

## ESTUDIO TERMOFLUIDODINAMICO ESTRUCTURAL EN CALENTADORES DE AGUA DE USO DOMESTICO

**Nelson O. Moraga, Pablo A. Pacheco y Alberto F. Aguilera**

*Departamento de Ingeniería Mecánica, Universidad de La Serena Chile, Benavente 980,  
Casilla 555, La Serena, Chile, nmoraga@userena.cl, <http://www.mecanicauls.cl>*

**Keywords:** Water heaters, Heat Exchangers, Turbulent Convection, Finite Volume Method, Finite Element Method.

**Resumen.** El presente trabajo describe simulaciones computacionales para caracterizar la mecánica de fluidos, transferencia de calor y mecánica de sólidos en dos equipos, que emplean gases de combustión de hidrocarburos para el calentamiento de agua, de uso doméstico. Uno de ellos es un calefactor de agua mejicano de Recuperación Rápida de 5 litros, de acero, con un intercambiador de calor anular, con aletas rectas en espiral. El otro, es un calentador de agua chileno de 6 litros que tiene un intercambiador de calor con 52 aletas de cobre. Las ecuaciones básicas de termo-fluidos, que incluyen el modelo  $k-\epsilon$  de turbulencia, se resuelven empleando el Método de Volúmenes Finitos, mientras que la resistencia de materiales, que incluye los esfuerzos térmicos, se investiga empleando el Método de Elementos Finitos. Las simulaciones 3D se efectúan con el programa comercial ANSYS Fluent y ANSYS Static Structural, respectivamente. Los resultados obtenidos permiten describir en ambos equipos las distribuciones de velocidad y temperatura en los gases de combustión en el intercambiador de calor, junto con las distribuciones de velocidad y temperatura en el agua que circula por las tuberías del intercambiador de calor. Esta información se emplea para analizar el diseño de las aletas de los intercambiadores de calor de ambos equipos. El cálculo de tensiones y deformaciones indica que los factores de seguridad en las zonas críticas son de 4.1 y 1.2, respectivamente.

## 1 INTRODUCCION

La necesidad de describir la mecánica de fluidos, transferencia de calor y resistencia de materiales es frecuente en numerosas aplicaciones de ingeniería. En particular esta descripción es fundamental para el diseño de equipos por los que circulan fluidos no isotérmicos, como en equipos que emplean gases de combustión de hidrocarburos para calentar agua.

El diseño de equipos para transferencia de calor o masa indica que una disminución en el área de transferencia de calor se logra empleando flujos turbulentos. Una descripción detallada de modelos alternativos para describir flujos turbulentos, indica que el modelo  $k-\varepsilon$  estándar (Launder y Spalding, 1974) es uno de los modelos más sencillos para obtener resultados con soluciones suficientemente precisas para una mayor cantidad de aplicaciones (Chen y Jaw, 1998).

El objetivo de este trabajo es describir la mecánica de fluidos, la transferencia de calor y la mecánica de sólidos del equipo con intercambiador de calor (6 litros) y de Recuperación Rápida (5 litros). Los resultados se obtuvieron con el Método de Volúmenes Finitos, implementado en el software comercial ANSYS – Fluent. El presente trabajo incluye los resultados, obtenidos mediante simulaciones computacionales, para el diseño térmico, de dos calefones: uno con intercambiador de calor, de 6 litros de Chile y otro de Recuperación Rápida, 5 litros. El procedimiento empleado se basa en determinar primero la distribución de velocidad, presión y temperatura en los gases y en el agua, y luego se calcula las tensiones y deformaciones (Zienkiewicz y Taylor, 1991) en las paredes de los tubos empleados en los equipos.

## 2 MODELO FÍSICO Y MATEMÁTICO

Los dos calentadores de agua en estudio consisten en un equipo de Recuperación Rápida de 5 litros y un calentador de agua de 6 litros, con un intercambiador de calor con 5 aletas, como se ilustra en la Figura (1).

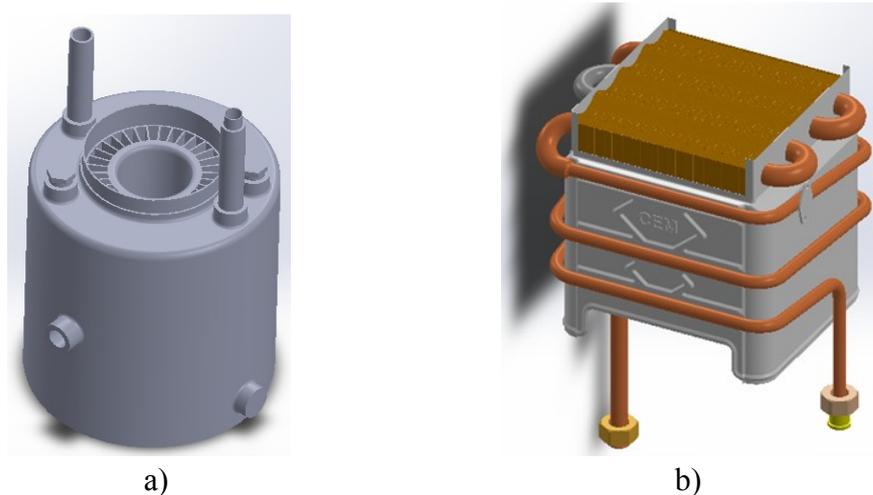


Figura 1: Calentadores de agua: a) de Recuperación Rápida; b) con intercambiador de calor

El estudio incluye la caracterización de la mecánica de fluidos, la transferencia de calor y la resistencia en los materiales que constituyen los dos calentadores de agua. El modelo matemático para la descripción de la mecánica de los fluidos y de la transferencia de calor se

basa en las ecuaciones de continuidad, momento lineal y energía:

El modelo matemático consideró flujo turbulento para el agua, utilizando el modelo  $k - \varepsilon$  estándar, [Raisee et al. \(2010\)](#) y flujo laminar para los gases. En la zona cercana a la pared se consideran las funciones de pared propuestas por [Launder y Spalding \(1974\)](#). Los supuestos utilizados para esta simulación son: estado estacionario flujo turbulento para el agua, flujo laminar para los gases, fluido Newtoniano (gas y agua), propiedades constantes para el cobre y propiedades constantes para el gas y el agua.

El modelo matemático general, para el flujo turbulento de agua en el interior del serpentín, incluye las siguientes ecuaciones:

Continuidad, Ec. (1):

$$\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_i} = 0 \quad (1)$$

Ecuación de momento lineal, Ec. (2):

$$\rho \frac{D\bar{u}_i}{Dt} = -\frac{\partial P}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_i} \left[ (\mu + \mu_t) \left( \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} \right) - \frac{2}{3} \rho k \delta_{ij} \right] + \rho g_i \beta (T - T_0) + S \quad (2)$$

Ecuación de energía cinética turbulenta,  $k$ , Ec. (3):

$$\rho \frac{Dk}{Dt} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_i} \right] + G - \rho \varepsilon \quad (3)$$

Rapidez de disipación de la energía cinética turbulenta,  $\varepsilon$ , Ec. (4):

$$\rho \frac{D\varepsilon}{Dt} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_i} \right] + C_1 \frac{\varepsilon}{k} G - \rho C_2 \frac{\varepsilon^2}{k} \quad (4)$$

donde  $G$  representa la producción de energía térmica turbulenta y  $\mu_t$  es la viscosidad turbulenta, respectivamente expresadas por las Ecs. (5) y (6):

$$G = \mu_t \left( \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} \right) \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} \quad (5)$$

$$\mu_t = \rho C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon} \quad (6)$$

La ecuación de energía en el flujo turbulento, Ecs. (7), (8) y (9) incluye la conductividad térmica turbulenta  $k_t$

$$\frac{\partial \rho E}{\partial t} + \nabla \cdot (\vec{v}(\rho E + p)) = \nabla \cdot (k_{eff} \nabla T) \quad (7)$$

$$k_{eff} = k + k_t \quad (8)$$

$$E = h - \frac{p}{\rho} + \frac{v^2}{2} \quad (9)$$

## 2.1 Tratamiento de pared

En las paredes se supone que no existe deslizamiento y el flujo se considera isotérmico por lo que no se incluye la transferencia de calor en el problema. En la zona cercana a la pared se consideran las funciones de pared propuestas por [Launder y Spalding \(1974\)](#). En consecuencia cuando la distancia perpendicular a la pared,  $y^* \leq 11.225$ , las fuerzas viscosas son dominantes en la subcapa laminar, donde la velocidad adimensional es idéntica al número de Reynolds turbulento, Ecs. (10) y (11):

$$u^+ = y^+ \quad (10)$$

$$y^+ = \frac{\rho C_\mu^{1/4} k_p^{1/2} y_p}{\eta} \quad (11)$$

cuando  $y^* \geq 11.225$  se usa la ley logarítmica que se expresa como, Ec. (12)

$$u^+ = \frac{1}{\kappa} \ln(Ey^+) \quad (12)$$

donde  $\kappa$  es la constante de von Kármán,  $k_p$  e  $y_p$  son la energía cinética turbulenta en el punto  $p$  y la distancia desde el punto  $p$  a la pared, respectivamente.

El flujo de gases es laminar, por lo cual el modelo matemático es un caso particular del descrito por las Ecs. (1) a (12), en el cual se considera que la viscosidad turbulenta, la energía cinética turbulenta y la rapidez de disipación de energía cinética turbulenta son iguales a cero.

La determinación de las tensiones y deformaciones en los materiales de los calentadores de agua se realiza en base a las ecuaciones de equilibrio aplicadas en un elemento finito quedando expresadas de la siguiente forma, Ec. (13):

$$\begin{aligned} \frac{\partial \sigma_x}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_{xy}}{\partial y} + \frac{\partial \sigma_{xz}}{\partial z} + b_x &= 0 \\ \frac{\partial \sigma_{yx}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_x}{\partial y} + \frac{\partial \sigma_{yz}}{\partial z} + b_y &= 0 \\ \frac{\partial \sigma_{zx}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_{zy}}{\partial y} + \frac{\partial \sigma_z}{\partial z} + b_z &= 0 \end{aligned} \quad (13)$$

donde  $b_x$ ,  $b_y$  y  $b_z$  son las componentes de las fuerzas distribuidas en el elemento.

Las ecuaciones de equilibrio se expresan de la siguiente forma, Ecs. (14):

$$\begin{aligned} \sigma_x n_x + \tau_{xy} n_y + \tau_{xz} n_z + s_x &= 0 \\ \tau_{yx} n_x + \sigma_y n_y + \tau_{yz} n_z + s_y &= 0 \\ \tau_{zx} n_x + \tau_{zy} n_y + \sigma_z n_z + s_z &= 0 \end{aligned} \quad (14)$$

donde  $s_x$ ,  $s_y$  y  $s_z$  son las fuerzas distribuidas en las fronteras y los  $n_x$ ,  $n_y$  y  $n_z$  son las

componentes del vector unitario normal a la superficie.

### 3 IMPLEMENTACION COMPUTACIONAL

El método de Volúmenes Finitos, Patankar (1980), se utiliza para el estudio de la mecánica de fluidos y de transferencia de calor, en base al empleo del programa comercial ANSYS Fluent. El estudio se resuelve utilizando una malla tetraédrica, no uniforme y con 2.238.435 nodos para el modelo tridimensional del calefactor de Recuperación Rápida de 5 litros, Figura (2a). En el calefón con intercambiador de calor de 6 litros se utiliza una malla hexaédrica con 8.546.263 nodos, Figura (2b). La función de interpolación empleada en las ecuaciones de continuidad, momentum, energía, energía cinética turbulenta y disipación de energía cinética turbulenta es QUICK (Quadratic Upwind Interpolation for Convective Kinetics). El algoritmo PISO (Pressure Implicit with Splitting of Operators) se emplea para resolver en forma iterativa y en secuencia las ecuaciones básicas del modelo matemático. Los valores de los coeficientes de sub relajación utilizados para el estudio realizado en el calefactor de Recuperación Rápida de 5 litros son: presión, 0.1; velocidades, 0.01; energía cinética turbulenta, 0.01; disipación de energía cinética turbulenta, 0.01; y energía, 0.9. El criterio de convergencia empleado para cada una de las variables dependientes es de  $10^{-5}$ . En el equipo con intercambiador de calor, se emplea el mismo criterio de convergencia. Los factores de sub relajación utilizados son: presión, 0.1; velocidades, 0.01; energía cinética turbulenta, 0.01; disipación de energía cinética turbulenta, 0.01; y energía, 0.8. Los cálculos se realizaron utilizando un computador con un procesador Intel® Core™ i7-3820 CPU @3.60Ghz, con una memoria RAM de 32 GB, montados en un sistema operativo de Win 7 Professional.

Una vez descrita la mecánica de fluidos y la transferencia de calor para cada equipo los resultados de temperatura y presión, calculados con el método de Volúmenes Finitos y el programa Fluent se exportan a una malla diferente para el cálculo de tensiones y deformaciones realizadas con el programa ANSYS. La malla utilizada para la simulación de resistencia de materiales se muestra en la Figura (2a), y tiene 706.016 nodos con 373.609 elementos. Es una malla no uniforme y con elementos tetraédricos. El equipo con intercambiador de calor utiliza una malla con elementos tetraédricos no uniformes y 1.010.545 nodos, Figura (2b).

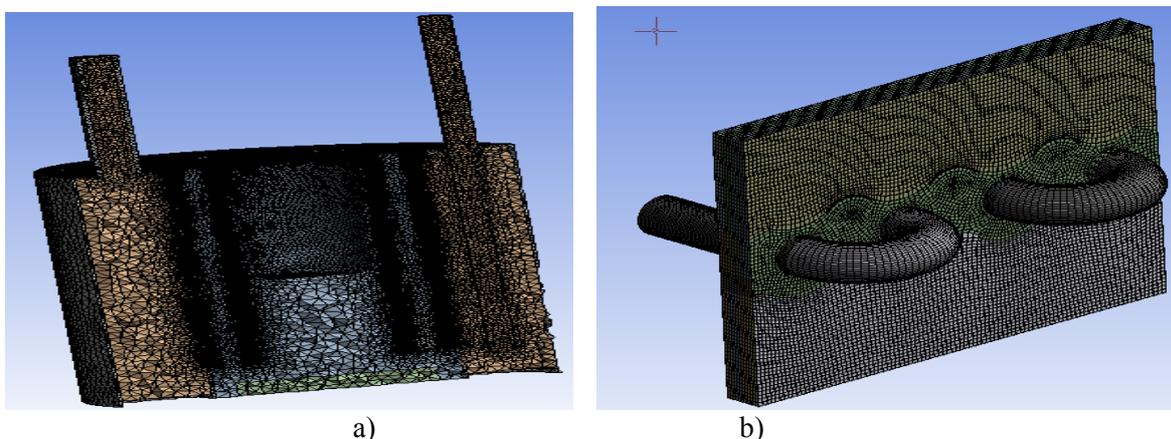


Figura 2: Mallas utilizadas en Calentadores de agua: a) de Recuperación Rápida, 2.238.435 de nodos; b) con intercambiador de calor, 1.010.545 de nodos

## 4 RESULTADOS

### 4.1 Distribución de temperatura

La distribución de temperatura en: agua, gases, aletas y quemador del calefactor RR de 5 litros se ilustra en la Figura (3), con un aumento de la temperatura del agua de 20 °C a 47 °C.

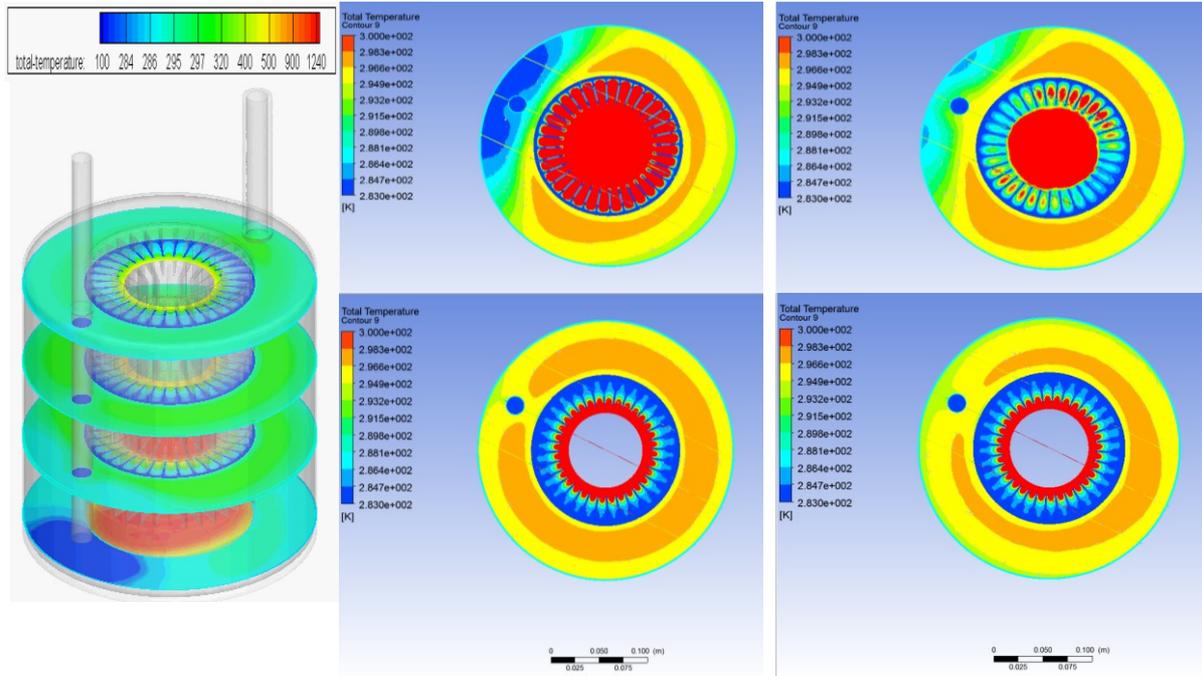


Figura 3: Distribución de temperatura en calefactor de Recuperación Rápida de 5 litros

La Figura (4) muestra la distribución de temperaturas en las cinco aletas y en la tubería de calefón de 6 litros. Las temperaturas más altas se encuentran en la parte inferior de los tubos por donde llegan los gases, alcanzando valores de 97 °C. En la parte superior de las aletas y en las zonas cercanas al orificio donde pasa la tubería, las temperaturas son bajas, 18 °C, debido a que el calor absorbido por las aletas se traspassa a la tubería y posteriormente al agua.

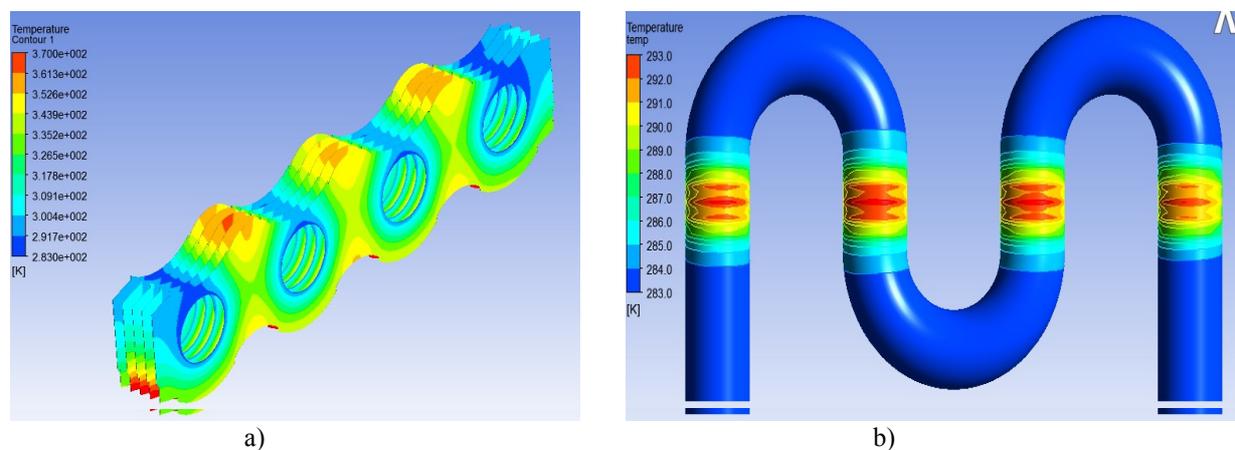


Figura 4: Distribución de temperatura en calefactor con intercambiador de calor: a) 5 aletas; b) Tubería por donde circula el agua

## 4.2 Distribución de velocidades

Esta sección presenta los resultados de la mecánica de fluidos de los gases de combustión y el agua en el calefón de Recuperación Rápida de 5 litros. La Figura (5) muestra la distribución del módulo de la velocidad en un plano longitudinal del calefactor RR (eje z) el cual corta el estanque, las tuberías de agua, las aletas, el tapón central y los gases de combustión, permitiendo observar con mejor claridad la mecánica de fluidos en el interior del calefactor RR. Los valores de los contornos de velocidad indican que los gases de combustión en el interior del estanque se encuentran entre 0.03 m/s y 2.5 m/s y el agua sale a una velocidad de 1.5 m/s.

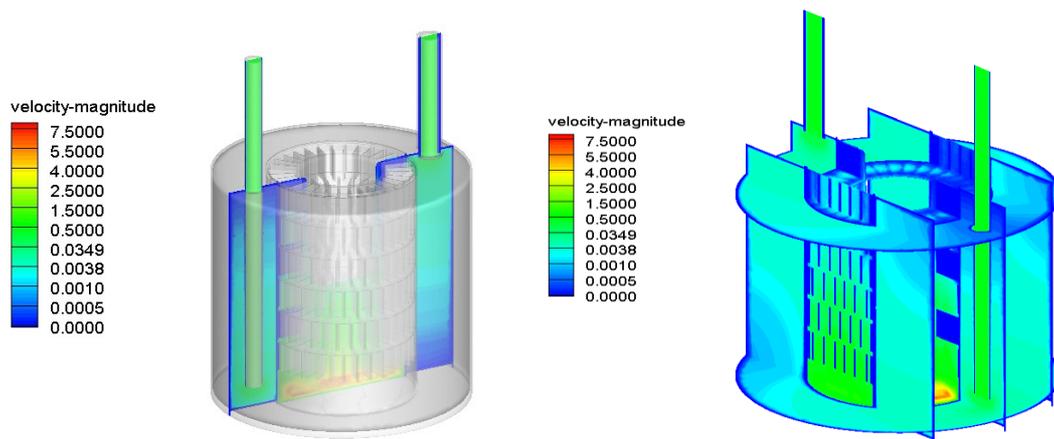


Figura 5: Distribución de velocidades en calefactor de Recuperación Rápida de 5 litros: a) Vista general del calefactor RR; b) Calefactor de RR en planos

La dinámica de fluidos del agua del calefactor con intercambiador de calor se describe en la Figura (6), donde se muestran las líneas de corriente del agua. Se verifica que la velocidad del agua varía desde 0.1 m/s a 0.5 m/s, en la zona de los tubos con curvatura menor, sección interna de la tubería.

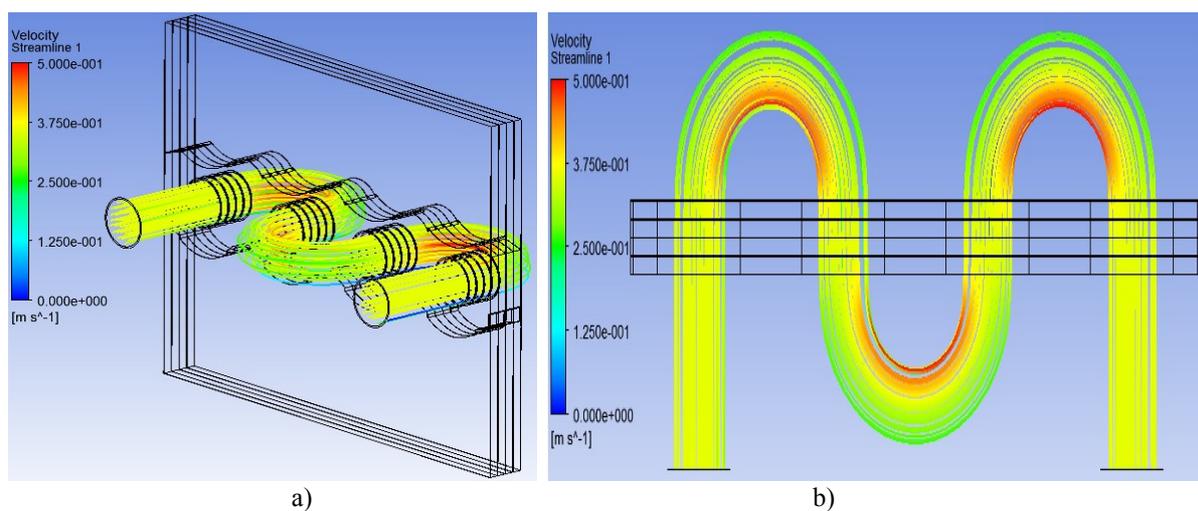


Figura 6: Distribución de velocidades en calefactor con intercambiador de calor: a) Vista isométrica del intercambiador; b) Vista de superior del intercambiador

### 4.3 Mecánica de sólidos

Una vez que se obtienen los resultados de la mecánica de fluidos y transferencia de calor en el software Ansys-Fluent, los resultados se exportan al software Ansys-Static-Structural por medio de interfaces entre los programas.

El análisis estructural requiere utilizar una nueva malla, debido a que el módulo Static-Structural trabaja con el Método de Elementos Finitos (MEF) y la topología de los elementos de la malla es distinta. En este análisis se utilizan criterios especiales para mallas de problemas de Mecánica y Dinámica de Fluidos Computacional. La malla utilizada para la simulación del calefactor RR se muestra en la Figura (7a), y tiene 706.016 nodos y 373.609 elementos, mientras que la malla utilizada para el intercambiador de calor, que se muestra en la Figura (7b), tiene 5.022.157 nodos y 852.001 elementos.

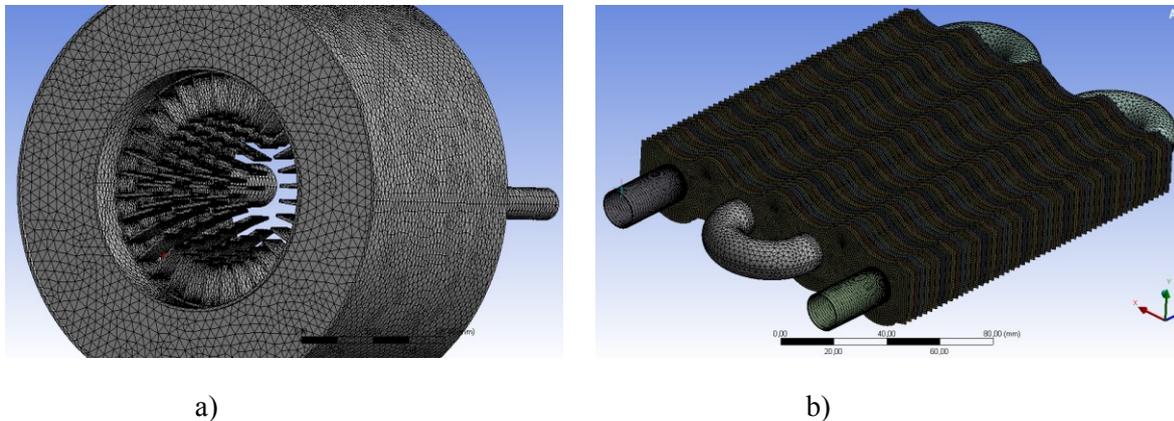


Figura 7: Malla utilizada para simulación de mecánica de sólidos: a) de calefactor de Recuperación Rápida de 5 litros, 706.016 nodos; b) con intercambiador de calor y 54 aletas, 5.022.157 nodos

### 4.4 Deformaciones Totales en RR

Los resultados obtenidos en la deformación total se muestran en la Figura (8), las deformaciones más altas corresponden a 0.03 mm y ocurren en la parte inferior del calefactor RR, donde está ubicado el quemador y las temperaturas fluctúan entre 900 y 960 °C.

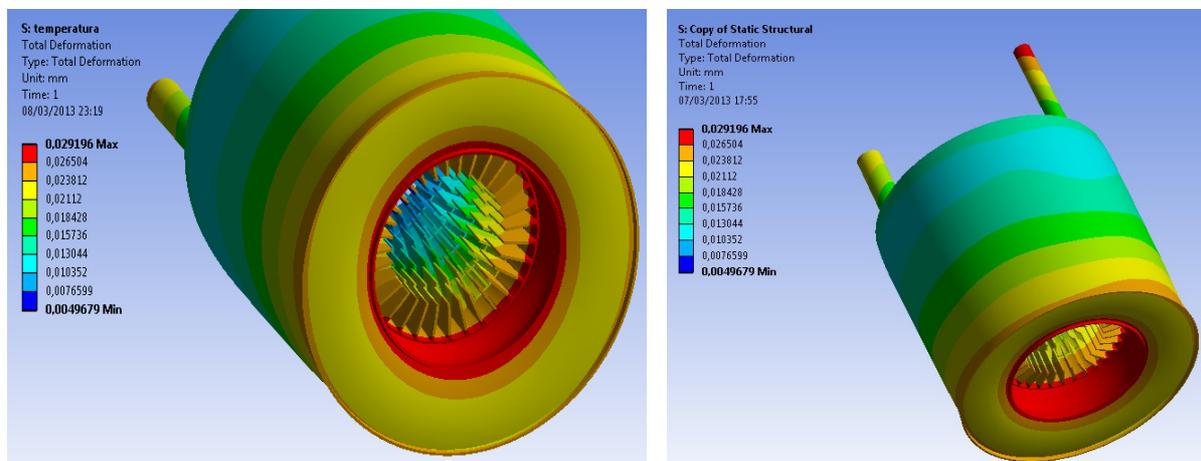


Figura 8: Deformaciones del calefactor de Recuperación Rápida de 5 litros

#### 4.5 Deformaciones totales en el intercambiador de calor

Las deformaciones mas altas, 0,18 mm, ocurren en la parte inferior, donde las temperaturas son altas, por lo tanto hay mayor deformación térmica, Figura (9).

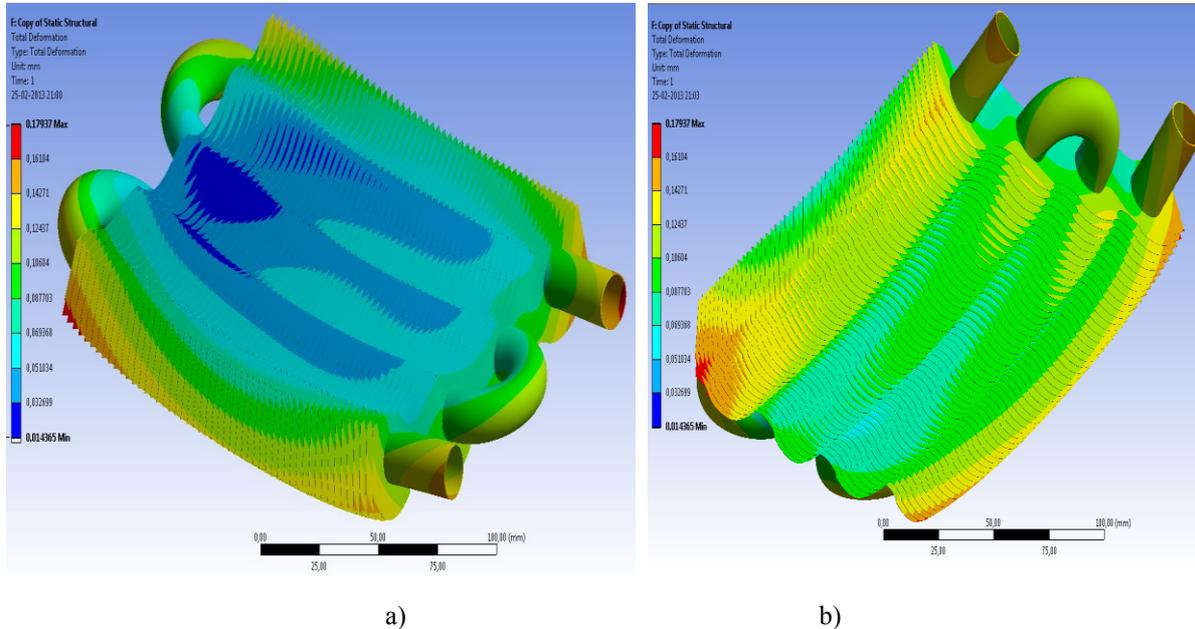


Figura 9: Deformaciones en mm del calefón con intercambiador de calor

#### 4.6 Tensiones en calefactores

Los resultados de tensiones de von Mises se muestran a continuación, Figura (10). En el calefactor de Recuperación Rápida de 5 litros, la zona de mayor tensión es la parte inferior por donde inciden los gases calientes y está ubicado el quemador. El valor máximo del esfuerzo de Von Mises es de 45.94 MPa, Figura (10a). Mientras que en calefactor con intercambiador de calor la mayor tensión, 173 MPa, está en la parte inferior por donde inciden los gases calientes, Figura (10b).

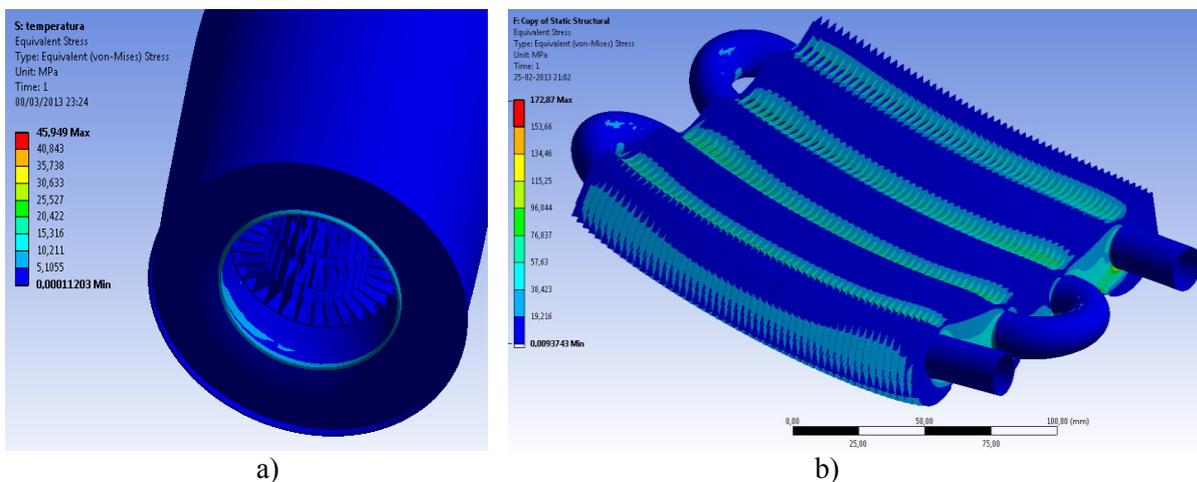


Figura 10: Tensiones de von Mises: a) de calefactor RR de 5 litros; b) con intercambiador de calor

#### 4.7 Factor de seguridad en calefactores

A continuación se describe en la Figura (11) el factor de seguridad, definido como el cociente entre el esfuerzo admisible en el material dividido por el esfuerzo calculado, para el calefactor de Recuperación Rápida de 5 litros, y se aprecia un valor mínimo de 4.52 y un valor máximo de 10, por lo tanto se aprecia que existen partes del calefactor que se encuentran sobre dimensionadas y pueden ser re diseñadas, con el objeto de reducir costos.

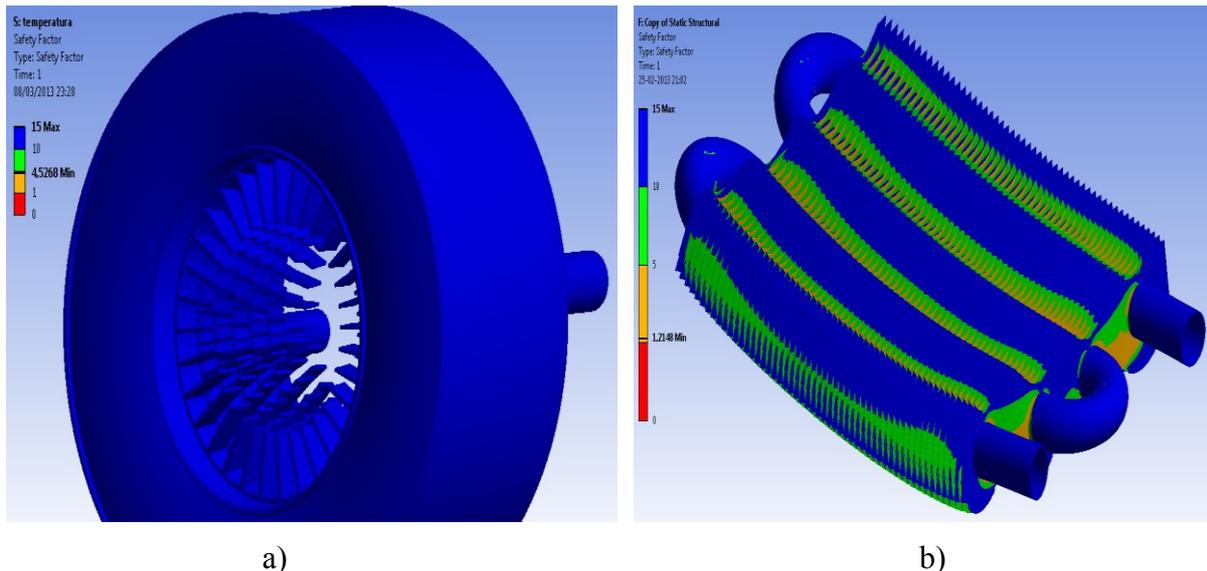


Figura 11: Factor de seguridad: a) de calefactor RR de 5 litros; b) con intercambiador de calor

## 5 CONCLUSIONES

En relación a la mecánica de fluidos y transferencia de calor se concluye que los resultados obtenidos para el calefactor de Recuperación Rápida de 5 litros facilitan la comprensión del funcionamiento del equipo y pueden ser empleados en labores de optimización, modificación o re diseño. En el calefactor con intercambiador de calor, la geometría de las aletas puede reducirse en altura debido a que los gradientes en la parte superior son nulos o muy pequeños. Este cambio en la geometría no altera la transferencia de calor, disminuye la cantidad de material necesario y por lo tanto los costos decrecen. La recirculación de gases en la parte superior de la tubería en el calefactor con intercambiador de calor, no es perjudicial para aumentar la temperatura del agua, ya que la temperatura de los gases en esa zona es de 109 °C.

Respecto a la mecánica de sólidos el cálculo de resistencia de materiales efectuado empleando el método de elementos finitos del programa ANSYS, indica que los valores de tensiones y deformaciones obtenidos en los componentes del calefón de Recuperación Rápida y el calefactor con intercambiador de calor son bajos, lo que permite considerar la posibilidad de reducir costos vía cambio de materiales o mediante la disminución de espesores de aletas y de la pared que separa los gases del agua.

## AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen el apoyo recibido de CONICYT (Chile) en el proyecto FONDECYT 1111067.

**REFERENCIAS**

- Chen C. and Jaw S. *Fundamentals of Turbulence Modeling*, Taylor & Francis, Washington, 1998.
- Launder E. and Spalding B. The numerical computation of turbulent flows, *Computational Methods in Applied Mechanical Engineering*, 3:296-289, 1974.
- Patankar S.V. *Numerical Heat Transfer and Fluid Flow*, Hemisphere Publishing Corporation, Washington DC, 1980.
- Raisee M., Jafari A., Babaei H., and Iacovides H. Two-dimensional prediction of time dependent turbulent flow around a square cylinder confined in a channel, *Int. J. Numerical Method in Fluids*, 62:1232-1263, 2010.
- Zienkiewicz O.C. and Taylor R.L. *The finite element method*, volume II. McGraw Hill, 1991.