/h ft °F].  $h$ = Coeficiente de transferencia de calor para el medio.

De lo anterior se obtuvo  $N_{u_f} = 3,802$  y  $h = 1,482 \text{ BTU/h ft}^2 \text{ } ^\circ\text{F}$

Calor perdido a través de la superficie cilíndrica de la probeta (ecuación 2) donde  $A = 2\pi r l$

$$q = 54,4 \text{ BTU/h} = 15,94 \text{ W}$$

Calor perdido por la superficie superior e inferior de la probeta (ecuación 2) donde  $A = \pi r^2$

$$q = 933,5 \text{ BTU/h} = 273,515 \text{ W (Para cada superficie)}$$

Calor perdido en total por la probeta:  $Q_{\text{total}} = 562,97 \text{ W}$

Para el aceite. (Se calcula la pérdida de calor del tanque hacia el ambiente) con la temperatura de los tanques  $T_w = 70^\circ\text{C}$  y  $T_\infty = 25^\circ\text{C}$ .  $K_f = 0,01575 \text{ BTU/h ft } ^\circ\text{F}$ ,  $P_r = 0,72$ .

$$\frac{g^2 \beta \Delta T}{\mu^2} = 1,6 \times 10^3$$

Para obtener

$$N_{u_f} = 83,612, \quad \text{por lo tanto } h = 0,902 \text{ BTU/h ft}^2 \text{ } ^\circ\text{F}$$

Calor perdido a través de la superficie cilíndrica de la probeta (ecuación 2): donde  $A = 2\pi r l$

$$q = 691,89 \text{ BTU/h} = 202,723 \text{ W}$$

Calor perdido por la superficie superior del tanque (ecuación 2) donde  $A = \pi r^2$ ,  $N_{u_f} = 58,8645$ ,  $h = 1 \text{ BTU/h ft}^2 \text{ } ^\circ\text{F}$ ,

$$q = 67,5 \text{ BTU/h} = 19,777 \text{ W}$$

Calor perdido por la superficie inferior del tanque (ecuación 2) donde  $A = \pi r^2$ ,  $N_{u_f} = 25,07$ ,  $h = 0,426 \text{ BTU/h ft}^2 \text{ } ^\circ\text{F}$

$$q = 28,75 \text{ BTU/h} = 8,423 \text{ W}$$

Calor total perdido por el tanque de aceite:

$$Q_t = 230,924 \text{ W}$$

**5.1. Determinación de la potencia requerida.** Se determina mediante la primera ley de la termodinámica para procesos de estado estable, flujo estable: [6]

$$Q - W = 0 \quad (7)$$

$Q$  = Calor perdido en el ambiente.

$W$  = Potencia del impulsor + Potencia de la resistencia eléctrica

Los impulsores son movidos por motores de 1/15 HP, lo cual equivale a 49,71 w, por lo tanto:

Calor perdido por el tanque= Potencia del impulsor + Potencia requerida por la resistencia. La potencia requerida para la resistencia es de 280,634 w. Por practicidad en su consecución se elige una resistencia de 500 w.

## 6. SIMULACIÓN DEL COMPORTAMIENTO DEL SISTEMA DE ENFRIAMIENTO

Se utilizó el complemento FLOWWORKS del software SOLIDWORKS 2007, cuyo propósito fue determinar la conveniencia del sistema diseñado, mediante el análisis de transferencia de calor de la probeta al medio de enfriamiento, del cambio de temperatura del mismo y las líneas de flujo involucradas durante la agitación.

### 6.1. Análisis para el agua como medio de enfriamiento

Para este medio se realizaron diferentes simulaciones empleando probetas de acero AISI-SAE 4140, para

diferentes posiciones del agitador (ver Figura 2), lo cual permitió determinar cuál disposición provoca el menor aumento en la temperatura del tanque y la mayor tasa de enfriamiento para la probeta. Las temperaturas del agua y del ambiente se tomaron de 25°C, la temperatura de la probeta de 815°C (temperatura de austenización del acero). Para la velocidad de agitación (velocidad angular del eje del agitador), se realizaron simulaciones previas con velocidades desde 1000 RPM hasta la máxima posible de 6000 RPM, encontrando que solo desde 4000 RPM se tienen velocidades adecuadas en el fluido para la remoción de calor. Debido a lo anterior las simulaciones se realizaron para velocidades de 4000 RPM y 6000 RPM.

Se corrió la simulación para cada una de las configuraciones del agitador una misma velocidad y se analizó el cambio de temperatura sobre la probeta con el tiempo.

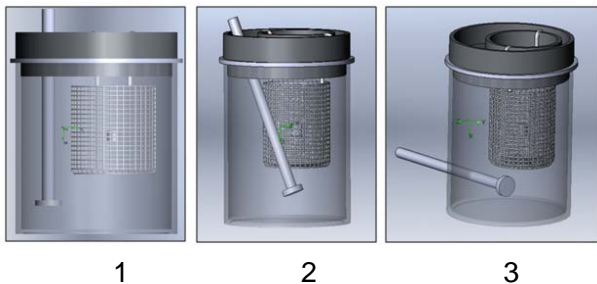


Figura 2. Diferentes disposiciones de los Impulsores

En la Figura 3 se observa que las posiciones 1 y 2 son las que producen el enfriamiento más rápido, tanto con agitación de 4000 RPM como con 6000 RPM. También se nota un aumento en las tres posiciones en la tasa de enfriamiento ocasionada por el aumento en la velocidad de agitación.

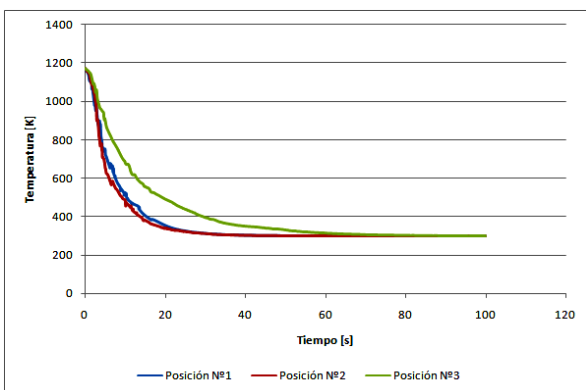


Figura 3. Comparación de Posiciones a 6000 RPM

Otro aspecto importante en el proceso de enfriamiento es la duración de la etapa A; para analizar la incidencia de la posición del agitador y de la velocidad de agitación en esta etapa. La Figura 4 muestra la variación de la tasa de transferencia de calor con el tiempo, ya que es en este

tipo de gráficos donde se puede determinar con exactitud la duración de cada una de las etapas de enfriamiento.

Teniendo en cuenta que el momento en el que la etapa A termina se identifica por un aumento en la tasa de transferencia de calor, se concluye que en la posición 2 la etapa A dura menos en comparación con la demás posiciones. Además se puede notar que el aumento de la velocidad de agitación de solo 4000 RPM a 6000 RPM, genera un aumento en la tasa de transferencia de calor.

La Figura 5 muestra las trayectorias de flujo y la velocidad de este para la disposición 2, a diferentes velocidades.

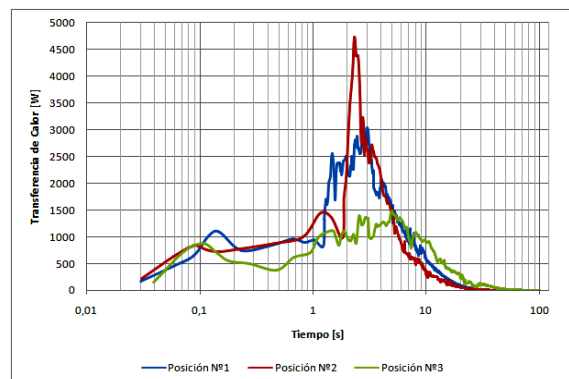


Figura 4. Rata de transferencia de calor Vs tiempo (6000 RPM)

La velocidad en la zona de las probetas es de alrededor de 0,9 m/s, que es la máxima velocidad posible, porque el mezclador tiene una velocidad angular límite de 6000 RPM. También se nota una zona dentro de la canastilla donde la velocidad es alta, provocando un enfriamiento más rápido de las probetas que se encuentren allí.

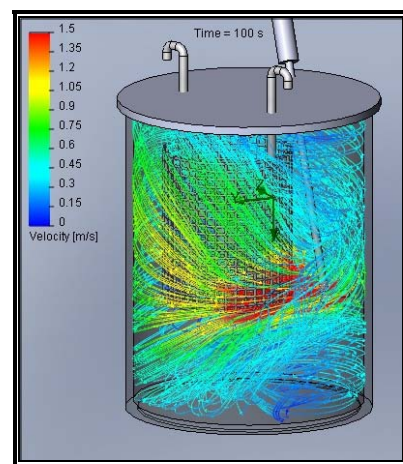


Figura 5. Trayectorias de Flujo a 6000 RPM

Gracias a la agitación y al volumen seleccionado para el temple de la carga térmica de 10 probetas, el cambio de la temperatura del agua oscila entre 6,4 °C y 7,7 °C, que son resultados satisfactorios frente a lo esperado teóricamente. Este pequeño cambio de temperatura,



indica que el medio logra enfriar rápidamente las probetas y disminuye la capa de vapor que es la que impide un buen resultado en la dureza del material.

**6.2. Análisis para el aceite como medio de enfriamiento** Para este análisis se realizaron simulaciones, en las que, se empleó aceite de motor a 298 °K (25° C), 333° K (60° C) y 343° K (70° C); además para cada temperatura la velocidad del agitador fue de 4000 RPM y 6000 RPM. El material de las probetas usadas en el análisis es acero SAE 4140. Se utilizó la posición del agitador 2. La Figura 6 muestra los resultados de las simulaciones variando la temperatura del medio de enfriamiento.

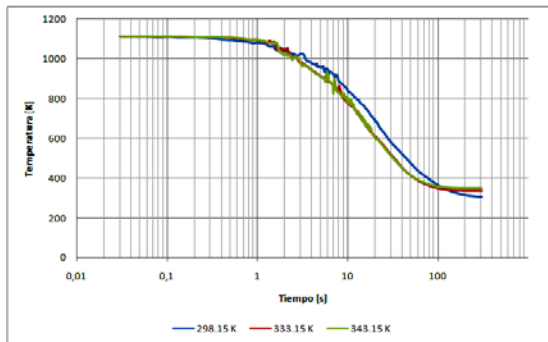


Figura 6. Temperatura de la Probeta (Agitación de 6000 RPM)

Se puede observar que las temperaturas del medio templante que presentaron un enfriamiento más rápido de la probeta son las de 333,15 K y 343,15 K. Para el diseño del sistema se seleccionó una temperatura del aceite de 333,15 K, ya que esta produce un comportamiento muy similar al que produce la de 343,15 K sin la necesidad de gastar más energía en el calentamiento del medio.

La simulación corrobora que la temperatura de 298,15 K para el aceite, no es la apropiada para realizar el tratamiento térmico, porque provoca que la transferencia de calor no sea la adecuada. También se observó que al agitar el medio con una velocidad de 6000 RPM, se produce un aumento en la tasa de transferencia de calor y una disminución en la duración de la etapa A. Dicha etapa presenta una duración, para las temperaturas de 333,15 K y 343,15 K, de aproximadamente 1,6 s para una agitación de 4000 RPM y de 1 s para la agitación de 6000 RPM. La etapa B finaliza aproximadamente pasados 20 s del proceso de enfriamiento para todas las temperaturas del medio; lo que indica que dicha temperatura afecta principalmente la duración de la etapa A.

En la Tabla 1 se observan los resultados referentes al aumento en la temperatura final del medio. Este comportamiento da como resultado un efectivo funcionamiento del equipo como sistema de enfriamiento para el temple de aceros.

CONFIGURACIÓN [Temperatura del medio, Agitación]	AUMENTO DE TEMPERATURA
298,15 K, 4000 RPM	5,35 K
298,15 K, 6000 RPM	4,85 K
333,15 K, 4000 RPM	4,15 K
333,15 K, 6000 RPM	4,05 K
343,15 K, 4000 RPM	4,05 K
343,15 K, 6000 RPM	3,95 K

Tabla 1. Aumento en la temperatura del medio de enfriamiento para las diferentes configuraciones

## 7. CONCLUSIONES

El agua dentro de su severidad como medio de enfriamiento, ofrece un excelente comportamiento, por dar grandes tasas de enfriamiento que permiten la caída rápida de la temperatura, facilitando así el tratamiento térmico de temple para materiales, sin peligro de distorsión, y por lo que la severidad del medio, no interfiere para el alcance de sus mejores propiedades.

El aceite como medio de enfriamiento, entrega altas tasas de transferencia de calor, dando a materiales altos índices de dureza, de acuerdo a la solicitud de rapidez en el enfriamiento, pues de acuerdo a las simulaciones, el cambio en la temperatura y en la agitación, aumentan o disminuyen tales tasas.

Se comprueba que la velocidad de agitación del medio de enfriamiento incide directamente sobre la duración de la etapa A y sobre la máxima tasa de transferencia de calor alcanzada durante el proceso de enfriamiento.

La posición del agitador en el interior del tanque afecta de forma directa la tasa de enfriamiento debido a la diferencia entre las líneas de flujo para cada una de las posiciones, siendo la posición N°2 la que presentó mayor velocidad de enfriamiento.

## 7. BIBLIOGRAFÍA

- [1] ASM INTERNATIONAL. ASM Handbook volume 4 Heat Treating. ASM,1991. Pag160 ISBN 0-87170-379-3.
- [2] C.E. Bates, *J. Heat Treat.*, Vol 6, 1988, p 27-45
- [3] ASM Handbook volume 4 Heat Treating. Op.Cit. pág. 169
- [4] ACASA. Fichas Técnicas [en línea]. Manizales (Colombia). [Citado en 1 de Octubre de 2007]. Disponible en: <http://www.acasa.com.co/acasa/index.htm>.
- [5] J.P HOLMAN. Transferencia de Calor. Primera Edición en Español. Editorial Mc Graw-Hill. España, 1999. pág. 235.
- [6] CENGEL, Yunus; BOLES, Michael. Termodinámica. Cuarta Edición. Editorial Mc Graw-Hill. 2002