

**DISEÑO DE UN SISTEMA DE CALENTAMIENTO DE BAJAS
TEMPERATURAS UTILIZANDO COMBUSTIÓN SUMERGIDA
APROVECHANDO LOS GASES DE COMBUSTIÓN DE UNA
PLANTA DIESEL**

**RONALD RESTREPO ECHANDÍA
ANDRÉS FELIPE LONDOÑO MENESES
ALEJANDRA MORALES SÁNCHEZ**

**INSTITUCIÓN UNIVERSITARIA PASCUAL BRAVO
FACULTADA DE INGENIERIA
TECNOLOGIA MECANICA
MEDELLÍN
2012**

**DISEÑO DE UN SISTEMA DE CALENTAMIENTO DE BAJAS
TEMPERATURAS UTILIZANDO COMBUSTIÓN SUMERGIDA
APROVECHANDO LOS GASES DE COMBUSTIÓN DE UNA
PLANTA DIESEL**

**RONALD RESTREPO ECHANDÍA
ANDRÉS FELIPE LONDOÑO MENESES
ALEJANDRA MORALES SÁNCHEZ**

**ASESOR:
LUIS CARLOS OLMOS VILLALBA**

**INSTITUCIÓN UNIVERSITARIA PASCUAL BRAVO
FACULTADA DE INGENIERIA
TECNOLOGIA MECANICA
MEDELLÍN
2012**

**DISEÑO DE UN SISTEMA DE CALENTAMIENTO DE BAJAS
TEMPERATURAS UTILIZANDO COMBUSTIÓN SUMERGIDA
APROVECHANDO LOS GASES DE COMBUSTIÓN DE UNA
PLANTA DIESEL**

ASESOR

JURADO

MEDELLÍN, 2012

CONTENIDO

Introducción	1
Capítulo 1. Planteamiento del problema	2
Capítulo 2. Justificación	3
Capítulo 3. Objetivos	4
3.1 Objetivo general	4
3.2 Objetivos específicos	4
Capítulo 4. Antecedentes	5
Capítulo 5. Referentes teóricos	6
5.1 Transferencia de calor	6
5.2 Intercambiadores de calor	8
5.3 CHP	12
Capítulo 6. Cálculos	14
Capítulo 7. Resultados	20
Capítulo 8. Análisis de resultados	26
Capítulo 9. Conclusiones	27
Capítulo 10. Recomendaciones	28
Referencias	29
Anexos	30

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Transferencia de calor por conducción-----	6
Figura 2. Transferencia de calor por convección-----	8
Figura 3. Combustión sumergida-----	12
Figura 4. Configuración del SCCS-----	13
Figura 5. Proceso de transferencia de calor del SCCS-----	15
Figura 6. Isométrico del tanque-----	22
Figura 7. Vista superior del tanque sin tapa-----	23
Figura 8. Alzado del tanque-----	24

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Propiedades físicas H ₂ O-----	19
Tabla 2. Propiedades físicas del Gas-----	19
Tabla 3. Propiedades físicas H ₂ O al final del proceso-----	19
Tabla 4. Propiedades físicas del Gas al final del proceso-----	19
Tabla 5. Números adimensionales-----	20
Tabla 6. Coeficientes globales-----	20
Tabla 7. Flujos-----	20
Tabla 8. Temperaturas-----	20
Tabla 9. Dimensiones del tanque-----	21
Tabla 10. Dimensiones del tubo-----	21

LISTA DE ANEXOS

Anexo 1. Plano del tanque-----	1
Anexo 2. Plano de la tapa del tanque-----	2
Anexo 3. Plano cuadrante para tubos-----	3
Anexo 4. Plano tubo perforado-----	4
Anexo 5. Plano de tubo-----	5

NOMENCLATURA

T_{inGE} : Temperatura de los gases a la entrada.

Di : Diámetro interno del tubo.

De : Diámetro externo del tubo.

μ_{GE} : Viscosidad de los gases

Cp_{GE} : Calor específico a presión constante de los gases

k_{GE} : Conductividad térmica de los gases.

ρ_{GE} : Densidad de los gases.

Pr_{GE} : Prandtl de los gases.

Q_{GE} : Calor de los gases.

μ_{H2O} : Viscosidad del agua.

Cp_{H2O} : Calor específico a presión constante del agua.

k_{H2O} : Conductividad térmica del agua.

ρ_{H2O} : Densidad del agua.

Pr_{H2O} : Prandtl del agua.

$Q_{punto.sccs}$: Calor del sistema de combustión sumergida.

Q_{b-h2o} : Calor entre la burbuja y el agua.

T_{inH2O} : Temperatura inicial del agua.

T_{FnH2O} : Temperatura final del agua.

T_{FnGE} : Temperatura final de los gases.

h_e : Coeficiente de transferencia por convección del agua.

h_b : Coeficiente de transferencia por convección de la burbuja.

h_j : Coeficiente de transferencia por convección de los gases.

Nu_b : Número Nusselt de la burbuja

Re_b : Número Reynolds de la burbuja.

Nu_{H_2O} : Número Nusselt del agua.

Re_{H_2O} : Número Reynolds del agua.

Nu_{GE} : Número Nusselt de los gases.

Re_{GE} : Número Reynolds de los gases.

U : Coeficiente global de transferencia.

Introducción

Las primeras patentes en el campo de la combustión sumergida se les concedieron a finales del siglo XIX, pero fue el trabajo de desarrollo de Swindin (1949) en la década de 1930 y años 1940 que condujo a las primeras aplicaciones comerciales del proceso [1].

Decimos que los tubos inmersos son el medio por el cual se transfiere calor al líquido; porque esto se dedujo en 1944 por parte de la Asociación Americana de Gases (AGA) una ecuación semi-empírica, luego en 1958 científicos ingleses obtuvieron una ecuación que se acercó más al comportamiento real donde relacionaban la longitud y el diámetro de la tubería en función de la eficiencia térmica [2].

Como su nombre lo indica, la combustión sumergida es un proceso de combustión del gas, de tal manera que los gases de combustión caliente de productos son liberados bajo la superficie de un líquido. De esta manera, la energía liberada por el proceso de combustión se transfiere por contacto directo con el líquido [3].

La utilización del sistema de tubos sumergidos o combustión inmersa tiene aplicaciones en el campo industrial, agrícola, químico y textil; en el agrícola se comprobó que con la fertilización por dióxido de carbono el mejoramiento en el crecimiento de algunas plantas en cultivos tradicionales como arroz, trigo, patatas y verduras [4]; en la industria siderometalúrgica en procesos como desengrase, decapado, lavado y fosfatación aprovechan las propiedades químicas del agua con dióxido de carbono para evitar la corrosión de los metales, en textil el agua es de fácil solución con los tintes que sirven para teñir las telas además las temperaturas medias que se logran sirven para hacer lavados post-procesos; también se puede emplear en el lavado de envases para alimentos o bebidas gaseosas. Esto es una tecnología que en Colombia aun no se utiliza por eso queremos comunicar los beneficios de esta por medio de esta investigación para las diferentes industrias.

El trabajo tiene como objetivo aprovechar los gases de emisión de una planta diesel para calentar agua y ayudar a las empresas de los sectores mencionados anteriormente a optimizar sus procesos y disminuir las emisiones al medioambiente.

La Combustión Sumergida, consiste en el calentamiento directo del baño al hacer circular los gases de combustión por el interior del mismo. En el caso de Tubos Sumergidos dichos gases circulan por el interior de tubos inmersos en el baño.

Capítulo 1. Planteamiento del problema

Analizando la información reportada del análisis energético industrial del en el proyecto uso eficiente y racional de la energía en el marco del programa de producción más limpia en el Valle de Aburra **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**, los sectores industriales poseen procesos de calentamiento a baja temperatura calentados generalmente por calderas centralizadas.

Para reemplazar calderas se puede adoptar la tecnología de la combustión sumergida, como aplicaciones de esta tecnología se encuentran los tratamientos químicos de superficie y los lavados mediante baños de agua caliente inferiores a 65 °C. Las aplicaciones sectoriales en los procesos industriales pueden citarse como sigue:

- **Sector metalmecánico:** Desengrase, decapado, fosfatación y enjuague.
- **Sector alimentos:** Agua de lavado (envases, alimentos, etc.), baños ácidos y agua de aclarado.
- **Sector textil y del papel:** Producción constante de agua caliente y blanqueo.
- **Sector químico:** Agua de lavado.
- **Otros sectores:** Fabricación de materiales de construcción, calentamiento de agua de piscinas, tratamiento de pieles y operaciones unitarias de concentración de disoluciones acuosas. **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**

Capítulo 2. Justificación

La solución a la problemática de consumo energético y emisión de gases en los diferentes sectores industriales requiere de la utilización de tecnologías de combustión y calentamiento de nueva generación con alta eficiencia térmica, complementada con el aprovechamiento de los gases de combustión de las plantas industriales, con propiedades de combustión que contribuyan a mejorar la productividad de los procesos, la salud ocupacional y la disminución de emisiones contaminantes y gases de efecto invernadero, la reutilización de los gases de emisión es un medio con el cual se pueden conseguir estos objetivos, cuya disponibilidad en la mayoría de las empresas del sector industrial hacen viable los procesos de modernización tecnológica en estas compañías.

Se hace entonces necesario introducir innovaciones tecnológicas en equipos de combustión para procesos de baja temperatura con calentamiento de fluidos que consultando las nuevas tendencias y uso de materiales de nueva generación sean adaptables a la escala económica de nuestras empresas y compatibles con el uso de los gases de emisión, tales como la combustión sumergida o los tubos inmersos.

En este contexto se plantea el proyecto “Diseño de un sistema de calentamiento de bajas temperaturas utilizando tubos inmersos perforados o combustión sumergida mediante una planta diesel.”.

Capítulo 3. Objetivos

Los objetivos de este trabajo de grado son los siguientes:

3.1 Objetivo general:

Diseñar, un sistema de combustión por combustión sumergida y/o tubos inmersos para calentamiento de líquidos a partir de los calentamientos de los tubos por medio de los gases de escape de un motor diesel.

3.2 Objetivos específicos:

- Realizar una revisión de los diferentes prototipos existentes de los sistemas de combustión sumergida por medio de tubos inmersos, tomando estos como referencia para hacer el diseño.
- Diseñar un prototipo de combustión sumergida por tubos inmersos, partiendo de ideas anteriormente estudiadas y analizadas.
- Desarrollar y culminar de la mejor forma posible el sistema de combustión, avanzando en los diferentes estudios ya hechos y poner en práctica los conocimientos adquiridos para que el diseño quede muy bien estructurado.

Capítulo 4. Antecedentes

Los sectores industriales que poseen procesos de calentamiento a baja temperatura calentados generalmente por calderas centralizadas son:

- **Sector metalmecánico:** calentamiento de baños en procesos de preparación superficial como desengrase (67°C), decapado (45°C-65°C), desengrase alcalino (55°C-75°C), enjuague y lavado (60°C-75°C).
- **Sector químico:** calentamiento de agua de lavado (70°C), decapado, cubas de desengrasante, cubas de fosfatación, de electrolisis, de concentración de soluciones y recuperación de baños usados.
- **Sector alimentos, hoteles y restaurantes:** lavado de recipientes y prendas, manos y utensilios con agua caliente (35°C-45°C), pasteurización de alimentos (63°C-68°C) y algunos procesos de cocción y esterilización.
- **Sector cuero:** procesos de curtido del cuero (40°C), baños de recurtido (50°C) y acondicionamiento (40°C-50°C).
- **Sector textil:** teñido de tela (90°C-150°C), lavado (40°C-60°C), descrudado y mercerizado.

El desarrollo de tecnologías de combustión sumergida y de tubos inmersos puede contribuir a la solución de los principales problemas que se pueden evidenciar en los sistemas de calentamiento actuales en procesos industriales del Valle de Aburra tales como los costos energéticos generados por las grandes plantas eléctricas que estas industrias tienen en sus instalaciones, además la gran cantidad de gases de combustión que arrojan a la atmosfera provocando un incremento en la emisión de gases efecto invernadero en el Valle de Aburra. **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**

Capítulo 5. Referentes teóricos

5.1 Transferencia de calor

El paso del calor de los cuerpos más calientes a otros que lo están menos se llama transmisión del calor y se produce en tres formas: conducción, convección y radiación.

La propagación por conducción tiene lugar cuando se pone en contacto entre dos cuerpos que están a diferentes temperaturas o en dos puntos de un mismo objeto. Está a diferente temperatura en la propagación por conducción la transmisión del calor se lleva a cabo por medio de transferencia de energía de una molécula a otra, la capacidad para producir el calor varía notablemente de un material a otro. En general los elementos metálicos son muy conductores del calor, destacan en ellos la plata y el cobre u otros materiales; por ejemplo, los plásticos, la madera, el vidrio o barro, son malos conductores del calor y se utiliza por tal motivo en otras situaciones en que debemos mantener la conducción del calor en límites. La conductibilidad es bastante menor en los líquidos que en los sólidos y aún menor en los gases en el vacío.

En la transferencia de calor se hace necesario enfatizar sobre algunos conceptos básicos que la determinan como los aislantes térmicos que son los materiales que dificultan el paso del calor. Ejemplos: Tela, madera, plásticos, porcelana, cuero, asbesto.

5.1.1 Transferencia de calor por conducción: Es la forma que transmite el calor en cuerpos sólidos, se calienta un cuerpo, las moléculas que reciben directamente el calor aumentan su vibración y chocan con las que rodean; estas a su vez hacen lo mismo con sus vecinas hasta que todas las moléculas del cuerpo se agitan, por esta razón, si el extremo de una varilla metálica se calienta con una flama, transcurre cierto tiempo para que el calor llegue a otro extremo. Como se muestra en la Figura 1.

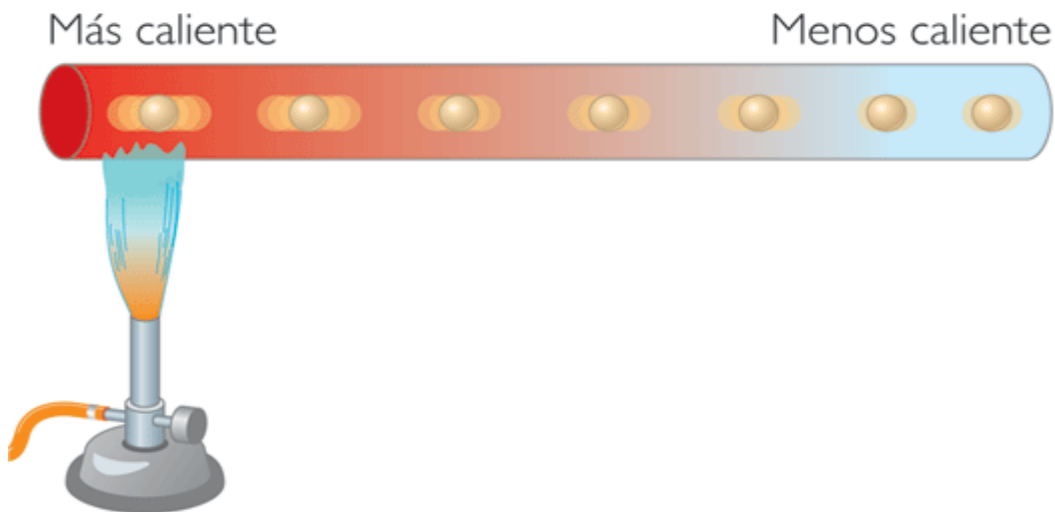


Figura 1. Transferencia de calor por conducción.

El calor no se transmite con la misma facilidad por todos los cuerpos, se llaman buenos conductores del calor aquellos materiales que permiten fácilmente su paso; los malos conductores o aislantes son los que oponen mucha dificultad al paso del calor, aprovechando esta propiedad muchas vasijas para calentar líquidos se hacen aluminio.

Cuando el calor se transmite a través de un cuerpo por conducción, esta energía se propaga en virtud de la agitación atómica en el material, sin que exista transporte de materia en el proceso.

- **Transmisión del calor:** La conducción del calor significa transmisión de energía entre sus moléculas, a manera de ejemplo se tiene que al introducir una cuchara de metal en café caliente, la parte inferior se calienta y poco después la parte superior, aunque esta última no toque el líquido, la conducción del calor es el resultado de las colisiones entre las moléculas, en las que las moléculas con mayor energía cinética transmiten calor a las de menor energía. No hay dos materiales que tengan idéntica estructura molecular o atómica, por lo que su comportamiento es diferente con respecto a la capacidad para conducir el calor.
- **Aplicaciones por conducción:** La temperatura del cuerpo es de 36.5°C aproximadamente y el medio que nos rodea está, en general a menor temperatura, por lo que constantemente cierta cantidad del calor se está transfiriendo de nuestro cuerpo hacia el ambiente. Cuando la temperatura es baja esta transferencia se hace rápidamente y esto nos hace sentir frío. [7]

5.1.2 Transferencia de calor por convección: La convección es el mecanismo de transferencia de calor a través de un fluido con movimiento masivo de éste (como se muestra en la Figura 2). En la convección existe movimiento del fluido a nivel macroscópico; mientras que en la conducción existe movimiento a nivel microscópico, atómico o molecular, pero no a nivel macroscópico, entendiendo como nivel macroscópico movimiento de volúmenes relativamente grandes del fluido. La convección se clasifica en forzada y natural:

- En la convección forzada se obliga al fluido a fluir mediante medios externos, como un ventilador o una bomba. En la convección natural el movimiento del fluido es debido a causas naturales, como el efecto de flotación, el cual se manifiesta con la subida del fluido caliente y el descenso del fluido frío.
- La convección forzada se clasifica a su vez en interna y externa dependiendo de si el flujo del fluido es interno o externo. El flujo de un fluido se clasifica como interno o externo dependiendo de si se fuerza al fluido a fluir por un canal confinado (superficie interior) o por una superficie abierta. El flujo por un tubo o ducto es flujo interno si ese fluido está limitado por completo por superficies sólidas. El flujo de un fluido no limitado por una superficie (placa, alambre, exterior de un tubo) es flujo externo. El flujo de líquidos en un tubo se conoce como flujo en canal abierto si ese tubo está parcialmente lleno con el líquido y se tiene una superficie libre.

- La velocidad de transferencia de calor a través de un fluido es mucho mayor por convección que por conducción. Cuanto mayor es la velocidad del fluido mayor es la velocidad de transferencia de calor.
- La transferencia de calor por convección depende de las propiedades del fluido, de la superficie en contacto con el fluido y del tipo de flujo. Entre las propiedades del fluido se encuentran: la viscosidad dinámica m , la conductividad térmica k , la densidad r . También se podría considerar que depende de la viscosidad cinemática n , puesto que $n = m / r$. Entre las propiedades de la superficie que intervienen en la convección están la geometría y la aspereza. El tipo de flujo, laminar o turbulento, también influye en la velocidad de transferencia de calor por convección. En cualquier caso, la velocidad de transferencia de calor por convección siempre es proporcional a la diferencia de temperatura entre la superficie y el fluido. [8]

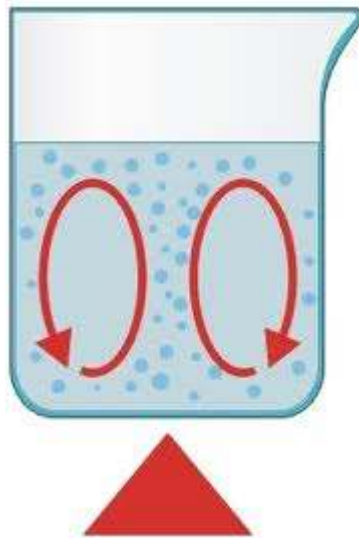


Figura 2. Transferencia de calor por convección.

5.2 Intercambiadores de calor

La clasificación más general que puede realizarse de los cambiadores de calor, se efectúa atendiendo al grado de contacto entre los fluidos. Según este criterio, los cambiadores de calor se dividen en dos grandes grupos:

- Intercambiadores de contacto directo.
- Intercambiadores de contacto indirecto. Estos pueden a su vez dividirse en alternativos y de superficie.

Los intercambiadores de contacto directo, también conocidos como intercambiadores de mezcla, son aquellos dispositivos en los que los fluidos sufren una mezcla física completa, realizándose, como consecuencia, la transferencia energética entre ellos.

Pertencen a este grupo, entre otros tipos de intercambiadores, las denominadas torres de refrigeración o torres húmedas, así como los enfriadores de gases.

En cuanto a los intercambiadores alternativos, ambos fluidos recorren un mismo espacio de forma alternada, sin coincidencia entre ellos, de forma tal que la mezcla física de ambos fluidos puede considerarse despreciable. El elemento fundamental de este subgrupo de intercambiadores es la superficie que alternativamente recibe y cede la energía térmica.

Por otra parte, se denominan intercambiadores de superficie a aquellos equipos o dispositivos en los que la transferencia térmica se realiza a través de una superficie, plana o cilíndrica, que separa físicamente las corrientes de ambos fluidos, no existiendo por tanto ninguna posibilidad de contacto directo o contaminación entre dichos fluidos, salvo en el caso de rotura de la antedicha superficie de separación.

- **Clasificación de los cambiadores de calor de superficie:** La clasificación más usual de este grupo de intercambiadores, se realiza en base a la dirección relativa de los flujos de ambos fluidos, pudiéndose hablar entonces de intercambiadores de flujos paralelos y de intercambiadores de flujos cruzados, según sus direcciones sean paralelas en el espacio o formen cualquier ángulo en él. Los intercambiadores de flujos paralelos, son generalmente utilizados en el intercambio térmico líquido-líquido, mientras que los de flujos cruzados se utilizan generalmente en el intercambio líquido-gas. Como se decía anteriormente se denomina intercambiadores de calor de flujos paralelos a aquellos intercambiadores en los que circulan ambos fluidos con direcciones paralelas en el espacio, si además de tener ambos flujos la misma dirección, tienen el mismo sentido, reciben el nombre de “en equicorriente”, denominándose en “contracorriente” a aquellos en los que los flujos tienen sentidos contrarios. Dentro del subgrupo de intercambiadores de flujos paralelos, se emplean entre otros, los denominados “de placas”, “de tubo”, también llamados “de doble tubo”, de “inmersión”, “multitubulares” o de “carcasa y tubos”. En los intercambiadores multitubulares o de carcasa y tubos, es normal combinar la clasificación anterior con otra, basada en el número de veces que cada partícula de los fluidos recorre el intercambiador, recibiendo el nombre de paso cada recorrido, así, un cambiador en equicorriente o contracorriente, sería un cambiador de un paso por carcasa y un paso por tubos[9].

La historia de los intercambiadores de calor, tanto de casco y tubos como de placas, es bien conocida. A lo largo de los años, diferentes tipos de intercambiadores de calor se han diseñado para cumplir las especificaciones de diferentes procesos y aplicaciones. Cada uno de estos diseños presenta inigualables ventajas y hasta el día de hoy han mantenido un liderazgo en la industria de la refrigeración, pero hoy surge un nuevo participante que toma lo mejor de cada uno de estos diseños y los pone a trabajar a favor del usuario. Los intercambiadores de calor de casco y tubo (o tubular) tienen usos en donde se demandan de manera significativa una alta temperatura y presión. El uso de estos equipos también abarca aplicaciones donde el líquido contiene partículas que bloquearían los canales de un cambiador de calor de placas.

Hay varias configuraciones de intercambiadores de calor de casco y tubo incluyendo diseños como: doble tubo, de tubos en "u", recto, espiral, y aleteado. El de doble tubo es el tipo más sencillo de intercambiador de calor. Está constituido por dos tubos concéntricos de diámetros diferentes. Uno de los fluidos fluye por el tubo de menor diámetro y el otro fluido fluye por el espacio anular entre los dos tubos. En este tipo de intercambiador son posibles dos configuraciones en cuanto a la dirección del flujo de los fluidos: contra flujo y flujo paralelo.

En la configuración en flujo paralelo los dos fluidos entran por el mismo extremo y fluyen en el mismo sentido. En la configuración en contra flujo los fluidos entran por los extremos opuestos y fluyen en sentidos opuestos [10].

Tipos de intercambiadores de calor: En este punto se realiza una descripción de los tipos fundamentales de intercambiadores que son:

- Intercambiadores de tubería doble.
- Intercambiadores enfriados por aire.
- Intercambiadores de tipo placa.
- Intercambiadores de casco y tubo.
- Intercambiadores de tubería doble.

Consiste en un tubo pequeño que está dentro de otro tubo mayor, circulando los fluidos en el interior del pequeño y entre ambos. Estos intercambiadores se utilizan cuando los requisitos de área de transferencia son pequeños.

Las curvas características de evolución de temperaturas en intercambiadores son:

- Intercambiadores enfriados por aire.

Consisten en una serie de tubos situados en una corriente de aire, que puede ser forzada con ayuda de un ventilador. Los tubos suelen tener aletas para aumentar el área de transferencia de calor. Pueden ser de hasta 40 ft (12 m) de largo y anchos de 8 a 16 ft (2.5 a 5 m).

La selección de un intercambiador enfriado por aire frente a uno enfriado por agua es una cuestión económica, hay que considerar gastos de enfriamiento del agua, potencia de los ventiladores y la temperatura de salida del fluido (un intercambiador de aire, tiene una diferencia de temperatura de unos 15 °F (8 °C)). Con agua se obtienen diferencias menores.

- Intercambiadores de tipo placa.

Llamados también intercambiadores compactos. Pueden ser de diferentes tipos:

- Intercambiadores de tipo placa y armazón similares a un filtro prensa.
- Intercambiadores de aleta de placa con soldadura:

Admiten una gran variedad de materiales de construcción, tiene una elevada área de intercambio en una disposición muy compacta. Por la construcción están limitados a presiones pequeñas.

- Intercambiadores de casco y tubo.

Son los intercambiadores más ampliamente utilizados en la industria química y con las consideraciones de diseño mejor definidas. Consisten en una estructura de tubos pequeños colocados en el interior de un casco de mayor diámetro [11].

5.3 CHP

Los quemadores de combustión sumergida son equipos de calentamiento directo de baños a bajas temperaturas. Los productos de la combustión del gases de emisión entran en contacto directo con el líquido a calentar mediante burbujeo, de tal manera que ninguna pared limita el intercambio térmico gas/líquido, produciéndose unas eficiencias de combustión que incluso sobrepasan el 100 % sobre el poder calorífico inferior en temperaturas de proceso inferiores a la del punto de rocío húmedo de los gases de combustión comprendidas entre 50 °C y 65 °C a la presión atmosférica 6.

Un sistema de combustión sumergida consta de tres partes principales **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**, **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**: el cuerpo del quemador, el distribuidor, la rampa de dispersión de gases, los dispositivos de alimentación y control de la combustión y una cuba con el fluido a calentar.

El cuerpo del quemador generalmente construido en un material que no sea corrosivo y que sea resistente a las altas temperaturas en cuyo interior se realiza la combustión alimenta un distribuidor común a las rampas de dispersión de gases, el cual es un conjunto de tubos agujereados por donde fluyen al fluido a calentar los gases de la combustión **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** Los dispositivos de alimentación y control es el conjunto de elementos que operan sincronizadamente para el buen funcionamiento del quemador entre ellos los circuitos de aire y combustible, los sistemas de ignición y detección de llama y el control de la temperatura del proceso.

Como aplicaciones de esta tecnología se encuentran los tratamientos químicos de superficie y los lavados mediante baños de agua caliente inferiores a 65 °C. La aplicación de esta tecnología de calentamiento puede estar limitada fundamentalmente por las dimensiones y geometría de la cuba y del proceso de calentamiento, por la naturaleza química del líquido a calentar y por la propia temperatura del proceso. Esto es procesos que necesiten de dispositivos mecánicos dentro de la cuba del baño, que precisen un

baño muy alcalino o muy detergente, o que requieran una temperatura superior a los 65 °C.

El desempeño de estos sistemas es dependiente de numerosos factores, tales como las propiedades físicas del fluido que se está calentando, las dimensiones de los equipos, la velocidad a la cual el fluido pasa por las superficies de intercambio de calor y la turbulencia del mismo. Sin embargo, la temperatura de salida de los humos, que se evacuan de la cuba de calentamiento aproximadamente a la misma temperatura del baño, depende fundamentalmente de la longitud del tubo, es decir, de la superficie de intercambio calórico.

El coeficiente de convección depende linealmente de la velocidad de circulación de los humos por el interior del tubo.

Por el extremo superior del tubo salen los gases de combustión. En este extremo el tubo puede estar dotado de un sifón cuya finalidad consiste en evacuar también el agua de condensación

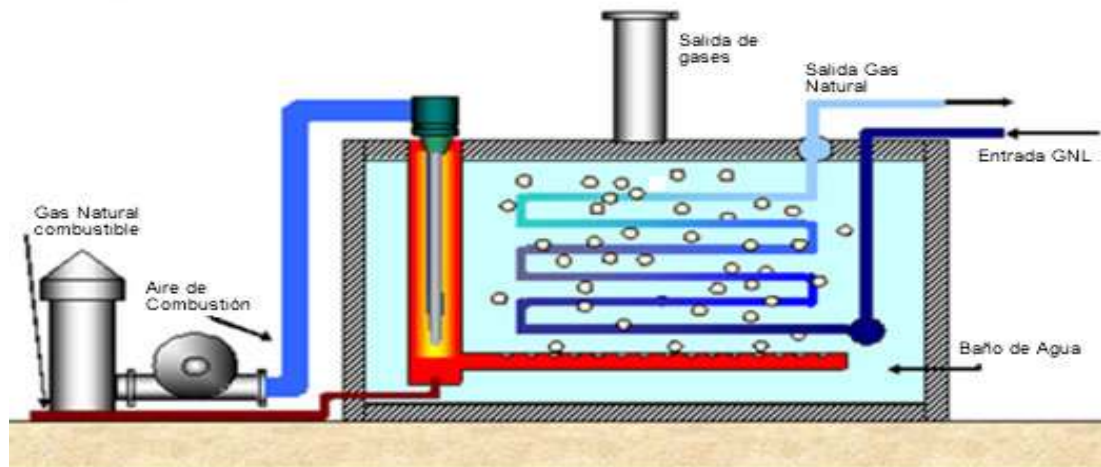


Figura 3. Combustión sumergida.

Capitulo 6. Modelo de cálculo del prototipo del sistemas de calentamiento mediante combustión sumergida

El objetivo que se desea alcanzar con el sistema de calentamiento mediante combustión sumergida (SCCS) es una transferencia de calor desde los gases de escape de una planta de generación (MCI) a un baño con agua, se definió este intercambiador como un tanque en el cual se sumerge un tubo en forma de "T" invertida y perforado en el fondo, tal como se representa en la figura 5.

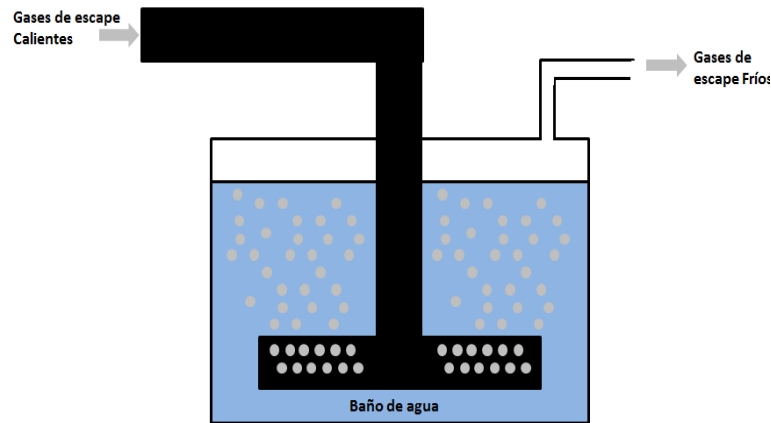


Figura 4. Configuración del SCCS.

Como con la mayoría de sistemas que involucran flujo de sustancias y/o energía, el primer paso es realizar balances de masa y energía. El balance de energía consiste en que el calor que pierden los gases de escape es igual al calor que gana el agua, lo cual se utiliza para calcular el área de transferencia de calor. Se tiene el balance de energía a continuación, donde Q_{GE} es la cantidad de calor a retirar de los gases de escape.

$$\dot{Q}_{GE} = \dot{Q}_{SCCS} \quad (1)$$

$$\dot{Q}_{GE} = \dot{m}_{GE} \cdot C_{p_{GE}} \cdot (T_{H,GE} - T_{C,GE}) \quad (2)$$

$$\dot{Q}_{SCCS} = U_{SCCS} \cdot A_{ext} \cdot \Delta T_m \quad (3)$$

Donde:

$$U_{SCCS} A = \frac{1}{\frac{1}{h_i \cdot A_{i,tubo}} + \frac{R_{fi}''}{A_{i,tubo}} + \frac{Ln\left(\frac{D_{e,tubo}}{D_{i,tubo}}\right)}{2 \cdot \pi \cdot k_{inox} \cdot L_{tubo}} + \frac{R_{fe}''}{A_{e,tubo}} + \frac{1}{h_e \cdot A_{e,tubo}}} \quad (4)$$

$$\dot{m}_{GE} = Q_{GE} \cdot \rho_{GE} \quad (5)$$

$$A_{i,tubo} = \pi \cdot D_i \cdot L_{tubo} \quad (6)$$

$$A_{e,tubo} = \pi \cdot D_e \cdot L_{tubo} \quad (7)$$

El diseño de un intercambiador de calor se realizara mediante las siguientes suposiciones:

- Los gases se escape tienen propiedades del aire atmosférico a temperatura de los gases de combustión, esto debido a que la combustión del combustible Diesel se realiza con alto excesos de aire.
- Las impurezas son insignificantes

La temperatura media logarítmica (ΔT_m), se tomó del modelo de un intercambiador de calor de flujo paralelo, por lo tanto:

$$\Delta T_{LM} = \frac{\Delta T_A - \Delta T_B}{Ln\left(\frac{\Delta T_A}{\Delta T_B}\right)} \quad (8)$$

Donde:

$$\Delta T_A = T_{h-out} - T_{c-out} \quad (9)$$

$$\Delta T_B = T_{h-in} - T_{c-in} \quad (10)$$

El cálculo del área de transferencia de calor con la cual se diseñó el sistema requiere el cálculo de los coeficientes convectivos (coeficientes de película: h) externo e interno para obtener así un coeficiente global de transferencia de calor (U) con el que se obtenga una capacidad de incrementar la temperatura del agua aproximadamente a 40°C, con un área adecuada, como se presenta en la figura 6.

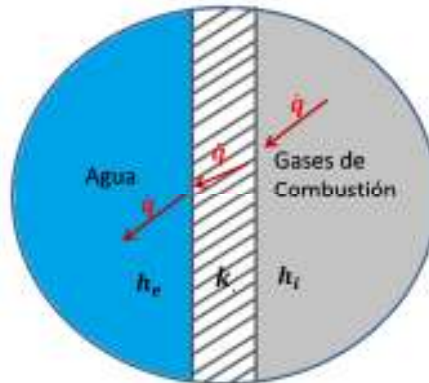


Figura 5. Proceso de transferencia de calor del SCCS.

Calculo del coeficiente de transferencia de calor por convección interno.

Como se definió en el diseño del sistema, en la parte interna de los tubos circularan los gases de combustión provenientes de la planta de generación, por lo tanto el modelo planteado para el cálculo del h_i es el siguiente:

Usando el número adimensional Nusselt (Nu), tenemos:

$$h_i = \frac{Nu_{GE} \cdot k_{GE}}{D_i} \quad (12)$$

Por lo tanto para un flujo interno, el número adimensional Nusselt está en función del número adimensional de Reynolds y Prandtl, debido a esto se calcularon estos números mediante las siguientes ecuaciones:

$$Re_{GE} = \frac{\rho_{GE} \cdot v_{GE} \cdot D_i}{\mu_{GE}} \quad (13)$$

$$Pr_{GE} = \frac{Cp_{GE} \cdot \mu_{GE}}{k_{GE}} \quad (14)$$

De acuerdo a los resultados obtenidos de los números de Re y Pr , la correlación que se utilizó para hallar Nu , fue la correlación modificada por Gnielinski [15]:

$$Nu_{GE} = \frac{(f_{GE}/8)(Re_{GE}-1000)Pr_{GE}}{1+12.7(f_{GE}/8)^{1/2}(Pr^{2/3}-1)} \quad (15)$$

Para el factor de fricción para una sola fase, se utilizó la correlación de Churchill [16]:

$$f_{GE} = 8 \left[\left(\frac{8}{\text{Re}_{GE}} \right)^{12} + \frac{1}{(A+B)^{3/2}} \right]^{1/12} \quad (16)$$

Donde:

$$A = \left\{ 2.457 \ln \left[\frac{1.0}{\left(\left(\frac{7}{\text{Re}_{GE}} \right)^{0.9} + 0.27 \frac{\varepsilon}{D_i} \right)} \right] \right\}^{16} \quad (17)$$

$$B = \left(\frac{37530}{\text{Re}_{GE}} \right)^{16} \quad (18)$$

Calculo del coeficiente de transferencia de calor por convección externo

Para el cálculo de coeficiente de transferencia de calor por convección externo (h_e), se realizó el mismo procedimiento del h_i , lo único que varía es la correlación para hallar el número Nu , para lo cual cambia el fluido y las áreas de transferencia.

$$h_e = \frac{Nu_{H_2O} \cdot k_{H_2O}}{D_e} \quad (19)$$

Por lo tanto para un flujo interno, el número adimensional Nusselt esta en función del número adimensional de Reynolds y Prandtl, debido a esto se calcularon estos números mediante las siguientes ecuaciones:

$$\text{Re}_{H_2O} = \frac{\rho_{H_2O} \cdot v_{H_2O} \cdot D_e}{\mu_{H_2O}} \quad (20)$$

$$\text{Pr}_{H_2O} = \frac{Cp_{H_2O} \cdot \mu_{H_2O}}{k_{H_2O}} \quad (21)$$

De acuerdo a los resultados obtenidos de los números de Re y Pr , la correlación que se utilizó para hallar Nu , fue la propuesta por Churchill y Beinstein [17]:

$$Nu_{GE} = 0.3 + \frac{0.62 \text{Re}_{H_2O} \text{Pr}_{H_2O}}{(1 + (0.4/\text{Pr})^{2/3})^{1/4}} \left[1 + \left(\frac{\text{Re}_{H_2O}}{282000} \right)^{5/8} \right]^{4/5} \quad (22)$$

Calculo del coeficiente global de transferencia de calor

Después de haber encontrado los coeficientes de transferencia de calor por convección internos como externos, y teniendo en cuenta las suposiciones realizadas anteriormente la Ecuación (4), queda de la siguiente manera:

$$U_{SCCS} A = \frac{1}{\frac{1}{h_i \cdot A_{i,tubo}} + \frac{\ln\left(\frac{D_{e,tubo}}{D_{i,tubo}}\right)}{2 \cdot \pi \cdot k_{inox} \cdot L_{tubo}} + \frac{1}{h_e \cdot A_{e,tubo}}} \quad (23)$$

Calculo de la transferencia de calor desde la burbuja de gases de combustión hacia el baño de agua

Es muy importante tener en cuenta la transferencia de calor desde la burbuja de gases de combustión o de escape hacia el baño de agua, debido a que este proceso será el que llevará el baño de agua a la temperatura final deseada. Por lo tanto para determinar esta transferencia de calor se tomó como referencia el trabajo realizado por Kalman et al [18] y realizando las siguientes consideraciones:

- No se tienen en cuenta la transferencia de masa, por lo tanto el radio de la burbuja en todo el trayecto es el mismo.
- La velocidad de ascenso de la burbuja será tomada constante.

Por lo tanto la transferencia de calor quedaría expresada de la siguiente manera:

$$\dot{m}_b \cdot C_{p_b} \cdot (T_{H,b} - T_{C,b}) = U_{b-h_2o} \cdot A_{transf} \cdot \Delta T_{ml} \quad (24)$$

Donde: \dot{m}_b , es el flujo másico de las burbujas; C_{p_b} , es el calor específico de la burbuja; $T_{H,b}$ y $T_{C,b}$, son las temperaturas de entrada y salida de las burbujas, respectivamente; U_{b-h_2o} , es el coeficiente global de transferencia de calor; A_{transf} , es el área de transferencia de calor; y ΔT_{ml} , es la temperatura media logarítmica.

El coeficiente global de transferencia de calor entre la burbuja y el agua, se determina mediante la ecuación (25), teniendo en cuenta que entre la burbuja y el líquido se desprecia el espesor de la zona de interface o zona de contacto entre la burbuja y el líquido, y por ende no se tendrá transferencia de calor por conducción, y el área interna y externa serían las mismas.

$$U_{b-h_2o} = \frac{1}{\frac{1}{h_b} + \frac{1}{h_{h_2o}}} \quad (25)$$

Donde: h_b , es el coeficiente de transferencia de calor por convección de la burbuja y h_{h20} , es el coeficiente de transferencia de calor por convección del liquido. Para hallar este último coeficiente se utilizaran las ecuaciones (19) hasta la (22).

Ahora bien, como se ha expresado en todo el modelo el factor importante es el coeficiente de transferencia de calor, por lo tanto usando la ecuación (19) expresada en función de la burbuja, tenemos que:

$$h_b = \frac{Nu_b \cdot k_b}{D_b} \quad (26)$$

Donde: k_b , conductividad térmica de la burbuja; D_b , es el diámetro de la burbuja; y el número Nusselt (Nu_b) queda expresado según Kalman et al [18], así:

$$Nu_b = 0.0041 \cdot P_e^{0.855} \quad (27)$$

Sabiendo que el número Peclet (P_e), esta dado por el productos entre el número Reynolds y Prandtl.

Para hallar el número Reynolds, es necesario conocer la velocidad de la burbuja (v_b), por lo tanto, Kalman et al [18] propone:

$$v_b = \left(\frac{2.14 \cdot \sigma_{H2O}}{\rho_{H2O} D_b} + 0.505 g D_b \right)^{1/2} \quad (28)$$

Donde: σ_{H2O} , es la tensión superficial del agua.

Para la temperatura media logarítmica, la ecuación (8) quedaría igual, solo cambiaran las ecuaciones (9) y (10), por las siguientes:

$$\Delta T_A = T_{h-in} - T_{c-out} \quad (29)$$

$$\Delta T_B = T_{h-out} - T_{c-in} \quad (30)$$

Capítulo 7. Resultados

Posteriormente, a la etapa de los cálculos y con todas las variables definidas se procedió a realizar el modelo matemático (anexo en copia magnética) asistido por software (Microsoft Excel) Los resultados de los cálculos se presentan en las tablas 1 a 10:

Propiedades para todo el proceso según la temperatura:

Tabla 1. Propiedades físicas H₂O

Propiedades para el agua a 293.15 K		
μ_{H_2O}	0.00100377	Kg/m.s
Cp_{H_2O}	4182.11	J/Kg.K
k_{H_2O}	0.60304	W/m.K
ρ_{H_2O}	998.372885	Kg/m ³
Pr_{H_2O}	6.9678	

Tabla 2. Propiedades físicas del Gas

Propiedades para el GE a 573.15 K		
μ_{GE}	2.96456E-05	Kg/m.s
Cp_{GE}	1045.093	J/Kg.K
K_{GE}	0.045289	W/m.K
ρ_{GE}	0.6085925	Kg/m ³
Pr_{GE}	0.683926	

Tabla 3. Propiedades físicas H₂O al final del proceso

Propiedades para el agua a 313.15 K		
μ_{H_2O}	0.00065468	Kg/m.s
Cp_{H_2O}	4178.63	J/Kg.K
k_{H_2O}	0.63178	W/m.K
ρ_{H_2O}	991.8085788	Kg/m ³
Pr_{H_2O}	4.3302	

Tabla 4. Propiedades físicas del Gas al final del proceso

Propiedades para el GE (burbuja) a 415.6 K		
μ_{GE}	2.36527E-05	Kg/m.s
Cp_{GE}	1016.184	J/Kg.K
K_{GE}	0.034892	W/m.K
ρ_{GE}	0.8408048	Kg/m ³
Pr_{GE}	0.68688	

Para hallar los coeficientes globales de transferencia de calor los números adimensionales hallados se presentan en la siguiente tabla:

Tabla 5. Números adimensionales

Numero adimensional	Valores
Re_{GE}	5067.756478
Nu_{GE}	16.3187397
Re_{H2O}	8288.52629
Nu_{H2O}	113.490811
Re_b	43440343.64
Nu_b	10110.71032
Re_{H2O}	12624.5975
Nu_{H2O}	120.9610872

Tabla 6. Coeficientes globales

Coefficiente de transferencia por convección	Valores	Unidades
GE (h_i)	32.27333635	W/m ² *K
Agua (h_e)	2694.46844	W/m ² *K
Burbuja (h_b)	50.42655308	W/m ² *K
Agua (h_e)	10.92353757	W/m ² *K
$U_{SCCS}A$	2.51960414	W/K
U_{b-h2o}	8.9785743	W/m ² *K

Tabla 7. Flujos

Flujos de calor	Valores	Unidades
$Q_{punto.SCCS}$	444.946451	W
Q_{b-h2o}	8.93606815	W

Tabla 8. Temperaturas

Variable	Valores	Unidades
T_{inH2O}	293.15	K
T_{inGE}	573.15	K
T_{FnH2o}	333	K
T_{FnGE}	412	K

Tabla 9. Dimensiones del tanque

Variable	Valores	Unidades
Largo	0.5	m
Ancho	0.5	m
Alto	0.5	m

Tabla 10. Dimensiones del tubo

Variable	Valores	Unidades
Tubo perforado C/U	0.2	m
Tubo	0.4	m
Número de perforaciones	220	
Diámetro perforaciones	0.002	m
Diámetro Tubo	1	ln
Diámetro Tubo perforado	1	ln
Espesor Tubo	1.25	
Espesor Tubo Perforado	1.25	

Con todo el proceso de los modelos matemáticos obtuvimos como resultados las dimensiones del tanque y la tubería que serian mas idóneas para llegar a la temperatura deseada, generando 60° de temperatura a la salida como definitiva para el proceso; así como mostramos en las tablas anteriores el modelo para el tanque es el siguiente:

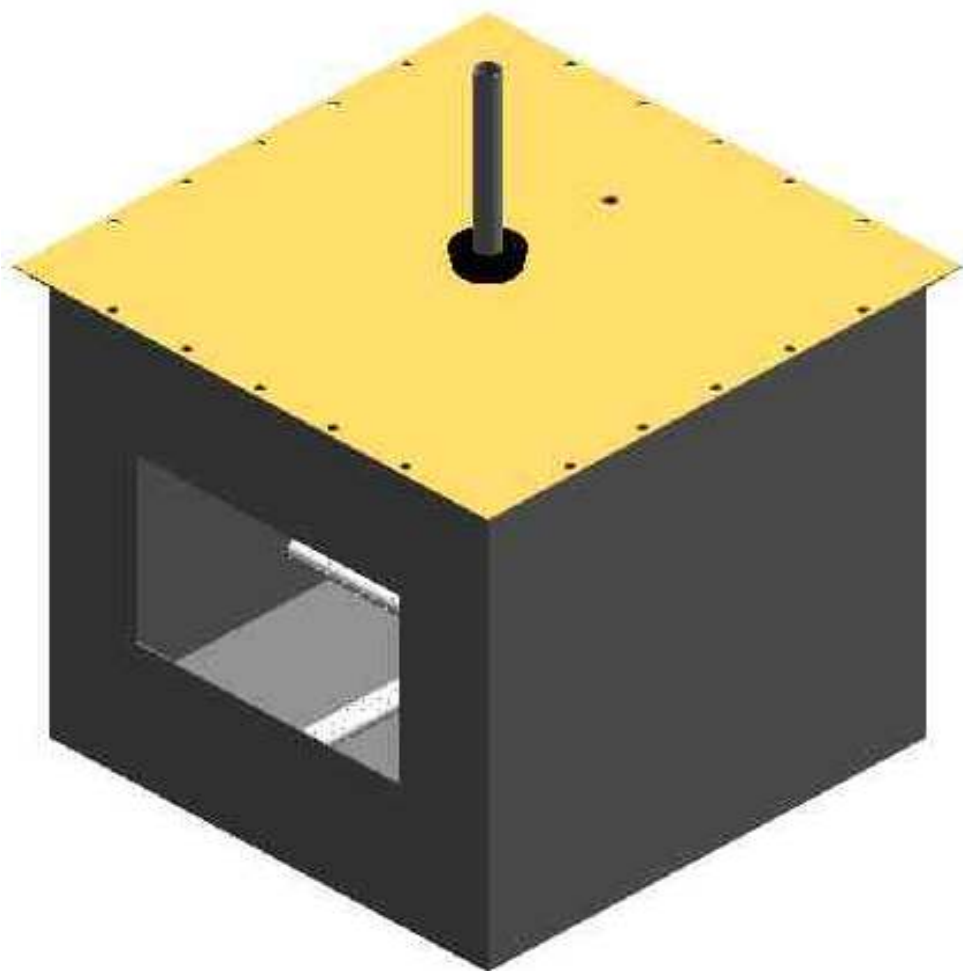


Figura 6. Isométrico del tanque

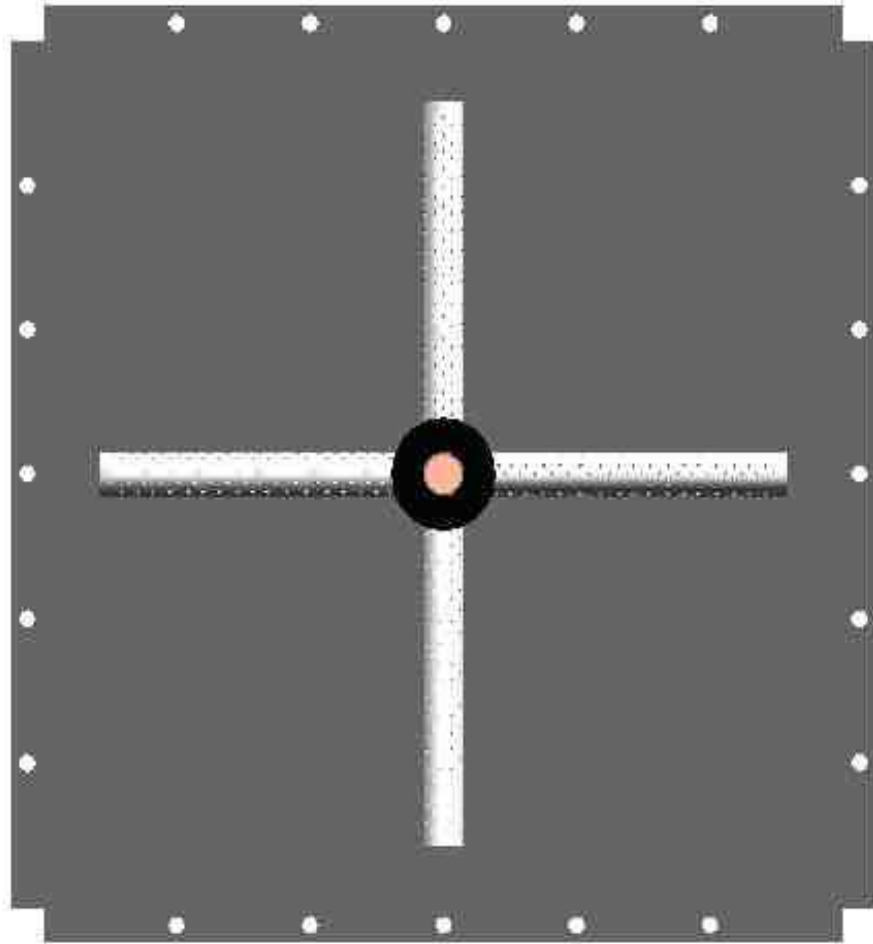


Figura 7. Vista superior del tanque sin tapa

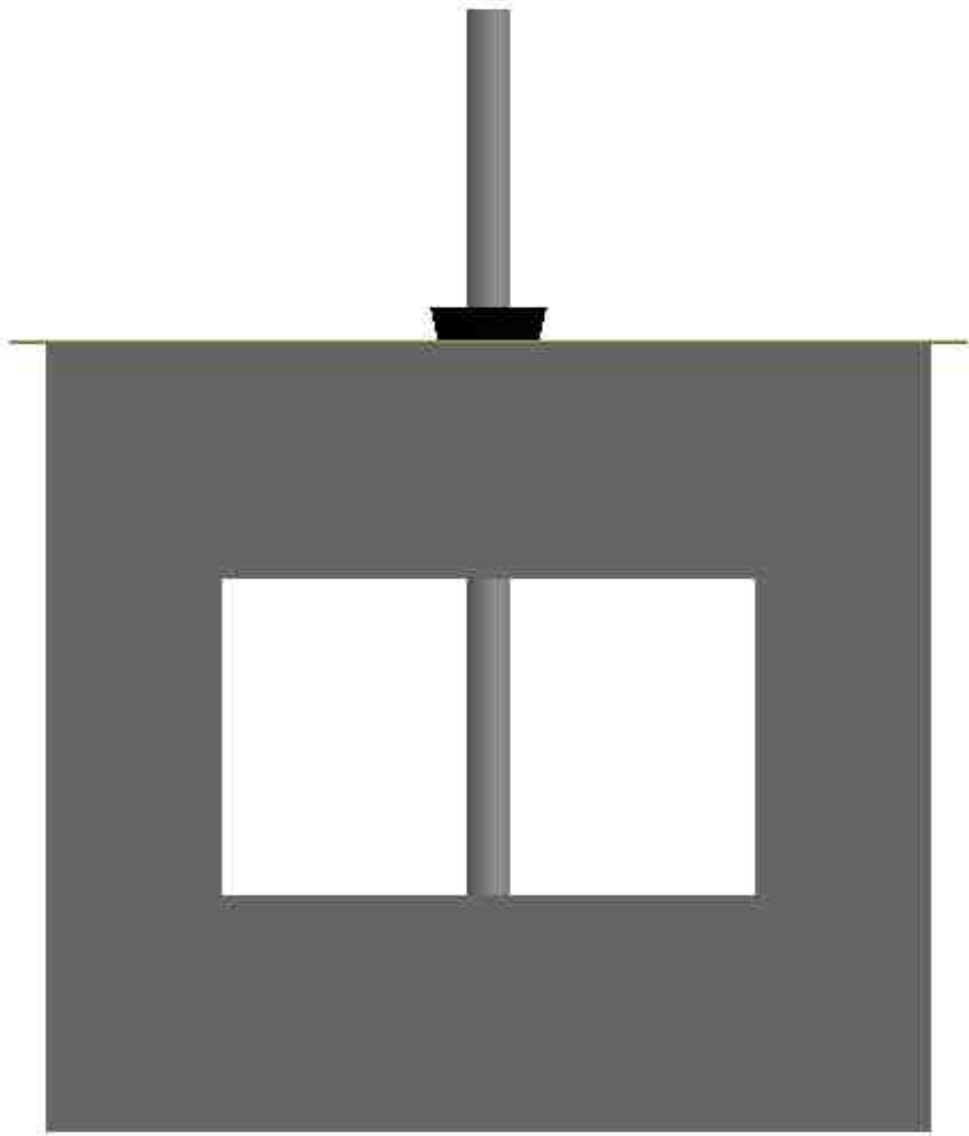


Figura 8. Alzado del tanque

Capítulo 8. Análisis de los resultados

Para iniciar los modelos de cálculo del sistema de combustión sumergida lo primero fue dividir los cálculos en la transferencia interna y la externa (burbuja), lo segundo escoger una de las ecuaciones de equilibrio de flujo másico, podía ser la ecuación en la que trabajábamos con el cambio de temperaturas o las entalpías, escogimos las temperaturas, luego teniendo en cuenta las consideraciones ya descritas anteriormente, con la temperatura media logarítmica y sabiendo que el flujo es paralelo hallamos el coeficiente global de transferencia por convección; después de tener esto claro pasamos a calcular el número Nusselt para esto buscamos en tablas el Prandtl y el número de Reynolds de las ecuaciones térmicas, como los valores no eran exactos interpolamos y con los resultados obtenidos llegamos a utilizar la relación modificada por Gnielinski. Para calcular el factor de transferencia externa realizamos un proceso similar con la excepción del flujo que en este caso es cruzado y el número Nusselt está dado por la relación de Kalman que asocia el número Reynolds con la velocidad de la burbuja.

Con este modelo los resultados en cuanto a temperatura fueron: en el agua se pasó de una temperatura de 20°C a una temperatura de 60°C, un incremento de 20°C en la primera etapa y los otros 20°C en la segunda etapa. Donde el proceso de la segunda etapa fue más rápido y eficiente, esto debido al contacto directo entre el flujo de gases de combustión (burbuja) y el agua a calentar.

En el proceso de diseño del prototipo, después de tener las dimensiones, se hicieron las siguientes consideraciones:

El diámetro de una pulgada ayuda para que el flujo sea constante, no se genere turbulencia; el espesor del tubo se tomó de 1.25 porque es el más delgado y esto es beneficioso en la transferencia por convección.

La distribución en cruz de los tubos perforados se hizo para lograr un área mayor de contacto y de igual manera hacer más eficiente la transferencia; en el diseño se propuso sujetar con un caucho cónico el tubo, como se puede observar en las figuras 7 y 9, para variar la altura de los mismos y así en un futuro puedan analizar los cambios y eficiencias que tiene el sistema según las diferentes posiciones de los tubos perforados; además en la tapa tiene una salida de gases donde se pueden conectar diferentes instrumentos de medición, para conocer diferentes parámetros como acidez del agua, temperatura de gases y agua, composición final de los gases de escape; el diseño de la tapa se basó en la premisa de evitar fuga de gases y así perder capacidad de transferencia, por este motivo es plana, con empaque entre el tanque y la tapa sujeta por tornillos.

El tanque también cuenta con dos ventanas que sirven para ver el comportamiento del sistema cuando varía la altura del tubo y estudiar las velocidades de la burbuja de la que depende el coeficiente global de transferencia en la segunda etapa del estudio.

Capítulo 9. Conclusiones

- La investigación en el proceso de combustión sumergida siempre ha sido enfocada en el estudio de quemadores acoplados a un sistema tubular perforado para incrementar tiempos y eficiencias de transferencia de calor. En este trabajo aunque también se trabaja con productos de combustión, se le dio un enfoque diferente al no utilizar un proceso directo que nos genere estos gases, si no, un proceso en el cual los gases de combustión son productos residuales con altas cargas de energía térmica.
- Al utilizar gases de escape de una planta de generación de energía mediante un motor de combustión interna, para calentar mediante la combustión sumergida, se puede concluir que se abarcarían varias necesidades en cuanto a reducción de gases de efecto invernadero y además recuperación de energía de un calor residual, donde se estaría realizando reducción de emisiones de CO₂ a las atmosfera por la capacidad que tiene el agua en capturarlo y además realizar calentamiento de agua en procesos específicos con mejor eficiencia y disminución de costos.
- Durante el trabajo uno de los esfuerzos arduos fue encontrar un modelo de transferencia de calor desde la burbuja hacia el agua, donde lo mas importante fue encontrar una correlación del numero de Nusselt adecuada. En muchos trabajos realizan enfoques en la transferencia de masa y por ende una transferencia de calor en función a está, en el caso de este trabajo dejamos un poco de lado la transferencia de masa para tener un modelo de calculo de la transferencia de calor menos compleja y así poder hacer una buena aproximación a un proceso real.
- Por medio de la implementación de herramientas de análisis, métodos, expresiones y simulaciones matemáticas y graficas se logró obtener información y modelos concretos en el proceso de calentamiento de agua por medio de la combustión sumergida.
- El principal obstáculo para la implementación a gran escala de este sistema es la falta de conocimiento del público de esta beneficiosa tecnología y la desconfianza que genera todo cambio que requiere inversión.
- Los principales beneficios de la combustión sumergida son los bajos costos de mantenimiento, la fácil incorporación a las plantas de trabajo, el comportamiento amigable con el medio ambiente.
- El periodo de investigación para nosotros fue de gran ayuda para el crecimiento académico y de profundización en las áreas de termodinámica y transferencia de calor una materia que no estaba incluida dentro de nuestro plan de estudios importante para nuestro campo de acción en el mercado laboral.
- Fomentar la investigación dentro de la universidad a través de semilleros como el nuestro mejoraría la calidad académica y de egresados de la misma.

Capítulo 10. Recomendaciones

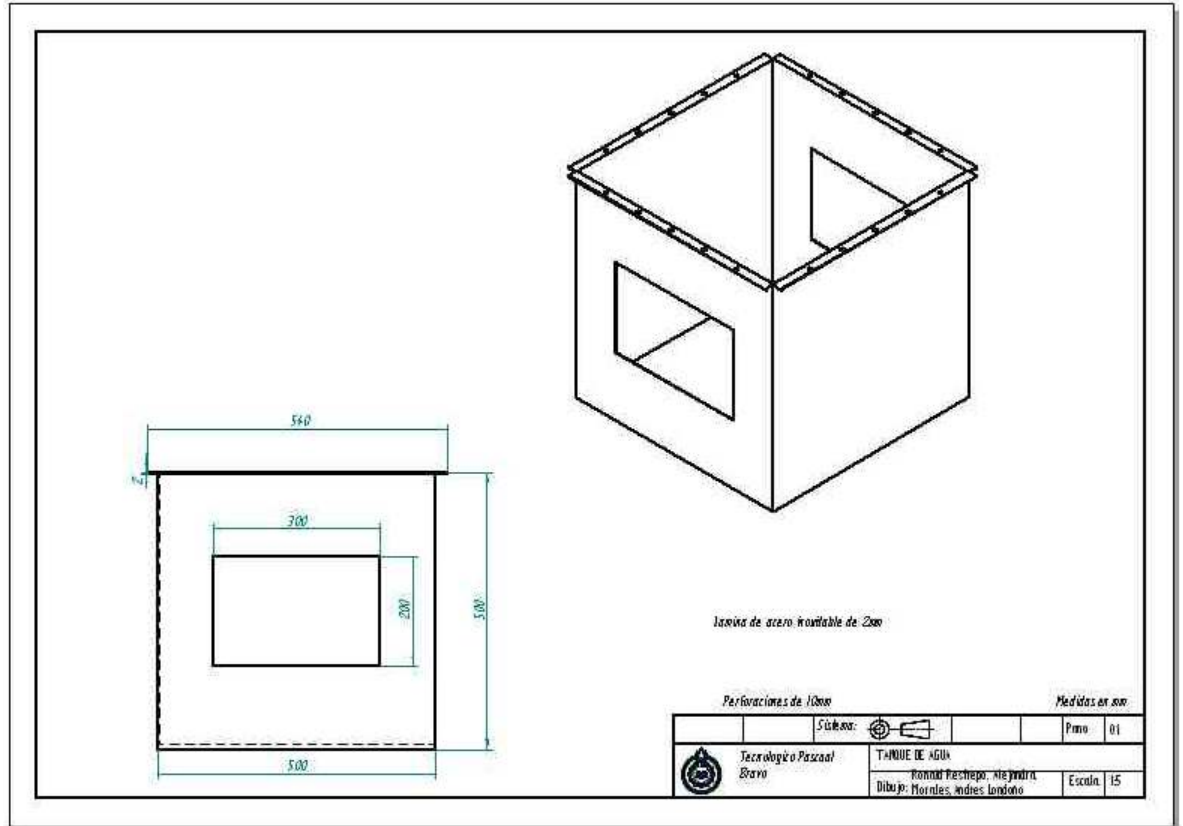
De este trabajo se desprende una serie de recomendaciones enfocadas a futuros proyectos, que se pueden abordar en la institución con aras a la investigación de desarrollos tecnológicos en calentamiento de baños a bajas temperaturas y reducción de emisiones de gases de efecto invernadero, por lo tanto se mencionan algunos proyectos con los que se puede fortalecer este primer aporte:

- Evaluación de la reducción de emisiones de CO₂ mediante la combustión sumergida usando gases de escape de un motor de combustión interna.
- Evaluación de profundidad o inmersión de los tubos perforados en un sistema de calentamiento mediante la combustión sumergida usando gases de escape de un motor de combustión interna.
- Evaluación técnica y económica de un sistema de cogeneración para generación de energía eléctrica y calentamiento de baños.

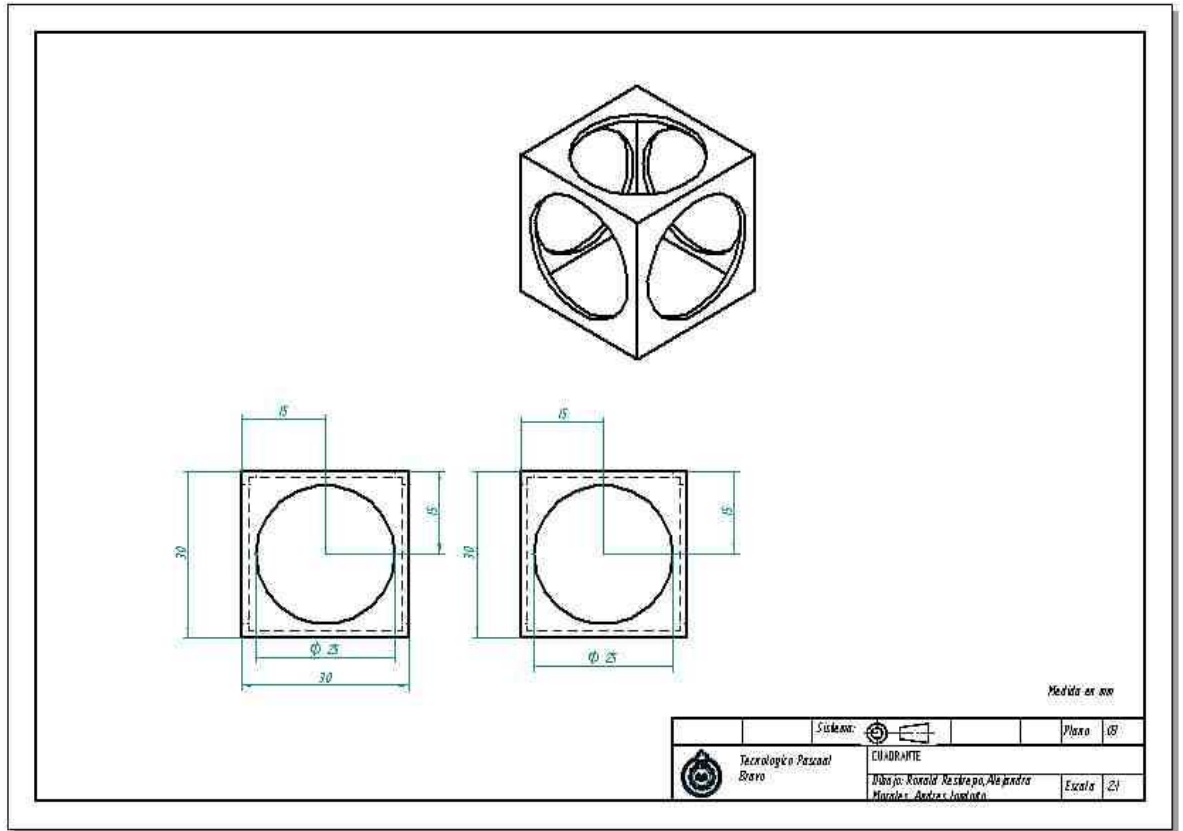
Referencias

1. Collier, J.G. Submerged combustion. www.thermopedia.com/content/1164/
2. Jaime A. Hernández Vélez, Jaime H. Cortes Torres, Andrés Amell Arrieta. Calentamiento de fluidos con tubos inmersos: una alternativa eficiente para uso industrial. gasure.udea.edu.co/docs/Calentamiento%20de%20fluidos%20con%20tubos%20inmersos%20una%20alternativa%20eficiente%20paa%20uso%20a%20nivel%20industrial.pdf
3. Collier, J.G. Submerged combustion. www.thermopedia.com
4. Definición, fertilización de plantas por dióxido de carbono. www.forumnatura.eu/index.php?option=com_glossary&letter=F&id=172&Itemid=9
5. Chejne Farid, Sánchez Katerina y Amell Arrieta. Análisis energético industrial del Valle de Aburra. Centro de Publicaciones Universidad Nacional de Colombia Sede Medellín. 2007.
6. Aplicaciones avanzadas del gas natural en procesos industriales de baja temperatura. Serie tecnológico – Energética. Ente Vasco de la Energía. 1990.
7. <http://html.rincondelvago.com/transferecia-de-calor-por-conduccion.html>.
8. http://www.telecable.es/personales/albatros1/calor/transferecia_de_calor_05_conveccion.htm.
9. Intercambiadores de calor. Termodinámica.
10. 2006-08-04: Ing. Liliana García BIR Refrigeración. Intercambiador de casco y placas.
11. Diseños de equipos e instalaciones. Intercambiadores de calor. Tema 7
12. Aplicaciones avanzadas del gas natural en procesos industriales de baja temperatura. Serie tecnológico – Energética. Ente Vasco de la Energía. 1990.
13. Baukal, Charles E. Heat and Transfer in Industrial Combustion. CRC Press. Estados Unidos. 2000.
14. Minton, Paul, E. handbook of Evaporation Technology. Noyes Publications. Estados Unidos. 1986.
15. GNIELINSKI, V. New equations for heat and mass transfer in turbulent pipe and channel flow. In: International Chemical Engineering. Vol.16. (1976); p.359-368
16. CHURCHILL, S. W. Frictional equation spans all fluid flow regimes. In: Chemical Engineering. Vol.84. (1977); p.91-92.
17. Churchill, S. W. y M. Berstein, J. Heat Transfer, 99, 300, 1977.
18. Kalman H., Mori Y.H. Experimental analysis of a single vapor bubble condensing in sub cooled liquid. In: Chemical Engineering Journal. Vol.85. (2002); p.197-206.

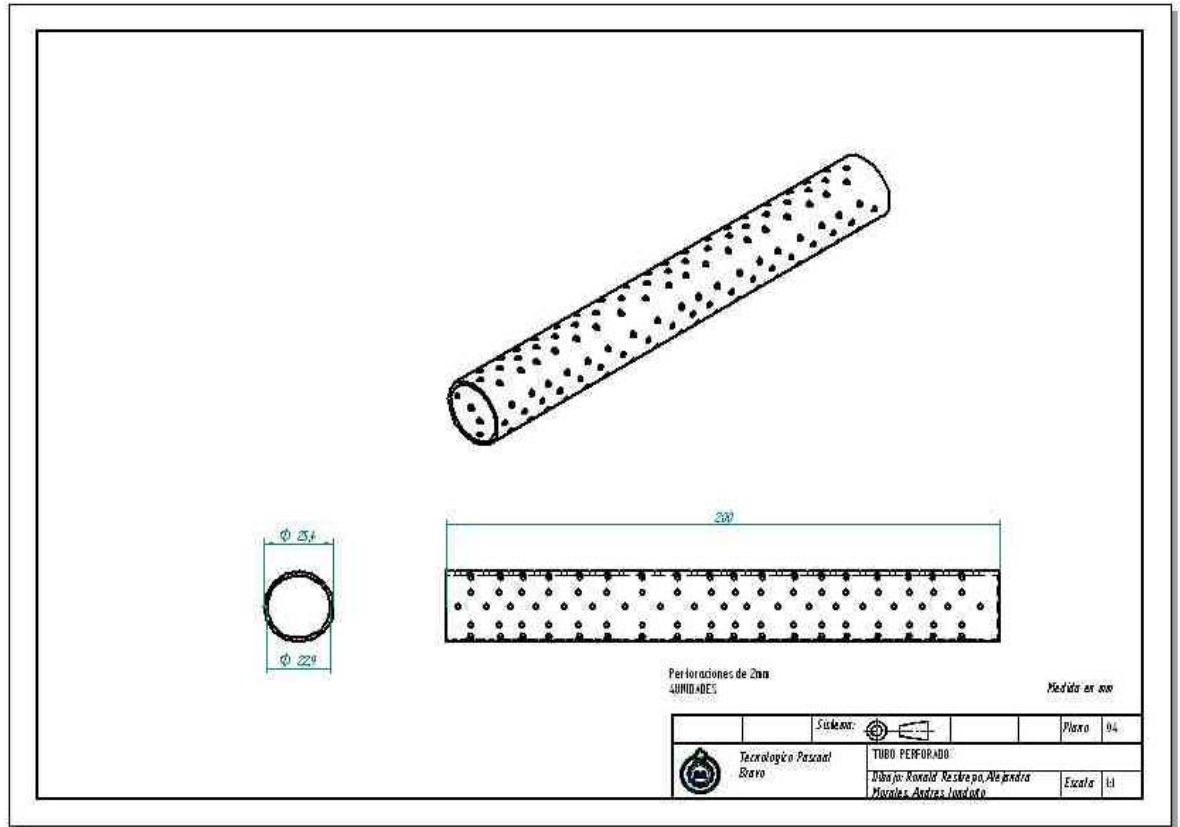
Anexos



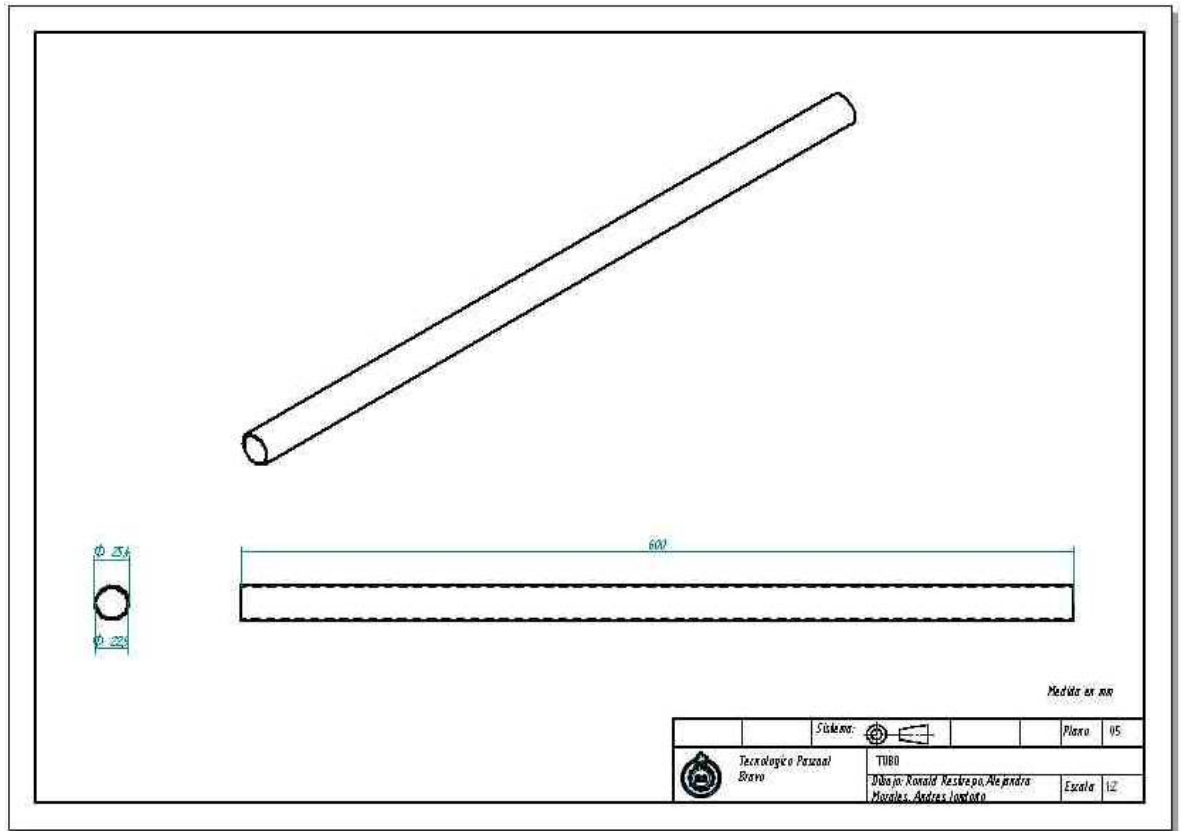
Anexo 1. Plano del tanque



Anexo 3. Plano cuadrante para tubos



Anexo 4. Plano tubo perforado



Anexo 5. Plano de tubo