

 Institución Universitaria	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-27

# **Aprovechamiento de energía térmica por medio de combustión de gas natural**

**Jorge Arvey Quintero Moreno**

**CC. 1128479091**

**Ingeniería Electromecánica**

**Director(es) del trabajo de grado**

**Luis Alfonso Loaiza Upegui**

**INSTITUTO TECNOLÓGICO METROPOLITANO**

**Fecha**

**24/09/2017**

	<b>INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO</b>	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

# RESUMEN

---

Este trabajo tiene como objetivo diseñar el banco de tubos para aprovechar los gases que se pierde en el ambiente por el quemador de alta velocidad en la empresa Industrias Emu S.A.

La Industrias Emu S.A es una empresa dedicada a la fabricación de químicos para la agro industria, uno de sus productos principales es el sulfato de cobre Penta hidratado. Este es obtenido mediante un reactor con capacidad para 10m<sup>3</sup> donde se adicionan 5m<sup>3</sup> de agua, cobre y ácido sulfúrico, esta reacción se calienta por medio de un serpentín y un quemador de alta velocidad que se demora 3.5 horas en calentar la reacción de 26°C a 85°C, al obtener esta temperatura, se sostiene la reacción a esta temperatura en un promedio de 9 horas para la obtención del sulfato de cobre.

El quemador de alta velocidad consume 20.29 m<sup>3</sup>/h de gas natural y los gases del quemador salen por la chimenea a 350 °C en promedio, con estos gases de salida del quemador se busca diseñar un banco de tubos para realizar el calentamiento de 5 m<sup>3</sup> de agua para ahorrar en consumo de gas natural, reduciendo así las 3.5 horas de precalentamiento de la reacción.

Este trabajo toma las mediciones de las variables como temperatura de los gases de combustión, velocidad de los gases de combustión -entregada por la turbina del quemador de alta velocidad-, diámetro y material de la tubería, así como la distancia entre la chimenea y la ubicación del banco de tubos. Con estos datos se procede a definir la configuración del banco de tubos a partir del diámetro, longitud y números los tubos. Teniendo en cuenta los anteriores datos se procede a realizar los cálculos correspondientes para encontrar la energía que se puede aprovechar del banco de tubos para el calentamiento del agua y el ahorro de combustible en la reacción del cobre penta hidratado al subir el agua caliente.

En este orden de ideas, de la configuración del banco de tubos escalonado se obtuvo como resultado un aprovechamiento de energía de 70.10 kW para calentar 5 m<sup>3</sup> el agua hasta 90°C, lo cual le permitirá a la empresa obtener un ahorro en el precalentamiento de la reacción de 3.5 horas, reflejado en ahorro de combustible. Así pues, se concluye que el diseño del dispositivo es eficiente por su configuración y aporta muchos beneficios al proceso de la empresa, alguno de ellos es el ahorro de combustible 71.015 m<sup>3</sup>/h por reacción de sulfato de cobre Penta hidratado y el ahorro del consumo del gas por las 3.5 horas = 20.29 m<sup>3</sup>/h \* 1324\$ \* 3.5 h = \$ 94.023,86 por reacción montada, al mes se realizan 20 reacciones, lo que al mes se traduce en un ahorro de =\$94.023,86 \* 20 = \$1.880.477, 20, al año = \$ 1.880.477,20 \* 12 = \$ 22.565.726,40.

**Palabras claves:** *banco de tubos, sulfato de cobre Penta hidratado, quemador de alta velocidad, serpentín, energía térmica, reacción.*

 Institución Universitaria	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

# RECONOCIMIENTOS

---

Le agradezco inicialmente a Dios por bendecirme para llegar hasta aquí, porque me ha ayudado y acompañado para que este sueño tan anhelado de ser un profesional, hoy lo pueda cumplir. Gracias al Instituto Tecnológico Metropolitano –ITM-, por brindarme la oportunidad de formarme como un profesional integral.

A mi director de trabajo de grado, Luis Alfonso Loaiza Upegui por su esfuerzo y dedicación, porque con su conocimiento, experiencia, paciencia y motivación ha contribuido para que pueda lograr este sueño. También a todos los docentes que me acompañaron y me instruyeron durante toda mi carrera profesional, en especial a Luis Fernando, Argimiro, Bernardo y Muñera; gracias por sus consejos, sus enseñanzas y sobre todo por su amistad.

Así mismo agradezco a mis jefes de trabajo, Carlos Piña y Ricardo torres, los cuales me han motivado y acompañado durante mi formación profesional.

Son muchas las personas que han hecho parte de mi formación profesional y a cada una les agradezco su amistad, sus consejos, su apoyo, sus ánimos y la compañía en los momentos más difíciles de mi vida. Algunas de ellas aún están aquí conmigo y otras en mis recuerdos y en mi corazón, sin importar en donde estén quiero darles las gracias por formar parte de mí, por todo lo que me han brindado y por todas sus bendiciones.

Y sin lugar a dudas, agradezco profundamente a mi familia que siempre me ha apoyado en este camino de crecimiento personal y profesional. Mil gracias y que Dios los bendiga.

 Institución Universitaria	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

# ACRÓNIMOS

---

- SL:** distancia entre ejes de los tubos en dirección del flujo
- ST:** distancia entre ejes de los tubos en dirección transversal al flujo del flujo
- SD:** distancia transversal entre ejes de los tubos
- D:** diámetro de los tubos
- L:** longitud de los tubos
- AL:** área de flujo en distancia entre ejes del flujo
- AT:** área de flujo ente la distancia superficial de los tubos
- AD:** área de flujo entre las diagonales de los tubos
- Vmax:** velocidad máxima
- V:** velocidad
- N:** número de tubos
- NL:** número de tubos en dirección del flujo
- NT:** número de tubos en plano transversal del flujo
- Tm:** temperatura promedio
- Ti:** temperatura de entrada
- Te:** Temperatura de salida
- Ts:** temperatura superficial
- As:** área superficial
- T quemador:** temperatura quemador
- T salida supuesta:** temperatura de salida supuesta
- T salida:** temperatura de salida
- T entrada:** temperatura de entrada
- T superficial:** temperatura superficial
- Prs:** prandtl a temperatura superficial

	<b>INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO</b>	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

# TABLA DE CONTENIDO

APROVECHAMIENTO DE ENERGIA TERMICA POR MEDIO DE GAS NATURAL TUBOS.....	.....
RESUMEN.....	.....
.....2	.....2
RECONOCIMIENTO.....	.....
.....3	.....3
ACRONIMOS.....	.....
.....4	.....4
1. INTRODUCCIÓN.....	6
2. MARCO TEÓRICO.....	8
3. METODOLOGÍA.....	18
4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	21
5. CONCLUSIONES, RECOMENDACIONES Y TRABAJO FUTURO .....	24
REFERENCIAS .....	25
APÉNDICE.....	26
A. cálculos de convección interna forzada y banco de tubos.....	30
B. planos del banco de tubos.....	38
C. Plano de ubicación en planta .....	42
D. catálogo de bomba NGA - PRO .....	43
E. catálogo de cañuela LMR .....	26
F. catálogo de manta aislante de roca mineral .....	49

 Institución Universitaria	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

# 1. INTRODUCCIÓN

---

## 1.1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Industrias Emu S.A, es una organización industrial dedicada a producir y comercializar Soluciones Agro-Industriales de excelente calidad para el mercado nacional e internacional; entre los productos más destacados se encuentran el sulfato de cobre Penta hidratado, oxido de zen sello oro y blanco, emuzin, entre otros. En esta industria se busca intervenir el reactor de sulfato de cobre para el aprovechamiento de los gases que se pierden en el aire y que ayudan significativamente al aumento del consumo de gas natural y por ende los costos.

El reactor que se pretende intervenir está compuesto por un tanque con capacidad para 10 m<sup>3</sup>, un quemador de alta velocidad, un serpentín por donde pasa la combustión del quemador, un soplador que es el encargado de inyectar aire a la reacción para oxidar el material. El quemador de alta velocidad es el encargado de calentar la reacción compuesta por agua, cobre y ácido sulfúrico a una temperatura de 85°C, de igual modo ayuda a sostener esta temperatura durante 9 horas que dura la reacción con la que se obtienen los cristales de sulfato de cobre Penta hidratado. Con este sistema utilizando 5m<sup>3</sup> de agua a temperatura ambiente alrededor de 25°C, el tiempo de precalentamiento de la reacción es de 3.5h hasta llegar a 85°C.

El objetivo de este proyecto es utilizar un dispositivo de transferencia de calor para aprovechar los gases de combustión del quemador de alta velocidad que salen a 350°C y realizar el calentamiento de los 5 m<sup>3</sup> de agua en un tanque emergente hasta llevarla a 90°C, y de esta forma poder utilizar esta agua en otra reacción, con este proceso se lograría el ahorro de 3.5 horas del precalentamiento de la reacción del sulfato de cobre Penta hidratado, lo que traerá consigo un ahorro considerable de gas natural, en tanto que su consumo por hora es de 20.29 m<sup>3</sup>/h.

## 1.2 JUSTIFICACION

Con esta temperatura final obtenida del agua en el tanque emergente, se logra ahorrarle a la reacción 3.5 horas de consumo de gas en precalentamiento de la reacción de sulfato de cobre, con este ahorro de gas se obtiene los siguientes resultados:

- Consumo del quemador = 20.29 m<sup>3</sup>/h
- Precio del m<sup>3</sup> de gas = 1324\$
- Costo del gas por las 3.5 horas de ahorro = 20.29 m<sup>3</sup>/h\*1324\$\*3.5 h = \$ 94.023,86 por reacción montada, al mes se realizan 20 reacciones lo que al mes el ahorro es de = \$94.023,86\*20 = \$1.880.477, 20, al año = \$ 1.880.477,20 \* 12 = \$ 22.565.726,40.

El costo de la fabricación del banco de tubos, el aislamiento térmico general y el control eléctrico de todo el sistema, tiene un costo en promedio de 20.000.000 \$. En este sentido, Industrias Emu libraría la inversión del sistema de calentamiento de las aguas en un tiempo aproximado de 11 meses.

	<b>INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO</b>	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

## 1.3 OBJETIVOS

### 1.3.1 Objetivo general:

Diseñar un banco de tubos para optimizar el uso de los gases de combustión perdidos de un quemador de alta velocidad, para obtener un ahorro energético y económico para la Industria Emu S.A.

### 1.3.2 Objetivos específicos:

- Analizar y calcular las variables que intervienen en el diseño del banco de tubos.
- Seleccionar y calcular la configuración de tubos más adecuada.
- Elaborar informe final, planos de fabricación, cotización del costo del equipo.

**Capítulo 1:** Se explicará el por qué del diseño del banco de tubos, en que será aprovechado, cuáles serían los objetivos a resolver con este proyecto y los beneficios que traen para la empresa en la que se desarrolla la práctica y la implementación del banco de tubos.

**Capítulo 2:** Se planteará el marco de conocimientos que se han tenido en cuenta para el desarrollo del banco de tubos como lo son: el cómo funciona la reacción del sulfato de cobre, la energía que nos entrega el quemador de gas natural y qué variables debemos tener en cuenta para diseñar el banco de tubos y obtener el mejor rendimiento del banco de tubos.

**Capítulo 3:** En este apartado se expone la metodología empleada para el desarrollo del diseño del banco de tubos con el propósito de alcanzar un óptimo rendimiento, teniendo en cuenta todas las variables que afectan el sistema de aprovechamiento de la energía térmica. Todo ello, a partir del libro *Transferencia de calor y masa, fundamentos y aplicaciones* (Yunus a. Cengel, afshin j. Ghajar, 2009).

**Capítulo 4:** Aquí se consolidan los resultados obtenidos de las pruebas realizadas para el diseño del banco de tubos.

**Capítulo 5:** Por último, se llegan a unas conclusiones que son un intento de recoger las fortalezas y limitaciones en el proceso de diseñar un banco de tubos.

	<b>INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO</b>	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

## 2. MARCO TEÓRICO

---

### 2.1 Materiales y métodos de obtención de sulfato de cobre Penta hidratado

En la literatura están descritos los métodos de obtención de sulfato de cobre, de manera general el sulfato de cobre se puede obtener a partir de la adición del ácido sulfúrico diluido sobre el cobre u óxido de cobre en grandes cantidades, seguida de evaporación y cristalización (Perdomo Lorenzo, 2005).

- 1- Uno de los primeros métodos de obtención del sulfato de cobre fue desarrollado por Okers, basado en la reacción de  $2\text{Cu} + 2\text{H}_2\text{SO}_4 + \text{O}_2 \rightarrow 2\text{CuSO}_4 + 2\text{H}_2\text{O}$ , sin embargo, los mejores resultados se obtuvieron a 25°C y utilizando un exceso de aire, y con una concentración de ácido sulfúrico de 25 %. Con posterioridad se reemplazó el oxígeno por el aire, lo cual dio una productividad de sulfato de cobre por encima de un 28%, ocurriendo la cristalización cuando la temperatura de la solución se eleva a 30 ° C con un exceso de aire y por debajo de las condiciones óptimas. En el proceso desarrollado por Okers, a partir del cobre se obtiene el vitriolo azul, el cual debe volverse a cristalizar. El ácido sulfúrico al 50% se disuelve con las aguas madres del vitriolo a una temperatura de 30-32 ° C. La temperatura de disolución se eleva a 81-82 ° C y el vitriolo se disuelve, hasta llegar a 1.2 g/ml y esta solución después de clarificada es cristalizada.
- 2- La escoria de calcopirita es pulverizada con agua y una solución débil de sulfato de cobre, el hierro es tratado para precipitar el cobre, el cual es calentado a 400 – 500 ° C y disuelto en una solución de ácido sulfúrico, Posteriormente, la solución es concentrada para obtener cristales de sulfato de cobre.
- 3- La firma rusa Kyshtymm Electrolítica Copper Works produce el sulfato de cobre a partir de una escoria básica de cobre, la cual se pulveriza y con posterior tratamiento se obtiene una solución ácida de sulfato de cobre. Este producto además es purificado mediante la recristalización.
- 4- La obtención de sulfato de cobre a partir de la calcopirita, se basa en la desulfuración y posterior tratamiento con ácido sulfúrico de concentración 1.07-1.09 g/ml, donde el aire es burbujeado a través de la mezcla a una temperatura de 80-90 0 C y la solución es concentrada 1.30-1.31 g/ml al vacío a una temperatura de 25-28°C, la cantidad de ácido sulfúrico y cobre se calculan estequiometricamente teniendo en cuenta el cobre presente en el mineral.
- 5- El sulfato de cobre se puede producir a partir de un material de cobre que se obtiene en la fundición de metales, para lo cual el material es molido y lixiviado con una solución de ácido sulfúrico de 5-10% a una temperatura de 60-70 0 C. La solución se filtra, se decanta y se evapora obteniendo cristales con un 50% de sulfato de cobre. Los métodos más comunes de purificación comprenden: destilación, cristalización, extracción,

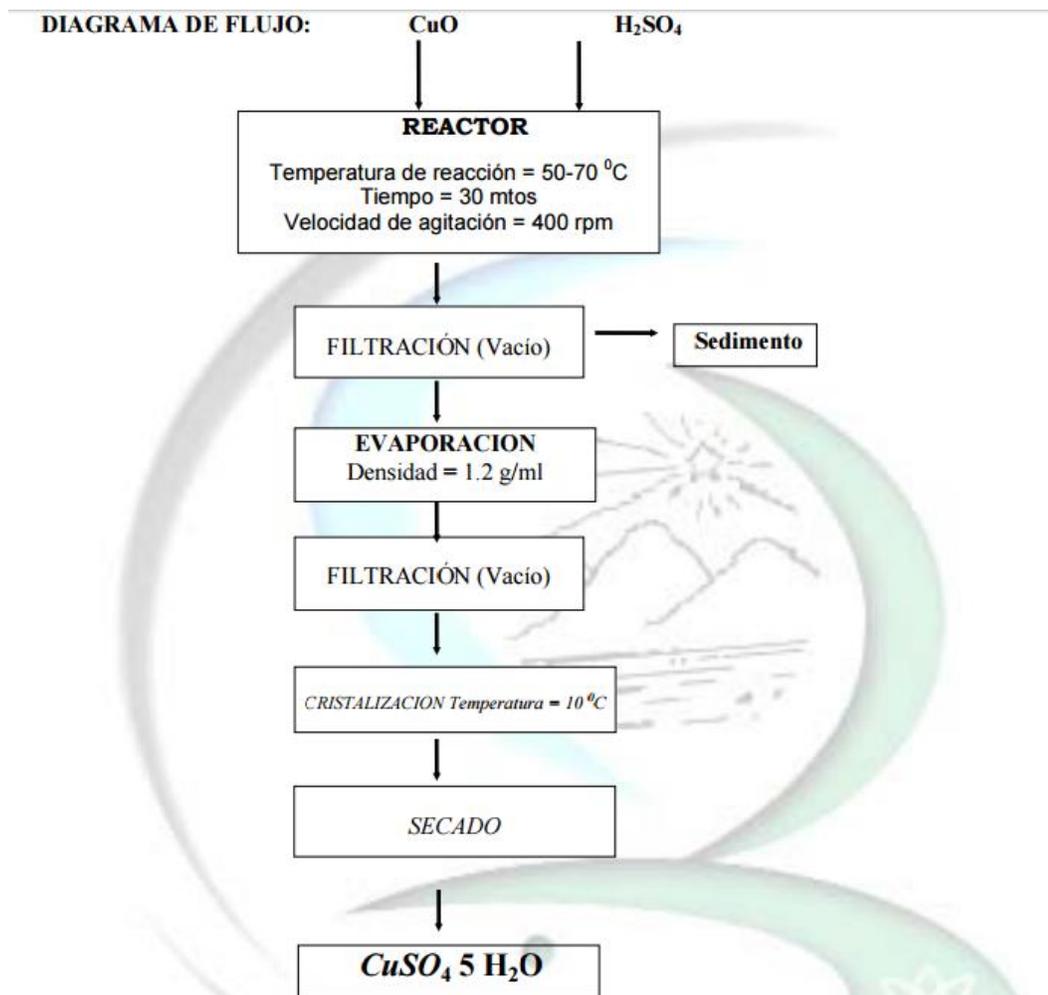
 Institución Universitaria	<b>INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO</b>	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

cromatografía. En algunos casos las impurezas volátiles y otras, pueden ser eliminadas simplemente por calentamiento.

El método de purificación más empleado en el caso de compuestos inorgánicos es la cristalización y la recristalización, mediante la cual se eliminan la mayor cantidad de impurezas presentes. Los procedimientos más utilizados para la purificación de un producto sólido por recristalización de una solución se incluyen los siguientes pasos:

- 1- El material se disuelve en un solvente adecuado, mediante agitación vigorosa y se calienta cercana hasta el punto de ebullición para formar una solución cercana a la saturación.
- 2- La solución caliente se filtra para eliminar las partículas insolubles. Para prevenir la cristalización durante la filtración, puede emplearse un embudo filtrante enchaquetado y la solución puede ser diluida con más solvente.
- 3- La solución se enfría hasta que las sustancias disueltas cristalicen.
- 4- Los cristales son separados del licor madre, ya sea por centrifugación o por filtrado al vacío, a través de un vidrio sinterizado o Buhner. Usualmente la centrifugación es la más usada debido a la mayor eficiencia en la separación de los cristales del licor madre y el ahorro de tiempo, particularmente cuando los cristales son muy pequeños y finos.
- 5- Los cristales son lavados con una pequeña cantidad de solvente fresco y se separan del licor madre, posteriormente se secan. Para la obtención del sulfato de cobre a escala de laboratorio, se siguieron las operaciones tecnológicas que se muestran a continuación.

	<b>INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO</b>	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22



**Figura 1:** diagrama de flujo sacado de Revista cubana de química (Vol. XVII, No 2, 2005) (Abril 15 de 2017).

En un reactor de vidrio de 1 un litro de capacidad se añade la cantidad de ácido sulfúrico diluido entre 12.5 - 20 % de concentración y se va dosificando gradualmente el óxido de cobre, la mezcla se agita a una velocidad de 400 rpm y se calienta a una temperatura entre 50–700 C, durante 30 minutos para lograr un mejor contacto entre las dos fases reaccionantes: fase sólida- fase líquida teniendo un sistema heterogéneo sólido–líquido. Después de llevada a cabo la reacción, la mezcla se filtra al vacío y la solución resultante se evapora hasta densidad de 1.2 g/ml, se enfría a 10 0 C, y los cristales se secan. Se realizó un Diseño de Experimentos Factorial<sup>11</sup> - 22 con tres réplicas en el punto central, utilizando el Software Statgraphics 5.1, donde fueron seleccionados las variables de proceso, así como los niveles de las mismas, fijándose como variables respuestas el rendimiento del proceso y la pureza del sulfato de cobre. Las variables independientes del proceso fueron:

Variables cuantitativas: X1 – Temperatura de reacción (°c), X2- Concentración de ácido sulfúrico (%).



	<b>INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO</b>	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

Se determinaron los modelos estadísticos en cuanto a pureza del producto y rendimiento del proceso de síntesis del sulfato de cobre:

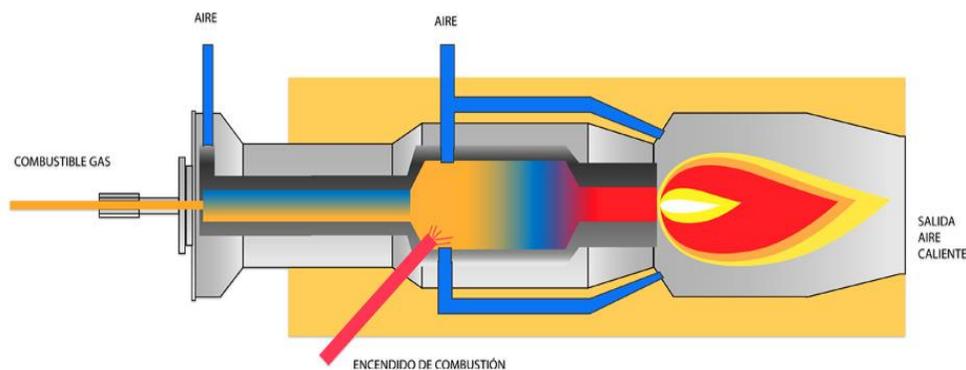
- Pureza =  $99.66 + 0.48 X1 - 1.72 X2 - 0.44 X1X2$ .
- Rendimiento =  $78.57 + 0.945 X1 - 13.505 X2 - 0.145 X1X2$ .

Al analizar los resultados alcanzados, se pudo observar que para el caso de la “pureza del producto, la variable de mayor influencia es la concentración del ácido sulfúrico teniendo un efecto negativo; mientras que la temperatura tiene una influencia positiva menor. Para el caso del rendimiento, la concentración del ácido sulfúrico presenta una mayor influencia negativa, mientras que la temperatura tiene un menor efecto positivo” (Perdomo Lorenzo, 2005).

## 2.2 Quemadores de Gas Natural

Los quemadores de alta velocidad son de mezcla en cono o block adaptables a una variada gama de aplicaciones. Pueden trabajar con gas natural, butano, propano o gas pobre. Bien completamente automatizado. La alta velocidad de los gases de combustión garantiza uniformidad de temperatura en el horno extremadamente alta, brindando posibilidades de mejoramiento en el control de calidad, los niveles de producción y en el consumo de combustible. Ø 2” y llave esférica Ø 1” para gas. La óptima estabilidad de llama obtenida en cualquier condición de funcionamiento de los quemadores determina un sistema de combustión amplio y seguro con distintas regulaciones:

- 1) Estequiométrico. Dada su gran flexibilidad de trabajar la regulación de combustión.
- 2) Con exceso de aire hasta 900%, con gas al mínimo puede ser.
- 3) Con exceso de gas hasta 100% -con aire al máximo-. Estas características hacen a los quemadores adaptables a un vasto campo de aplicaciones industriales como: hornos túneles, hornos intermitentes en la industria cerámica y ladrillera, hornos metalúrgicos para tratamientos térmicos, hornos para vidrio. Estos son particularmente aptos para procedimientos combinados, como templar acero a 1000°C con funcionamiento estequiométrico, seguido de recocido a 600°C y enfriamiento en condiciones de exceso de aire.



 Institución Universitaria	<b>INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO</b>	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

**Figura 2:** quemador de alta velocidad de gas natural, tomado Gil, Edison; Gómez, Elías; y Arrieta, Andrés. Combustión del gas natural y quemadores industriales. Módulo 2. Medellín, Universidad de Antioquia.

### **Funcionamiento.**

Los quemadores se caracterizan por una combustión estable y dan un efecto de impulso penetrante con amplio rango mínimo máximo, ya sea con funcionamiento estequiométrico, con exceso de gas a la máxima capacidad, o con exceso de aire a la mínima capacidad. La alta velocidad de los gases de salida del cono de combustión (hasta 210m/seg.) mejora la uniformidad de la temperatura del horno y la transferencia del calor a la carga. Cuando se instalan quemadores enfrentados se recomienda dejar un espacio mínimo de 15 cm entre los ejes de llama para evitar el choque y turbulencia de la misma y obtener el máximo de efecto de impulso. (Andres, Lorenzo, & Elias., 1996).

### **2.3 Banco de tubos**

El flujo externo sobre una matriz de tubos es una configuración muy común en equipos como condensadores y evaporadores. (Yunus A.Cengel, 2009).



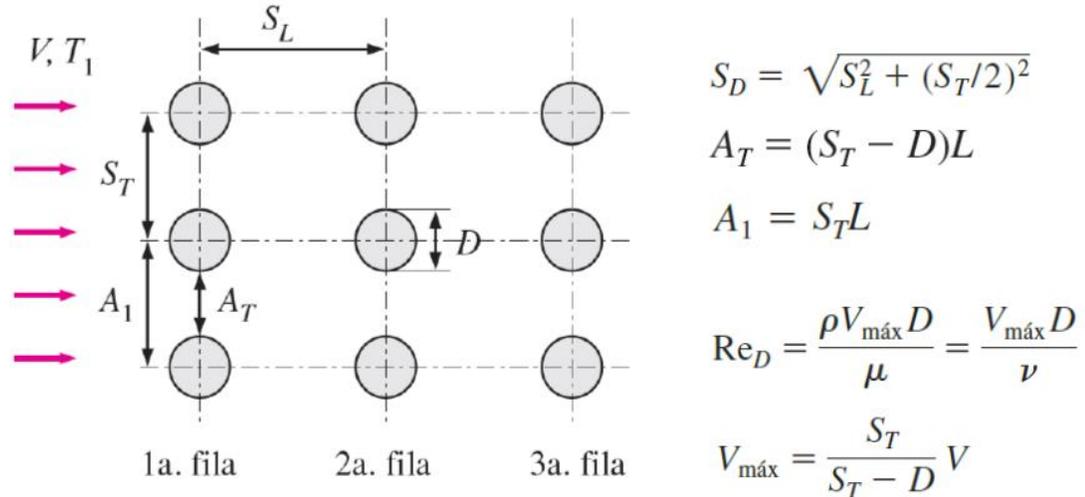
**Tubos alineados**



**Tubos escalonados**

**Figura 3:** tubos alineados y escalonados, tomado del libro *Transferencia de calor y masa fundamentos y aplicaciones* (Yunus a. Cengel, Afshin j. Ghajar; 2009)

### Tubos alineados

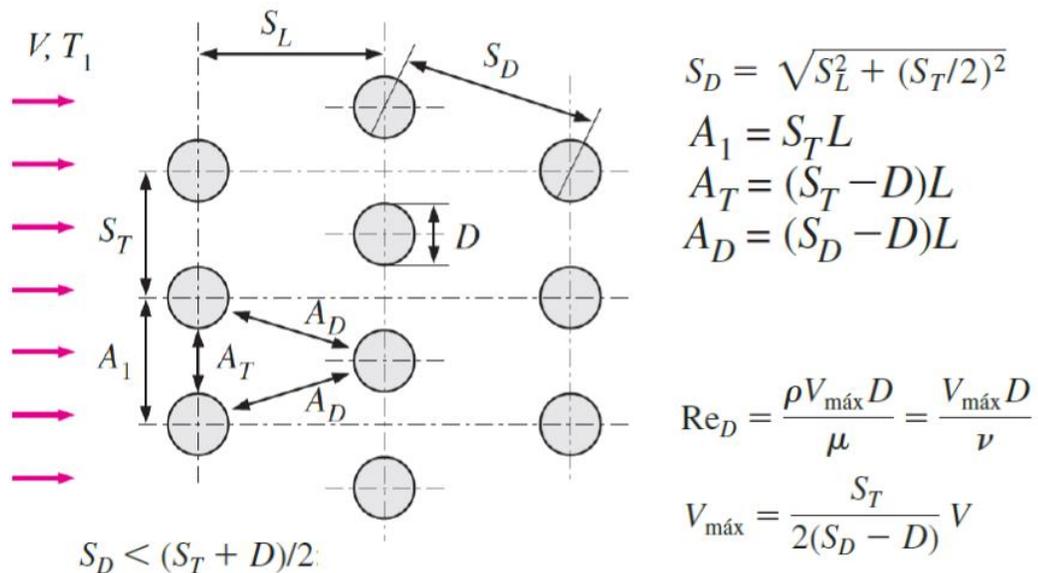


**Figura 4:** tubos alineados y variables que lo componen tomado del libro *Transferencia de calor y masa fundamentos y aplicaciones* (Yunus a. Cengel, Afshin j. Ghajar; 2009)

**NL:** número de tubos en dirección del flujo.

**L:** longitud de los tubos-

### Tubos escalonados



**Figura 5:** tubos escalonados y variables que lo componen tomado del libro *Transferencia de calor y masa fundamentos y aplicaciones* (Yunus a. Cengel, Afshin j. Ghajar; 2009)

**Nusselt para banco de tubos (NL ≥ 16)**

 Institución Universitaria	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

$$1) \quad NU_D = \frac{hD}{k} = C Re_D^m Pr^n (Pr/Pr_s)^{0.25}$$

**Tabla 5:** tabla de correlación de numero de Nusselt para banco de tubos tomado del libro *Transferencia de calor y masa fundamentos y aplicaciones* (Yunus a. Cengel, Afshin j. Ghajar; 2009).

Configuración	Rango $Re_D$	Correlación
Alineados	0 – 100	$NU_D = 0.9 Re_D^{0.4} Pr^{0.36} (Pr/Pr_s)^{0.25}$
	100 – 1000	$NU_D = 0.52 Re_D^{0.5} Pr^{0.36} (Pr/Pr_s)^{0.25}$
	1000 – $2 \times 10^5$	$NU_D = 0.27 Re_D^{0.63} Pr^{0.36} (Pr/Pr_s)^{0.25}$
	$2 \times 10^5$ - $2 \times 10^6$	$NU_D = 0.033 Re_D^{0.8} Pr^{0.4} (Pr/Pr_s)^{0.25}$
Escalonados	0 – 500	$NU_D = 1.04 Re_D^{0.4} Pr^{0.36} (Pr/Pr_s)^{0.25}$
	500 – 1000	$NU_D = 0.71 Re_D^{0.5} Pr^{0.36} (Pr/Pr_s)^{0.25}$
	1000 - $2 \times 10^5$	$NU_D = 0.35 (S_T/S_L)^{0.2} Re_D^{0.6} Pr^{0.36} (Pr/Pr_s)^{0.25}$
	$2 \times 10^5$ – $2 \times 10^6$	$NU_D = 0.31 (S_T/S_L)^{0.2} Re_D^{0.8} Pr^{0.36} (Pr/Pr_s)^{0.25}$

### Nusselt para banco de tubos ( $NL < 16$ )

$$2) \quad Nu_{D,nl < 16} = F Nu_D \rightarrow Nu_D = \frac{hD}{k} = C Re_D^m Pr^n (Pr/Pr_s)^{0.25}$$

**Tabla 6:** tabla de factor de corrección según número de tubos tomada del libro *Transferencia de calor y masa fundamentos y aplicaciones*, (Yunus a. Cengel, Afshin j. Ghajar; 2009).

$N_t$	1	2	3	4	5	7	10	13
Alineados	0.70	0.80	0.86	0.90	0.93	0.96	0.98	0.99
Escalonados	0.64	0.76	0.84	0.89	0.93	0.96	0.98	0.99

A menos que se indique lo contrario, todas las propiedades se evalúan en  $T_m$ :

$$3) \quad T_m = \frac{T_i + T_e}{2}$$

$T_i$  = temperatura del fluido a la entrada del banco de tubos.

$T_e$  = temperatura del fluido a la salida del banco de tubos.

### Temperatura a la salida, $T_e$

$$4) \quad T_e = T_s - (T_s - T_i) \exp\left(-\frac{A_s h}{\dot{m} c_p}\right)$$

$$5) \quad A_s = N \pi D L$$

$$6) \quad \dot{m} = \rho V (N_T S_T L)$$

$$7) \quad \dot{Q} = \dot{m} C_p (T_e - T_i)$$

**h:** Coeficiente convectivo [W/ (m<sup>2</sup>·K)].

**C<sub>p</sub>:** Calor específico [J/ (kg ·°C)].

**N<sub>T</sub>:** número de tubos en plano transversal al fluido.

**N:** número total de tubos.

 Institución Universitaria	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

**L:** Longitud de los tubos[m].  
**Ts:** Temperatura superficial de los tubos [K].  
**Caída de presión ( $\Delta P$ )**

$$8) \Delta P = N_L f \chi \frac{\rho v^2_{max}}{2}$$

f: factor de fricción.

$\chi$ : factor de corrección.

$\Delta P$ : Caída de presión [Pa].

$\Delta P$  = Presión entrada banco – Presión salida banco.

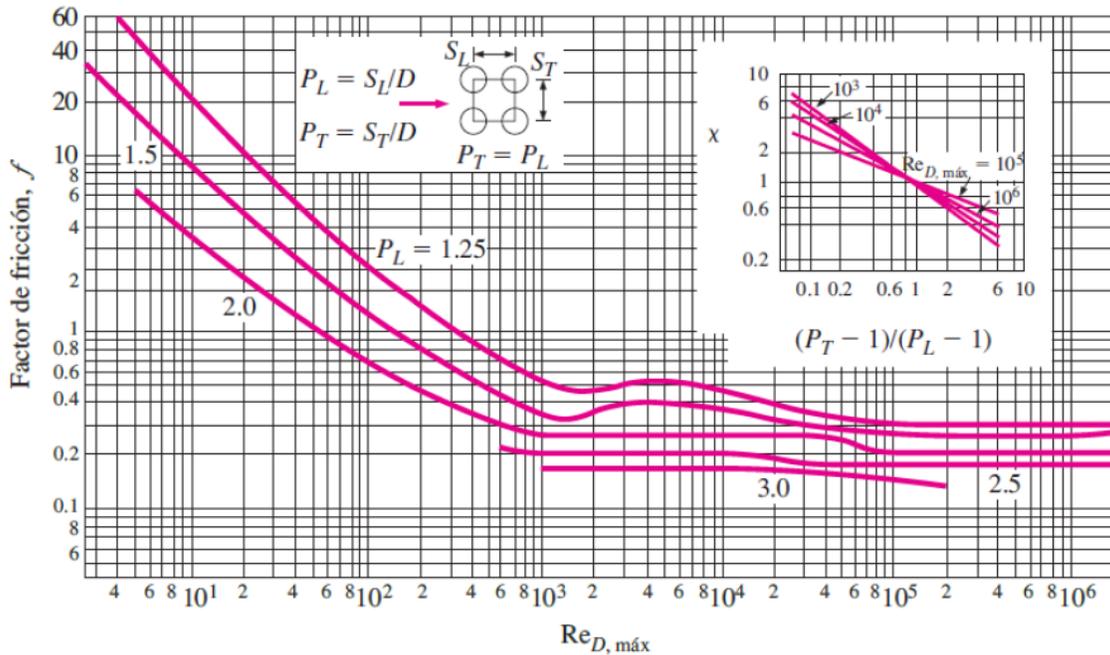
La potencia requerida de bombeo es:

$$9) W_{bomba} = \dot{V} \Delta P = \frac{\dot{m} \Delta P}{\rho}$$

$$10) \dot{V} = V(N_T S_T L)$$

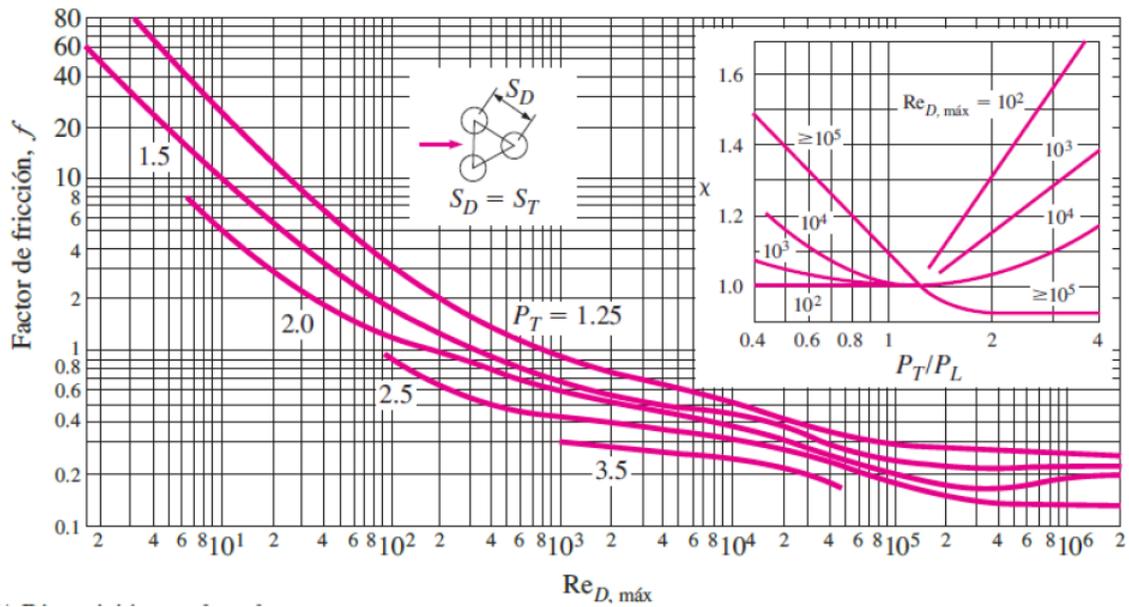
$$11) \dot{m} = \rho \dot{v} = \rho V(N_T S_T L)$$

#### f, Tubos alineados



**Figura 6:** grafico para el factor de fricción para tubos alineados tomado del libro *Transferencia de calor y masa fundamentos y aplicaciones*, (Yunus a. Cengel, Afshin j. Ghajar; 2009)

#### f, Tubos escalonados



**Figura 7:** gráfico para el factor de fricción para tubos escalonados sacada del libro *Transferencia de calor y masa fundamentos y aplicaciones*, (Yunus a. Cengel, Afshin j. Ghajar; 2009)

	<b>INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO</b>	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

## 3. METODOLOGÍA

---

### 3.1 Toma de variables de la salida del quemador de alta velocidad

Primero se toma la variable entregada por la turbina del quemador que es el caudal, entrega  $793\text{m}^3/\text{h}$ , con este caudal y el diámetro de la tubería obtenemos la velocidad de los gases a la entrada de la tubería de direccionamiento hacia el banco de tubos. Se toma medición de temperatura de los gases que nos entrega a  $325^\circ\text{C}$  de temperatura los gases de combustión. Con la distancia de la tubería de 7 metros y la configuración de la tubería que es circular, se calcula por medio de convección interna forzada la energía térmica que se puede aprovechar de estos gases de combustión, basados en el artículo de *Tecnología de la Combustión de los Gases y Quemadores Atmosféricos de Pre mezcla* (Amell A. Andrés; Barraza Lorenzo; Gómez Elías; 1996).

Con los datos obtenidos anteriormente se encontró la velocidad de entrada a la tubería de direccionamiento de los gases que es de  $(26,95\text{ m/s})$  a una temperatura de  $(325^\circ\text{C})$ . Con la recolección de estos datos, más la distancia de 7 metros a la que estará ubicado el banco de tubos, procedemos a calcular la temperatura de salida de los gases, con los datos de la temperatura ambiente y velocidad promedio del ambiente y el material del tubo a usar que es acero inoxidable 316, se obtuvo un coeficiente convectivo de  $0.8071\text{ w/m}^2\cdot\text{k}$ . A partir de estas identificaciones procedió a realizar el cálculo experimental del cual se obtuvo una temperatura de salida de la tubería de  $319^\circ\text{C}$  y una transferencia de calor de  $1215,8\text{ w}$  que se propone para ser aprovechada en el banco de tubos. Sumado lo anterior, el resultado es una pérdida de  $6^\circ\text{C}$  grados en 7 metros si no se le realiza un aislamiento térmico a la tubería de direccionamiento.

### 3.2 Material de fabricación del banco de tubos escalonados

Basados en los químicos que estará expuesto el banco de tubos como lo son el sulfato de cobre y un 5% al 12% de ácido sulfúrico, se escoge acero inoxidable 316 porque proporciona un servicio útil en concentraciones de ácido sulfúrico debajo del 20% y arriba de 85%. Entre 20% y 85% el acero inoxidable está sujeto a ataque rápido. Las aleaciones que contienen molibdeno frecuentemente demuestran una ventaja bajo las condiciones más severas de acidez y temperatura y tiene una conductividad térmica de  $22,6\text{w/m}\cdot\text{k}$ , condiciones que facilita la transferencia de calor por conducción del banco de tubos<sup>1</sup>.

### 3.3 Configuración de banco de tubos

---

<sup>1</sup> Esta Información fue tomada de *Resistencia a la corrosión de los aceros inoxidables*, consultada el 23 de febrero de 2017 en el sitio web <http://bit.ly/1S8PNN4>

	<b>INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO</b>	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

La configuración de tubos escalonados posee un mayor coeficiente de transferencia de calor que está asociado con los tubos entre líneas, para este caso se hace referencia a la segunda fila. Los tubos de la primera línea actúan como una rejilla de turbulencia, aumentando el coeficiente convectivo para las líneas siguientes, en la medida que los tubos están más cerca hay un mayor gradiente de temperatura, por lo que la transferencia por convección es mayor; es por esto que se escoge la configuración de banco de tubos escalonados<sup>2</sup>.

Con los datos que obtenidos, la energía térmica que puede ser aprovechada del serpentín después de pasar por el tubo de direccionamiento es de 1218.83 w a una temperatura de salida del tubo de 319°C, esta energía será aprovechada en el interior de los tubos para calentar las aguas madres que se recirculará con ayuda de una bomba NGA-PRO de pedrollo, que entrega un caudal de entrada al banco de tubos de 21 m<sup>3</sup>/h, esta tendrá transferencia de calor por conducción y convección a contra flujo -en diferentes sentidos los gases de combustión y las aguas madres- esto con el fin de tener una mejor transferencia de calor, el banco de tubos se diseñó con tubos escalonados utilizando 25 tubos a una longitud de 0.7m cada tubo y los siguientes datos de construcción:

**SL:** 0.06 m

**ST:** 0.06 m

**SD:** 0.07m

**D:** 0.0483 m

**NL:** 5

**NT:** 5

**Velocidad de entrada:** 3.67 m/s

**Temperatura de los tubos:** 300°C

**Temperatura de entrada del Agua:** 21°C -temperatura ambiente promedio-

Con los datos asignados al diseño del banco de tubos, los conocidos y los mencionados anteriormente se encontraron los siguientes resultados: la temperatura de salida del agua del banco de tubos es de 27°C con una tasa de transferencia de calor de 20750034,84 w.

### 3.4 Aislamiento del banco de tubos y tubería de entrada al banco de tubos

Dado que el sistema del banco de tubos está calculado para fabricarse en acero inoxidable 316 y su conductividad térmica es de 22,6w/m\*k, lo que implica una gran cantidad de energía térmica que se pierde al medio ambiente por conducción, convección y radiación al ambiente, siendo entre un 15% a un 20% de pérdidas en el entorno, haciendo el sistema menos eficiente<sup>3</sup>. Por ende, se aísla con una manta hecha de lana mineral de roca con las siguientes características: "0.91m de ancho por 2.44m de largo con una conductividad térmica de 0.38 btu\*pulg/hr\*pie<sup>2</sup>\*°F". Además de la tubería con unas "cañuelas aislantes de lámina mineral aglomerada sintética de una longitud de 0.91m por 2in de espesor con una conductividad de 0.32

<sup>2</sup> Basado en el estudio realizado por la Universidad de Chile, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas del Departamento de Ingeniería Mecánica, *Modelacion de flujo laminar y transferencia de calor en haz de tubos*, Carlos Francisco Espinosa Barrios, Santiago de Chile, junio 2012.

<sup>3</sup> Teniendo como referencia el estudio realizado por la Universidad Simón Bolívar, entre el Decano de Estudios Profesionales, Coordinación de Ingeniería Mecánica, Diseño e Instalación de Aislamiento térmico de tuberías y equipos, Ciro Limone Torres, Sartenejas, marzo de 2012.

	<b>INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO</b>	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

btu\*pulg/hr\*pie^2\*°F” estos datos suministrados por el proveedor calorcol reduce la energía térmica perdida en el medio ambiente, para lograr así el diseño de un sistema más eficiente.

### **3.5 Beneficios de la empresa con el banco de tubos escalonado**

Subiendo los 5m<sup>3</sup> de agua a 90°C, se da un ahorro de precalentamiento del reactor de 3.5 h de dicha agua. El quemador utilizado en el reactor es de 750000 btu/h y consume 20.29 m<sup>3</sup> de gas, en tanto que el consumo de gas es de 25 m<sup>3</sup> \* 3.5 h = 71.015m<sup>3</sup> de gas ahorrados por reacción, el precio del gas por las 3.5 horas de ahorro = 20.29 m<sup>3</sup>/h\*1324\$\*3.5 h = \$ 94.023,86 por reacción montada.

 Institución Universitaria	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

## 4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### 4.1 Energía térmica disponible de los gases del quemador

Con las variables suministradas por los elementos que componen el sistema de combustión por gas natural del reactor de sulfato de cobre Penta hidratado, utilizando un tubo circular de diámetro 0.102 m, por medio de convección forzada en el interior de la tubería circular con una distancia de 7 metros desde donde se realiza la combustión de gas natural hasta el punto de ubicación del banco de tubos para obtener esta temperatura de entrada al banco de tubos se procede a realizar los siguientes cálculos:

$$\text{Con la Temperatura promedio} = \frac{(T_{\text{quemador}} + T_{\text{salida}})}{2} = \frac{(325^{\circ}\text{C} + 315^{\circ}\text{C})}{2} = 320^{\circ}\text{C}$$

Con esta temperatura promedio se extrae el número de prandtl, viscosidad cinemática, conductividad térmica, calor específico y densidad, por tablas del libro Termodinámica (McGraw-Hill: 2009, 1008). De esta manera, con los datos obtenidos con la temperatura promedio, se procede a realizar los cálculos pertinentes hasta encontrar:

$$6) \text{ Coeficiente convectivo} = h = \frac{Nu \cdot k}{Dh} = \frac{184,3978692 \cdot 0,03964 \text{ w/m} \cdot \text{k}}{0,102 \text{ m}} = 71,66207387 \text{ w/m}^2 \cdot \text{k}$$

$$7) \text{ Flujo másico} = (V \text{ entrada} \cdot \text{densidad} \cdot \text{área transversal})$$

$$\text{Flujo másico} = (26,9575526 \text{ m/s} \cdot 0,9079 \text{ kg/m}^3 \cdot 0,008171282 \text{ m}^2) = 0,199990194 \text{ kg/s}$$

A través de este resultado se resuelve la siguiente ecuación y obtenemos la temperatura que será aprovechada en el banco de tubos.

$$T \text{ salida} = 315^{\circ}\text{C} - (315^{\circ}\text{C} - 320^{\circ}\text{C}) \cdot \exp\left(\frac{-71,66207387 \frac{\text{w}}{\text{m}^2} \cdot \text{k} \cdot 2,506990938 \text{ m}^2}{0,199990194 \frac{\text{kg}}{\text{s}} \cdot 1070,4 \text{ J/kg} \cdot \text{k}}\right) = 319,3203778^{\circ}\text{C}$$

### 4.2 Material de diseño del banco de tubos

Se diseñó el banco de tubos en acero inoxidable 316 ya que tiene una buena conductividad ( $k=0.607 \text{ w/m} \cdot \text{k}$ ) lo que nos permite una buena transferencia de calor por conducción. Así mismo se determinó porque las aguas madres que se van a calentar contienen sulfato de cobre en bajas concentraciones y ácido sulfúrico en bajas concentraciones de un 5% al 15%, este material tiene una buena resistencia a estas concentraciones de ácido sulfúrico y se realizaron pruebas durante un mes sumergiendo un tubo de acero inoxidable en el reactor de cobre para determinar su deterioro y después del mes no se le encontró desperfecto al tubo sometido a prueba.

### 4.3 Diseño del banco de tubos

Para determinar el mejor análisis del diseño final del banco de tubos, se realizó varias pruebas experimentales que fueron tabuladas en una gráfica en el programa Excel para determinar el comportamiento de temperatura de salida de las aguas madres del banco de tubos en la figura 8 y 9.

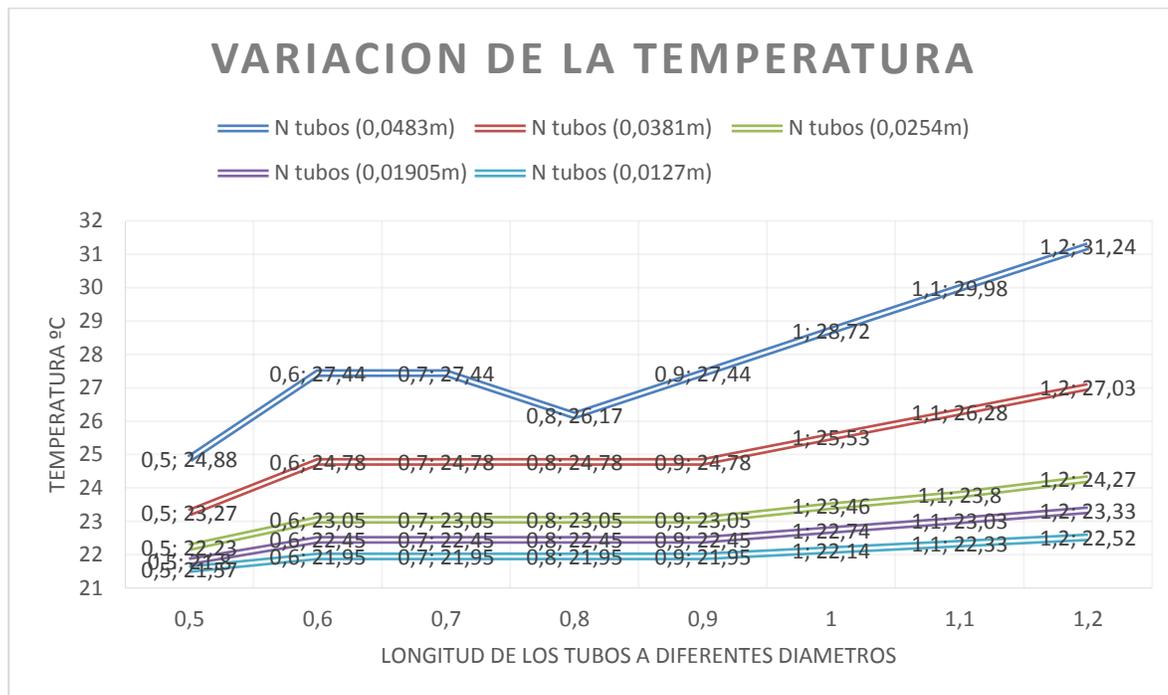


Figura 8: Gráfico de variación de temperatura según diámetro de tubería

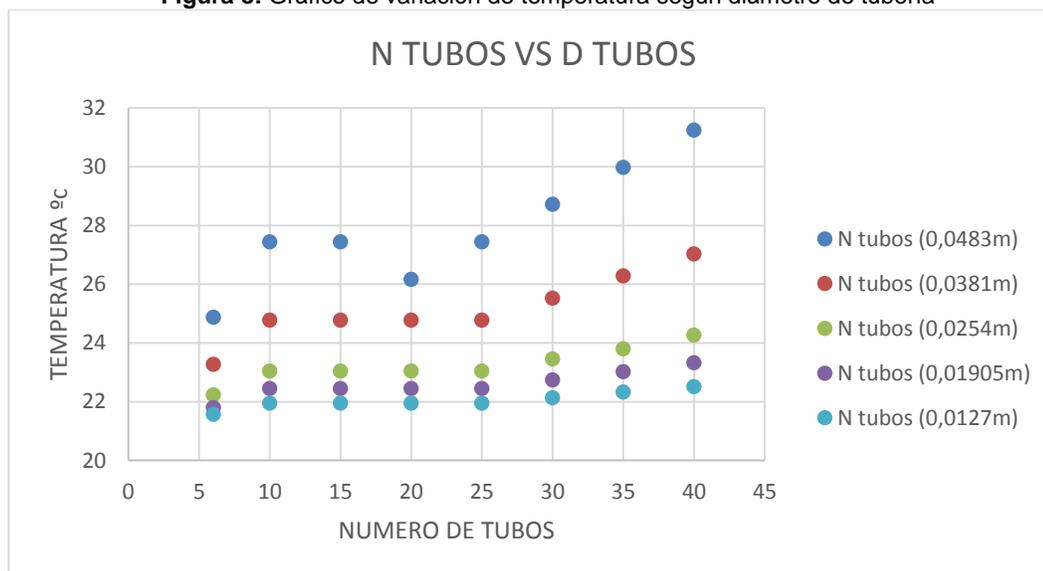


Figura 9: Gráfico de número de tubos vs temperatura de salida

#### 4.4 análisis de temperatura de salida del banco de tubos

En las gráficas 8 y 9 se realizaron varias pruebas para determinar que diámetro de tubería usar y la cantidad de tubos, el comportamiento que presentó la prueba experimental fue que entre el diámetro de los tubos aumentaba la temperatura de salida del banco de tubo aumentaba proporcionalmente debido a que el área de contacto aumentaba y se presentaba un aumento de transferencia de calor por conducción, condición que se puede observar en el gráfico 9. Así, al aumentar el número de tubos, la temperatura de salida del banco no variaba mucho con la de entrada, porque el sistema es más dependiente del diámetro y no de la cantidad de

 Institución Universitaria	<b>INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO</b>	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

tubos, por esta razón el banco de tubos se diseñó con el diámetro de 0.0483 m en tanto que tuvo el mejor comportamiento para la temperatura de salida con 25 tubos.

#### 4.5 Energía aprovechada

Tras los cálculos realizados se llegó a la conclusión de que los gases de escape del serpentín se pueden aprovechar en energía térmica y el resultado es de 87.55 kW la cual nos permite calentar el agua en 5 horas promedio lo que nos ahorra 3.5 horas de precalentamiento en la reacción y nos ahorramos 71.015 m<sup>3</sup> de consumo de gas del quemador de gas natural, lo que hace nuestro sistema eficiente porque estamos trabajando con energía térmica que se perdía al medio ambiente y será aprovechada en el mismo sistema. Para obtener este resultado ya mencionado, primero se buscó el número de Nusselt, coeficiente convectivo y la temperatura superficial de los tubos.

$$27) \text{ Nusselt} = \frac{\left(\frac{f}{8}\right) * (RE - 1000) * Pr}{1 + 12.7 * \left(\frac{f}{8}\right)^{0.5} * (Pr^{\frac{2}{3}} - 1)} = \frac{\left(\frac{0,02296896}{8}\right) * (32775,0369 - 1000) * 5,42}{1 + 12.7 * \left(\frac{0,02296896}{8}\right)^{0.5} * (5,42^{\frac{2}{3}} - 1)} = 204,390627$$

$$28) \text{ Coeficiente convectivo} = h = \frac{Nu * k}{Dh} = \frac{204,390627 * 0,615 \text{ w/m}^2 * k}{0,0301 \text{ m}} = 4176,08757 \text{ w/m}^2 * k$$

$$T(r) = 32^{\circ}\text{C} + \frac{\ln\left(\frac{0,0167 \text{ m}}{0,01505 \text{ m}}\right) + \frac{0,02514 \frac{\text{w}}{\text{m}} * k}{4176,08757 \frac{\text{w}}{\text{m}^2} * k * 0,01505 \text{ m}}}{\ln\left(\frac{0,0167 \text{ m}}{0,01505 \text{ m}}\right) + \frac{0,02514 \frac{\text{w}}{\text{m}} * k}{4176,08757 \frac{\text{w}}{\text{m}^2} * k * 0,01505 \text{ m}} + \frac{0,02514 \frac{\text{w}}{\text{m}} * k}{2,75486228 \frac{\text{w}}{\text{m}^2} * k * 0,0167 \text{ m}}} = 32,1599502^{\circ}\text{C}$$

Con estos datos se procedió a encontrar temperatura de salida del banco,  $\Delta T_{lm}$  y Tasa de transferencia de calor.

$$T \text{ salida} = 32,16^{\circ}\text{C} - (32,16^{\circ}\text{C} - 32^{\circ}\text{C}) * \exp\left(\frac{-4176,08757 \frac{\text{w}}{\text{m}^2} * k * 0,1891238 \text{ m}^2}{615,831353 \frac{\text{kg}}{\text{s}} * 4178 \text{ J/kg} * k}\right) = 32,0272477^{\circ}\text{C}$$

$$34) \Delta T_{lm} = \frac{T \text{ entrada} - T \text{ salida}}{\ln\left(\frac{T \text{ superficial} - T \text{ salida}}{T \text{ superficial} - T \text{ entrada}}\right)} = \frac{32^{\circ}\text{C} - 32,028^{\circ}\text{C}}{\ln\left(\frac{32,16^{\circ}\text{C} - 32,028^{\circ}\text{C}}{32,16^{\circ}\text{C} - 32^{\circ}\text{C}}\right)} = 0,14590261^{\circ}\text{C}$$

$$35) \text{ Tasa de transferencia de calor} = \dot{Q} = h * \text{área superficial} * \Delta T_{lm}$$

$$\dot{Q} = 4176,08757 \text{ w/m}^2 * k * 0,18912388 \text{ m}^2 * 0,14590261^{\circ}\text{C} = 70106,6632 \text{ w}$$

Ya con la tasa de transferencia de calor obtenida y el tiempo que dura la reacción obtuvimos la temperatura final al calendar 5m<sup>3</sup> de agua

$$37) PT = \text{masa} * C_p * (T \text{ final} - T \text{ inicial}) / \text{tiempo} = T \text{ final} = (PT * \text{tiempo} / \text{masa} * C_p) + T \text{ inicial}$$

$$38) T \text{ final} = \left(\frac{70106,6632 \frac{\text{J}}{\text{s}} * 21600 \text{ s}}{4980 \text{ kg} * 4178 \frac{\text{J}}{\text{kg}} * k}\right) + 293,15 \text{ K} = 402,320809 \text{ K} - 273,15 \text{ K} = 92,7^{\circ}\text{C}$$

#### 4.6 Ahorro de la empresa

Como se ha demostrado, el ahorro de la empresa al disminuir las 3.5 h de precalentamiento sería el siguiente:

Consumo del quemador = 20.29 m<sup>3</sup>/h

Precio del m<sup>3</sup> de gas = 1324\$

Costo del gas por las 3.5 horas de ahorro = 20.29 m<sup>3</sup>/h \* 1324\$ \* 3.5 h = \$ 94.023,86 por reacción montada

Al mes se realizan 20 reacciones lo que al mes el ahorro es de = \$94.023,86 \* 20 = \$ 1.880.477,20

Lo que al año se vería reflejado en = \$ 1.880.477,20 \* 12 = \$ 22.565.726,40

 Institución Universitaria	<b>INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO</b>	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

## 5. CONCLUSIONES, RECOMENDACIONES Y TRABAJO FUTURO

---

- De este trabajo se concluye que el aprovechamiento de la energía térmica por medio del banco de tubos es alta ya que la transferencia de calor por conducción y por convección permite transferir calor de manera más fácil a las aguas madres que son aprovechadas en esta aplicación.
- Para el diseño del banco de tubos se llega a la conclusión de que entre mayor el diámetro y número de tubos y teniendo en cuenta la longitud de ellos mismos, se obtiene una mejor temperatura de salida del banco de tubos debido a que se aumenta el área superficial y permite una mejor transferencia de calor teniendo en cuenta el aislamiento del banco con el medio, evitando pérdidas excesivas con el medio.
- Una de las grandes limitaciones para diseñar el banco de tubos fue que el agua al calentar tenía concentración de ácidos que limitó el uso de acero inoxidable, circunstancia que causó un aumento en el costo de fabricación del banco de tubos, por la distancia de la chimenea del serpentín y el banco de tubos, la cual se aisló térmicamente para evitar pérdidas con el medio ambiente.
- La fortaleza es que el acero inoxidable tiene una buena conductividad térmica lo que permitió una buena transferencia de calor a las aguas madres, así como la ubicación del banco de tubos; su cercanía con el tanque de almacenamiento evita pérdidas excesivas de tubería hasta el tanque.
- Con este diseño de banco de tubos se logró calentar el agua madre en un promedio de 5 horas llevándola hasta 90°C, lo que permitió tener un ahorro de 3.5 horas en el precalentamiento de la reacción, prueba cuantitativa que demuestra la eficiencia del sistema propuesto.
- Al emplazar la operación del banco de tubos en contraflujo, los dos elementos; el fluido frío y el caliente, mejoran la transferencia de calor, ya que el diseño de banco de tubos incluye baffles para que el flujo del fluido frío realice un mejor recorrido por todos los tubos, de este modo, tener un mejor aprovechamiento de la energía térmica disponible.
- Para investigaciones futuras se recomienda hacer el sistema automatizado para controlar las variables de temperatura de las aguas madres y evitar evaporación por sobre calentamiento. De igual modo, tener en cuenta un sistema para la limpieza del banco de tubos –que no dependa de operarios- para evitar el deterioro del equipo.

 Institución Universitaria	<b>INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO</b>	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

- Instalar un sistema para la limpieza del banco de tubos, para evitar cualquier anomalía con el fluido frío, como por ejemplo contaminación, por tal razón, se sugiere un mantenimiento de una vez al mes.

## REFERENCIAS

---

Amell A. Andrés; BARRAZA Lorenzo; GÓMEZ M Elías (1996). Tecnología de la Combustión de los Gases y Quemadores Atmosféricos de Remezcla. Medellín.

Andrés, Lorenzo, B., & Elias., G. M. (1996). *tecnología de la combustion de gases y quemadores atmosfericos de premezcla*. Medellín.

Gil, Edison; Gómez, Elías; y Arrieta Andrés Amell. Combustión del gas natural y quemadores industriales. Modulo 2 Medellín, Universidad de Antioquia.

Heywood, J. B. (1988). *Internal Combustion Engine Fundamentals*, M.C. Grew-Hill, New York.

Minkowycs W.J, Sparrow E.M. and Murphy J.Y (2006). *Handbook of numerical heat transfer*, John Willey & Sons Inc.

Perdomo Lorenzo, A. M. (2005). Síntesis y purificación de sulfato de cobre. calidad farmacéutica. *Revista Cubana de Química*, vol. XVII, núm. 2., 122-128.

Yunus a.Cengel, a. J. (2009). *transferencia de calor y masa fundamentos y aplicaciones*. México: McGraw-Hill.

### Cibergrafía

Calorcol expertos en ingeniería de aislamientos, mantas aislantes, cañuelas LMR, consultada en diciembre 18 de 2016 <http://bit.ly/2yLbUrE>

Diseño e instalación de aislamiento térmico de tuberías y equipos, Universidad Simón Bolívar, Ciro Limone Torres, Sartenejas, marzo de 2012. <http://bit.ly/2hWck49>

*Modelación de flujo laminar y transferencia de calor en haz de tubos*, Carlos Francisco Espinosa Barrios, Universidad de Chile, Santiago de Chile, junio 2012. <http://bit.ly/2yJXTL3>

NGA – PRO, electro bomba en Aero inoxidable con rodete abierto, <http://bit.ly/2m6abrg>

*Resistencia a la corrosión de los aceros inoxidables* consultada en febrero 23 de 2017. <http://bit.ly/1S8PNN4>

*Revista cubana de química (Vol. XVII, No 2, 2005)* consultada en Abril 15 de 2017. <http://bit.ly/2zHue5l>

 Institución Universitaria	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

# APÉNDICE

---

**A.** cálculos de convección interna forzada y banco de tubos

**B.** planos del banco de tubos

**C.** Plano de ubicación en planta

**D.** catálogo de bomba NGA - PRO

**E.** catálogo de cañuela LMR

**F.** catálogo de manta aislante de roca mineral

## A. cálculos de convección interna forzada y banco de tubos

---

	<b>INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO</b>	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

Todos los cálculos realizados a continuación fueron tomados del libro *Transferencia de calor y masa fundamentos y aplicaciones* (Yunus a. Cengel, Afshin j. Ghajar: 2009).

#### Convección interna forzada

Es la transferencia de calor por convección que resulta de forzar por medio de un ventilador, compresor o bomba un fluido a lo largo de un tramo de tubo o ducto.

#### Datos conocidos tubería en acero inoxidable 314

caudal de la turbina a 65 Hz	793	m <sup>3</sup> /h
diámetro salida turbina	0,635	M
diámetro tubería salida del quemador	0,102	M
diámetro externo salida quemador	0,114	M
temperatura salida quemador	325	°c
longitud tubería	7	M
acero inoxidable (aspereza)	0,000002	M
temperatura infinito	25	°c
área superficial	2,506990938	m <sup>2</sup>
área transversal	0,008171282	m <sup>2</sup>
conductividad térmica acero inoxidable	22,6	w/m*k
temperatura de salida supuesta	315	°c
Radio interior	0,051	M
Radio exterior	0,057	M

#### Cálculos

$$1) \text{ Temperatura promedio} = \frac{(T_{\text{quemador}} + T_{\text{salida}})}{2} = \frac{(325^{\circ}\text{c} + 315^{\circ}\text{c})}{2} = 320^{\circ}\text{c}$$

Con esta temperatura promedio se saca el número de Prandtl, viscosidad cinemática, conductividad térmica, calor específico y densidad por tablas del libro Cengel, Yunus y Boles, Michael. Termodinámica. 6ª ed. México: McGraw-Hill, 2009. 1008p.

$$\text{Prandtl} = 0.7452$$

$$\text{Viscosidad cinemática} = 0.000027578 \text{ kg/m}^2\cdot\text{s}$$

$$\text{Conductividad térmica} = 0,03964 \text{ w/m}^2\cdot\text{k}$$

$$\text{Calor específico} = 1070.4 \text{ J/kg}^{\circ}\text{k}$$

$$\text{Densidad} = 0,9079 \text{ kg/m}^3$$

Con estos datos procedemos a realizar los siguientes cálculos

$$2) \text{ velocidad de entrada} = V = \frac{Q_{\text{caudal}}}{S_{\text{secciontransversal}}} = \frac{\left(\frac{793 \text{ m}^3}{\text{h}}\right)}{3600 \text{ s}} = 26,9575526 \text{ m/s}$$

 Institución Universitaria	<b>INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO</b>	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

$$3) \text{ Reynolds} = \frac{V \text{ entrada} * Dh \text{ diametro hidraulico}}{V \text{ viscosidad cinematica}} = \frac{(26,9575526 \frac{m}{s} * 0,102 \text{ m})}{0,000027578 \text{ m}^2/\text{s}} = 99705, 2131$$

$$4) \text{ Factor de fricción de la tubería} = \frac{1}{\sqrt{f}} = -1,8 * \log * \left( \frac{6,9}{re} + \left( \frac{E}{3,7} \right)^{1,11} \right)$$

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = -1,8 * \log * \left( \frac{6,9}{99705,2131} + \left( \frac{0,000002}{0,102 \text{ m}} \right)^{1,11} \right) = 7,47218677$$

$$F = \left( \frac{1}{\sqrt{f}} \right)^2 = (1/7,47218677)^2 = 0,01791037$$

Nusselt para flujo turbulento en tubos circulares

$$5) \text{ Nusselt} = \frac{\left( \frac{f}{8} \right) * (RE - 1000) * Pr}{1 + 12,7 * \left( \frac{f}{8} \right)^{0,5} * (Pr^{\frac{2}{3}} - 1)} = \frac{\left( \frac{0,01791037}{8} \right) * (99705,2131 - 1000) * 0,7452}{1 + 12,7 * \left( \frac{0,01791037}{8} \right)^{0,5} * (0,7452^{\frac{2}{3}} - 1)} = 184, 3978692$$

$$6) \text{ Coeficiente convectivo} = h = \frac{Nu * k}{Dh} = \frac{184,3978692 * 0,03964 \text{ w/m}^2 * \text{k}}{0,102 \text{ m}} = 71,66207387 \text{ w/m}^2 * \text{k}$$

7) Flujo másico = (V entrada \* densidad \* área transversal)

$$\text{Flujo másico} = (26,9575526 \text{ m/s} * 0,9079 \text{ kg/m}^3 * 0,008171282 \text{ m}^2) = 0,199990194 \text{ kg/s}$$

### Convección externa Itagüí

temperatura Itagüí	20	C
velocidad del viento en Itagüí	1,6	m/s
densidad	1,207	kg/m <sup>3</sup>
calor especifico	1007	J/kg*k
conductividad térmica	0,02514	w/m*k
viscosidad cinemática	1,52E-05	m <sup>2</sup> /s
Prandtl	0,739	

Con estos datos se realizaron los siguientes cálculos

$$8) \text{ Reynolds} = \frac{V \text{ entrada} * Dh \text{ diametro externo}}{V \text{ viscosidad cinematica}} = \frac{1,6 \frac{m}{s} * 0,114 \text{ m}}{1,52E-05 \text{ m}^2/\text{s}} = 12031, 66227$$

9) Nusselt = 3.66 porque es flujo laminar a temperatura superficial constante

$$10) \text{ Coeficiente convectivo externo} = h = \frac{Nu * k}{De} = \frac{3,66 * 0,02514 \text{ w/m}^2 * \text{k}}{0,114 \text{ m}} = 0,807126316 \text{ w/m}^2 * \text{k}$$

Para obtener la temperatura superficial de la tubería se usó la siguiente ecuación

$$11) T(r) = T_{\infty} \text{ int} + \frac{\ln\left(\frac{r}{r_1}\right) + \frac{k}{h_{int} * r_1}}{\ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right) + \frac{k}{h_{int} * r_1} + \frac{k}{h_{ext} * r_2}}$$

$$T(r) = 320^{\circ}\text{C} + \frac{\ln\left(\frac{0,057 \text{ m}}{0,051 \text{ m}}\right) + \frac{0,02514 \frac{\text{w}}{\text{m}} * \text{k}}{71,66207387 \frac{\text{w}}{\text{m}^2} * \text{k} * 0,051 \text{ m}}}{\ln\left(\frac{0,057 \text{ m}}{0,051 \text{ m}}\right) + \frac{0,02514 \frac{\text{w}}{\text{m}} * \text{k}}{71,66207387 \frac{\text{w}}{\text{m}^2} * \text{k} * 0,051 \text{ m}} + \frac{0,02514 \frac{\text{w}}{\text{m}} * \text{k}}{0,807126316 \frac{\text{w}}{\text{m}^2} * \text{k} * 0,057 \text{ m}}} = 315^{\circ}\text{C}$$

 Institución Universitaria	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

Con esta temperatura superficial se puede encontrar la temperatura de salida de los gases después de recorrer 7 m de longitud por medio de la siguiente ecuación:

$$12) T \text{ salida} = T \text{ superficial} - (T \text{ superficial} - T \text{ entrada}) \exp\left(\frac{-h \cdot A \text{ superficial}}{\dot{m} \cdot c_p}\right)$$

$$T \text{ salida} = 315^\circ\text{C} - (315^\circ\text{C} - 320^\circ\text{C}) \cdot \exp\left(\frac{-71,66207387 \frac{\text{W}}{\text{m}^2} \cdot \text{k} \cdot 2,506990938 \text{m}^2}{0,199990194 \frac{\text{kg}}{\text{s}} \cdot 1070,4 \text{J/kg} \cdot \text{k}}\right) = 319,3203778^\circ\text{C}$$

Con esta temperatura de salida se procede a calcular el banco de tubos escalonado en acero inoxidable 316 con los siguientes datos conocidos:

SL	0,06	M
ST	0,06	M
SD	0,07	M
Diámetro tubería	0,0483	M
Temperatura de la tubería	300	°C
Velocidad entrada	3,67429742	m/s
NI	5	
Numero de tubos	25	
Temperatura a la entrada	21	°C
longitud tubos	0,7	M
Nt	5	
caudal bomba	21	m <sup>3</sup> /h
Diámetro tubería bomba	0,04496	M
área transversal tubería bomba	0,00158761	m <sup>2</sup>

Con estos datos del banco de tubos se calcula la temperatura promedio

$$13) T \text{ salida supuesta} = 30^\circ\text{C}$$

$$14) T \text{ promedio} = \frac{(T \text{ entrada} + T \text{ salida supuesta})}{2} = \frac{(30^\circ\text{C} + 21^\circ\text{C})}{2} = 25,5^\circ\text{C}$$

Con esta temperatura promedio se obtienen los siguientes datos por tablas del libro Cengel, Yunus Y Boles, Michael. Termodinámica. 6ª ed. México: McGraw-Hill, 2009. 1008p.

$$\text{Prandtl} = 6,14$$

$$\text{Viscosidad dinámica} = 0,000891 \text{ kg/m} \cdot \text{s}$$

$$\text{Conductividad térmica} = 0,607 \text{ W/m} \cdot \text{k}$$

$$\text{Calor específico} = 4180 \text{ J/kg} \cdot \text{k}$$

$$\text{Densidad} = 997,65 \text{ kg/m}^3$$

Con estos datos se continua con los siguientes cálculos para hallar la temperatura de salida del banco de tubos escalonado y su tasa de transferencia de calor

 Institución Universitaria	<b>INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO</b>	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

$$15) V_{Max} = \frac{ST}{2*(SD-D)} * V = \frac{0,06 \text{ m}}{2*(0,07 \text{ m} - 0,0483 \text{ m})} * 3,67429742 \text{ m/s} = 5,86884739 \text{ m/s}$$

$$16) Re_D = \frac{V_{Max} * D * \rho}{\text{viscosidad dinámica}} = \frac{5,86884739 \frac{\text{m}}{\text{s}} * 0,0483 \text{ m} * 997,65 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}}{0,000891 \frac{\text{kg}}{\text{m} * \text{s}}} = 317395,27$$

Con este Reynolds obtenido se excluye de la tabla, la ecuación para el Nusselt para este caso

$$17) Nusselt = 0.031 * (ST/SL)^{0.2} * Re_{D^{0.8}} * Pr^{0.36} * (Pr/Pr_s)^{0.25}$$

Primero para obtener este Nusselt se saca de tablas prandtl a temperatura superficial del libro CENGEL, Yunus y BOLES, Michael. Termodinámica. 6ª ed. México: McGraw-Hill, 2009. 1008p

$$Pr_s = 0,902$$

$$17) Nusselt = 0.031 * (0,06 \text{ m} / 0,06 \text{ m})^{0.2} * 317395,27^{0.8} * 6,14^{0.36} * (6,14/0,902)^{0.25} = 2424,50523$$

Con el número de tubos utilizado en el banco de tubos, se sacan las tablas del libro Cengel, Yunus y Boles, Michael. Termodinámica. 6ª ed. México: McGraw-Hill, 2009. 1008, el Factor de corrección = 0.93

$$\text{Con este factor corregimos el Nusselt} = 2254,78987$$

Con el Nusselt corregido aplicamos la siguiente ecuación para encontrar los datos restantes

$$18) \text{Coeficiente convectivo} = h = \frac{Nu * k}{D} = \frac{2254,78987 * 0,607 \text{ w/m}^2 * \text{k}}{0,0483 \text{ m}} = 28336,5932 \text{ w/m}^2 * \text{k}$$

$$19) \text{Área superficial} = \pi * \text{número de tubos} * \text{diámetro tubería} * \text{longitud tubos}$$

$$\text{Área superficial} = \pi * 35 * 0,0483 \text{ m} * 0,7 \text{ m} = 3,71760367 \text{ m}^2$$

$$20) \text{Flujo másico} = \dot{m} = \rho V (NT * ST * L)$$

$$\dot{m} = 997,65 \text{ kg/m}^3 * 3,67429742 \text{ m/s} * (4 * 0,06 \text{ m} * 0,7 \text{ m}) = 615,831353 \text{ kg/s}$$

$$21) T_{salida} = T_{superficial} - (T_{superficial} - T_{entrada}) \text{ expo } \left( \frac{-h * A_{superficial}}{\dot{m} * c_p} \right)$$

$$T_{salida} = 300^\circ\text{C} - (300^\circ\text{C} - 21^\circ\text{C}) * \text{expo} \left( \frac{-28336,5932 \frac{\text{W}}{\text{m}^2} * \text{k} * 3,71760367 \text{ m}^2}{615,831353 \frac{\text{kg}}{\text{s}} * 4180 \text{ J/kg} * \text{k}} \right) = 32,1871827^\circ\text{C}$$

$$22) \text{Tasa de transferencia de calor} = \dot{Q} = \dot{m} * c_p * (T_{salida} - T_{entrada})$$

$$\dot{Q} = 615,831353 \text{ kg/s} * 4180 \text{ J/kg} * \text{k} * (32,187^\circ\text{C} - 21^\circ\text{C}) = 28797766,7 \text{ W}$$

Con esta temperatura de salida se calcula la temperatura de entrada al tanque de almacenamiento a partir de los datos conocidos:

temperatura Itagüí	25	°C
longitud	2	M
temperatura entrada	32	°C
diámetro	0,0301	M
Flujo másico	615,831353	kg/s
acero inoxidable (aspereza)	0,000002	M
área superficial	0,18912388	m <sup>2</sup>
diámetro externo tubería	0,0334	M
R1	0,01505	M
R2	0,0167	M

 Institución Universitaria	<b>INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO</b>	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

Primero se asume una temperatura de salida supuesta = 26°C

$$23) T \text{ promedio} = \frac{(T \text{ entrada} + T \text{ salida supuesta})}{2} = \frac{(32^\circ\text{C} + 26^\circ\text{C})}{2} = 29^\circ\text{C}$$

Con esta temperatura se deduce de la tabla los siguientes datos del libro Cengel, Yunus y Boles, Michael. Termodinámica. 6ª ed. México: McGraw-Hill, 2009. 1008p

Prandtl = 5,42

Viscosidad dinámica = 7,98E-04 kg/m\*s

Conductividad térmica = 0,615 w/m\*k

Calor específico = 4178 J/kg\*k

Densidad = 996 kg/m<sup>3</sup>

Con estos datos procedemos a resolver las siguientes ecuaciones

$$23) \text{ Área de la tubería} = \pi \cdot (R1^2) = \pi \cdot (0,01505^2) = 0,00071158 \text{ m}^2$$

$$24) \text{ Velocidad de entrada} = \dot{m} / (\rho \cdot \text{área de la tubería})$$

$$\text{Velocidad de entrada} = 615,831353 \text{ kg/s} / (996 \text{ kg/m}^3 \cdot 0,00071158 \text{ m}^2) = 868,919583 \text{ m/s}$$

$$25) Re = \frac{V \text{ Max} \cdot D \cdot \rho}{\text{viscosidad dinamica}} = \frac{868,919583 \frac{\text{m}}{\text{s}} \cdot 0,0301 \text{ m} \cdot 996 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}}{7,98 \text{E}-04 \frac{\text{kg} \cdot \text{s}}{\text{m}}} = 32775,0369$$

$$26) \text{ Factor de fricción de la tubería} = \frac{1}{\sqrt{f}} = -1,8 \cdot \log * \left( \frac{6,9}{re} + \left( \frac{E}{3,7} \right)^{1,11} \right)$$

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = -1,8 \cdot \log * \left( \frac{6,9}{32775,0369} + \left( \frac{0,000002}{0,0301 \text{ m}} \right)^{1,11} \right) = 6,59825817$$

$$F = \left( \frac{1}{\sqrt{f}} \right)^2 = (1/6,59825817)^2 = 0,02296896$$

$$27) \text{ Nusselt} = \frac{\left( \frac{f}{8} \right) \cdot (Re - 1000) \cdot Pr}{1 + 12,7 \cdot \left( \frac{f}{8} \right)^{0,5} \cdot (Pr^{\frac{2}{3}} - 1)} = \frac{\left( \frac{0,02296896}{8} \right) \cdot (32775,0369 - 1000) \cdot 5,42}{1 + 12,7 \cdot \left( \frac{0,02296896}{8} \right)^{0,5} \cdot (5,42^{\frac{2}{3}} - 1)} = 204,390627$$

$$28) \text{ Coeficiente convectivo} = h = \frac{Nu \cdot k}{Dh} = \frac{204,390627 \cdot 0,615 \text{ w/m} \cdot \text{k}}{0,0301 \text{ m}} = 4176,08757 \text{ w/m}^2 \cdot \text{k}$$

Ahora, se encontrará la temperatura superficial de la tubería para descubrir la temperatura de salida

Datos conocidos por tablas del libro CENGEL, Yunus y BOLES, Michael. Termodinámica. 6ª ed. México: McGraw-Hill, 2009. 1008p

temperatura Itagüí	25	C
velocidad del viento en Itagüí	1,6	m/s
densidad	1,207	kg/m <sup>3</sup>
calor específico	1007	J/kg*k
conductividad térmica	0,02514	w/m*k
viscosidad cinemática	1,52E-05	m <sup>2</sup> /s
Prandtl	0,739	

 Institución Universitaria	<b>INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO</b>	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

Con estos datos se procede a resolver las siguientes ecuaciones

$$29) \text{ Reynolds} = \frac{V \text{ entrada} * Dh \text{ diametro externo}}{V \text{ viscosidad cinematica}} = \frac{1,6 \frac{\text{m}}{\text{s}} * 0,0301 \text{ m}}{1,52 \text{E}-05 \text{ m}^2/\text{s}} = 3525, 06596$$

30) Nusselt = 3.66 porque es flujo laminar a temperatura superficial constante

$$31) \text{ Coeficiente convectivo externo} = h = \frac{Nu * k}{De} = \frac{3.66 * 0,02514 \text{ w/m}^2\text{k}}{0,0301 \text{ m}} = 2,75486228 \text{ w/m}^2\text{k}$$

Para obtener la temperatura superficial de la tubería utilizamos la siguiente ecuación

$$32) T(r) = T_{\infty} \text{ int} + \frac{\ln\left(\frac{r}{r_1}\right) + \frac{k}{h_{int} * r_1}}{\ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right) + \frac{k}{h_{int} * r_1} + \frac{k}{h_{ext} * r_2}}$$

$$T(r) = 32^{\circ}\text{C} + \frac{\ln\left(\frac{0,0167 \text{ m}}{0,01505 \text{ m}}\right) + \frac{0,02514 \frac{\text{W}}{\text{m}}\text{k}}{4176,08757 \frac{\text{W}}{\text{m}^2}\text{k} * 0,01505 \text{ m}}}{\ln\left(\frac{0,0167 \text{ m}}{0,01505 \text{ m}}\right) + \frac{0,02514 \frac{\text{W}}{\text{m}}\text{k}}{4176,08757 \frac{\text{W}}{\text{m}^2}\text{k} * 0,01505 \text{ m}} + \frac{0,02514 \frac{\text{W}}{\text{m}}\text{k}}{2,75486228 \frac{\text{W}}{\text{m}^2}\text{k} * 0,0167 \text{ m}}} = 32, 1599502^{\circ}\text{C}$$

Con esta temperatura superficial es posible encontrar la temperatura de salida de los gases después de recorrer 2 m de longitud por medio de la siguiente ecuación:

$$33) T \text{ salida} = T \text{ superficial} - (T \text{ superficial} - T \text{ entrada}) \text{ expo} \left( \frac{-h * A \text{ superficial}}{\dot{m} * C_p} \right)$$

$$T \text{ salida} = 32,16^{\circ}\text{C} - (32,16^{\circ}\text{C} - 32^{\circ}\text{C}) * \text{expo} \left( \frac{-4176,08757 \frac{\text{W}}{\text{m}^2}\text{k} * 0,1891238 \text{ m}^2}{615,831353 \frac{\text{kg}}{\text{s}} * 4178 \text{ J/kg}\text{k}} \right) = 32,0272477^{\circ}\text{C}$$

$$34) \Delta T_{lm} = \frac{T \text{ entrada} - T \text{ salida}}{\ln\left(\frac{T \text{ superficial} - T \text{ salida}}{T \text{ superficial} - T \text{ entrada}}\right)} = \frac{32^{\circ}\text{C} - 32,028^{\circ}\text{C}}{\ln\left(\frac{32,16^{\circ}\text{C} - 32,028^{\circ}\text{C}}{32,16^{\circ}\text{C} - 32^{\circ}\text{C}}\right)} = 0, 14590261^{\circ}\text{C}$$

35) Tasa de transferencia de calor =  $\dot{Q} = h * \text{área superficial} * \Delta T_{lm}$

$$\dot{Q} = 4176,08757 \text{ w/m}^2\text{k} * 0,1891238 \text{ m}^2 * 0,14590261^{\circ}\text{C} = 70106,6632 \text{ w}$$

Con esta tasa de transferencia de calor entregada al tanque de almacenamiento encontraremos la temperatura alcanzada en el tiempo de reacción. Datos conocidos del agua en el tanque:

Transferencia de calor	70,1066632	Kw
Temperatura inicial	293,15	K
densidad	996	kg/m <sup>3</sup>
Calor específico	4178	J/kg*k
Tiempo	21600	S
volumen de agua	5	m <sup>3</sup>

Primero se necesita hallar la masa del agua

$$36) \rho = \text{masa} * \text{volumen} = \text{masa} = \rho / \text{volumen}$$

$$\text{Masa} = 996 \text{ kg/m}^3 * 5 \text{ m}^3 = 4980 \text{ kg}$$

$$37) PT = \text{masa} * C_p * (T \text{ final} - T \text{ inicial}) / \text{tiempo} = T \text{ final} = (PT * \text{tiempo} / \text{masa} * C_p) + T \text{ inicial}$$

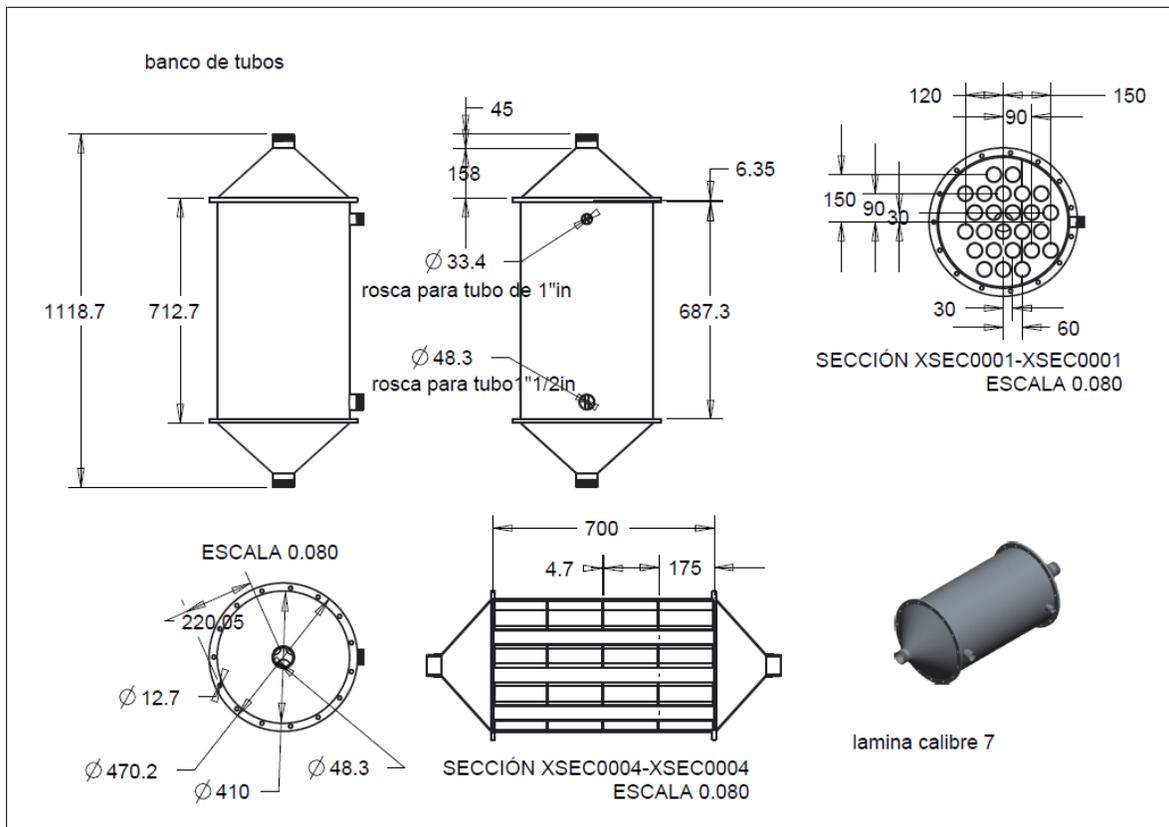
$$38) T \text{ final} = \left( \frac{70106,6632 \frac{\text{J}}{\text{s}} * 21600 \text{ s}}{4980 \text{ kg} * 4178 \frac{\text{J}}{\text{kg}}\text{k}} \right) + 293,15 \text{ k} = 402,320809 \text{ k} - 273,15 \text{ k} = 92,7^{\circ}\text{C}$$

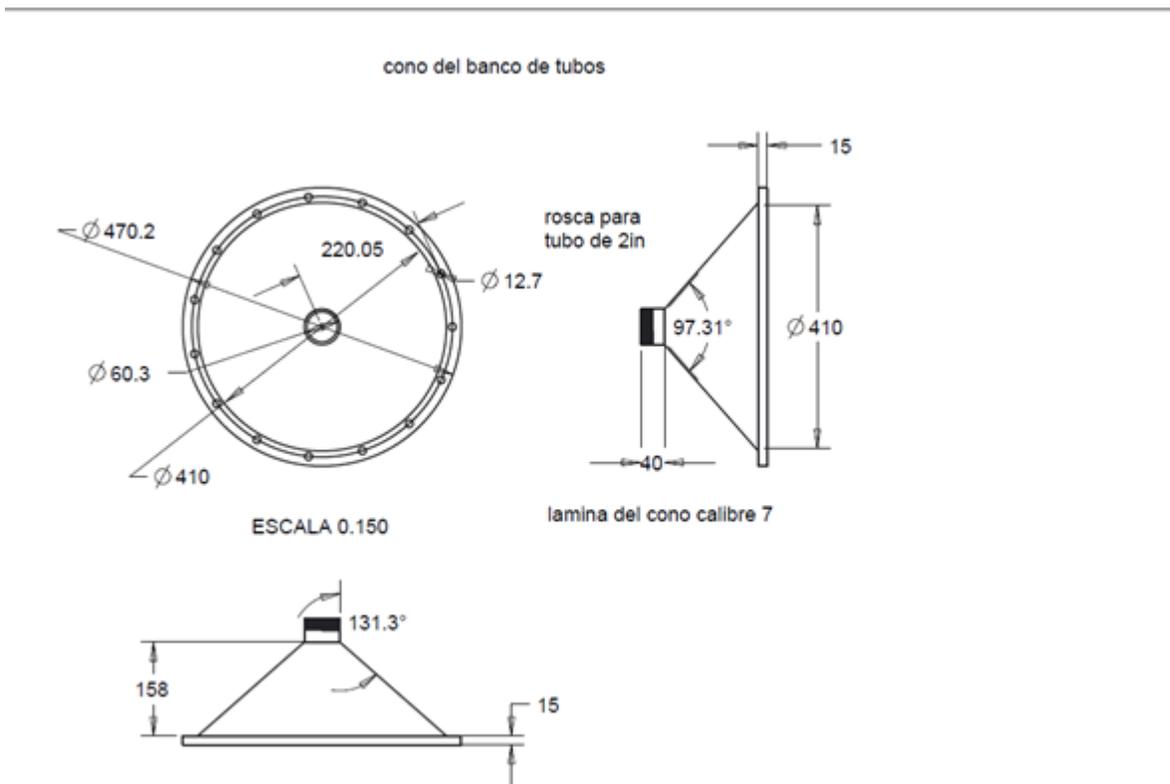
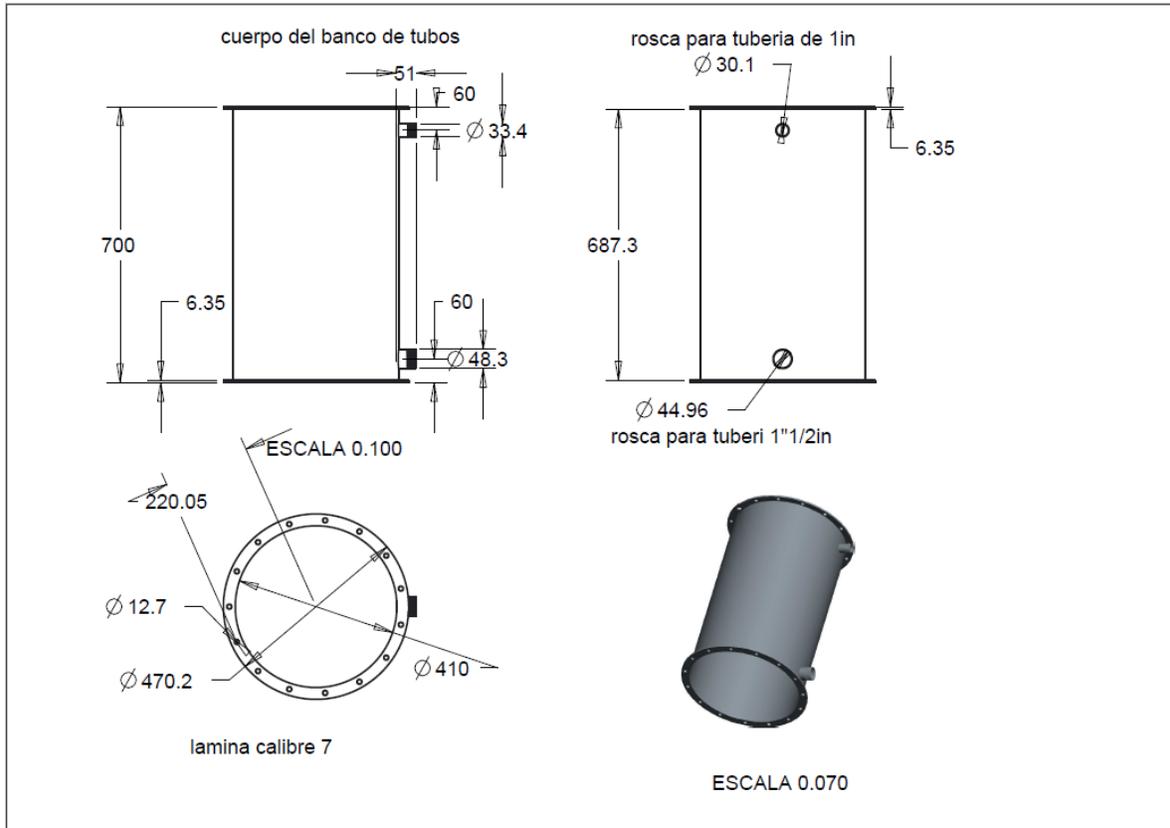
 Institución Universitaria	<b>INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO</b>	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

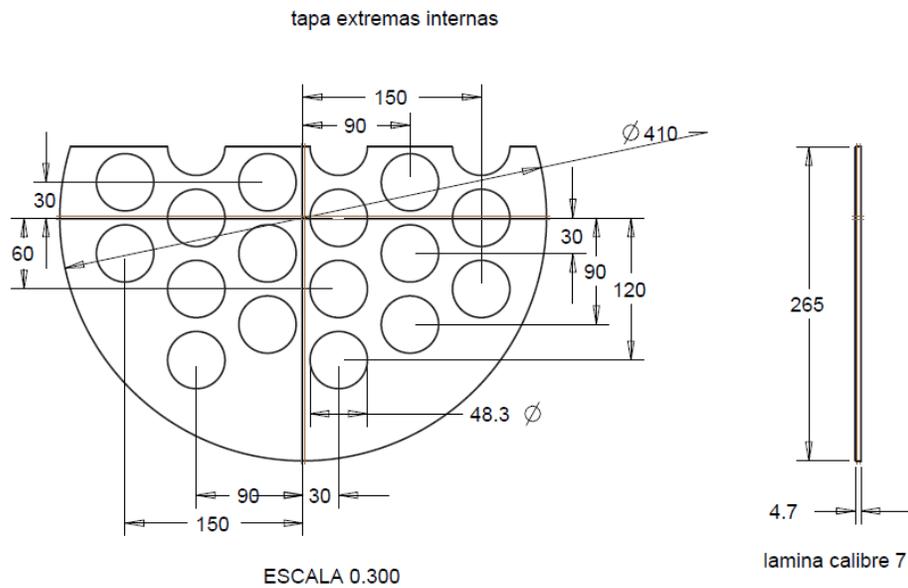
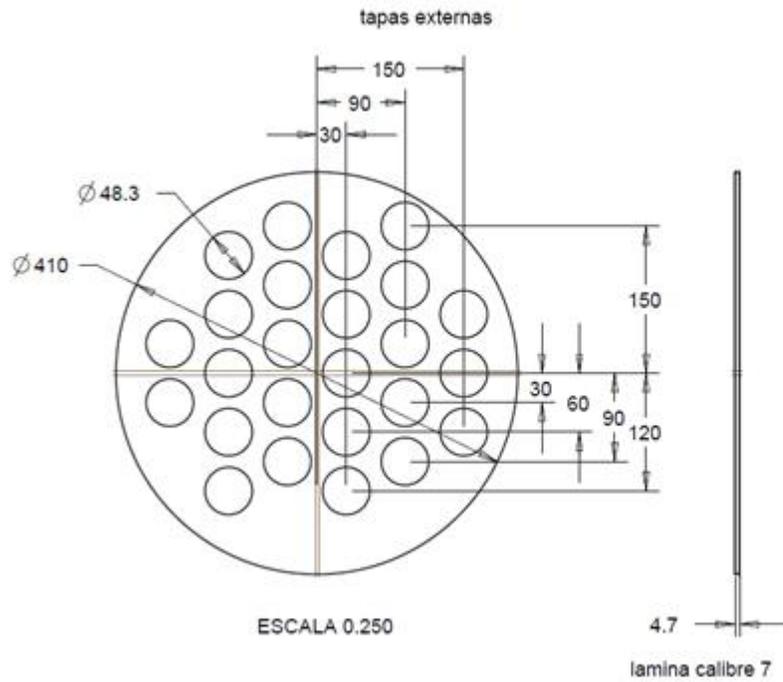
Con esta temperatura final obtenida de las aguas madre, la reacción ahorra 3.5 horas de consumo de gas en precalentamiento del agua para la adición del gas, con este ahorro de gas obtenemos los siguientes resultados:

- Consumo del quemador = 20.29 m<sup>3</sup>/h
- Precio del m<sup>3</sup> de gas en cuenta epm en mes de febrero 2017 = 1324\$
- 39) Costo del gas por las 3.5 horas de ahorro = 20.29 m<sup>3</sup>/h \* 1324\$ \* 3.5 h = \$ 94.023,86 por reacción montada
- 40) Al mes se realizan 20 reacciones lo que al mes el ahorro es de = \$94.023,86 \* 20 = \$ 1.880.477,20
- Al año se verían reflejados en un ahorro de = \$ 1.880.477,20 \* 12 = \$ 22.565.726,40

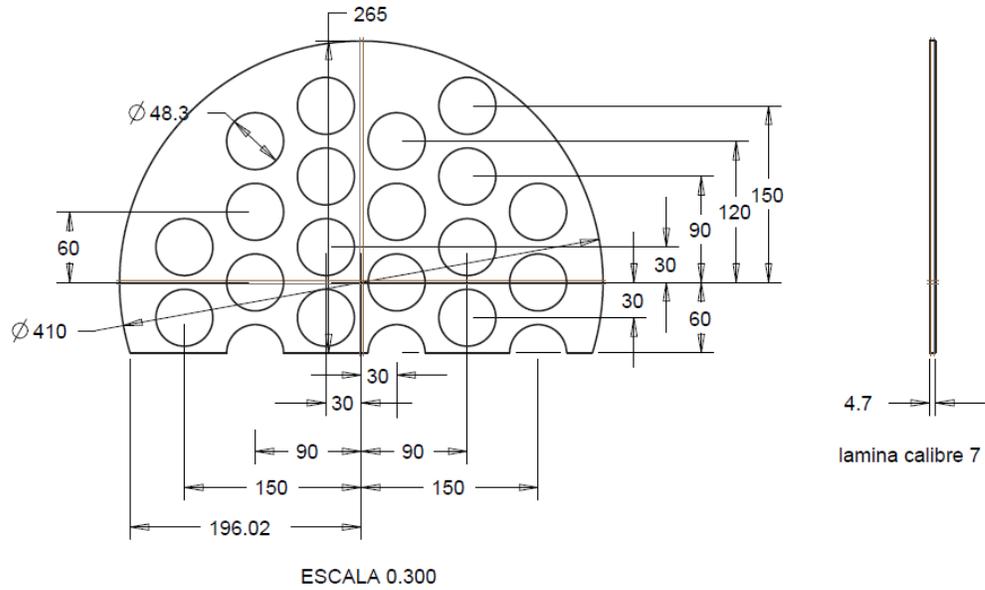
## B. Planos



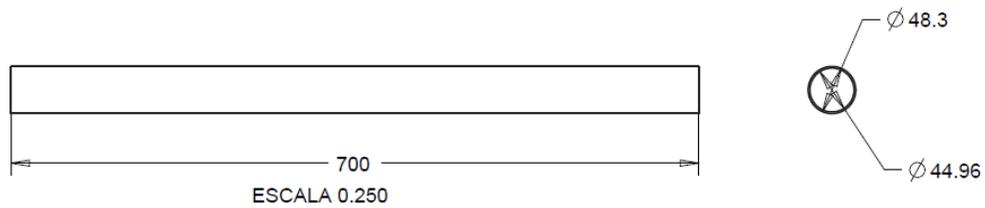




tapa del centro del banco

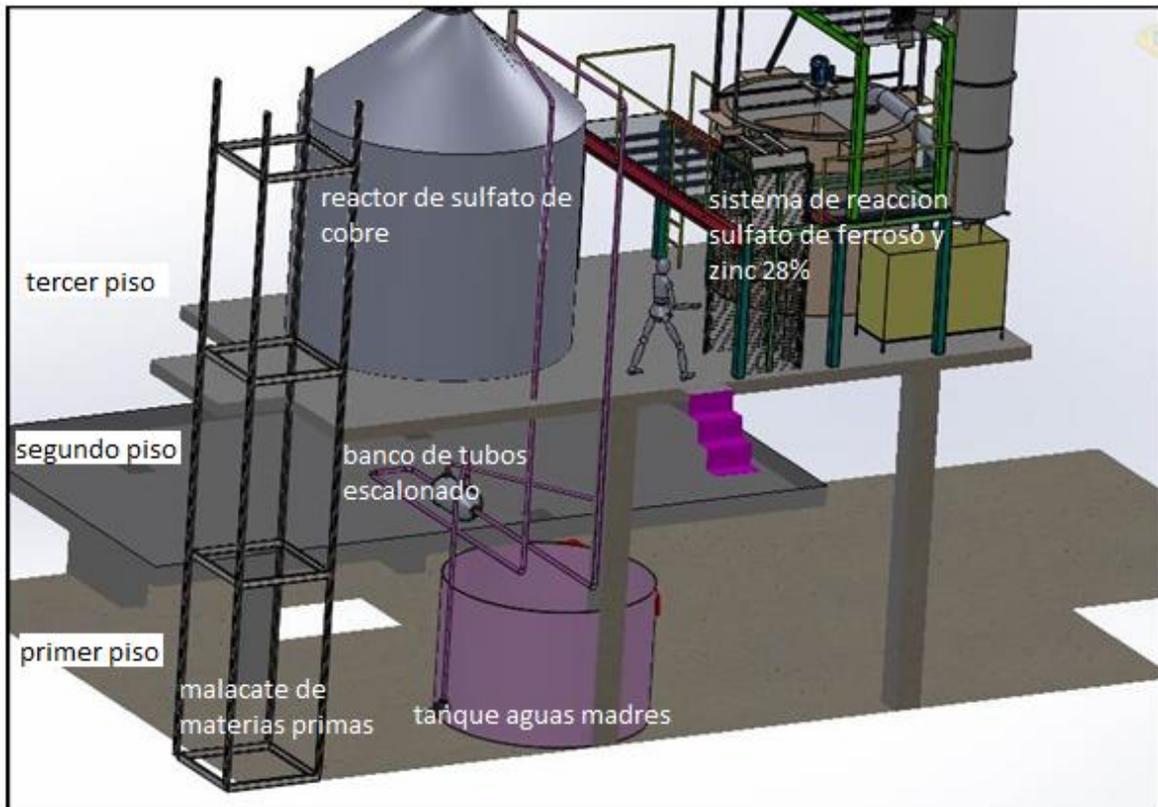


tubería 1"1/2 en acero inoxidable



 Institución Universitaria	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

## C. Plano ubicación en la planta



 Institución Universitaria	<b>INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO</b>	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

# D. CATALOGO DE BOMBA NGA-PRO

## NGA-PRO

**Electrobombas en acero inox con rodete abierto**



-  Agua limpia
-  Utilizo agrícola
-  Utilizo industrial

**CAMPO DE PRESTACIONES**

- Caudal hasta 350 l/min (21 m<sup>3</sup>/h)
- Altura manométrica hasta 20 m

**LIMITES DE UTILIZO**

- Altura de aspiración manométrica hasta 7 m
- Temperatura del líquido de -10 °C hasta +90 °C
- Temperatura ambiente de -10 °C hasta +40 °C
- Presión máxima en el cuerpo de la bomba 6 bar
- Pasaje de cuerpos sólidos en suspensión hasta Ø 10 mm
- Funcionamiento continuo S1

**EJECUCION Y NORMAS DE SEGURIDAD**

EN 60335-1 IEC 60335-1 CEI 61-150	EN 60034-1 IEC 60034-1 CEI 2-3	
---	--------------------------------------	---

**CERTIFICACIONES**

Empresa con sistema de gestión certificado DNV  
ISO 9001: CALIDAD  
ISO 14001: AMBIENTE

**UTILIZOS E INSTALACIONES**

Son recomendadas para bombear agua limpia, sin partículas abrasivas y líquidos químicamente no agresivos con los materiales que constituyen la bomba.

Por estas características, las bombas de la serie **NGA-PRO** encuentran su específico utilizzo en las instalaciones para el lavado de fruta, verdura, pescado, crustáceos, en las instalaciones industriales de lavado y para la circulación de líquidos de enfriamiento. La instalación se debe realizar en lugares cerrados o protegidos de la intemperie.

**PATENTES - MARCAS - MODELOS**

- Modelo comunitario registrado nº 002098434

**EJECUCION BAJO PEDIDO**

- Sello mecánico especial
- Otros voltajes

**GARANTIA**

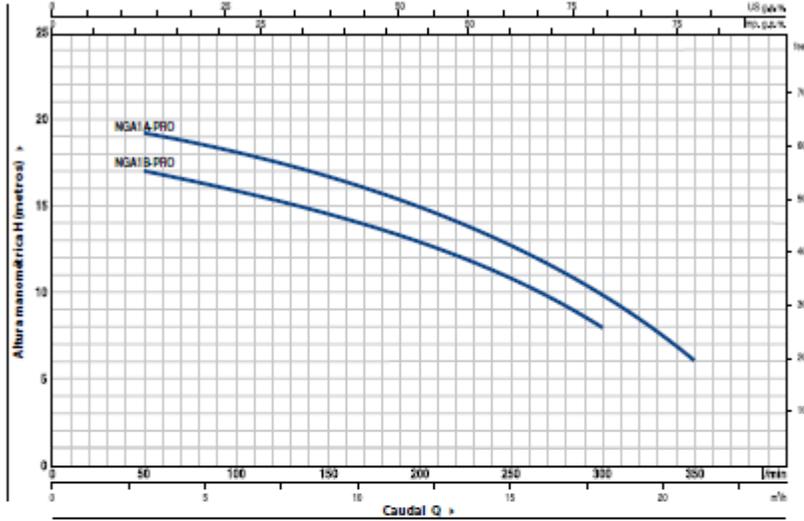
2 años según nuestras condiciones generales de venta

68 | CATALOGO GENERAL 60 Hz



CURVAS Y DATOS DE PRESTACIONES

60 Hz n= 3450 rpm HS= 0 m



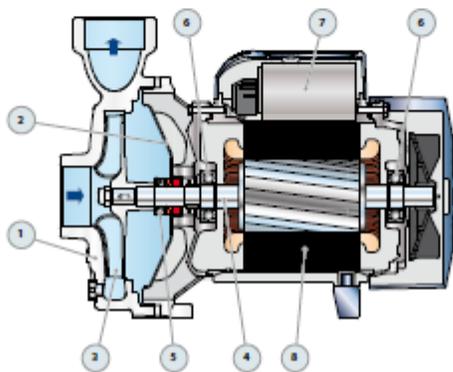
MODELO		POTENCIA (P <sub>2</sub> )		Q	0	3	6	9	12	15	18	21
Monofásica	Trifásica	kW	HP									
NGAm 1B - PRO	NGA 1B - PRO	0.55	0.75	Q	0	50	100	150	200	250	300	350
				H	18	17	16	14.5	13	10.5	8	
NGAm 1A - PRO	NGA 1A - PRO	0.75	1	H	20	19.5	18	16.5	15	12.5	10	6

Q = Caudal H = Altura manométrica total HS = Altura de aspiración

Tolerancia de las curvas de prestaciones según EN ISO 9906 Grado 3B.

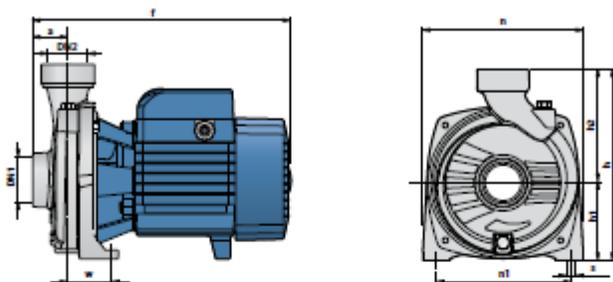
## NGA-PRO

POS. COMPONENTE	CARACTERISTICAS CONSTRUCTIVAS				
1 CUERPO BOMBA	Acero Inoxidable AISI 316 con bocas roscadas ISO 228/1				
2 TAPA	Acero Inoxidable AISI 316				
3 RODETE	Rodete abierto en acero inoxidable AISI 316				
4 EJE MOTOR	Acero Inoxidable AISI 316				
5 SELLO MECANICO	Señlo	Eje	Materiales		
	Modelo	Diámetro	Anillo fijo	Anillo móvil	Elastómero
	AR-145	Ø 14 mm	Cerámica	Grafito	Viton
6 RODAMIENTOS	6203 ZZ / 6203 ZZ				
7 CONDENSADOR	Electrobomba	Capacidad			
	Monofásica	(220 V)	(110 V o 127 V)		
	NGAm TB - PRO	16 µF - 450 VL	60 µF - 300 VL		
	NGAm TA - PRO	20 µF - 450 VL	60 µF - 300 VL		
8 MOTOR ELECTRICO	<p>NGAm - PRO: monofásica 220 V - 60 Hz con protección térmica incorporada en el bobinado.            NGA - PRO: trifásica 220/380 V - 60 Hz o 220/440 V - 60 Hz.</p> <p>➤ Las electrobombas trifásicas están equipadas con motores de alto rendimiento en clase IE2 (IEC 60034-30)</p> <p>- Aislamiento: clase F            - Protección: IP 34</p>				





**DIMENSIONES Y PESOS**



MODELO	BOCAS	DIMENSIONES mm										kg			
		DN1	DN2	a	f	h	h1	h2	n	m1	w	s	1=	3=	
Monofásica	Trifásica														
NGAm 1B - PRO	NGA 1B - PRO	1½"	1½"	41	297	227	92	135	190	160	50	10	12.6	12.6	
NGAm 1A - PRO	NGA 1A - PRO												12.7	12.6	

**CONSUMO EN AMPERIOS**

MODELO	TENSION		
	220 V	110 V	127 V
Monofásica			
NGAm 1B - PRO	5.6 A	11.2 A	9.5 A
NGAm 1A - PRO	6.5 A	13.0 A	12.1 A

MODELO	TENSION			
	220 V	380 V	220 V	440 V
Trifásica				
NGA 1B - PRO	4.0 A	2.3 A	4.0 A	2.3 A
NGA 1A - PRO	4.8 A	2.8 A	4.8 A	2.4 A

NGA – PRO, electro bomba en Aero inoxidable con rodete abierto, <http://bit.ly/2m6abrg>

# E. CATALOGO DE CAÑUELAS LMR

**CALORCOL**  
 Expertos en Ingeniería de Aislamientos

## CAÑUELAS AISLANTES Ficha Técnica



Aislamiento térmico para tuberías que operan a altas temperaturas.



### Descripción

Las cañuelas de Lana Mineral de Roca aglutinada con resina sintética consisten en aislamientos térmicos normalizados para tubería estándar de diversos diámetros nominales, en medias cañas que se ajustan a lo largo del tubo y que se moldean en forma cilíndrica.

Son totalmente incombustibles, 100% libres de asbesto, químicamente neutras, no causan ni promueven la corrosión, su uso es para aislamiento térmico en tuberías estándar de diversos diámetros nominales.

Tienen gran resistencia mecánica, se ajustan perfectamente al tubo sin dejar la más mínima ranura o escape de calor, por su alta densidad 8 lb/pie<sup>3</sup> (128 kg/m<sup>3</sup>) evita el paso de calor con mucha eficiencia y proporciona una excelente durabilidad ya que no pierde peso ni densidad al estar sometida continuamente a temperaturas.

### Especificaciones Técnicas

Unidad	Cañuelas con foil y sin foil de aluminio
Densidad	8 lb/pie <sup>3</sup> (128 Kg/m <sup>3</sup> )
Dimensiones	Longitud 0,91 m Espesor 1", 1½", 2", 2½", 3" y 4"
Conductividad térmica	0,25 BTU, plg /hr.pie <sup>2</sup> °F a Tm 100 °F
Diámetro nominal de la tubería	De 1/2" a 12"
Norma	ASTM C-547-03 type II
Temperatura de operación	Hasta 650 °C
Empaque	Caja de cartón

### Aplicaciones

- Material diseñado para aislamiento térmico de tuberías en líneas de servicio que operan a altas temperaturas en régimen continuo.
- Para uso en tuberías frías debe ser provisto con una barrera de vapor para evitar condensación.
- Aptas para tuberías expuestas a la intemperie siempre y cuando sean protegidas del agua.

### Espesores de aislamiento recomendados

Temperatura °C	100	150	200	250	300	350	400	450	500	550
Diámetro tubería	Espesores de aislamiento en in									
1/2"	1	1	1	1 1/2	1 1/2	1 1/2	2	2 1/2	2 1/2	3
3/4"	1	1	1	1 1/2	1 1/2	1 1/2	2	2 1/2	2 1/2	3
1"	1	1	1 1/2	1 1/2	2	2	2 1/2	3	3	3 1/2
1 1/4"	1	1	1 1/2	1 1/2	2	2	2 1/2	3	3	3 1/2
1 1/2"	1	1	1 1/2	1 1/2	2	2	2 1/2	3	3	3 1/2
2"	1	1 1/2	1 1/2	2	2	2 1/2	3	3	3 1/2	4
2 1/2"	1 1/2	1 1/2	2	2 1/2	3	3	3	3 1/2	4	4
3"	1 1/2	2	2	2 1/2	3	3	3	3 1/2	4	4 1/2
4"	1 1/2	2	2 1/2	3	3	3	3 1/2	4	4 1/2	5
5"	1 1/2	2	2 1/2	3	3	3 1/2	4	4 1/2	5	5 1/2
6"	1 1/2	2	2 1/2	3	3	3 1/2	4	4 1/2	5	5 1/2
8"	1 1/2	2	2 1/2	3	3	3 1/2	4	5	6	6
10"	2	2 1/2	3	3	3 1/2	4	4 1/2	5	6	6 1/2
12"	2	2 1/2	3	3	3 1/2	4	5	5 1/2	6	7
14"	2	2 1/2	3	3 1/2	4	4	5	6	6 1/2	7
16"	2	2 1/2	3	3 1/2	4	4 1/2	5	6	6 1/2	7 1/2
18"	2	2 1/2	3	3 1/2	4	4 1/2	5	6	6 1/2	7 1/2
20"	2 1/2	3	3 1/2	4	4	4 1/2	5	6	7	8
22"	2 1/2	3	3 1/2	4	4	4 1/2	5	6	7	8
24"	2 1/2	3	3 1/2	4	4	4 1/2	5	6	7	8

 Institución Universitaria	<b>INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO</b>	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

**La Lana Mineral de Roca es el aislante más utilizado en el mundo en el campo industrial y comercial por su excelente desempeño térmico, absorción acústica, resistencia al fuego; además de ser amigable con el medio ambiente.**

## Ventajas

- Por su densidad poseen un bajo factor K reduciendo drásticamente las pérdidas de calor. 0.25 BTU.in/ft<sup>2</sup>.h.°F a Tm 100 °F
- No pierden sus propiedades físicas cuando están sometidas a intenso calor, se adaptan perfectamente a las tuberías sin dejar ningún escape de calor.
- No se descomponen, no se encogen, no se estiran, tampoco se rompen cuando están sometidas a trabajo intenso y continuo.
- No se desintegran, ni pierden su forma en líneas expuestas a vibraciones.
- Son fáciles de instalar, se pueden cortar sin perder sus propiedades.
- Son totalmente incombustibles, no emanan gases ni humos tóxicos.
- Vienen en dos presentaciones; sin foil de aluminio para recubrir con lámina metálica y con foil de aluminio reforzado que sirve como acabado final.
- Son inertes, no son habitat de hongos, bacterias y bichos. Por ser totalmente inorgánicas no corroen las superficies donde se aplican.

Conductividad térmica		
T° media	k	
°F	°C	BTU plg/hr pie <sup>2</sup> °F
100	38	0,24
175	79	0,29
200	93	0,32
250	121	0,34
325	163	0,40
400	204	0,47



## Compromiso Ambiental

La Lana Mineral de Roca es un producto amigable con el medio ambiente con su aplicación en todos nuestros sistemas de aislamiento contribuimos eficientemente con el desarrollo ambiental sostenible, disminuyendo drásticamente los consumos de energía y combustibles, por lo tanto, se reduce la emisión de gases y humos, la contaminación del aire, el efecto invernadero y la lluvia ácida; en su manufactura no se utilizan agentes gasificantes de tipo CFC o HCFC.



Calorcol S.A.S presenta esta ficha técnica de producto como una guía y no se responsabiliza del uso que se le de. Se reserva el derecho de modificar información sin previo aviso. Para mayor información favor consultar departamento técnico.

### Oficina principal

Calle 46N° 71-121  
 PBX: (574) 274 4149  
 Email: [info@calorcol.com](mailto:info@calorcol.com)  
 Copacabana - Antioquia - Colombia

### Centros de distribución

**Bogotá:** Cra 97 N° 24C - 75 Bg 40 Fontibón PBX (571) 742 3849

**Barranquilla:**

Cel. 316 5278492

**Cali:**

Cel. 316 5278486

**Pereira:**

Cel. 312 8765703

**Bucaramanga:**

Cel. 316 2550568

**Barranca:**

Cel. 316 7404321

**Exportaciones:**

[exportaciones@calorcol.com](mailto:exportaciones@calorcol.com)

**Línea nacional: 316 5272521**

**www.calorcol.com**

Calorcol expertos en ingeniería de aislamientos, mantas aislantes, cañuelas LMR,  
 consultada en diciembre 18 de 2016 <http://bit.ly/2yLbUrE>

# F. MANTA AISLANTE DE ROCA MINERAL



Expertos en Ingeniería de Aislamientos

## Ficha Técnica

### MANTA AISLANTE



Material elaborado a partir de Lana Mineral de Roca para aislamientos térmicos con servicios de temperatura hasta 750 °C

Soluciones de aislamiento



### Descripción

Las Mantas Aislantes hechas de Lana Mineral de Roca, son reforzadas a ambos lados con malla de alambre galvanizado que le sirven como medio de retención, son totalmente Incombustibles y por su flexibilidad se ajustan perfectamente a cualquier tipo de geometría por Irregular que sea.

Pueden ser cortadas y pinnadas para aislar superficies curvas, cuerpos irregulares y resaltes como juntas, costuras, traslapes, bridas, falanges y cabezas de remaches. La malla metálica de las Mantas Aislantes les proporciona una excelente resistencia mecánica y sirven como base para la aplicación uniforme del cemento aislante Rocalán.

Su presentación es en rollos con medidas de 0.61m ó 0.91m x 2.44m de largo. Las Mantas tienen una densidad estándar de 140 kg/m<sup>3</sup> (8.75 lb/pe<sup>3</sup>) y 100 kg/m<sup>3</sup> (6.25 lb/pe<sup>3</sup>) sin embargo y a solicitud del cliente se fabrican mantas en diferentes densidades.

El medio de retención estándar es la malla hexagonal con ojo de 1" por el lado frío y malla hexagonal con ojo de 2 1/4" por el lado caliente.

La malla hexagonal es fabricada en alambre calibre 23 galvanizado, según la solicitud del cliente pueden ser fabricadas con otros medios de retención.

### Aplicaciones

- Las Mantas aíslan eficientemente maquinarias y equipos que funcionan a temperaturas hasta de 1.382°F (750 °C). Son ampliamente utilizadas para el aislamiento de calderas, chimeneas, hornos industriales, tanques, ductos, precipitadores, secadores, torres, equipos pesados e Industriales y todas aquellas superficies planas, curvas o irregulares donde se requiere un aislamiento eficiente y económico.
- Las Mantas en Lana Mineral de Roca son ideales para el control de ruido, especialmente para la atenuación de sonidos de baja frecuencia, aislamiento acústico de maquinaria, equipos mecánicos y música.

#### Especificaciones Técnicas

Unidad	Manta Aislante
Descripción	Manta Aislante de Lana de Roca con malla en alambre galvanizado por ambos lados
Densidad	100 kg/m <sup>3</sup> , 128 kg/m <sup>3</sup> , y 140 kg/m <sup>3</sup>
Conductividad térmica	0.24 BTU.in/ft <sup>2</sup> .h.°F a Tm 100 °F
T° de servicio	hasta 750°C en régimen continuo
Contracción lineal	< 1% a 1200 °F
Absorción de humedad	<1%
Combustibilidad	100% incombustible
Norma	ASTM C592 - 10 Type II
Empaque	Bolsa polietileno reforzado

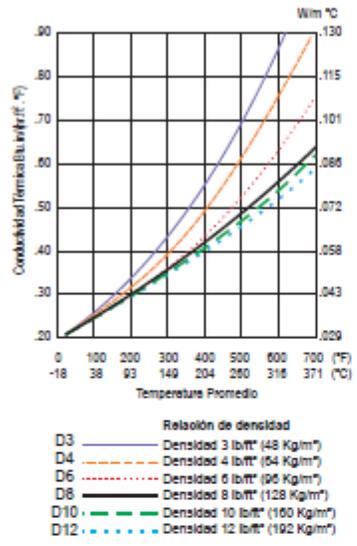
#### Conductividad térmica

T° media (°F)	(BTU.in/ft <sup>2</sup> .h.°F)
100	0.25
200	0.30
300	0.38
400	0.47
500	0.58

www.calorcol.com

 Institución Universitaria	<b>INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO</b>	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

La Lana Mineral de Roca es el aislante más utilizado en el mundo en el campo industrial y comercial por su excelente desempeño térmico, absorción acústica, resistencia al fuego; además de ser amigable con el medio ambiente.



### Ventajas

- Por su densidad poseen un bajo factor k reduciendo drásticamente las pérdidas de calor. 0.25 BTU.in/R<sup>2</sup>.h.°F a Tm 100 F
- Mayor durabilidad, dada por la composición química de la fibra y la calidad de los diferentes tipos de reforzamiento, que forman una unidad resistente mecánicamente.
- Las Mantas se pueden usar a temperaturas continuas de hasta 1382 °F (750 °C) sin afectarse por el calor, la humedad y humos corrosivos.
- Cubren superficies curvas o irregulares que tengan juntas, costuras, traslapes y cabezas de remaches. Pueden ser cortadas, remachadas, pinnadas, sin perder sus propiedades aislantes.
- Los refuerzos de las Mantas sirven para la fijación de las mallas entre sí y con el equipo aislado, haciendo innecesarios reforzamientos adicionales, al mismo tiempo brindan una base excelente para la aplicación del cemento para terminado Rocalán.
- Las Mantas Aislantes son Incombustibles y no desarrollan humo, químicamente inertes y no corrosivos.



### Compromiso Ambiental

La Lana Mineral de Roca es un producto amigable con el medio ambiente con su aplicación en todos nuestros sistemas de aislamiento contribuimos eficientemente con el desarrollo ambiental sostenible, disminuyendo drásticamente los consumos de energía y combustibles, por lo tanto, se reduce la emisión de gases y humos, la polución del aire, el efecto invernadero y la lluvia ácida; en su manufactura no se utilizan agentes gasificantes de tipo CFC o HCFC.





Calorcol S.A.S. presenta esta ficha técnica de producto como una guía y no se responsabiliza del uso que se le de. Se reserva el derecho de modificar información sin previo aviso. Para mayor información favor consultar departamento técnico.

<b>Oficina principal</b> Calle 46 N° 71-121 PBX: (574) 274 41 49 Email: <a href="mailto:info@calorcol.com">info@calorcol.com</a> Copacabana - Antioquia - Colombia	<b>Centros de distribución</b> Bogotá: Cra 97 N° 24C - 75 Bq. 40 Fontibón PBX (571) 432 19 40 <table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse; font-size: x-small;"> <tr> <td><b>Barranquilla:</b> Cel. 316 5278492</td> <td><b>Cali:</b> Cel. 316 5278486</td> <td><b>Peroira:</b> Cel. 312 8765703</td> <td><b>Bucaramanga:</b> Cel. 316 2550668</td> <td><b>Barrancabermeja:</b> Cel. 316 7404321</td> <td><b>Exportaciones:</b> <a href="mailto:exportaciones@calorcol.com">exportaciones@calorcol.com</a></td> </tr> </table>	<b>Barranquilla:</b> Cel. 316 5278492	<b>Cali:</b> Cel. 316 5278486	<b>Peroira:</b> Cel. 312 8765703	<b>Bucaramanga:</b> Cel. 316 2550668	<b>Barrancabermeja:</b> Cel. 316 7404321	<b>Exportaciones:</b> <a href="mailto:exportaciones@calorcol.com">exportaciones@calorcol.com</a>	<b>Línea nacional: 316 5272521</b>  <a href="http://www.calorcol.com">www.calorcol.com</a>
<b>Barranquilla:</b> Cel. 316 5278492	<b>Cali:</b> Cel. 316 5278486	<b>Peroira:</b> Cel. 312 8765703	<b>Bucaramanga:</b> Cel. 316 2550668	<b>Barrancabermeja:</b> Cel. 316 7404321	<b>Exportaciones:</b> <a href="mailto:exportaciones@calorcol.com">exportaciones@calorcol.com</a>			

[Calorcol expertos en ingeniería de aislamientos, mantas aislantes, cañuelas LMR \(diciembre 18 de 2016\) http://calorcol.com/calorcol/calorcolsite/?page\\_id=2050](http://calorcol.com/calorcol/calorcolsite/?page_id=2050)

	<b>INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO</b>	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

FIRMA ESTUDIANTES Jose A. Quintero M.

FIRMA ASESOR [Signature]

*Entrega Informe final de Trabajo de Grado.*

FECHA ENTREGA: Nov 17/2017

FIRMA COMITÉ TRABAJO DE GRADO DE LA FACULTAD \_\_\_\_\_

RECHAZADO \_\_\_      ACEPTADO \_\_\_      CON MODIFICACIONES \_\_\_

ACTA NO. \_\_\_\_\_

FECHA ENTREGA: \_\_\_\_\_

FIRMA CONSEJO DE FACULTAD \_\_\_\_\_

ACTA NO. \_\_\_\_\_

FECHA ENTREGA: \_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_