

## **Análisis y aprovechamiento de la energía térmica por fricción en película semisólida rotatoria de aleación Cu-Sn, bajo los efectos de alta presión**

Analysis and utilization of the thermal energy by friction in semi-solid rotating film of Cu-Sn alloy, under the effects of high pressure

JOSÉ GUASUMBA CODENA<sup>1</sup>, ISIDORO LILLO BRAVO<sup>2</sup>, LENIN ABATTA JÁCOME<sup>3</sup> Y

ROMÁN BUÑAY ANDRADE<sup>4</sup>

### **RESUMEN**

El presente trabajo, consiste en la investigación y el desarrollo experimental de un nuevo dispositivo de generación de calor por fricción deslizante, en película térmica. Este tercer cuerpo, se forma por la energía mecánica de rotación, la fuerza de aplastamiento axial, y la temperatura de contacto entre un par de rozamiento bronce, acero. En la transformación de la energía mecánica en térmica, la temperatura superficial del acero es de 266 °C y 215°C para el bronce. En lo referente al caldero, la temperatura del vapor alcanza los 150°C, y presión interna de 60 Psi, durante un tiempo de calentamiento y vaporización de 60 minutos. Para realizar las pruebas de funcionamiento del vaporizador por fricción, se utiliza una máquina con potencia de 5 kW, que transfiere al caldero el torque y el empuje necesario para producir calor útil. Por otra parte, la velocidad de rotación del eje, en este ensayo es de 416 RPM., y la fuerza de empuje axial de 2000 N.

**Palabras clave:** tercer cuerpo; lubricante; aplastamiento; película irradiante; calentador por fricción.

---

<sup>1</sup> Universidad Nacional «Cuyo Mendoza». Mendoza, Argentina.

<sup>2</sup> Universidad de «Sevilla». Sevilla, España.

<sup>3</sup> Universidad Internacional de «Andalucía». Andalucía, España.

<sup>4</sup> Universidad de «Cuenca». Santa Ana, Ecuador.

## ABSTRACT

This project consists on the research and experimental development, of a new device for heat generation by sliding friction, into thermal film. The third body is formed by the mechanical energy of rotation, the axial force, and the contact temperature between a pair of friction bronze and steel. In the change of mechanical energy to heat, the temperature surface of the steel is 266 °C and 215 °C for the bronze. In regard to the boiler, the steam temperature reaches 150 °C, and internal pressure of 60 psi. One hour is the time for heating and vaporization of water. To perform functional testing of steam boiler by friction, is using a machine with power of 5 kW, which transfers the torque to the boiler and the push needed to produce useful heat. On the other hand, the speed of rotation of the shaft, in this test is 416 RPM. And the axial thrust force 2000 N.

**Keywords:** third body; lubricant; crushing; film radiating; boiler by friction.

## ICHIKLLACHAW

Kay uryaychawqa musyapakuypaqwan ikpirimintal ruraykunapaqmi willakun, huk achachaq pilikulachaw luchpiq tanqaynin ninqan mushuq achachay dispisitibu yuriynin nishqanpaqmi riman. Kay kimsa kaq kurkuqa mikanikapa muyuyninqa achachaywanmi yurin, aksiyal tañuyninpa kallpanwan, hinaman achachaypa tinkuyninpaqwan huk mahashqa brunsipaqwanpis, asirupaqwanpis. Achachaypa kallpanta tirmika nishqanman tikratsinanpaq, patsachaw asirupa achachayninqa 266°Cmi, brunsipanam 215°C. Kaldirupanam wapull achachaynin 150°C chan. Rurin prisiyun nishqanqa 60 Psi kamam patsa achachayninchaw chan, wapullninnam 60 minutuskama chan. Tanqay wapullnin kayninta riqinapaqqa kallpayuq 5kW maakinatam wanantsik torqueta kaldiruman aywatsinanpaq, hinaman kumaynintam wanantsik alli achachayta kamanapaq. Ehipa muyuynin nishqanpa wipyayninqa kay uryaychaw 416 RPMmim aksiyalpa kumaynin kallpannam 2000 N.

**Pushaq shimikuna:** kimsa qara; wiswi; harushqa; pelikula; kupaypa achachashqa.

## INTRODUCCIÓN

En el estado del arte, es común encontrar sistemas mecánicos que sufren alteraciones en sus propiedades físicas y funcionales, debido a los efectos del rozamiento. El desgaste abrasivo y adhesivo, la dilatación térmica por alta temperatura, origina la expansión y el deterioro de las superficies en contacto (Cámara, 2014), por consiguiente causan enormes pérdidas económicas en la industria, la minería y el transporte. Además, el calor de fricción, generado por máquinas y equipos, se disipa al ambiente sin posibi-

lidad de recuperación (Cámara, 2014). Por otra parte, existen tecnologías orientadas a aprovechar este principio, como es el caso de la soldadura por fricción (FSW), prensas rotatorias, vaporizadores de agua con energía cinética de rotación, y determinados sistemas térmicos para calentamiento de fluidos. Dentro de las investigaciones realizadas sobre el rozamiento y sus efectos, se puede indicar los trabajos de Zibota, Antonic; Nikolic, Neojša y Radomirovic, Dragi (2011), donde se determina la influencia de las pérdidas por fricción en rodamientos de rodillos (Dunckle y otros 2011). En lo referente al análisis térmico de la fricción, Tieu (2006), utiliza emulsiones en cintas de rodadura (Guasumba, 2005). En el desarrollo de materiales antifricción [4], se han estudiado compuestos DOE/RSM, elaborado por Guipu y Zhu (2010). Dunckle y otros (2001) realizan ensayos de fricción en películas de molibdeno (Holmberg, 2013), bajo condiciones de vacío y criogénicas. Además, se ha determinado el consumo total de energía debido a la fricción en máquinas papeleras (Jacob, 1950), por Holmberg (2013). En la fricción, hay que considerar la influencia de la fuerza normal, y los modos de desgaste abrasivo, como es el caso de los ensayos de desgaste de rodamientos de bolas (Pitts, 1977), realizado por (Camara, 2014). Para analizar las propiedades de fricción y desgaste, se utiliza la aleación CuZn39Pb3 bajo condiciones atmosféricas y de vacío. En el ámbito automotriz existen diversas investigaciones sobre desgaste en ejes, rodamientos, pistones, en las cuales, el estudio de lubricantes y sus técnicas de aplicación, representan aspectos relevantes para reducir los efectos críticos de la fricción. Así, se puede indicar el trabajo desarrollado por Guipu y Zhu (2010), que analizan las características de fricción bajo diversas condiciones de frenado (Spiegel, 1975). Por otra parte, en esta investigación, se propone aprovechar el calor que se disipa por el rozamiento, mediante el contacto de un par de fricción compuesto por acero K100 y la aleación Cu-Sn. Para inhibir el desgaste abrasivo o de adherencia, se crea un tercer cuerpo en forma de fluido térmico, que aparece bajo determinadas condiciones de presión, temperatura de contacto y velocidad de rotación del eje motriz. El caldero que se calienta por fricción es de tipo horizontal, en el un extremo se encuentra el intercambiador de calor de bronce y el otro el mecanismo de empuje para producir contacto permanente con el eje de rotación. En las pruebas de funcionamiento, se utiliza agua que ingresa por la parte posterior del caldero, y se evacúa en forma de vapor sobrecalentado a temperaturas entre 120 y 180 °C, por la región cercana al área de rozamiento. La principal ventaja de esta nueva tecnología de generación de calor útil, consiste en que no requiere combustión para producir calor, el par de fricción tiene larga duración a partir del instante en que se forma la película térmica, es decir, puede funcionar de manera continua, evitando con esto el desgaste en por el arranque en frío. En este proceso de conversión energética no se producen gases contaminantes.

Análisis de transferencia de calor

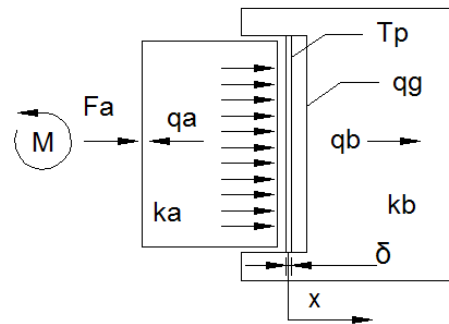


Figura 1. Modelo de generación de calor por fricción (Guasumba, 2005)

La generación de calor por fricción  $q_g$  para el estado estable se determina con la siguiente expresión [1].

$$q_g = q_a + q_b \quad (1)$$

Donde:  $q_a$  calor útil trasferido por el par de bronce hacia la zona de calentamiento y vaporización del agua,  $q_b$  calor transferido al eje motriz. Para obtener el modelo matemático de la conducción del calor en una dimensión, de acuerdo con la primera ley de la termodinámica que indica que la energía de entrada menos la de salida es igual a la energía que se acumula, en el sistema por lo tanto:

$$q_{entra} - q_{sale} = q_{acc} \quad (2)$$

En esta expresión, se considera el calor perdido por convección y radiación hacia el ambiente

$$-k A \frac{\partial T}{\partial x} + - \left[ -k A \frac{\partial T}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x} \left( -k A \frac{\partial T}{\partial x} \right) dx \right] - U_o \pi D_o dx (T - T_a) = A dx \rho Cp \frac{\partial T}{\partial t} \quad (3)$$

Simplificando, se obtiene:

$$k A \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} - U_o \pi D_o (T - T_a) = A \rho Cp \frac{\partial T}{\partial t} \quad k A \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} - U_o \pi D_o (T - T_a) = A \rho Cp \frac{\partial T}{\partial t}$$

$$\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} - \frac{U_o \pi D_o}{k A} (T - T_a) = \frac{1}{\alpha} \frac{\partial T}{\partial t} \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} - \frac{U_o \pi D_o}{k A} (T - T_a) = \frac{1}{\alpha} \frac{\partial T}{\partial t} \quad (4)$$

$U_o$  coeficiente global de transferencia de calor,  $A$  área de contacto,  $k$  conductividad térmica del sólido,  $D_o$  diámetro exterior del anillo de rozamiento,  $\alpha$  difusividad térmica,  $T_a$  temperatura ambiente.

Análisis del recipiente cilíndrico para el estado estacionario:

$$\text{Haciendo } \theta = T - T_a \text{ y } m = \sqrt{\frac{U_o \pi D_o}{kA}} \text{ se obtiene } \frac{\partial^2 \theta}{\partial x^2} - m^2 \theta = 0 \quad (5)$$

La solución general de la ecuación diferencial es

$$\theta = C_1 e^{-mx} + C_2 e^{mx} \quad (6)$$

La expresión matemática [9], para encontrar la isoterma de equilibrio, en el eje horizontal, se obtiene con  $\theta_o = T_o - T_a$ , que corresponde a la diferencia de temperaturas entre  $T_o$  en  $x=0$ , y el ambiente

$$\theta = \theta_o \left[ \frac{e^{-mx}}{1 + e^{-2mL}} + \frac{e^{mx}}{1 + e^{2mL}} \right] \quad (7)$$

Para hallar la temperatura en el borde del cilindro se tiene

$$\theta_L = \frac{\theta_o}{\frac{e^{mL} + e^{-mL}}{2}} = \frac{\theta_o}{\cosh(mL)} \quad (8)$$

La transferencia de calor en  $x=0$ , para el cilindro, está dado por:

$$q_o = k A m \theta_o \tanh(mL) \quad (9)$$

Análisis del recipiente cilíndrico en el estado transitorio, solución analítica

Utilizando la ecuación (4), con

$$K_1 = \frac{U_o \pi D_o}{k A}, \text{ y } K_2 = \frac{1}{\alpha}$$

Se tiene la ecuación diferencial parcial con coeficientes constantes

$$\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} - K_1 (T - T_a) = K_2 \frac{\partial T}{\partial t} \quad (10)$$

Realizando en (10) un cambio de variable, resulta

$$\frac{\partial^2 \theta}{\partial x^2} - K_1 \theta = K_2 \frac{\partial \theta}{\partial t} \quad (11)$$

Sea  $\theta(x,t) = XT$  entonces, la solución general de la ecuación diferencial parcial con coeficientes constantes es

$$\theta(x,t) = XT = (A_1 \cos cx + B_1 \operatorname{sen} cx) C_1 e^{-k_3 t}$$

Reduciendo las constantes [10]

$$\theta(x,t) = (A \cos cx + B \operatorname{sen} cx) e^{-K_3 t} \theta(x,t) = (A \cos cx + B \operatorname{sen} cx) e^{-K_3 t}$$

$$K_3 = \frac{K_1 + c^2}{K_2}$$

Suponiendo que  $\theta(0,t) = 0$  y  $\theta(L,t) = 0$ ;

$n = 0, \pm 1, \pm 2, \dots$  así,

$$\theta(x,t) = B \operatorname{sen} \left( \frac{n \pi x}{L} \right) e^{-\left( \frac{K_1 + \left( \frac{n \pi}{L} \right)^2}{K_2} \right) t} \quad (13)$$

$$\theta(x,t) = \sum_{n=1}^{\infty} B_n e^{-\left( \frac{K_1 + \left( \frac{n \pi}{L} \right)^2}{K_2} \right) t} \operatorname{sen} \left( \frac{n \pi x}{L} \right) \quad (14)$$

Para  $t=0$ , se verifica la siguiente condición inicial

$$\theta(x,0) = \sum_{n=1}^{\infty} B_n \operatorname{sen} \left( \frac{n \pi x}{L} \right) = 22^\circ$$

Temperatura inicial del cilindro,  $0 < x < L$

$$B_n = \frac{2}{L} \int_0^L f(x) \operatorname{sen} \left( \frac{n \pi x}{L} \right) dx$$

; para series de Fourier, de medio intervalo en senos,

$A_n = 0$ ; se encuentra que

$$B_n = \frac{44(1 - \cos n\pi)}{n\pi} \quad B_n = \frac{44(1 - \cos n\pi)}{n\pi}; \text{ el resultado se puede escribir como}$$

$$\theta(x,t) = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{44(1 - \cos n\pi)}{n\pi} e^{-\left( \frac{K_1 + \left( \frac{n \pi}{L} \right)^2}{K_2} \right) t} \operatorname{sen} \left( \frac{n \pi x}{L} \right)$$

Lo que resulta

$$\theta(x,t) = \frac{44}{\pi} \left[ e^{-\left( \frac{K_1 + \frac{\pi^2}{L^2}}{K_2} \right) t} \operatorname{sen} \left( \frac{\pi x}{L} \right) + \frac{2}{3} e^{-\left( \frac{K_1 + \frac{9\pi^2}{L^2}}{K_2} \right) t} \operatorname{sen} \left( \frac{3\pi x}{L} \right) + \dots \right]$$

Que se puede verificar como una de la solución buscada. Para graficar cada una de las isotermas, se tienen que dar valores de tiempo constante y distancia variable, para este caso entre 0 y 600 mm.

Por otra parte, para realizar el análisis de transferencia de calor en el caldero horizontal, que se calienta por fricción, se utiliza el esquema representado en la figura 2, que se indica a continuación.

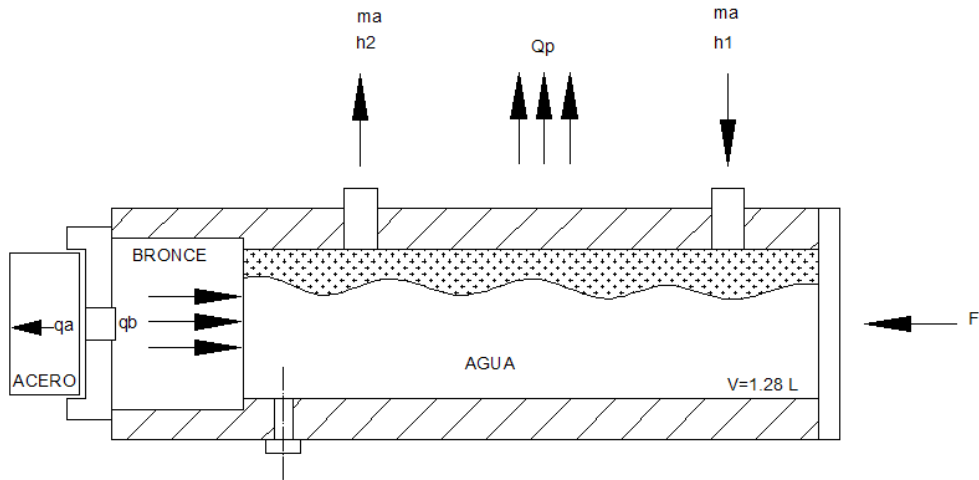


Figura 2. Volumen de control del calentador por fricción (Guasumba, 1993-2014)

El calor necesario para calentar y vaporizar el agua, en el interior del cilíndrico, se obtiene con la expresión:

$$q_a = m_a(h_2 - h_1) + m_c c_p(T_2 - T_1) + U_i A_s(T_p - T_a) \quad (15)$$

Dónde:  $m_a$  es la masa de agua,  $h_2$ ,  $h_1$  entalpías para el líquido comprimido y vapor sobrecalentado,  $m_c$  masa del recipiente cilíndrico,  $c_p$  calor específico del metal,  $T_2$ ,  $T_1$  temperatura del cilindro al inicio y al final del proceso,  $A_s$  área de pared cilíndrica,  $T_p$ ,  $T_a$  temperaturas de pared y del ambiente,  $U_i$  coeficiente global de transferencia de calor (Pitts, p.241), tomando en cuenta el área interna del recipiente [11].

$$U_i = \frac{1}{\frac{1}{h_i} + \frac{r_i}{k_A} \ln\left(\frac{r_o}{r_i}\right) + \frac{r_i}{r_o h_o}} \quad (16)$$

En esta ecuación  $h_p$ ,  $h_o$  son los coeficientes de transferencia de calor del agua y del aire, para el caso de espacios cilíndricos cerrados horizontales, el coeficiente  $h_i$  se calcula con la correlación propuesta por L.B.Evans y N.S. Stefan,  $r_p$ ,  $r_o$  radio interior y exterior del caldero,  $k_A$  conductividad térmica del aluminio.

## MATERIALES Y MÉTODOS

Desarrollo experimental, el calentador por fricción se ensambla en una máquina de ensayos que está accionada por un motor eléctrico de 5 kW., en el eje motriz con volante de inercia, se ajusta el par de fricción de acero K100, para que este le transmita la energía mecánica de rotación. En esta parte, es necesario indicar que se han realizado ensayos variando la velocidad de rotación, desde 220 hasta 1100 RPM, pudiendo observar que al aumentar la velocidad, ocurre un efecto de deslizamiento, con la consecuente disminución del calor generado por fricción. El cuerpo del caldero que soporta al par de fricción de material blando es decir de aleación Cu-Sn, se acopla a la bancada de la máquina de ensayos, por medio de sistemas de sujeción posterior y lateral, para evitar el desprendimiento del caldero debido a la energía mecánica. Para que exista contacto permanente entre el par bronce, acero, existe un dispositivo que le transmite la fuerza de aplastamiento de tipo axial [12]. A lo largo del ensayo, al calentarse las superficies en contacto se dilatan por lo que es necesario reducir la fuerza para evitar que el motor eléctrico deje de funcionar. En la figura 3 se presenta en forma gráfica el equipo experimental que genera calor por fricción.



Figura 1. Método de calentamiento por fricción (Guasumba, 1993-2014)

Para la determinación de las isoterms, en el cilindro de calentamiento, se utiliza un medidor de temperatura tipo láser, que tiene un rango de medición de  $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$  hasta  $1000\text{ }^{\circ}\text{C}$ , la separación del mallado es de 45mm., y se toman 12 mediciones cada 10 minutos. Además, este instrumento sirve para medir la temperatura superficial del par de fricción bronce, acero. Para la medición de los parámetros del caldero, se utilizan medidores de temperatura de carátula que tienen rangos de 0 a  $300\text{ }^{\circ}\text{C}$ , con apreciación de  $1^{\circ}\text{C}$ . La presión interna, se mide con un manómetro de 0 a 300 Psi. El tiempo calentamiento y vaporización del agua, en esta etapa se ha considerado de 60 minutos.



## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

El resultado más importante de esta investigación, consiste en la formación de la película térmica que inhibe el desgaste al actuar como un lubricante, este fluido térmico es producido en la interfaz acero y aleación Cu-Sn. Para su apareamiento deben existir las condiciones adecuadas de velocidad de rotación, presión de aplastamiento, geometría de contacto, y propiedades termofísicas de los materiales. A continuación, en la figura 2., se observa la película en forma de anillo con cavidad interna que absorbe la expansión volumétrica interior, evitando con esto el deterioro de los materiales en contacto.

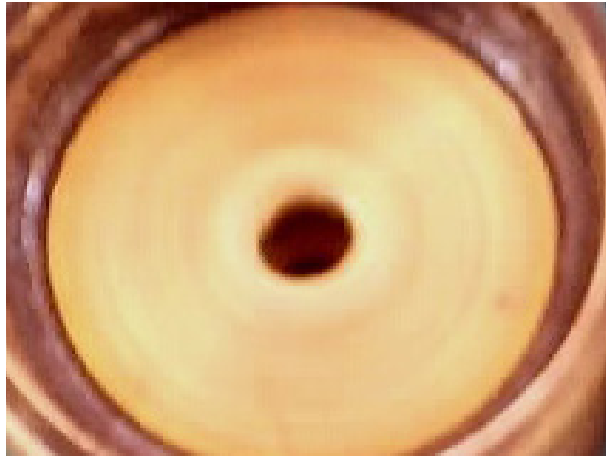


Figura 2. Película térmica, temperatura 900 °C  
Fuente: Guasumba, *Ensayos de calentamiento por fricción* (1993-2014)

En lo referente al proceso de calentamiento del agua, que se encuentra en el interior del caldero horizontal, en un experimento, se consiguieron las siguientes curvas en función del tiempo:

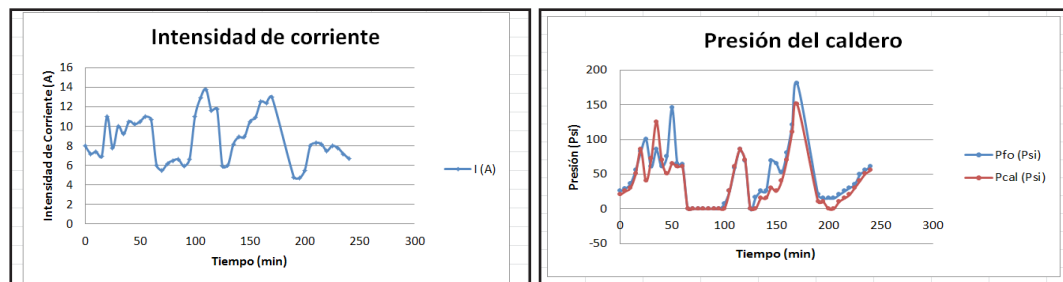


Figura 3. Consumo eléctrico del motor y presión del evaporador

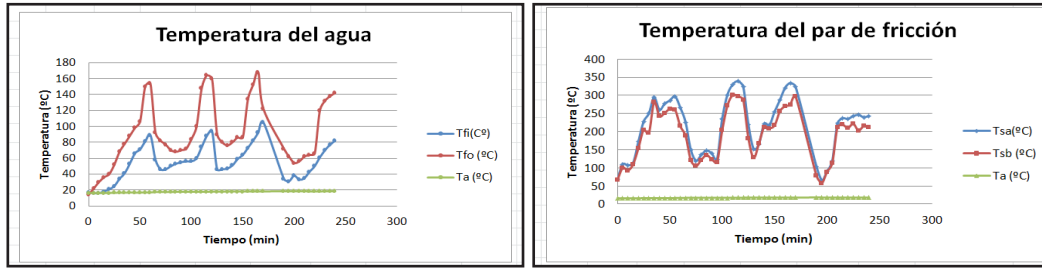


Figura 4. Temperatura del agua, y del par de fricción

A continuación en la figura 7, se indican las isoterms, elaboradas con los datos de temperatura tomadas en un intervalo de tiempo de 600 s. En la región cercana al rozamiento se obtienen las más altas temperaturas, mientras que en  $x=590$  mm., el gradiente de temperatura tiende a 0, en la mayoría de casos.

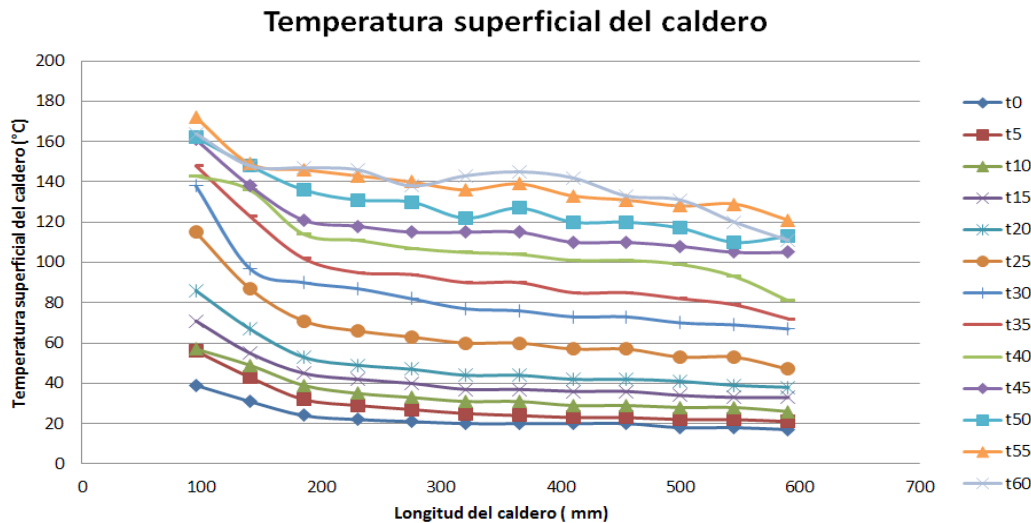


Figura 5. Perfil de temperaturas del cilindro

## CONCLUSIONES

Para realizar este ensayo de calentamiento del agua en un caldero de fricción, se utilizaron los siguientes parámetros: temperatura ambiente  $17^{\circ}\text{C}$ ; velocidad del aire circundante  $0,24$  m/s; velocidad de rotación del eje motriz 416 RPM, fuerza de aplastamiento axial 2000 N.

En un tiempo de calentamiento de 2100 s., la temperatura de saturación del agua es de  $92^{\circ}\text{C}$ , es decir en este momento empieza a producirse vapor saturado. Para obtener vapor sobrecalentado a la temperatura de  $150^{\circ}\text{C}$ , con presión interna de 60 Psi., el

tiempo complementario es de 1500 s., en este instante se procede a evacuar el vapor. Las temperaturas máximas del par de fricción acero bronce son 266 °C y 215 °C.

Para el análisis energético del caldero, se resuelve la ecuación diferencial parcial de segundo orden, para el estado estacionario con lo que se obtiene una temperatura en la pared cilíndrica de aluminio de 147 °C, en  $x=0$ , con un flujo de calor de 132 W, el calor transferido al agua por el intercambiador de aleación Cu-Sn, es de 110 W, y el calor que se pierde en el ambiente es de 36 W. En cuanto al flujo de calor en el eje motriz o par de acero K100, se estima una transferencia de calor por conducción de 17 W, de tal manera que el calor total necesario es de 298 W.

El calor generado por fricción alcanza en este experimento un valor de 379 W, por lo que la eficiencia de conversión con la presencia de película térmica, se aproxima al 78%. Este último parámetro indica la ventaja del proceso de conversión de energía mecánica en térmica, siempre y cuando se haya generado el tercer cuerpo, que actúa como lubricante y transmisor de alta energía calorífica.

## AGRADECIMIENTOS

En el desarrollo de este proyecto de investigación, han colaborado varias personas que han compartido sus valiosos conocimientos de interés científico, a los cuales expreso mi agradecimiento fraterno. Debo citar al señor Dr. Isidoro Lillo Bravo, Dr. Geraldo Lucio Tiago Filho, de Brasil; Dr. Brian Todd O'Leary (+), astronauta de la NASA, por su motivación para la investigación.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Câmara, Ronaldo. 2014. «Influence of the normal force, abrasive slurry concentration and abrasive wear modes on the coefficient of friction in ball-cratering wear tests.» *Tribology International*, pág. 52–62.
- Dunckle, C.; Aggleton, M.; Glassman, J. y Taborék, P. 2011. «Friction of molybdenum disulfide–titanium films under cryogenic vacuum conditions.» *Tribology International*, pág. 1819-1826.
- Guasumba, Jose. 2005. «Método y máquina para generación de alta energía calorífica por fricción.» *Ciencia*.
- Guipu, Xiao y Zhu, Zikang. 2010. «Friction materials development by using DOE/RSM and artificial neural network.» *Tribology International*, pág. 218-227.
- Holmberg, Kenneth; Roope, Siilasto y Tarja, Laitinen. 2013. «Global energy consumption due to friction in paper machines.» *Tribology International*, pág. 58–77.

- Jacob, M. 1950. *Elements of heat transfer and insulation*. John Wiley and Sons.
- Pitts, D. 1977. *Transferencia de calor*. México: McGraw Hill.
- Spiegel, M. 1975. *Matemáticas superiores para ingenieros y científicos*. México: McGraw Hill.
- Stewart, W. 1968. *El mundo de la alta presión*. México D.F.: Van Nostrand Momentum Books.
- Tieu, Kosasih y Godbole, A. 2006. «A thermal analysis of strip-rolling in mixed-film lubrication with O/W emulsions.» *Tribology International*, pág.1591-1600.
- Xiao, Jinkun; Lei Zhang, Kechao Zhou y Jianguo, Li. 2013. «Anisotropic friction behaviour of highly oriented pyrolytic graphite.» *Carbon 65*, pág. 53-62.
- Zibota, Antonic; Nikolic, Nejsa y Radomirovic, Dragi. 2011. «On the influence of a pin type on the friction losses in pin bearings.» *Mechanism and Machine Theory*, pág. 975-985.

**Fecha de recepción:** 29 de enero 2016

**Fecha de aceptación:** 31 de mayo 2016

### **Correspondencia**

José Guasumba Codena  
sjguasumba@espe.edu.ec