

**DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UNA MINI CALDERA PIROTUBULAR
PARA EL LABORATORIO DE TRANSFERENCIA
DE CALOR**

**OMAR ARTURO IGUARÁN DUARTE
DIANA MILENA MARTÍNEZ BARRIOS**



**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FISICOMECÁNICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA
BUCARAMANGA
2008**

**DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UNA MINI CALDERA PIROTUBULAR
PARA EL LABORATORIO DE TRANSFERENCIA
DE CALOR**

**OMAR ARTURO IGUARÁN DUARTE
DIANA MILENA MARTÍNEZ BARRIOS**

**Trabajo de grado presentado como requisito para optar al título de
Ingeniero Mecánico**

**Director
OMAR GÉLVEZ AROCHA
Ingeniero Mecánico**



CONSTRUIMOS FUTURO

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FISICOMECAÑICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA
BUCARAMANGA
2008**

**La nota de la Estudiante Diana Milena Martínez se encuentra pendiente
debido a que debe sustentar cuando regrese del intercambio de la
Universidad de *OKLAHOMA***

*A mis Padres por la confianza,
amor y empeño para lograr con
éxito esta meta, que es solo
el principio del camino. . .*

CONTENIDO

	Pág.
INTRODUCCIÓN	1
1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	2
1.1 IDENTIFICACIÓN DEL PROBLEMA	2
1.2 JUSTIFICACIÓN PARA SOLUCIONAR EL PROBLEMA	3
1.3 OBJETIVOS DEL TRABAJO DE GRADO	3
1.3.1 Objetivo General.	3
1.3.2 Objetivo Específico.	4
2. GENERALIDADES	5
2.1 CALDERA PIROTUBULAR	6
2.2 COMPONENTES DE UNA CALDERA PIROTUBULAR	8
2.2.1 Quemador	8
2.2.2 Haz de tubos	9
2.2.3 Casco	10
2.2.4 Chimenea	11
3. PROCESO DE DISEÑO DE LA MINI CALDERA	12
3.1 DISEÑO TÉRMICO	12
3.1.1 Datos de entrada Para el Diseño Térmico.	13
3.1.2 Calor total requerido en la mini caldera.	14
3.1.3 Cálculo de área de transferencia de calor.	21
3.1.4 Proceso de cálculo y resultados del diseño térmico.	30
3.2 DIMENSIONAMIENTO FINAL DE LA MINI CALDERA.	31
3.3 DISEÑO MECÁNICO	32
3.3.1 Cálculo del espesor del cuerpo de la caldera	33
3.3.2 Cálculo del espesor de los tubos de la caldera	34

3.3.3 Placa porta tubos	35
3.3.4 Cálculo de brida	39
3.4 SISTEMAS DE MEDICIÓN Y CONTROLES BÁSICOS	47
3.4.1 Control de presión	48
3.4.2 control de nivel	48
+3.4.3 Control de llama	48
4. PROCESO DE CONSTRUCCIÓN DE LA MINI CALDERA	51
4.1 SELECCIÓN DE MATERIALES	52
4.2 CONSTRUCCIÓN	53
4.2.1 Construcción de las bridas.	53
4.2.2 Construcción del casco.	54
4.2.3 Construcción del haz de tubos.	55
4.2.4 Construcción de la chimenea.	56
5. CONDICIONES DE OPERACIÓN DE LA MINICALDERA	57
5.1. REVISIÓN DE LA UNIDAD	57
5.2. CUIDADOS CON LA CALDERA	57
5.2.1. Durante la apagada.	57
5.2.2. Durante el encendido.	57
5.2.3. En operación.	58
5.3. DURANTE EL MANTENIMIENTO	58
6. PRUEBAS DE CAMPO	60
6.1 PRUEBA HIDROSTÁTICA.	60
6.2 CUIDADOS EN LA PRUEBA HIDROSTÁTICA.	61
6.2.1 Resultados de la Prueba Hidrostática.	62
6.3 PRUEBA DE BRIDAS	62
7. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	64
BIBLIOGRAFÍA	66
ANEXOS	68

LISTA DE CUADROS

	Pág.
Cuadro 1. Resultados de el proceso iterativo en el cálculo de la temperatura de llama adiabática con aire estequiométrico.	20
Cuadro 2. Resultados de el proceso iterativo en el cálculo de la temperatura de llama adiabática considerando el exceso de aire en la estequiometría.	21
Cuadro 3. Variación de la longitud en el proceso iterativo realizado en Matlab,	30
Cuadro 4. Materiales de los empaques y ancho del empaque	39
Cuadro 5. Formatos para cálculos de bridas	40
Cuadro 6. Especificación de los materiales utilizados.	52

LISTA DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1. Generalidades del proceso de diseño y construcción de una mini caldera pirotubular.	5
Figura 2. Esquema de una caldera pirotubular común.	6
Figura 3. Caldera pirotubular.	7
Figura 4. Componentes de una caldera pirotubular.	8
Figura 5. Disposición del quemador en la mini caldera	9
Figura 6. Haz de tubos de la caldera pirotubular	9
Figura 7. Casco de la mini caldera	10
Figura 8. Chimenea de la mini caldera	11
Figura 9. Diseño Térmico de la mini caldera.	12
Figura 10. Diagrama del proceso de diseño térmico	13
Figura 11. Condiciones de la mini caldera.	14
Figura 12. Diagrama de la analogía eléctrica de la transferencia de calor en el casco de la mini caldera.	15
Figura 13. Diagrama de transferencia de calor a lo largo de un tubo en la mini caldera.	22
Figura 14. Diagrama de un diferencial de tubo.	22
Figura 15. Superficie Disponible para la distribución de tubos en la mini caldera.	24
Figura 16. Nivel de agua requerido en la mini caldera.	25

Figura 17. Balance de energía en un diferencial de longitud.	26
Figura 18. Graficas de Emisividad y absorptividad del CO ₂ y H ₂ O.	29
Figura 19. Resultado del program 3 de emisividades y absorptividades del CO ₂ y H ₂ O.	29
Figura 20. Grafico obtenido de MATLAB. Calor ganado por tubo vs Temperatura	30
Figura 21. Dimensionamiento final de la mini caldera	31
Figura 22. Radio y espesor de la tubería seleccionada para el casco.	33
Figura 23. Radio, espesor y longitud de la tubería seleccionada para los tubos.	34
Figura 24. Sección transversal de la tubería seleccionada.	35
Figura 25. El área transversal interna del casco	36
Figura 26. Área transversal de los agujeros de la placa porta tubos	36
Figura 27. Brida superior (ϕ 10")	40
Figura 28. Brida inferior (ϕ 10")	42
Figura 29. Brida inferior (ϕ 12")	45
Figura 30. Diagrama de bloques de la caja de control	47
Figura 31. Diagrama de bloques de la caja de control	49
Figura 32. Diagrama de flujo de la tarjeta de control	49
Figura 33. Diagrama eléctrico general	50
Figura 34. Diagrama eléctrico de la tarjeta de control	50
Figura 35. Diagrama del proceso de construcción de la mini caldera	51

Figura 35. Taladrado de la placa porta tubo	50
Figura 36. Construcción de la bridas	53
Figura 37. Taladro de brida	53
Figura 38. Corte de tubos	54
Figura 39. Rectificado de tubo	54
Figura 40. Taladrado de la placa porta tubo	55
Figura 41. Ubicación del tubo	55
Figura 42. Soldadura del haz de tubo	56
Figura 43. Pulido del haz de tubo	56

LISTA DE ANEXOS

	Pág.
Anexo 1. Procedimiento del diseño técnico	69
Anexo 2. Programa del PIC 16F873A	75
Anexo 3. Planos de la mini caldera	80

RESUMEN

TITULO:

DISEÑO Y CONSTRUCCION DE UNA CALDERA PIROTUBULAR PARA EL LABORATORIO DE TRANSFERENCIA DE CALOR*

AUTORES:

IGUARÁN DUARTE, OMAR ARTURO; MARTÍNEZ BARRIOS, DIANA MILENA **

PALABRAS CLAVES:

Caldera Pirotubular, Generación de vapor, Diseño y Construcción, Quemador, Haz de Tubos, Chimenea.

DESCRIPCIÓN:

Este Documento tiene por objeto establecer un conjunto de parámetros asociados al Diseño y Construcción de una Mini Caldera Pirotubular que será utilizada en el laboratorio de Transferencia de Calor de la escuela de Ingeniería mecánica de la Universidad Industrial de Santander, la caldera que acá se menciona servirá como instrumento didáctico y complementario a los bancos de pruebas presentes en dicho laboratorio.

La producción de vapor se utiliza en todo tipo de industrias de transformación de materias primas, es por esto que el diseño y construcción de una mini caldera como elemento constitutivo de un proceso donde se utiliza vapor tiene una gran importancia para el afianzamiento de los conceptos adquiridos y suple la necesidad existente en el laboratorio de producir una pequeña cantidad de vapor (12lb/h), representando ahorro de energía y tiempo, ya que actualmente la caldera del laboratorio produce 650 lb/h de vapor en un tiempo bastante prolongado.

La caldera construida cuenta con diez tubos lisos en material A106, cuatro bridas en material A36, el casco esta construido en material A106, el quemador es de tiro forzado y trabaja con gas natural, el control de llama se realiza mediante una tarjeta programada, los procedimientos de construcción se desarrollaron mediante la norma ASME lo que indica que se siguieron lineamientos comerciales para el diseño construcción y fabricación, demostrando la gran importancia que tiene el acogerse a los códigos que son los que se utilizan en el desarrollo real de la profesión.

*Trabajo de Grado-Modalidad Investigación.

**Facultad de Ingenierías Fisico-Mecánicas, Escuela de Ingeniería Mecánica. Ing. Omar Gelvez Arocha

SUMMARY

TITLE:

DESIGN AND CONSTRUCTION OF A PIROTUBULAR BOILER FOR THE HEAT TRANSFER LAB *

AUTHORS:

IGUARÁN DUARTE, OMAR ARTURO; MARTÍNEZ BARRIOS, DIANA MILENA **

KEYWORD:

Pirotubular Boiler, Steam Generation, Design and Construction, Burner, Beam of Tubes, Chimney.

DESCRIPTION:

This Document intends to establish a set of parameters associated to the Design and Construction of a Mini Pirotubular Boiler that will be used in the Heat Transference laboratory of the mechanical Engineering school of the UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER, the boiler that is mentioned here will serve like didactic and complementary instrument to the present bench in this laboratory.

The steam production is used in all type of industries of transformation of raw materials, is by which the design and construction of a mini boiler like constituent element of a process where it is used steam has a great importance for the reinforcement of the acquired concepts and replaces the existing necessity in the laboratory to produce a small amount of steam (12lb/h), representing saving of energy and time, since at the moment the boiler of the laboratory produces 650 lb/h of steam in a prolonged time.

The constructed boiler account with ten smooth tubes in material A106, four flange in material A36, the constructed helmet this in A106 material, the burner is of forced shot and works with natural gas, the flame control is realized by means of a programmed card, the construction procedures were developed base on the norm ASME which indicates that commercial lineaments were followed for the design construction and manufacture, demonstrating the great importance that is to take refuge in the codes that are those that is used in the real development of the profession.

*Trabajo de Grado-Modalidad Investigación.

**Facultad de Ingenierías Fisico-Mecánicas, Escuela de Ingeniería Mecánica. Ing. Omar Gelvez Arocha

INTRODUCCIÓN

El diseño y construcción de elementos mecánicos, demuestra una clara aplicación de la ingeniería mecánica; es allí en donde además de poner en marcha los conocimientos adquiridos durante la carrera, se pueden suplir necesidades existentes en el entorno.

El propósito del presente trabajo es proveer de una mini caldera el Laboratorio de Transferencia de calor para suplir las necesidades de rango bajo (bajo requerimiento de vapor) cuando se necesita poner en operación tan solo uno o muy pocos bancos pertenecientes a este laboratorio.

El laboratorio de Transferencia de calor de la escuela de Ingeniería Mecánica, en la Universidad Industrial de Santander, presta el servicio de recinto para practicar los conceptos adquiridos en las materias térmicas durante el aprendizaje de la ingeniería como base del desarrollo personal del estudiante.

La producción de vapor se utiliza en todo tipo de industrias de transformación de materias primas, es por esto que el diseño y construcción de una mini caldera como elemento constitutivo de un proceso donde se utiliza vapor tiene una gran importancia para el afianzamiento de los conceptos adquiridos y sule la necesidad existente en el laboratorio de producir una pequeña cantidad de vapor (12lb/h), representando ahorro de energía y tiempo, ya que actualmente la caldera del laboratorio produce 650 lb/h de vapor.

1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

1.1 IDENTIFICACIÓN DEL PROBLEMA

El laboratorio de Transferencia de calor de la Escuela de Ingeniería Mecánica cuenta con dos Calderas Piro-tubulares, para generación del vapor necesario para los procesos propios de los bancos educativos que en el se encuentran.

Una de ellas es de una capacidad de generación de vapor 650 lb/h a 150 psi cuya función principal es alimentar la planta térmica, esta caldera cumple en exceso con el requerimiento de vapor de varios bancos en funcionamiento al mismo tiempo, mientras que la otra es de una capacidad de 7 lb/h a 15 psi y no alcanza a cumplir con el requerimiento de vapor si varios de los bancos se encienden simultáneamente.

El tiempo que gasta la caldera grande en generar vapor desde que se enciende hasta que se obtiene la temperatura adecuada es relativamente alto, representando pérdidas económicas por el combustible que se gasta debido al exceso de producción de vapor.

La caldera mediana se encuentra fuera de las instalaciones del laboratorio, esto origina una difícil verificación y control de las variables de operación, de igual manera esta no suministra el vapor necesario para realizar diferentes prácticas a la vez, reflejándose en un problema ya que los cursos de laboratorio cuentan con un gran número de estudiantes por práctica.

Una caldera pequeña permitiría que los estudiantes puedan apreciar las prácticas de la manera más eficaz y no pasar la mayoría del tiempo en

espera de que se genere el vapor y así aportar o participar activamente en la práctica que se este realizando.

1.2 JUSTIFICACIÓN PARA SOLUCIONAR EL PROBLEMA

Con este trabajo de grado, se busca diseñar y construir un equipo que economice el consumo de combustible y que cumpla con los requerimientos de producción de vapor ya sea para pocos equipos encendidos o que sirva de apoyo para una combinación de caldera mediana y caldera pequeña, asegurando un aprendizaje de calidad para formar ingenieros mecánicos con una mayor experiencia en procesos térmicos cuyo campo de acción es inmenso y de gran importancia a nivel industrial.

En el estudio de las alternativas de solución para el problema existente en el laboratorio de transferencia de calor se definió que la opción más viable es construir una mini caldera pirotubular portátil alimentada por gas natural que como su nombre lo indica es de baja producción de vapor, tamaño pequeño, de fácil manejo y traslado.

El diseño de este equipo generador de vapor se guiará en la sección IV y VIII del código ASME para recipientes a presión, ya que es el procedimiento ingenieril más confiable y utilizado, puesto que garantiza un diseño confiable bajo todas las normas y factores de seguridad.

1.3 OBJETIVOS DEL TRABAJO DE GRADO

1.3.1 Objetivo General. Adecuar el laboratorio de transferencia de calor de la Escuela de Ingeniería Mecánica de la UIS con un servicio de generación de vapor; para los requerimientos específicos necesario para la alimentación de equipos pequeños, y de esta manera, aportar una herramienta necesaria

para el funcionamiento de estos bancos y futuros bancos donados al laboratorio, con lo cual se obtendrá un buen desempeño y entendimiento de las practicas; para un mejor aprendizaje de los procesos estudiados a través de los cursos transferencia de calor y transferencia de calor aplicada.

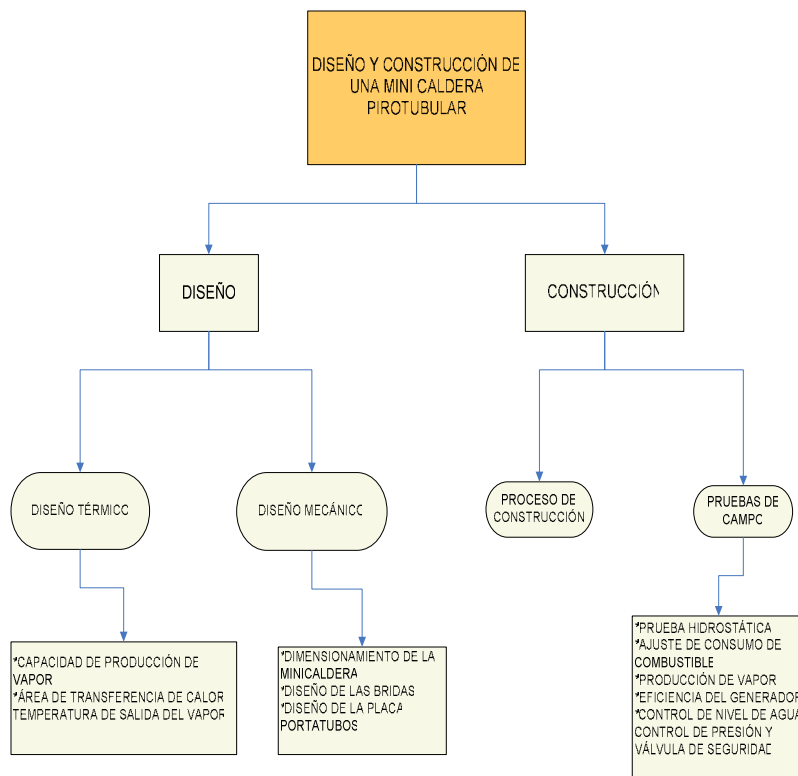
1.3.2 Objetivo Específico. Diseñar y construir una mini caldera pirotubular con las siguientes especificaciones

- ✓ Que genere el flujo de vapor 12 lb/h (El cual fue determinado, a partir de los requerimientos del consumo de vapor del laboratorio medido mediante una platina de orificio (flujometro), ver anexo).
- ✓ Presión de diseño de 60 lb/plg².
- ✓ Presión de trabajo de 20 lb/plg².
- ✓ Alimentada por gas natural.
- ✓ Alimentación de agua es de tipo manual.
- ✓ Un quemador atmosférico de aire forzado.
- ✓ Los sistemas de medición y/o control básicos (on-off) serán:
 - Visor de nivel de agua
 - Manómetro
 - Detector de llama térmico
 - Electro válvula de gas
 - Platina de orificio
 - Válvula de alivio
 - Presostato
- ✓ Diseño guiado bajo la norma ASME.

2. GENERALIDADES

En este trabajo de grado se realizó el diseño y construcción de una minicaldera tipo pirotubular con una capacidad de producción de vapor de 12 lb/h de vapor a una presión de diseño de 60 psi.

Figura 1. Generalidades del proceso de diseño y construcción de una minicaldera pirotubular.

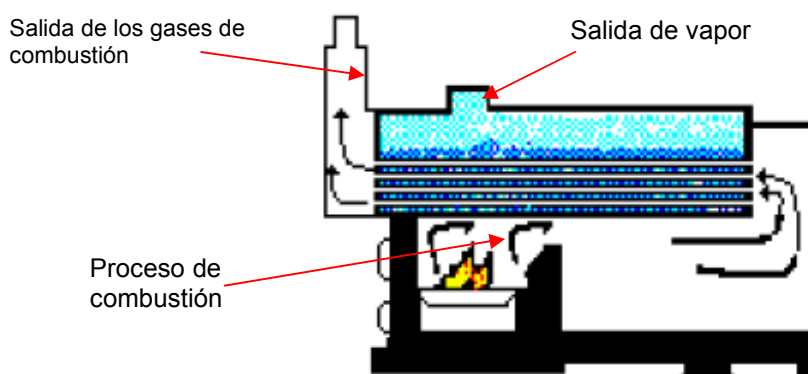


Para lograr entender de una mejor manera es necesario tener en cuenta los siguientes conceptos.

2.1 CALDERA PIROTUBULAR

La mini caldera diseñada y construida es de tipo pirotubular que es el más utilizado en la industria para aplicaciones pequeñas, como energía de calor.

Figura 2. Esquema de una caldera pirotubular común.



Fuente: Manual operativo de Calderas. ECOPEPETROL.

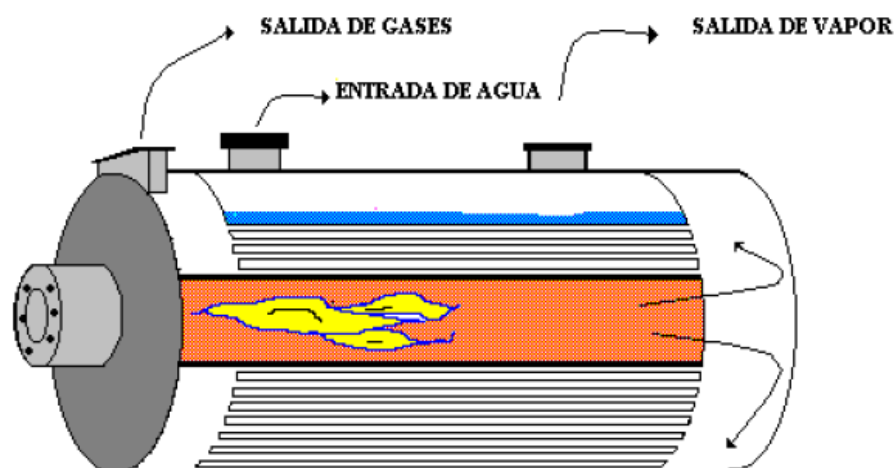
El esquema mostrado en la figura 2 muestra la disposición del proceso de generación de vapor en una caldera pirotubular, nombre que se le da ya que en ellas el calor es transferido desde los gases de combustión, que fluyen por el interior de los tubos, a el agua que los rodea.

El combustible es normalmente quemado debajo del casco y los gases son orientados a entrar en los tubos que se hallan en el interior del tambor de agua, haciendo su recorrido en uno o más pasos. El vapor sale por la parte superior del tambor y la entrada de agua está generalmente $2/3$ de la altura de los tubos.

Las altas presiones son una de las mayores limitantes de estas calderas. La fuerza que se ejerce a lo largo del tambor es dos veces la fuerza que se ejerce alrededor de la circunferencia. De lo anterior se deduce que para altas presiones y mayores capacidades se necesitarían paredes extremadamente gruesas, lo que las hace antieconómicas.

Aunque su gran capacidad de almacenamiento de agua le da habilidad para amortiguar el efecto de amplias y repentinas variaciones de carga, este mismo detalle hace que el tiempo requerido para llegar a la presión de operación desde un arranque en frío sea considerablemente más largo que para una caldera acuotubular.

Figura 3. Caldera pirotubular.

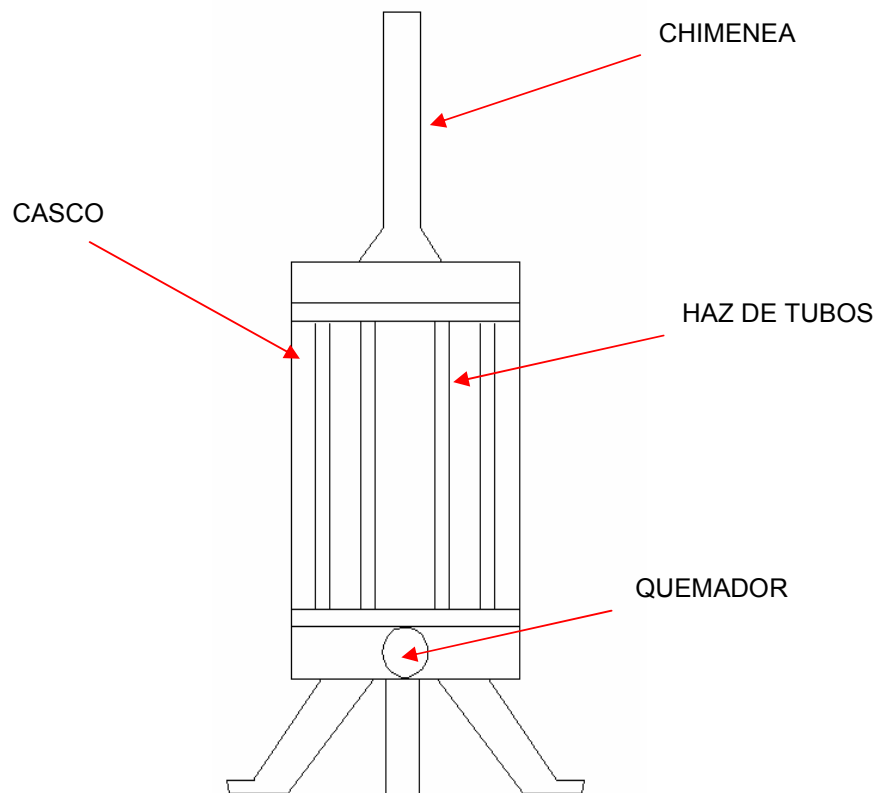


Fuente: Manual operativo de Calderas. ECOPEPETROL.

El tope práctico de presión para este tipo de caldera es de 250 psig y una producción hasta de 25.000 lbs/hora. Sin embargo en Europa se construyen unidades de hasta 30.000 lbs/hora de producción. Esto las hace recomendables para servicios donde la demanda de vapor sea relativamente pequeña y no se requiera su aplicación en turbinas.

2.2 COMPONENTES DE UNA CALDERA PIROTUBULAR

Figura 4. Componentes de una caldera pirotubular.



Para el diseño y construcción de una caldera pirotubular se deben tener en cuenta los elementos fundamentales que la constituyen, a continuación se referencian:

2.2.1 Quemador. Es el elemento de la caldera encargado de suministrar y acondicionar el combustible para mezclarlo con el aire y obtener una buena combustión. Debe producir una llama estable y uniforme de manera que se realice una cierta distribución en el hogar.

Figura 5. Disposición del quemador en la minicaldera



Los quemadores de gas son perforados y por sus orificios el gas debe salir a una velocidad mayor que la del aire para asegurar una penetración íntegra del chorro de aire.

2.2.2 Haz de tubos

Figura 6. Haz de tubos de la caldera pirotubular



Es el elemento de la caldera por el cual van los gases productos de la combustión que a su vez servirán para producir el vapor al contacto con el agua (intercambio de calor), deben ser de un material resistente a altas temperaturas y con una buena conductividad térmica, por lo general Acero A106, los haz de tubos se diseñan con una configuración de 90, 45 o 60°, dependiendo de la configuración seleccionada se obtendrá su respectivo paso longitudinal y transversal.

2.2.3 Casco

Figura 7. Casco de la minicaldera



El casco es el elemento que contiene en su interior el haz de tubos y al mismo tiempo el agua requerida para la producción de vapor, el casco es diseñado bajo criterios de presión, siendo su dimensión más importante el diámetro y el espesor, generalmente es de un material resistente a altas temperaturas y a altas presiones, para el diseño realizado se utilizó Acero A106.

2.2.4 Chimenea

Figura 8. Chimenea de la minicaldera



La chimenea es la encargada de evacuar los gases producto de la combustión al exterior, la caldera diseñada es de tiro atmosférico forzado, ya que el quemador posee un ventilador que hace que el flujo de los gases entre al haz de tubos y de la misma manera hace que se evacuen por la chimenea.

3. PROCESO DE DISEÑO DE LA MINI CALDERA

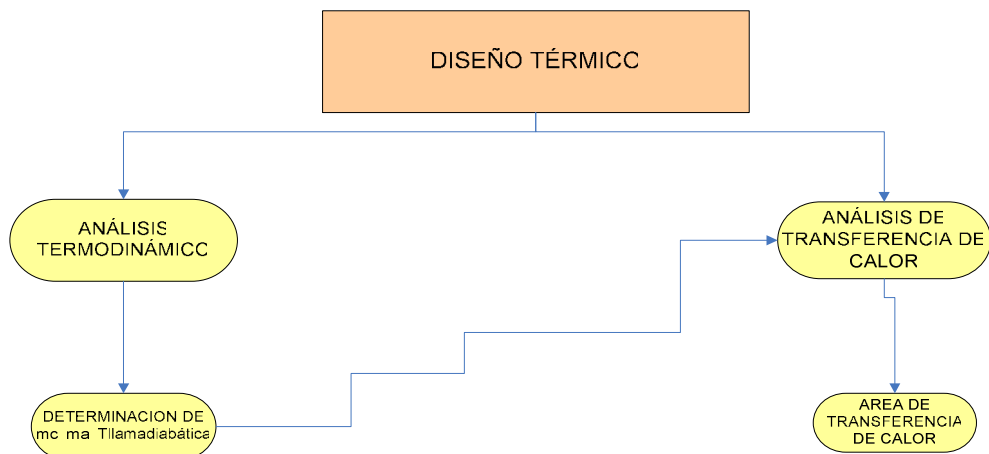
El diseño de la Mini Caldera consta del Diseño Térmico y el Diseño Mecánico.

3.1 DISEÑO TÉRMICO

Para el diseño térmico de la mini caldera tiene por objetivo obtener a partir de los requerimientos de flujo de vapor encontrar el área de transferencia, y el consumo de combustible necesario. Mediante un análisis termodinámico con base a los requerimientos de vapor a producir, se puede hallar:

- Masa de combustible y masa de aire para una combustión completa.
- La temperatura de llama adiabática la cual se requiere para determinar el área de transferencia de calor, que es función de la longitud de los tubos y el intercambio de calor desde la masa de los gases salientes hasta la masa de vapor de agua que se evapora. Este diseño térmico se resume en la figura 9

Figura 9. Diseño Térmico de la mini caldera.



3.1.1 Datos de entrada Para el Diseño Térmico. Los datos de entrada con que se cuenta para el diseño térmico de la Mini Caldera son de tres tipos:

✓ **Operacionales:** son los valores nominales de trabajo en que se desempeñará la mini caldera, entre ellos tenemos: Presión de trabajo, masa de vapor requerida, Poder calorífico inferior del combustible y emisividad de la superficie.

✓ **Geométricos:** es el valor de las dimensionales comerciales de los tubos con que se pueden contar en el mercado para el diseño de la mini caldera se determina el numero de ellos requeridos.

✓ **Ambientales:** son los datos de temperatura de agua ambiente disponible y presión atmosférica de Bucaramanga.

En la figura 10 se muestra un diagrama del proceso del diseño térmico junto con los valores de los datos de entrada.

Figura 10. Diagrama del proceso de Diseño Térmico

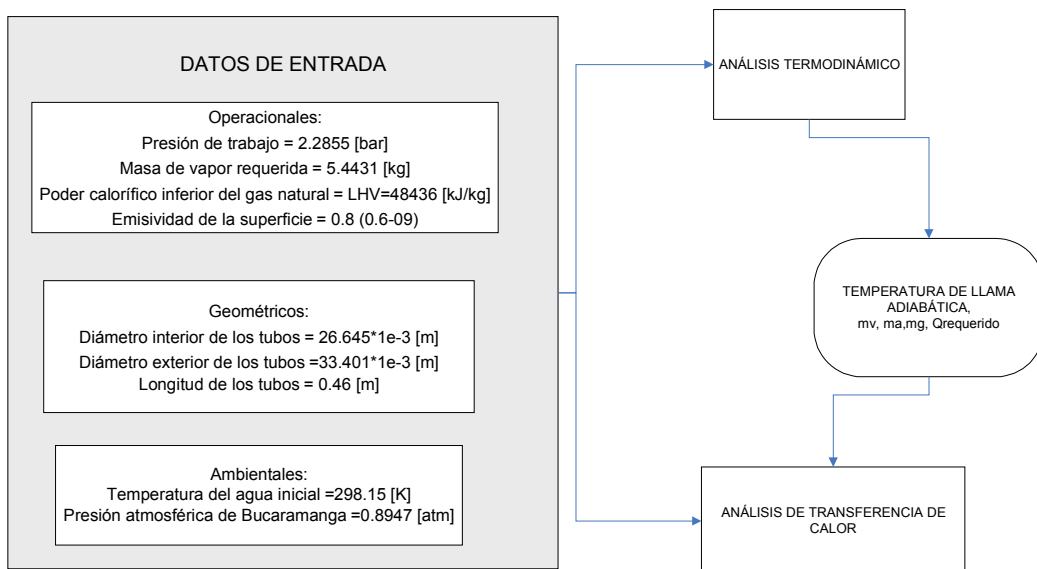
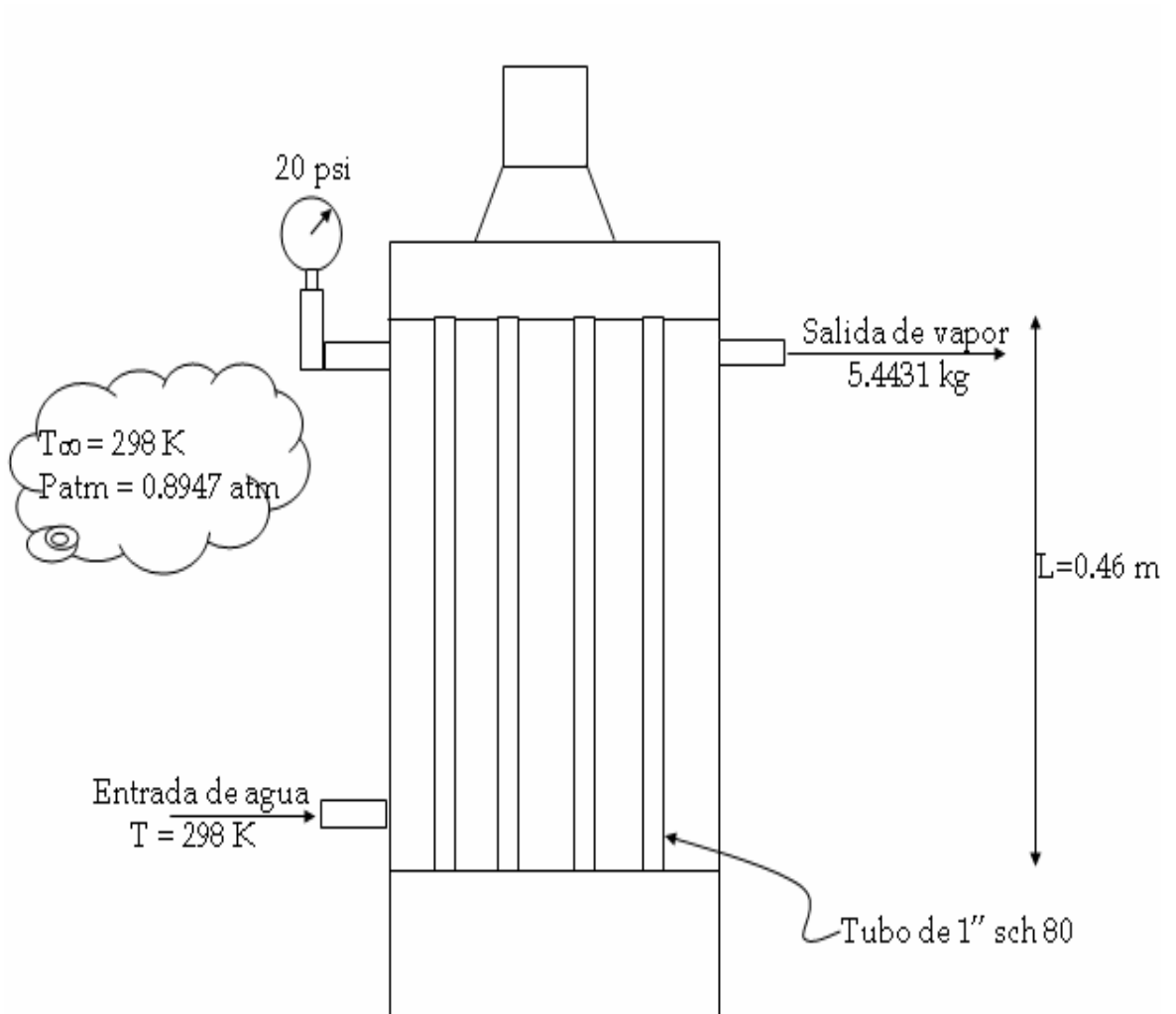
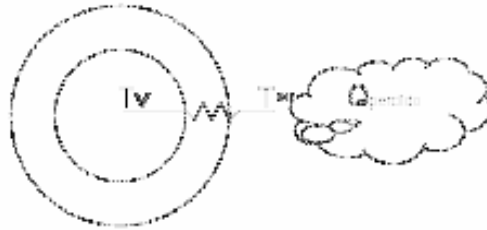


Figura 11. Condiciones de la mini caldera.



3.1.2 Calor total requerido en la mini caldera. El Q_{Total} es el calor total de entrada al proceso y que debe ser suministrado por la combustión, es determinado por los requerimientos de la producción de vapor Q_{util} , mas el $Q_{pérdidas}$, es el calor que se pierde por convección natural de las paredes de la caldera al ambiente y el calor perdido por los gases de combustión.

Figura 12. Diagrama de la analogía eléctrica de la transferencia de calor en el casco de la mini caldera.



$$Q_{Total} = Q_{util} + Q_{pérdidas} = Q_{util} + Q_{p_{paredes}} + Q_{p_{gases}}$$

En el diseño de una caldera el calor de perdidas no se conoce previamente así que para iniciar los cálculos su valor se estima a partir de los conceptos de eficiencia, asumiendo un valor típico para este tipo de caldera.

$$\eta = \frac{Q_{Util}}{Q_{Total}}$$

Análisis Termodinámico. Con el análisis termodinámico se busca determinar las condiciones operacionales de la mini caldera en cuanto a calor total, flujo de masa de combustible, relación aire combustible y la temperatura de llama adiabática

Calor útil:

$$Q_{util} = Q_{sensible} + Q_{latente}$$

$$Q_{sensible} = m_{H2O} * (hf_{125.3^{\circ}C} - hf_{25^{\circ}C}).$$

$$Q_{latente} = m_{H2O} * (hg_{125.3^{\circ}C} - hf_{125.3^{\circ}C}).$$

Donde:

$Q_{sensible}$: Calor para elevar la temperatura del agua desde temperatura ambiente (25°C) hasta la temperatura de saturación a la presión de trabajo (20 psi).

Q_{latent} : Calor de vaporización a 20 psi.

$$Q_{util} = 14194 \text{ [KJ/h]}$$

El calor total es el calor neto producido por los gases de combustión, es decir, es la suma del calor útil más el calor perdido por las paredes y el calor por perdidas por los gases de combustión.

$$Q_{Total} = Q_{util} + Q_{P_{pareders}} + Q_{P_{gases}}$$

El calor total se puede hallar conociendo el calor útil y la eficiencia de la siguiente manera:

$$\eta = \frac{Q_{Util}}{Q_{Total}}$$

En el proceso de diseño que se esta desarrollando, la η real de la caldera no se establecera totalmente hasta que no este totalmente dimensionada, por lo tanto, para continuar con el proceso se asume una eficiencia global para la mini caldera de 85%, 5% perdidas por convección natural de las paredes de la caldera al ambiente y 10% perdidas por los gases de combustión.

$$Q_{Total} = \frac{Q_{Util}}{\eta} = \frac{14194}{0.85} = 16698.83 \text{ [KJ / h]}$$

$$Q_{Total} = Q_{util} + Q_{P_{pareders}} + Q_{P_{gases}} = 0.85 * Q_{Total} + 0.05 * Q_{Total} + 0.10 * Q_{Total}$$

$$Q_{pérdidas} = Q_{P_{pareders}} + Q_{P_{gases}} = 834.94 + 1669.8 = 2504.82 \text{ [KJ/h]}$$

Las cuales serán comprobadas en las pruebas posteriores después de la construcción de la mini caldera.

Aire y combustible requerido por la caldera. El combustible utilizado para la combustión de la caldera es gas natural. Este combustible tiene un poder calorífico inferior definido. Conociendo el poder calorífico del combustible y el calor total requerido por la caldera se puede encontrar la masa de combustible de la siguiente manera:

$$M_{\text{comb}} = \frac{Q_{\text{total}}}{\text{LHV}}$$

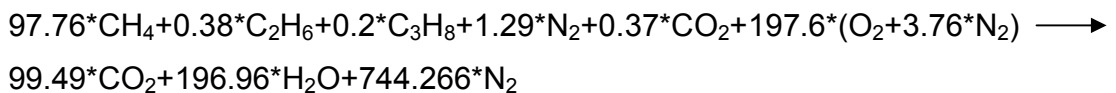
$$M_{\text{comb}} = 0.34 [\text{kg/h}]$$

La relación de aire combustible requerido por la caldera se toma como el 20% de exceso para condiciones normales de combustión del Gas Natural.

Estequiometria de la combustión. La mini caldera se diseñó para trabajar con gas natural cuya composición es:

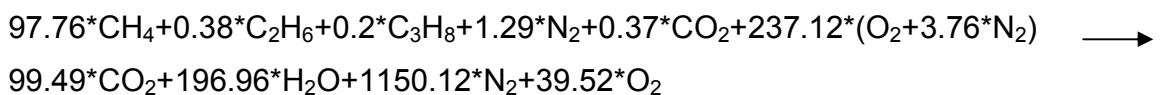
CH₄-97.76%, C₂H₆-0.38%, C₃H₈-0.2% N₂-1.618%, CO₂-0.37%, en porcentajes molares, datos suministrados por ACOGAS.

El aire se toma con una relación 21% de O₂ y 79% de N₂, dando como resultado del balance estequiométrico:



El quemador disponible para la mini caldera es de tiro forzado, este quemador hacía parte del banco de quemadores del laboratorio de plantas de gases y fue aportado para el desarrollo de este trabajo de grado por la Escuela de Ingeniería Mecánica.

Entonces balanceando la estequiometría con el exceso de aire tenemos que:



Fracciones molares de los productos

$$X = \frac{n_i}{n_t}$$

$$n_t = 99.49 + 196.96 + 1145.473 + 106.704 = 776.5$$

$$X_{\text{CO}_2} = \frac{99.49}{n_t} = 0.081$$

$$X_{\text{H}_2\text{O}} = \frac{196.96}{n_t} = 0.1603$$

$$X_{\text{O}_2} = \frac{106.704}{n_t} = 0.0322$$

$$X_{\text{N}_2} = \frac{1145.473}{n_t} = 0.7266$$

Donde:

n_i es el número de moles de cada producto

n_t es el número total de moles de los productos:

X_{CO2} fracción molar del CO2

X_{H2O} fracción molar del H2O

X_{O2} fracción molar del O2

X_{N2} fracción molar del N2

Presiones Parciales

$$P_{CO_2} = X_{CO_2} * P_{atm} = 0.0745$$

$$P_{H_2O} = X_{H_2O} * P_{atm} = 0.149$$

Donde

P_{CO_2} Presión Parcial del CO_2 [atm]

P_{H_2O} Presión Parcial del H_2O [atm]

Masa de los gases.

$$AC = \frac{m_{aire}}{m_{combustible}} = \frac{(N * M)_{aire}}{(N * M)_C + (N * M)_{H_2} + (N * M)_{N_2} + (N * M)_{O_2}}$$

$$AC = \frac{m_{aire}}{m_{combustible}} = \frac{32687}{1193.88 + 393.92 + 36.12 + 11.84} = 19.97 \left[\frac{\text{kg aire}}{\text{kg combustible}} \right]$$

Masa de aire:

$$m_{aire} = AC * m_{combustible} = 19.97 * 0.5516 = 11 \text{ kg/h}$$

Masa de los gases:

$$m_g = m_{aire} + m_{combustible} = 11.57 \text{ kg/h}$$

Temperatura de llama adiabática

$$Q - W = \sum_{\text{productos}} n_p * (h^0_f + h - h^0) - \sum_{\text{reactivos}} n_r * (h^0_f + h - h^0)$$

Del balance energético de la combustión y con $Q=0$ y $W=0$ tenemos que:

$$q_i = \sum_{\text{productos}} n_p * (\Delta h_p)$$

Donde q_i es el LHV de nuestro combustible utilizado y Δh_p es tomado de las tablas del libro de Termodinámica Aplicada de Juan Francisco Maradey Charris.

A través de un proceso iterativo donde se supone la temperatura de llama se halla el Δh_p y cuando el término de la derecha sea igual al q_i entonces esa será la temperatura de llama estequiométrica.

Cuadro 1. Resultados de el proceso iterativo en el cálculo de la temperatura de llama adiabática con aire estequiométrico.

Qi [kJ]	TII [K]	$\sum_{\text{productos}} n_p * (\Delta h_p)$
79485	2400	82539
79485	2390	82103
79485	2380	81666
79485	2370	81229
79485	2360	80793
79485	2350	80356
79485	2340	79920
79485	2330	79483

$$T_{\text{LLAMA ADIABATICA}} = 2330 \text{ [K]}$$

Para nuestro proyecto nos interesa la temperatura de los gases, entonces la temperatura hallada con el exceso de aire estequiométrico en la ecuación de temperatura de llama adiabática, será la temperatura de los gases a la entrada del proceso de transferencia de calor para nuestro caso.

Cuadro 2. Resultados de el proceso iterativo en el cálculo de la temperatura de llama adiabática considerando el exceso de aire en la estequiometría.

qi [kJ]	Tgases [K]	$\sum_{\text{productos}} n_p * (\Delta h_p)$
79485	2000	94040
79485	1930	89761
79485	1880	86713
79485	1810	82465
79485	1780	80653
79485	1761	79507
79485	1760,5	79477

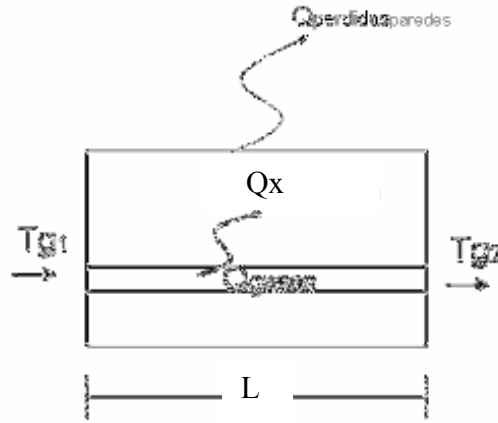
$$T_{\text{gases}} = 1760.5 \text{ [K]}$$

3.1.3 Cálculo de área de transferencia de calor. El área de transferencia de calor de la mini caldera deberá ser tal que a través de ella se transfiera todo el calor útil que el agua recibe para convertirse en vapor.

$$Q_{\text{util}} = m_{\text{vapor}} * h_{fg} = 14194 \text{ [KJ/h]}$$

Esta energía es cedida por los gases productos de la combustión enfriándose estos desde $T_{g1}=T_{\text{llama}}$ hasta T_{g2} , pero dado que desde el agua se pierde un poco del calor hacia el ambiente (Q_{paredes}), entonces la energía cedida por los gases es:

Figura 13. Diagrama de transferencia de calor a lo largo de un tubo en la mini caldera.

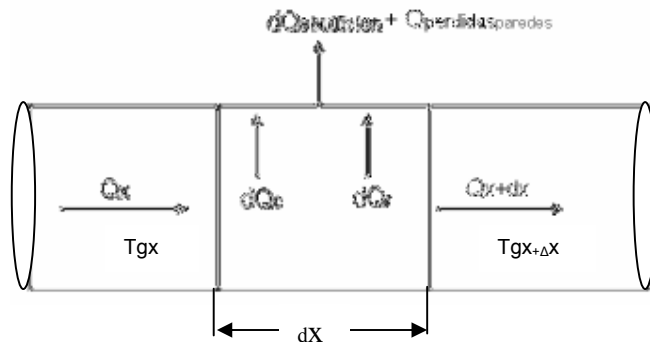


$$Q_{gas} = Q_{util} + Q_{paredes} = m_g * C_{pg} * (T_{g1} - T_{g2}) \quad (1)$$

$$T_{g2} = 1760.5 - \frac{16698.83}{12.05 * 1.49} = 830 \text{ K}$$

Como T_g va disminuyendo progresivamente cada Δx de tubo cederá una cantidad dQ_g diferente, la determinación de la longitud L del tubo requerida se estima a partir de la integración de los dQ_g en toda la longitud de la caldera:

Figura 14. Diagrama de un diferencial de tubo.



$$\int_0^L q_x * 2 * \pi * r * dx = \int_{T_{g1}}^{T_{g2}} m_g * C_{pg} * dt$$

El calor por unidad de área Q_x es variable y en cada elemento debe ser tal que el diferencial de calor $dQ_{\text{gas-superficie}}$, que se transfiere desde el gas a la superficie sea igual al diferencial de calor $dQ_{\text{superficie-vapor}}$, que desde la superficie va al agua.

Este calor también es igual a la suma del calor de convección más el calor de radiación en los tubos que a su vez también dependen de diferentes propiedades que se harán énfasis mas adelante.

$$dQ_x = dQ_{\text{gas-superficie}} = dQ_{\text{conveccion}} + dQ_{\text{radiacion}} \quad (2)$$

$$dQ_{\text{convección}} = h_{\text{gas}} (T_m - T_{\text{sup}}) * dA_{\text{int}} \quad (3)$$

$$dQ_{\text{radiación}} = \varepsilon_s * \frac{\varepsilon_g * E_{bg} - \alpha_s * E_{bs}}{\varepsilon_s + \alpha_s - \varepsilon_s * \alpha_s} \quad (4)$$

$$dQ_x = dQ_{\text{superficie-vapor}} = \mu_l * h_{fg} * \left[\frac{g * (\rho_l - \rho_v)}{\sigma} \right]^{\frac{1}{2}} * \left[\frac{C_p * (T_s - T_{\text{vapor}})}{C_{sf} * h_{fg} * Pr_l^n} \right]^3 \quad (5)$$

Siendo el área una función de la longitud de los tubos el proceso se desarrollará de la siguiente forma:

Proceso: en cada dx se conoce la temperatura de gas a la entrada, Δx y T_{vapor}

- a. Se determina la temperatura de superficie $T_{x \text{ superficie}}$, tal que

$$dQ_{\text{gas-superficie}} = dQ_{\text{superficie-vapor}} \quad \text{mediante las ecuaciones 2 y 5.}$$

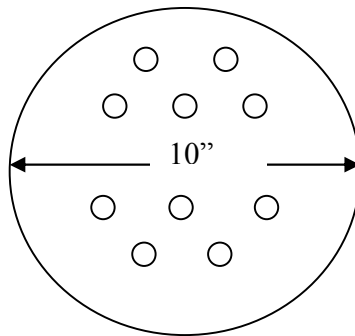
- b. Se determina la disminución de temperatura de los gases mediante la pérdida de calor:

$$dQ_{\text{gas-superficie}} = dQ_{\text{superficie-vapor}} = dQ_x = m_g * c_{p \text{ gas}} (T_{gx+\Delta x} - T_{gx})$$

- c. Este proceso se repite sucesivamente hasta que $\sum dQ_x = Q_{util}$
- d. La sumatoria de los Δx va ser igual a la longitud requerida.

Estimación del número de tubos de Caldera. Para la estimación de la cantidad de tubos que se va a poseer la caldera se parte de la superficie se utilizará:

Figura 15. Superficie Disponible para la distribución de tubos en la mini caldera.



Para la configuración de la disposición del casco y tubos se parte de el diámetro de casco disponible y el diámetro de los tubos que se consiguen en el mercado

$$\phi_{\text{casco}} = 10''$$

$$\phi_{\text{tubos}} = 1''$$

N = 10. valor estimado

Qua= Calor por unidad de área, el valor típico para mini calderas es 38021.65 [kJ/h*m²]

De la ecuación:

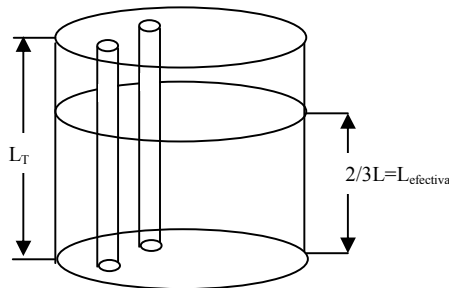
$$A = \frac{Q_{util}}{Q_{ua}} = \frac{14194}{38021.65} = 0.3733 \text{ [m}^2\text{]}$$

Se Calcula la longitud necesaria de los tubos:

$$L_{efectiva} = \frac{A}{\pi * \phi_{tubos} * N} = 0.301 \text{ m}$$

La mini caldera es de tubos verticales y debe mantenerse con un nivel mínimo de agua de 2/3 de la longitud, que es la longitud efectiva como se muestra en la figura 16.

Figura 16. Nivel de agua requerido en la mini caldera.



Ahora se procede a hallar la longitud total que tendrán los tubos que conformarán el haz de tubos en la mini caldera de la siguiente forma:

$$L_T = \frac{L_{efectiva}}{2/3} = 0.46 \text{ m}$$

El análisis que corrobora esta consideración de área de transferencia de calor para el cálculo del calor cedido de los gases de combustión se realiza

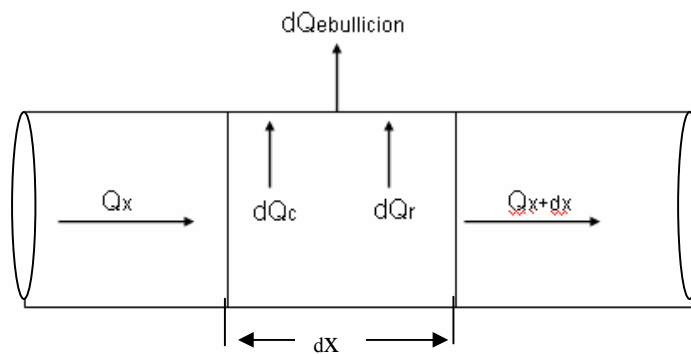
mediante un programa en MATLAB que utiliza las ecuaciones de transferencia de calor propuestas por Cengel Yanus, Encropera y Mills bajo las siguientes suposiciones:

- La temperatura de los gases a la salida de la cámara de combustión es igual a la temperatura de llama adiabática con exceso de aire.
- La transferencia por radiación se realiza en dirección normal al flujo de gases.
- La temperatura se considera uniforme en planos perpendiculares al flujo.

Balance de Energía. Al tomar un diferencial (dx) de un tubo de humos, tenemos:

Figura 17. Balance de energía en un diferencial de longitud.

BALANCE DE ENERGÍA



$$dDQ_{\text{ebullicion}} = m_{\text{gt}} * C_{p_m} * (T_{g_1} - T_{g_2})$$

$$dQ_{\text{ebullicion}} = dQ_{\text{convección}} + dQ_{\text{radiación}}$$

Donde:

Masa de los gases por tubo (m_{gt})

Calor específico de los gases a temperatura media (C_{pm})

Diferencial de temperatura en el dx ($T_{g1}-T_{g2}$)

Calor cedido al agua y al ambiente a través de las paredes de los tubos de humos ($dQ_{ebullicion}$)

- **Calor por Convección**

$$dQ_{convección} = h_{gas} (T_m - T_{sup}) * A_{int}$$

Temperatura media de los gases de combustión (T_m)

Temperatura superficial de los tubo (T_{sup}).

$$A_{int} = \pi * \phi_{int} * dx$$

Área interna de los tubos (A_{in})

$$h = \frac{Nu * K}{\phi}$$

Coefficiente de transferencia de calor de convección de los gases de combustión (h).

Conductividad térmica de los gases de combustión (K).

Nusselt que depende del # Reynold (Nu)

$$Nu = 0.023 * Re^{4/5} * Pr_m^{0.3}$$

si Reynold es turbulento

$$Nu = 3.66$$

si Reynold es laminar a temperatura ambiente

numero de Prandtl a temperatura media de los gases de combustión (Pr_m)

$$Re = \frac{4 * m_{gt}}{\phi * \pi * \mu}$$

si $Re > 2500$ es flujo turbulento y si $Re < 2500$ flujo laminar

Viscosidad cinemática de los gases de combustión (μ).

La dependencia de q_s respecto a ΔT_e caracteriza la primera y mas útil correlación para la ebullición nucleada, que desarrollo Rohsenow

$$Q_x = \mu_l * h_{fg} * \left[\frac{g * (\rho_l - \rho_v)}{\sigma} \right]^{\frac{1}{2}} * \left[\frac{C_p * (T_s - T_{vapor})}{C_{sf} * h_{fg} * Pr_l^n} \right]^3$$

Flujo de calor por unidad de área (Q).

Viscosidad del liquido [kg.m/s] (μ_l).

Entalpía de vaporización [J/kg] (h_{fg}).

Aceleración gravitacional= 9.81 m/s² (g).

Densidad del liquido [kg/m³] (ρ_l).

Densidad del vapor [kg/m³] (ρ_v).

Tensión superficial de la interfase liquido-vapor [N/m] (σ).

Calor específico del liquido [J/kg.°K] (C_{pl}).

Temperatura superficial (T_s).

Temperatura de saturación del fluido (T_{sat}).

Constante experimental dependiente combinación superficie-fluido=0.013 (C_{sf}).

Numero de prandtl del liquido (Pr_l)

Constante experimental que depende del fluido ($n=1$)

• Calor por Radiación

$$dQ_{radiacion} = \epsilon_s * \frac{\epsilon_g * E_{bg} - a_g * E_{bs}}{\epsilon_s + a_g - \epsilon_s * a_g} * A_{int}$$

$$E_{bs} = T_{sup}^4 * 5.67e-8$$

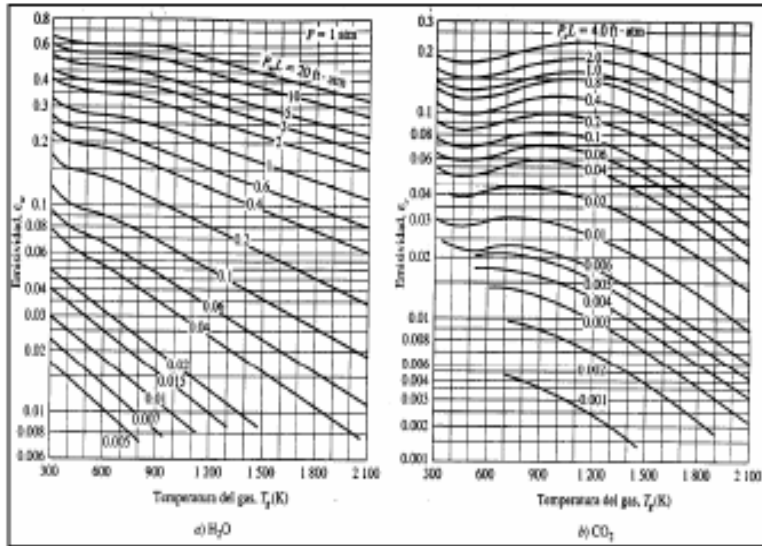
$$E_{bg} = T_m^4 * 5.67e-8$$

Emisividad de superficie (ϵ_s).

Emisividad de gases (ϵ_g).

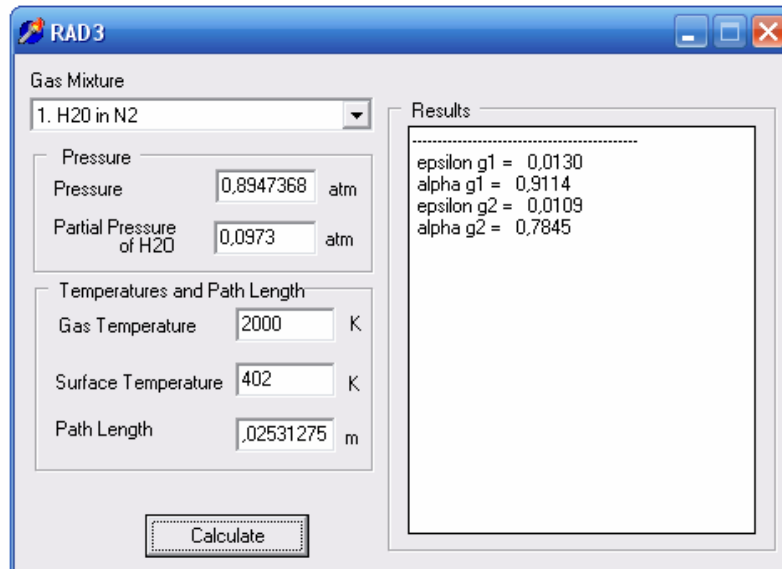
Absortividad de gases (a_g).

Figura 18. Graficas de Emisividad y absorptividad del CO₂ y H₂O.



Fuente: CENGEL, Yunus. Transferencia de calor. McGraw – Hill 2004

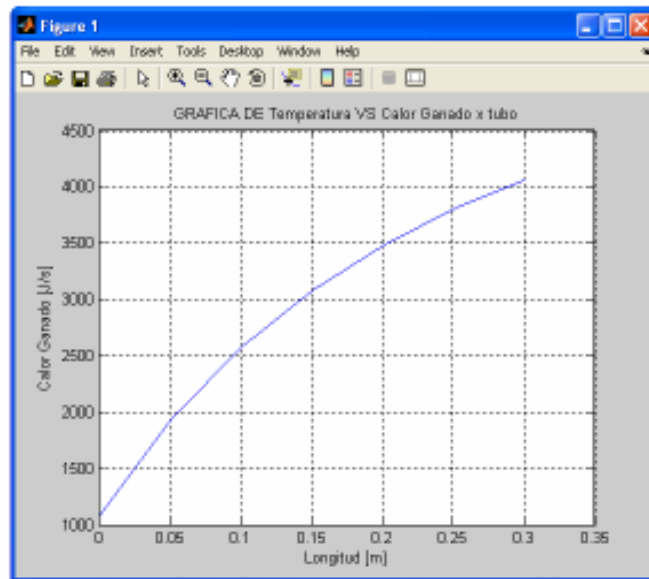
Figura 19. Resultado del programa RAD3 de emisividades y absorptividades del CO₂ y H₂O.



También se puede utilizar el programa RAD3 de la Mills para el cálculo de la emisividad y absorptividad de los gases de combustión.

3.1.4 Proceso de cálculo y resultados del diseño térmico. A continuación se muestra la solución de las ecuaciones planteadas, mediante la herramienta computacional MATLAB, el algoritmo utilizado se muestra el anexo 1.

Figura 20. Grafico obtenido de MATLAB. Calor ganado por tubo vs Temperatura



Cuadro 3. Variación de la longitud en el proceso iterativo realizado en Matlab,

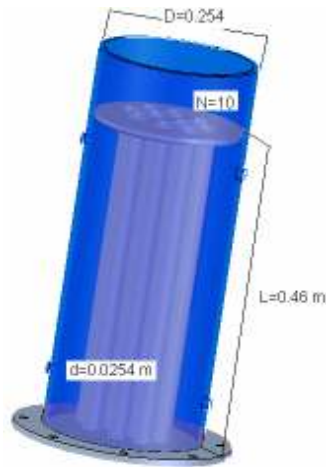
L [m]	T _{gas} [K]	Σ Qx [KJ/h]	Q _{útil}
0,001	1651,5	3925.87	14194
0,051	1455,5	6993.57	14194
0,101	1299	9384.9	14194
0,151	1174	11256.71	14194
0,201	1074	12733.26	14194
0,251	913	13927.83	14194
0,301	826	14251.14	14194

En el cuadro 2 se denota como varía la temperatura y el calor almacenado en cada variación de longitud L, la suma del calor de ganado en cada diferencial se aproxima al calor útil cuando la longitud aumenta, hecho que comprueba la longitud efectiva de transferencia hallada anteriormente.

El calor requerido para producir 20 lb/h de vapor más el calor perdido por convección natural es 14195 kJ/h y el calor disponible en la mini caldera es de 14516 kJ/h. (Este calor disponible es producido solo por 2/3 de la longitud de los tubos, el cual es el mínimo nivel de agua líquida que debe presentar la mini caldera).

3.2 DIMENSIONAMIENTO FINAL DE LA MINI CALDERA.

Figura 21. Dimensionamiento final de la mini caldera



Con los componentes de la mini caldera ya definidos y comprobados, procedemos a comprobar la eficiencia asumida previamente de la siguiente manera:

$$Q_{gas} = Q_{total} = Q_{util} + Q_{p_{paredes}} = m_g * C_{pg} * (T_{g1} - T_{g2})$$

$$Q_{total} = 12 * 1.49 * (1760 - 826) = 16699.92$$

La eficiencia será:

$$\eta = \frac{Q_{\text{útil}}}{Q_{\text{total}}} * 100 = \frac{14194}{16699.92} * 100 = 84.9\%$$

$\eta = 84.9\%$

La eficiencia calcula se aproxima mucho a la eficiencia asumida que era del 85% lo que nos deja notar que el diseño fue conservativo.

3.3 DISEÑO MECÁNICO

En el diseño de la mini caldera, el dimensionamiento de los elementos mecánicos que intervienen en su operación juega un papel muy importante ya que se debe asegurar las condiciones del diseño térmico y a la vez se debe considerar los requerimientos de operación requeridos.

Los elementos mecánicos a diseñar en este capítulo se mencionan a continuación:

- Casco
- Tubos
- Placa Portatubos
- Bridas

Los cálculos del diseño mecánico se realizaron en base la sección I, IV y VIII del código ASME. La primera hace referencia a potencia de calderas, la segunda hace referencia a calderas para calefacción y la tercera a recipientes a presión.

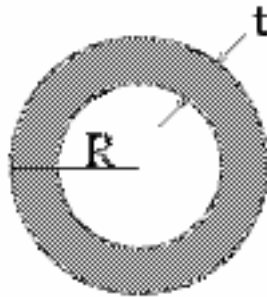
En la sección I PART PMB REQUIEREMENTS FOR MINIATURE BOILERS, se encuentra las especificaciones de mini calderas. En este capítulo se basa la mayor parte de los cálculos realizados.

El requerimiento para considerar una caldera como mini caldera es que no debe exceder:

- Diámetro de casco 16 in.
- Superficie de transferencia de calor 20 ft².
- Presión de operación 100 psig
- Volumen neto de 5 cu ft

3.3.1 Cálculo del espesor del cuerpo de la caldera

Figura 22. Radio y espesor de la tubería seleccionada para el casco.



$$t = \frac{P * R}{SE - 0.6 * P} = \frac{60 * 5}{10000 * 0.45 - 0.6 * 60} = 0.067''$$

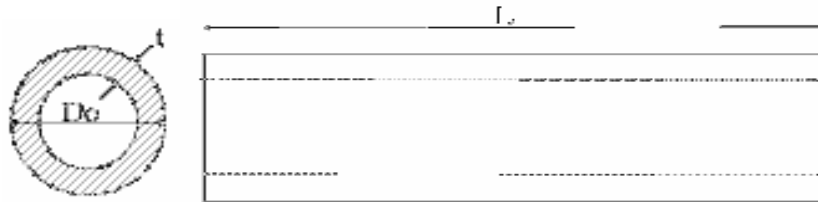
Para acero al carbono A106 y con diámetro de 10"

Según la norma el espesor mínimo debe ser 1/4" y por corrosión se le debe agregar 1/8".

El espesor del cuerpo $t=3/8''$

3.3.2 Cálculo del espesor de los tubos de la caldera

Figura 23. Radio, espesor y longitud de la tubería seleccionada para los tubos.



Los tubos son de material A106, con un diámetro de 1" Según la sección IV en la tabla HG-315 el espesor mínimo de los tubos debe ser de 0.095" por corrosión se decide colocar un espesor de tubo de 0.177" (4.5mm).

Comprobación de los tubos por presión externa:

$$t = 0.177''$$

$$\frac{L}{D_o} = \frac{20.866''}{1.315''} = 15.868$$

$$\frac{D_o}{t} = 7.43$$

De la figura HG 312.1 de la sección IV de la ASME se obtiene el valor de $B = 12000$

$$P_a = \frac{B}{D_o / t} = \frac{12000}{7.43} = 1615 \text{ Psi}$$

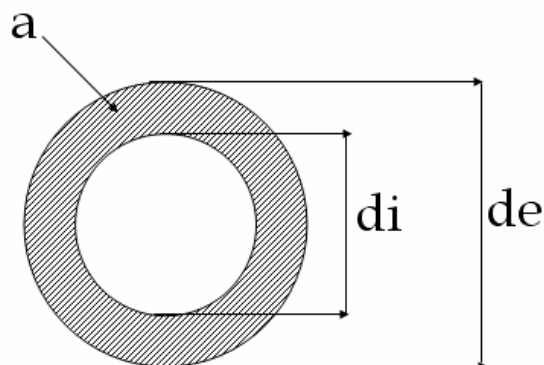
$P_a > P$ ok

3.3.3 Placa Porta tubos. La placa porta tubos debe tener un espesor mínimo según la norma de 5/16" y agregándole 1/8" por criterio de corrosión, se tendrá un espesor de 7/16" con la placa disponible en la industria local se toma un espesor de 1/2"

Comprobación del Diseño de la Placa Porta Tubos: para la comprobación del diseño de la placa portatubos se parte de la sección se calculan las áreas:

- Área transversal del tubo (a)
- Área transversal interna del casco (A)
- Área transversal de los agujeros de la placa porta tubos (C)

Figura 24. Sección transversal de la tubería seleccionada.



Con $d_e = 33.4\text{mm}$ y $d_i = 24.4\text{mm}$ tal y como se muestra en la figura X.

El área transversal del tubo (a) es:

$$a = \frac{\pi * d_e^2}{4} - \frac{\pi * d_i^2}{4} = 0.633 \text{ in}^2$$

El área transversal interna del casco (A) es:

Figura 25. El área transversal interna del casco.



Con $D=10$ in

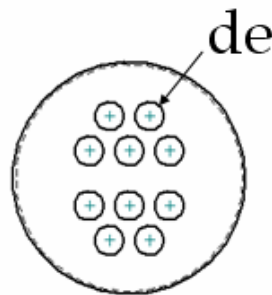
$$A = \frac{\pi}{4} * D^2 = 78.54 \text{ in}^2$$

El Área transversal de los agujeros de la placa porta tubos (C) es:

Figura 26. Área transversal de los agujeros de la placa porta tubos

$n = \#$ de tubos = 10

$$C = \frac{\pi}{4} * d_e^2 * n = 13.58 \text{ in}^2$$



Área transversal del casco (B)

Para un espesor del casco $t=3/8$ "

$$B = \pi * (D + t) * t = 11.34 \text{ in}^2$$

Deflexión o eficiencia de ligamento (η)

$$\eta = \mu = \frac{A - C}{A} = 0.827$$

$$Q = \frac{E_t * n * a}{E_s * B} = \frac{10 * 0.633}{11.34} = 0.558$$

El módulo de elasticidad del tubo es $E_t = 29870$ Psi

El módulo de elasticidad del casco $E_s = 29870$ Psi

Presión diferencial (P)

$$P = P_1 - P_2 - \frac{P_2 * n * a}{A - C} = 60 - 14 - \frac{14 * 10 * .633}{78.54 - 13.58} = 44.64 \text{ Psi}$$

Presión por fuera de los tubos es $P_1 = 60$ Psi

Presión por dentro de los tubos es $P_2 = 14$ Psi

Expansión diferencial (γ)

$$\gamma = \alpha_t * \theta_t - \alpha_s * \theta_s = 6.9 * 10^{-6} * 293.2 - 6.862 * 10^{-6} * 281 = 9 * 10^{-5} \approx 0$$

α_s = Coeficiente de expansión térmica del casco = $6.862 * 10^{-6}$ in/in °F

θ_s = Temperatura del casco °F = 281

α_t = Coeficiente de expansión térmica de los tubos = $6.9 * 10^{-6}$ in/in °F

θ_t = Temperatura de los tubos °F = 293.2

Presión diferencial efectiva (P_e)

$$P_e = P + \gamma * \frac{E_t * n * a}{A - C} = P = 44.64 \text{ Psi}$$

$$kR = 1.08 * \left[\frac{E_t * n * a}{L * h^3 * E_p * (A - C)} \right]^{\frac{1}{4}} * D = 1.08 * \left[\frac{29870 * 10 * 0.633}{20.86 * 0.5^3 * 29870 * (78.54 - 13.58)} \right]^{\frac{1}{4}} * 10$$

$$kR = 4.75$$

Con el kR hallado se obtiene de la tabla 1 del libro *Desing of process Equipment chapter 5* los siguientes valores:

$$G1=3.265 \quad G2=11.925 \quad G3= -0.673 \quad G4=3.65$$

$$P_{tracción} = 30000 \text{ Psi}$$

Máximo esfuerzo Radial

$$P_{rmax} = \frac{\left[P_e - P_2 * \frac{A}{(A - C)} * Q \right]}{4 * [Q * G_1 + G_2]} * \left(\frac{D}{h} \right)^2 = \frac{\left[4464 - 14 * \frac{7854}{(7854 - 1358)} * 0.558 \right]}{4 * [0.558 * 3.265 + 11.925]} * \left(\frac{10}{0.5} \right)^2$$

$$P_{rmax} = 256 \text{ Psi}$$

$$P_{rmax} < P_{tracción \text{ de la placa}}$$

$$P_{rmax} = \left(\frac{A - C}{n * a} \right) * \left(P - G_3 * \frac{\left[P_e - P_2 * \frac{A}{(A - C)} * Q \right]}{[Q + G_4]} \right)$$

$$P_{tmax} = \left(\frac{78.54 - 13.58}{10 * 0.633} \right) * \left(44.64 + 0.673 * \frac{\left[44.64 - 14 * \frac{78.54}{(78.54 - 13.58)} * 0.558 \right]}{[0.558 + 3.65]} \right)$$

$$P_{tmax} = 516 \text{ Psi}$$

$$P_{\text{tmax}} < P_{\text{tracción de los tubos}}$$

3.3.4 Calculo de Brida



Se utiliza un empaque de asbesto de 1/16" de espesor y un ancho de 3/4".
De la norma ASME sección VIII división 2 y Presión de Diseño P=60 psi.

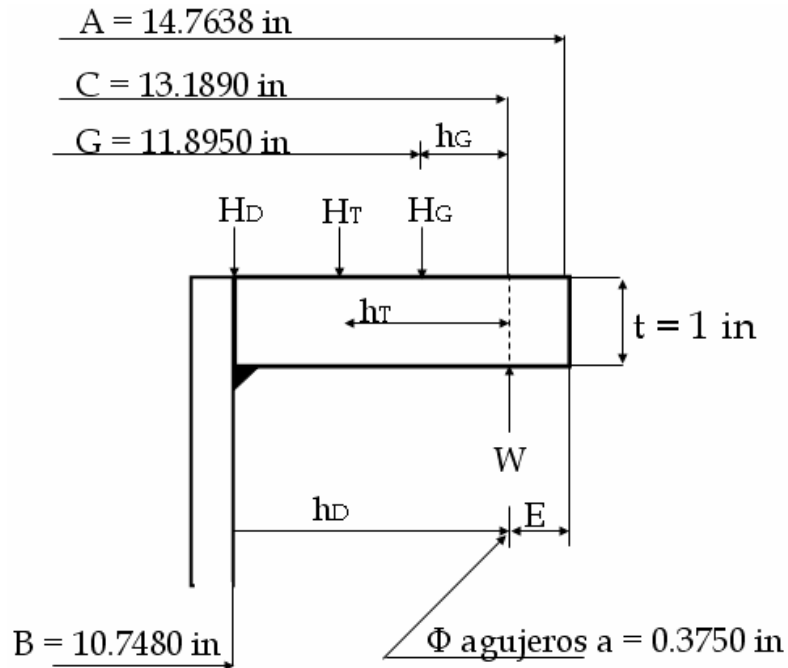
Cuadro 4. Materiales y ancho de los empaques

3-320.1 Gasket materials:	3-320.2 Effective gasket width
$m = 2.75$	$b_0 = \frac{N}{2} = \frac{3}{4} * \frac{1}{2} = \frac{3}{8} \text{ in}$
$y = 3600 \text{ psi}$	$b = \frac{\sqrt{b_0}}{2} = \frac{\sqrt{\frac{3}{8}}}{2} = 0.306 \text{ in}$

Fuente: norma ASME sección VIII división 2

El procedimiento para el cálculo se baso en el libro de DESIGN OF PROCESS EQUIPMENT (KANTI K. MAHAJAN)

Figura 27. Brida superior (Φ 10")



Cuadro 5. Formatos para cálculos de bridas

$G = C - a - 2 * 0.2785 - 2 * b = 11.8950 \text{ in}$	$W_{m1} = H + H_p = 104411b$
$H_p = 2 * \pi * b * G * m * P = 3773.51b$	$W_{m2} = \pi * b * G * y = 423091b$
$H = \frac{G^2 * \pi * P}{4} = 6667.61b$	

Se utilizan tornillos hexagonales de 3/8" grado 8 (esfuerzo permisible a temperatura de diseño $S_b = 25000 \text{ psi}$; esfuerzo permisible a temperatura ambiente $S_a = 25000 \text{ psi}$) . La brida es fabricada con lamina A 36 (esfuerzo permisible a temperatura de diseño $S_{fo} = 15600 \text{ psi}$; esfuerzo permisible a temperatura ambiente $S_{fa} = 15600 \text{ psi}$)

$A_m = \frac{W_{m2}}{S_s} = \frac{178976}{25000} = 1.6924$	$W = \frac{(A_m + A_b) * S_s}{2} = 234821b$
$A_b = 8 * 0.09 = 0.5440$	$N_{min} = \frac{A_b * S_s}{2 * y * \pi * G} = 0.0413$

FLANGE LOAD OPERATING	LEVER ARM	FLANGE MOMENT OPERATING
$H_D = 0.7854 * B^2 * P = 5443.81b$	$h_D = \frac{C - B}{2} = 1.2205in$	$M_D = H_D * h_D = 6644 \text{ lb-in}$
$H_G = H_P = 3773.51b$	$h_G = \frac{C - G}{2} = 0.6470 \text{ in}$	$M_G = H_G * h_G = 2441.5 \text{ lb-in}$
$H_T = H - H_D = 1223.81b$	$h_T = \frac{h_D + h_G}{2} = 0.9337 \text{ in}$	$M_T = H_T * h_T = 1142.7 \text{ lb-in}$
		$M_O = M_D + M_G + M_T$ $= 10228 \text{ lb-in}$

FLANGE MOMENT GASKET SEATING	LEVER ARM	FLANGE MOMENT GASKET SEATING
$H_G = W = 234821b$	$h_G = \frac{C - G}{2} = 0.6470 \text{ in}$	$M_G = W * h_G = 151931b$

Si el espacio entre pernos es mayor $2*a+t$, se debe aplicar el factor de corrección

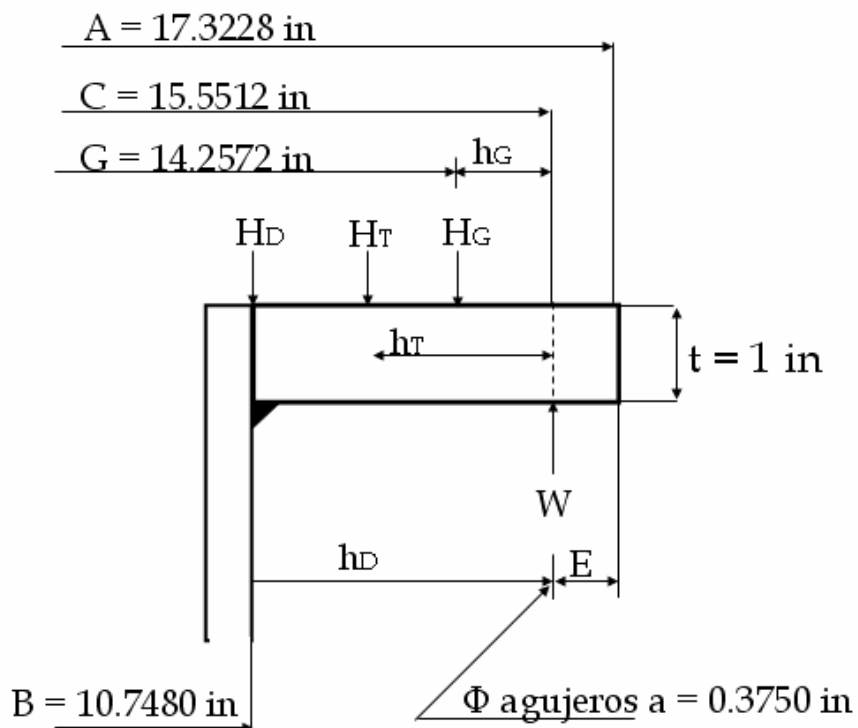
$\text{bolt spacing} = \frac{\pi * C}{\# \text{ pernos}} = 5.1793$	$C_r = \sqrt{\frac{\text{bolt spacing}}{2*a+t}} = 1.7203$	espesor de la brida $= 1 \text{ in}$
$M = \frac{M_O * C_r}{B} = 2431.81b - in$		

SHAPE CONSTANTS	De la tabla 4 FACTORS INVOLVING K
$K = \frac{A}{B} = 1.374$	$Y = 6.27$
	$t = \sqrt{\frac{MY}{S_m}} = 0.9886 \text{ in}$

Se comprobó el espesor

$P_{max} = \frac{A_b * S_b}{\frac{\pi}{4} * G^2 + 2 * \pi * b * G * m} = 78.1525 \text{ Psi}$	
$M_{max} = \frac{t^2 * S_b}{\gamma} = 2431.8 \text{ lb-in}$	$M_O = \frac{M_{max} * B}{C_F} = 15193 \text{ lb-in}$
$P_{max} = \frac{M_O}{\frac{\pi}{4} * B^2 * h_D + 2 * \pi * b * G * m * h_C + \frac{\pi}{4} * (G^2 - B^2) * h_T} = 89.1234 \text{ Psi}$	
MAWP=78.1525 Psi	

Figura 28. Brida inferior (Φ 10")



$G = C - a - 2 * 0.2785 - 2 * b = 14.2572 \text{ in}$	$W_{m1} = H + H_p = 14102 \text{ lb}$
$H_p = 2 * \pi * b * G * m * P = 4522.91 \text{ lb}$	$W_{m2} = \pi * b * G * y = 50712 \text{ lb}$
$H = \frac{G^2 * \pi * P}{4} = 9578.71 \text{ lb}$	

Se utilizan tornillos hexagonales de 3/8" grado 8 (esfuerzo permisible a temperatura de diseño $S_b = 25000 \text{ psi}$; esfuerzo permisible a temperatura ambiente $S_a = 25000 \text{ psi}$) . La brida es fabricada con lamina A 36 (esfuerzo permisible a temperatura de diseño $S_{fo} = 15600 \text{ psi}$; esfuerzo permisible a temperatura ambiente $S_{fa} = 15600 \text{ psi}$)

$A_m = \frac{W_{m2}}{S_a} = \frac{178976}{25000} = 2.0285$	$W = \frac{(A_m + A_b) * S_a}{2} = 27011 \text{ lb}$
$A_b = 8 * 0.09 = 0.5440$	$N_{min} = \frac{A_b * S_a}{2 * y * \pi * G} = 0.0345$

FLANGE LOAD OPERATING	LEVER ARM	FLANGE MOMENT OPERATING
$H_D = 0.7854 * B^2 * P = 5443.81 \text{ lb}$	$h_D = \frac{C - B}{2} = 2.4016 \text{ in}$	$M_D = H_D * h_D = 13074 \text{ lb-in}$
$H_C = H_p = 4522.91 \text{ lb}$	$h_C = \frac{C - G}{2} = 0.6470 \text{ in}$	$M_C = H_C * h_C = 2926.3 \text{ lb-in}$
$H_T = H - H_D = 4135 \text{ lb}$	$h_T = \frac{h_D + h_C}{2} = 1.5243 \text{ in}$	$M_T = H_T * h_T = 6302.9 \text{ lb-in}$
		$M_O = M_D + M_C + M_T$ $= 22303 \text{ lb-in}$

FLANGE MOMENT GASKET SEATING	LEVER ARM	FLANGE MOMENT GASKET SEATING
$H_G = W = 27011 \text{ lb}$	$h_G = \frac{C - G}{2} = 0.6470 \text{ in}$	$M_G = W * h_G = 17476 \text{ lb-in}$

Si el espacio entre pernos es mayor $2 * a + t$, se debe aplicar el factor de corrección

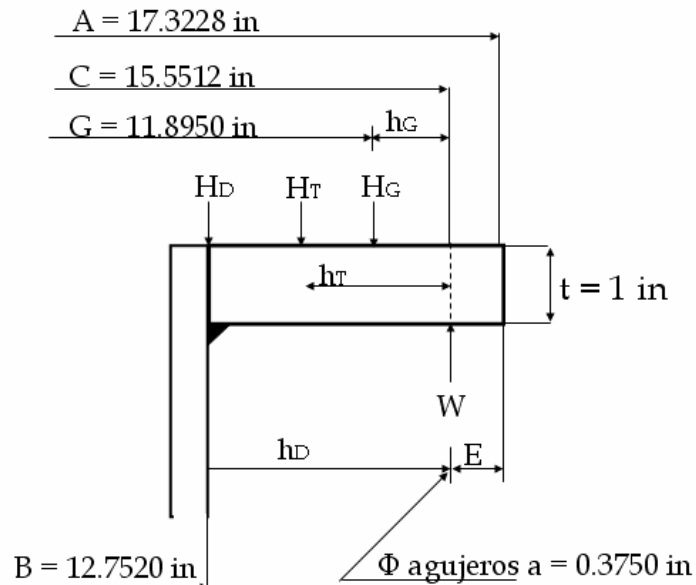
$\text{bolt spacing} = \frac{\pi * C}{\# \text{ pernos}} = 6.1069 \quad C_F = \sqrt{\frac{\text{bolt spacing}}{2 * a + t}} = 1.8681 \quad \text{espesor de la brida} = 1 \text{ in}$
$M = \frac{M_O * C_F}{B} = 3876.4 \text{ lb-in}$

SHAPE CONSTANTS	De la tabla 4 FACTORS INVOLVING K
$K = \frac{A}{B} = 1.6117$	$Y = 4.27$
	$t = \sqrt{\frac{MY}{S_{33}}} = 1.03 \text{ in}$

Se comprobó el espesor

$P_{\max} = \frac{A_o * S_o}{\frac{\pi}{4} * G^2 + 2 * \pi * b * G * m} = 60 \text{ Psi}$	
$M_{\max} = \frac{t^2 * S_{33}}{Y} = 3876.4 \text{ lb-in}$	$M_O = \frac{M_{\max} * B}{C_F} = 22303 \text{ lb-in}$
$P_{\max} = \frac{M_O}{\frac{\pi}{4} * B^2 * h_o + 2 * \pi * b * G * m * h_c + \frac{\pi}{4} * (G^2 - B^2) * h_f} = 60 \text{ Psi}$	
MAWP=60 Psi	

Figura 29. Brida inferior (Φ 12")



$G = C - a - 2 * 0.2785 - 2 * b = 14.2572 \text{ in}$	$W_{m1} = H + H_p = 141021b$
$H_p = 2 * \pi * b * G * m * P = 4522.91b$	$W_{m2} = \pi * b * G * y = 507121b$
$H = \frac{G^2 * \pi * P}{4} = 9578.71b$	

Se utilizan tornillos hexagonales de 3/8" grado 8 (esfuerzo permisible a temperatura de diseño $S_b = 25000$ psi ; esfuerzo permisible a temperatura ambiente $S_a = 25000$ psi) . La brida es fabricada con lamina A 36 (esfuerzo permisible a temperatura de diseño $S_{fo} = 15600$ psi ; esfuerzo permisible a temperatura ambiente $S_{fa} = 15600$ psi)

$A_m = \frac{W_{m2}}{S_a} = \frac{178976}{25000} = 2.0285$	$W = \frac{(A_m + A_b) * S_a}{2} = 270111b$
$A_b = 8 * 0.09 = 0.5440$	$N_{min} = \frac{A_b * S_a}{2 * y * \pi * G} = 0.0345$

FLANGE LOAD OPERATING	LEVER ARM	FLANGE MOMENT OPERATING
$H_D = 0.7854 \cdot B^3 \cdot P = 7663 \text{ lb}$	$h_D = \frac{C-B}{2} = 1.3996 \text{ in}$	$M_D = H_D \cdot h_D = 10725 \text{ lb-in}$
$H_G = H_P = 4522.91 \text{ lb}$	$h_G = \frac{C-G}{2} = 0.6470 \text{ in}$	$M_G = H_G \cdot h_G = 2926.3 \text{ lb-in}$
$H_T = H - H_D = 1915.81 \text{ lb}$	$h_T = \frac{h_D + h_G}{2} = 1.0233 \text{ in}$	$M_T = H_T \cdot h_T = 1960.4 \text{ lb-in}$
		$M_O = M_D + M_G + M_T$ $= 15612 \text{ lb-in}$

FLANGE MOMENT GASKET SEATING	LEVER ARM	FLANGE MOMENT GASKET SEATING
$H_G = W = 27011 \text{ lb}$	$h_G = \frac{C-G}{2} = 0.6470 \text{ in}$	$M_O = W \cdot h_G = 17476 \text{ lb-in}$

Si el espacio entre pernos es mayor $2 \cdot a + t$, se debe aplicar el factor de corrección

$\text{bolt spacing} = \frac{\pi \cdot C}{\# \text{ pernos}} = 6.1069$	$C_F = \sqrt{\frac{\text{bolt spacing}}{2 \cdot a + t}} = 1.8681$	espesor de la brida = 1 in
$M = \frac{M_O \cdot C_F}{B} = 2560 \text{ lb-in}$		

SHAPE CONSTANTS	De la tabla 4 FACTORS INVOLVING K
$K = \frac{A}{B} = 1.3584$	$Y = 7$
	$t = \sqrt{\frac{MY}{S_u}} = 1 \text{ in}$

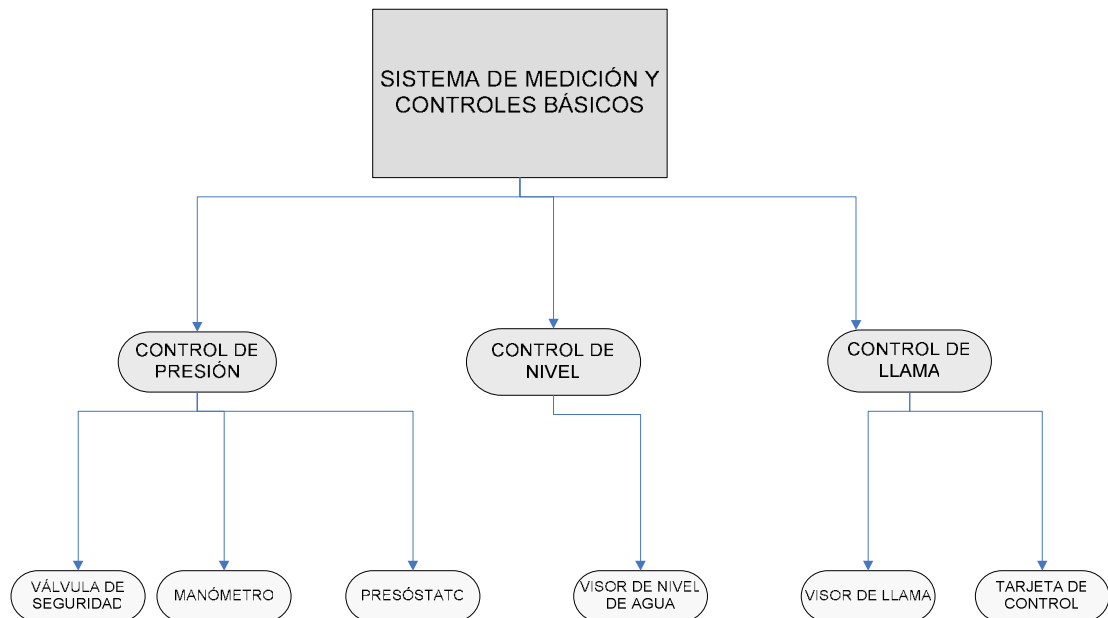
Se comprobó el espesor

$P_{max} = \frac{A_b * S_b}{\frac{\pi}{4} * G^2 + 2 * \pi * b * G * m} = 60 \text{ Psi}$	
$M_{max} = \frac{t^2 * S_b}{Y} = 2560 \text{ lb-in}$	$M_D = \frac{M_{max} * B}{C_F} = 17476 \text{ lb-in}$
$P_{max} = \frac{M_D}{\frac{\pi}{4} * B^2 * h_D + 2 * \pi * b * G * m * h_C + \frac{\pi}{4} * (G^2 - B^2) * h_T} = 67.1643 \text{ Psi}$	
<p>MAWP=60 Psi</p>	

3.4 SISTEMAS DE MEDICIÓN Y CONTROLES BÁSICOS

Los sistemas de medición y controles básicos utilizados en el diseño de la minicaldera se muestran en la figura siguiente

Figura 30. Diagrama de los sistemas de medición y controles básicos requeridos en el diseño de la caldera.



3.4.1 Control de Presión. Los elementos utilizados en el control y medición requeridos en la mini caldera en cuanto a presión son:

- **VÁLVULA DE SEGURIDAD:** es una válvula de tipo palanca que esta tarada a 30 psig, su funcionamiento esta orientado a proteger la mini caldera de sobre presiones (por encima de 30 psig), al superar la presión de taraje, la válvula se abre y deja pasar por ella el vapor hasta que la presión de la caldera sea inferior a la presión de taraje.
- **MANÓMETRO:** elemento utilizado para supervisar la presión de trabajo de la caldera en un rango de 0 a 60 psig.
- **PRESOSTATO DANFOSS KP 1A:** elemento utilizado para censar la presión dentro de la caldera, en caso de que sea mayor a 25 psig, este cierra el paso de combustible hacia el quemador hasta que la presión vuelva al rango de operación normal, caso de que este falle, la válvula de seguridad es la encargada de controlar las sobrepresiones en la caldera.

3.4.2 Control de Nivel. VISOR DE NIVEL DE BRONCE ½”, tubo de vidrio de 25 cm de longitud: Es el elemento que permite ver el nivel de agua que hay dentro de la mini caldera y poder controlar el mínimo y máximo nivel que se pueda presentar durante la operación.

3.4.3 Control de Llama

- **VISOR DE LLAMA:** permite observar el estado de la llama que se esta produciendo durante el proceso de combustión
- **CAJA DE CONTROL :** este elemento esta encargado de tres tareas importantes, estas son:

- Producir la Chispa
- Detectar la Llama
- Permitir el Flujo de Gas

Figura 31. Diagrama de bloques de la caja de control

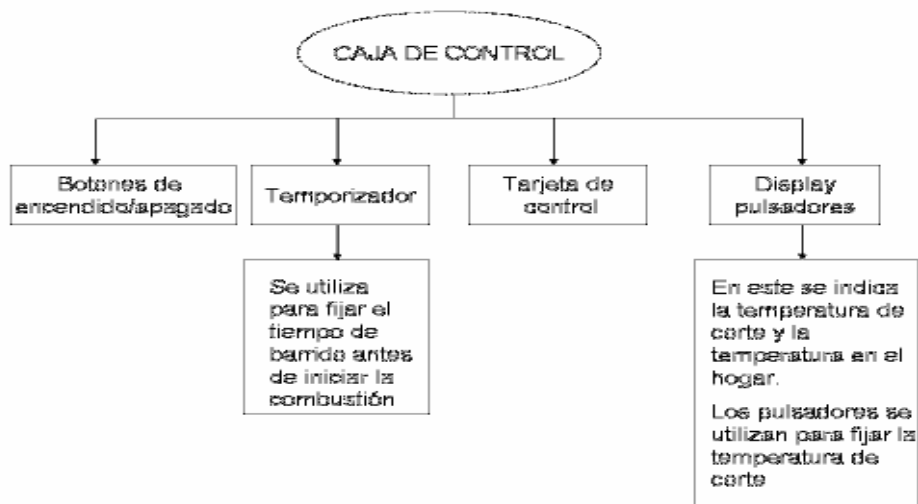


Figura 32. Diagrama de Flujo de la Tarjeta de control

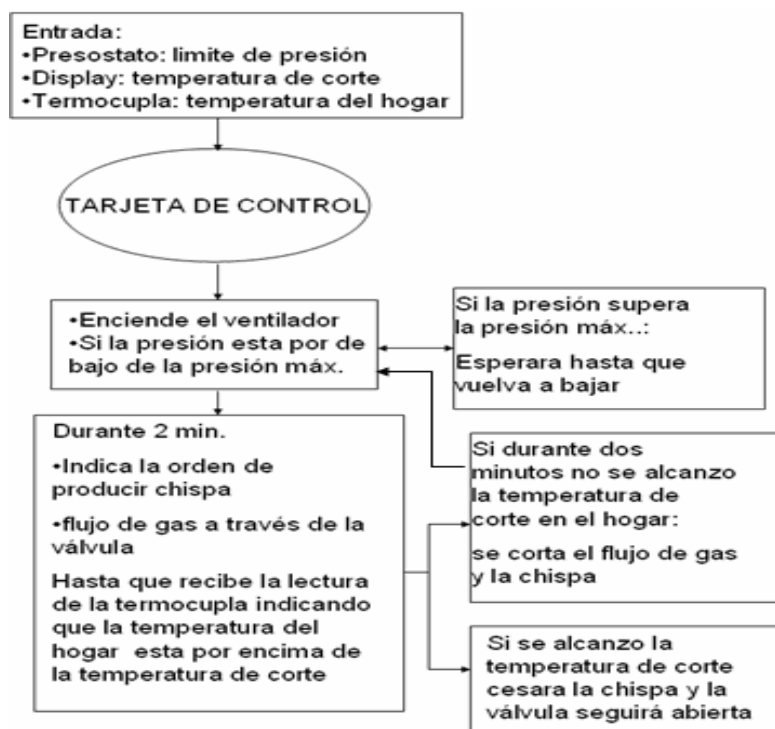


Figura 33. Diagrama de eléctrico general

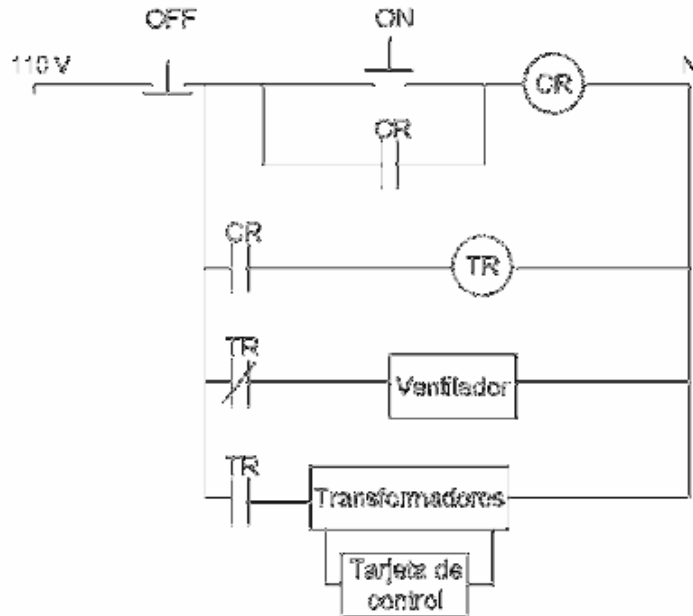
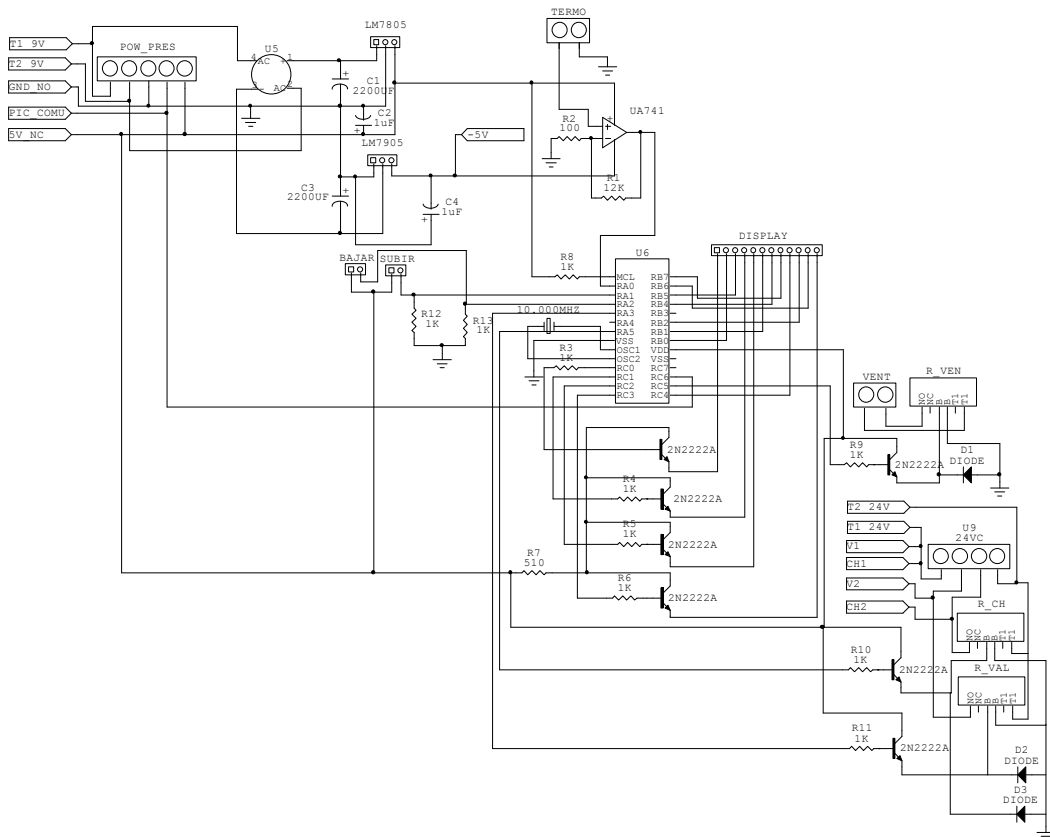


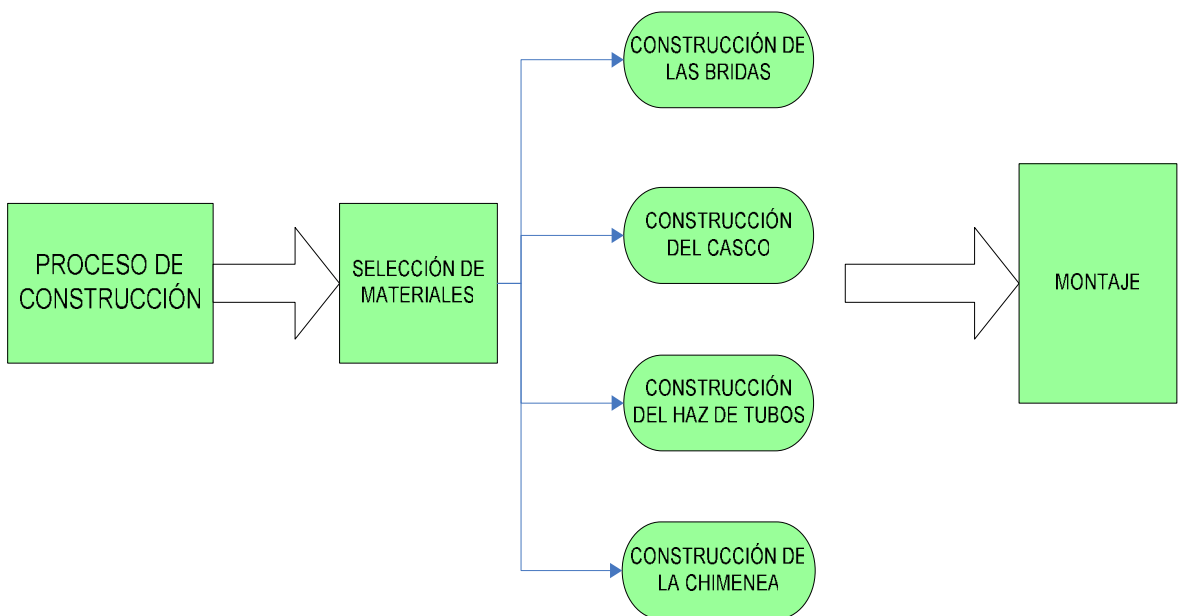
Figura 34. Diagrama de eléctrico de la tarjeta de control



4. PROCESO DE CONSTRUCCIÓN DE LA MINI CALDERA

En este capítulo se muestra como se realizó el proceso de fabricación¹ de los elementos constituyentes de la mini caldera y de igual manera su montaje hasta formar el elemento final.

Figura 35. Diagrama del proceso de construcción de la mini caldera.



Como muestra la figura 35, el proceso de fabricación de la minicaldera parte de la selección de los materiales adecuados para cada uno de los componentes, de igual manera estos fueron fabricados de forma simultánea, por esto se describirá el proceso de la siguiente forma:

¹ Bajo norma ASME section VIII Pressure Vessels

4.1 SELECCIÓN DE MATERIALES

Cuadro 6. Especificación de los materiales utilizados.

Elemento	Material	Especificación de Diseño
Casco	A 106, Acero galvanizado	Diametro de 10", longitud 26" sch 40, la cubierta externa del casco es de acero galvanizado calibre 22
Tubos	A 106	10 tubos de diámetro 1", longitud 22" sch 80
Placa Portatubos	A 516	2 placas de diametro 17,3" y 10", espesor 1/2".
Chimenea	Lámina de Acero	Longitud 40", diametro 3 1/2 "
Bridas	A 36	2 de diametro 17,3" y 2 diametro de 10", espesor de todas es 1".
Tornillos hexagonales	Acero Gr 8	8 longitud 3 1/2" y 8 longitud 2 1/2", diametro 3/8"
Soporte	Acero	3 angulo 3" x 5/16"
Quemador	Fundición de aluminio	De tiro forzado con conexión de gas natural
Anillo	A 106	Diametro de 10", sch 40, longitud 3"

La selección de los materiales se hizo bajo especificación técnica para los elementos seleccionados.

También se debe tener en cuenta la selección de otros componentes como:

- Aislante Térmico: mezcla refractaria para aislar el hogar del quemador y fibra de vidrio para aislar el casco del ambiente exterior.

4.2 CONSTRUCCIÓN

4.2.1 Construcción de las bridas. Para la construcción de las bridas se parte de discos de material A36 los cuales son llevados al torno en donde se dan las características requeridas

Figura 36. Construcción de las bridas



Luego de que se logran los diámetros de diseño se procede al taladrado

Figura 37. Taladrado de brida



4.2.2 Construcción del casco. Para la construcción del casco se parte de un tubo del diámetro requerido, con oxicorte se dimensiona la longitud

Figura 38. Corte de tubos



Luego de obtener la pieza con las dimensiones especificadas se procede a rectificar en el torno.

Figura 39. Rectificado de tubo



4.2.3 Construcción del haz de tubos. Para la construcción del haz de tubos, se parte de la unión de la placa portatubos que es perforada previamente.

Figura 40. Taladrado de la placa porta tubo



Luego se procede a insertar los tubos en la placa portatubos dejándolos sobresalir a 1/8 " por encima de la zona en donde van a ser soldados.

Figura 41. Ubicación de tubo



La soldadura de los tubos a la placa portatubos se hace con el método SMAW con electrodos E7018.

Figura 42. Soldadura del haz de tubo



Y por último se mejora el acabado de la soldadura con pulidora.

Figura 43. Pulido del haz de tubo



4.2.4 Construcción de la chimenea. La chimenea se construyó mediante la unión soldada de un tubo que se elabora doblando una lámina de acero con un cono que a su vez van unidos a la brida de la parte superior de la caldera como se muestra en la foto.

5. CONDICIONES DE OPERACIÓN DE LA MINICALDERA

5.1. REVISIÓN DE LA UNIDAD

Antes de poner en servicio la mini caldera se debe hacer una completa revisión interna y externa para comprobar que:

- * Todas las partes internas de la caldera están limpias, libres de obstrucción y en buena condición.
- * Todos los pasos de gas y aire están libres de cualquier obstrucción.
- * El venteo de la caldera está abierto.
- * El agua de alimentación puede ser controlada manualmente desde un punto donde los indicadores de visor de nivel sean visibles.

5.2. CUIDADOS CON LA CALDERA

5.2.1. Durante la apagada. Cuando una caldera debe permanecer apagada durante un tiempo considerable, no se debe permitir que permanezca parcialmente llena. Se debe llenar totalmente con agua y desaireada si la caldera estará fuera de servicio pocas semanas, o se desocupa y drena totalmente si estará apagada durante un periodo más largo.

Cuando se saca la caldera de servicio, tan pronto sus temperaturas sean iguales a la temperatura ambiente, se deben remover los depósitos acumulados que puedan causar corrosión.

5.2.2. Durante el encendido. Se debe siempre hacer una purga de gas al iniciar la caldera para evacuar cualquier volumen de gas que halla quedado

en el hogar del quemador, ya que se podría producir una explosión al generar la chispa.

5.2.3. En operación. La eficiencia y capacidad total de una caldera dependen directamente del estado de las superficies de transferencia, por lo cual la superficie exterior de los tubos debe permanecer razonablemente limpia de depósitos.

Un incremento en la pérdida de tiro a través de la unidad indica usualmente superficies sucias, lo que se manifiesta en un incremento de temperatura de salida de gases a una carga dada con porcentajes de CO₂, O₂, y temperatura de agua normales.

El ensuciamiento interno de los tubos es otro de los factores que afecta la eficiencia de la caldera ya que la formación de depósitos o incrustaciones no solo la disminuye, sino que puede causar la falla del tubo debido a sobrecalentamiento, pues el tubo se calienta en ese punto en su parte exterior y no cede el calor absorbido pues el depósito lo impide.

5.3. DURANTE EL MANTENIMIENTO

✓ El mantenimiento se debe efectuar cuando la caldera se encuentra apagada y a temperatura ambiente.

✓ Se debe desalojar todo el líquido.

✓ Los tornillos se deben aflojar y atezar en forma de cruz para que haya una uniformidad de fuerza.

- ✓ Se desmantela empezando en la chimenea hasta llegar al hogar del quemador.

- ✓ Se debe verificar los empaques y hacer su respectivo cambio.

- ✓ Se debe limpiar todas las superficies para evitar el sobrecalentamiento y cualquier obstrucción.

6. PRUEBAS DE CAMPO

6.1 PRUEBA HIDROSTÁTICA.

Una unidad nueva o que ha estado fuera de servicio durante algún tiempo, o que ha sido sometida a reparación después de un largo período de servicio, debe ser sometida a prueba hidrostática para verificar su hermeticidad, la resistencia de las partes de la caldera sometidas a alta presión y localizar las fallas que pudiera presentar.

Las partes bajo prueba son: Tambores de vapor y lodos, cabezales o colectores del supercalentador, cabezal de vapor supercalentado, paredes de agua y sus colectores, tubos evaporadores, tubos del supercalentador y tubos bajantes.

Para poder presionar estas partes únicamente, se deben colocar ciegos en todas las conexiones de los tambores de vapor y lodos incluidas las conexiones de las válvulas de seguridad, las cuales no deben ser sometidas a la presión de prueba.

Sólo permanecerán sin ciegos las líneas de venteo del tambor de vapor y una línea de extracción del tambor de lodos.

Antes de iniciar la prueba en una unidad nueva o que ha sido abierta se debe realizar una inspección para verificar que:

- * Todos los materiales extraños y herramientas han sido retirados.
- * Nadie está en el interior de la unidad.

* Todas las válvulas de seguridad y las partes que no deben ser sometidas a la presión de prueba se hallan debidamente aisladas.

* Las regulaciones de las compañías aseguradoras y de entidades especializadas como la ASME, piden como presión de prueba 1.5 veces la presión de diseño de la caldera. Ejemplo: para una caldera cuya presión de diseño es de 500 psi, la presión de prueba será de 750 psi.

6.2 CUIDADOS EN LA PRUEBA HIDROSTÁTICA.

A pesar de su aparente sencillez la prueba hidrostática debe efectuarse con ciertas precauciones que buscan proteger la caldera y a las personas encargadas de realizarla.

La caldera se debe llenar con agua limpia o tratada, preferiblemente condensado frío o agua de calderas a temperatura ambiente y nunca exceder dicha temperatura. Una vez llena la caldera se debe ventear durante algún tiempo - más o menos 15 minutos - para desalojar todo el aire del sistema.

Cuando se esté presionando la caldera es recomendable que éste presionamiento se haga lentamente o de manera controlada a una rata de 50 psi por minuto. Una vez presionada la caldera se debe esperar un tiempo mínimo de 15 minutos para realizar la inspección. Hacerlo antes es exponerse al riesgo de una rotura o escape súbito por falla de alguno de los elementos sometidos a presión. Nunca se debe exceder la presión en más del 6% de la presión de prueba.

Durante la inspección se debe observar que la presión se sostenga, si esto no ocurre se deben buscar fugas en las bridas donde se instalaron los ciegos, tapas de los manholes de los tambores de vapor y de lodos, válvulas

a las que no se les puede instalar ciegos, humedad en las tuberías del hogar y el supercalentador.

Si la presión se sostiene durante un tiempo prudencial - más o menos 1 hora - se considera que la prueba ha sido satisfactoria y se debe despresionar la caldera abriendo el venteo del tambor de vapor.

6.2.1 Resultados de la Prueba Hidrostática. Las pruebas hidrostáticas realizadas en la mini caldera se llevaron a cabo en las instalaciones de Ingesol Latinoamérica que quedan ubicadas en el parque industrial Chimita de la ciudad de Girón.

En la prueba realizada se lleno la mini caldera de agua limpia y se presurizó con una bomba manual hasta 200 psi comprobándose que la presión se mantuvo durante las dos horas que se estimó para la prueba.

6.3 PRUEBA DE BRIDAS

Esta prueba se realiza por lo general después de la prueba hidrostática y su objetivo es verificar el correcto sello en las bridas y empaques de válvulas más próximas a la caldera, y que si presentaran escapes no podrían ser reparadas en operación. Estas válvulas deben estar cerradas.

Para realizar esta prueba el supercalentador debe ser llenado con condensado y las válvulas de seguridad instaladas y grapadas para evitar su disparo al presionar la caldera.

La caldera se debe llenar con agua de calderas, se ventea para desalojar el aire y se presiona hasta alcanzar la presión del sistema de agua de

alimentación de la unidad. En este punto se bloquea la entrada de agua y se procede a hacer la revisión de las bridas y válvulas en los tambores de vapor y de lodos, tomas de columnas de agua (botella), y de indicadores de nivel de vidrio, (LG`s), tapas de colectores y tambores, etc.

7. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

- Se cumplieron satisfactoriamente los objetivos trazados en el plan de trabajo de grado al diseñar, construir y montar una mini caldera pirotubular que produce 12 lb/h de vapor a una presión de 20 lb/in².
- Se adecuó el laboratorio de Plantas Térmicas de la escuela de Ingeniería Mecánica con un servicio de generación de vapor para requerimientos bajos, comparado con la producción de vapor total que había en el (650 lb/h a 150 psi), esto para suplir las necesidades bajas de vapor al momento de operar pocos equipos o sistemas que no requieren mucho vapor.
- La caldera construida cuenta con diez tubos lisos en material A106, cuatro bridas en material A36, el casco esta construido en material A106, el quemador es de tiro forzado y trabaja con gas natural, el control de llama se realiza mediante una tarjeta programada, los procedimientos de construcción se desarrollaron mediante la norma ASME lo que indica que se siguieron lineamientos comerciales para el diseño construcción y fabricación, demostrando la gran importancia que tiene el acogerse a los códigos que son los que se utilizan en el desarrollo real de la profesión.
- La eficiencia térmica obtenida y el desempeño de la mini caldera son bastante aceptables.
- El desarrollo de este trabajo de grado dio la oportunidad a los autores de adquirir destrezas y poner en práctica los conocimientos ingenieriles adquiridos en el proceso de formación como ingenieros mecánicos de la mano con la misión de la escuela de Ingeniería Mecánica de la Universidad

Industrial de Santander y a su vez permitió la interdisciplinareidad en el momento que se diseñó el control de la mini caldera y en la selección de los materiales adecuados para que esta tenga una buena vida útil y un buen desempeño.

- La recomendación principal que nació del desarrollo de este trabajo de grado es aprender y aplicar los conceptos básicos de quemadores en el plan de estudios de ingeniería mecánica ya que es un excelente complemento a la formación como Ingenieros.
- Como recomendación final a este trabajo de grado sería importante tener en cuenta cambiar el sensor de detección de llama actual que es de tipo térmico por uno de tipo lumínico para aumentar la seguridad de las personas que operan el equipo diseñado.

BIBLIOGRAFÍA

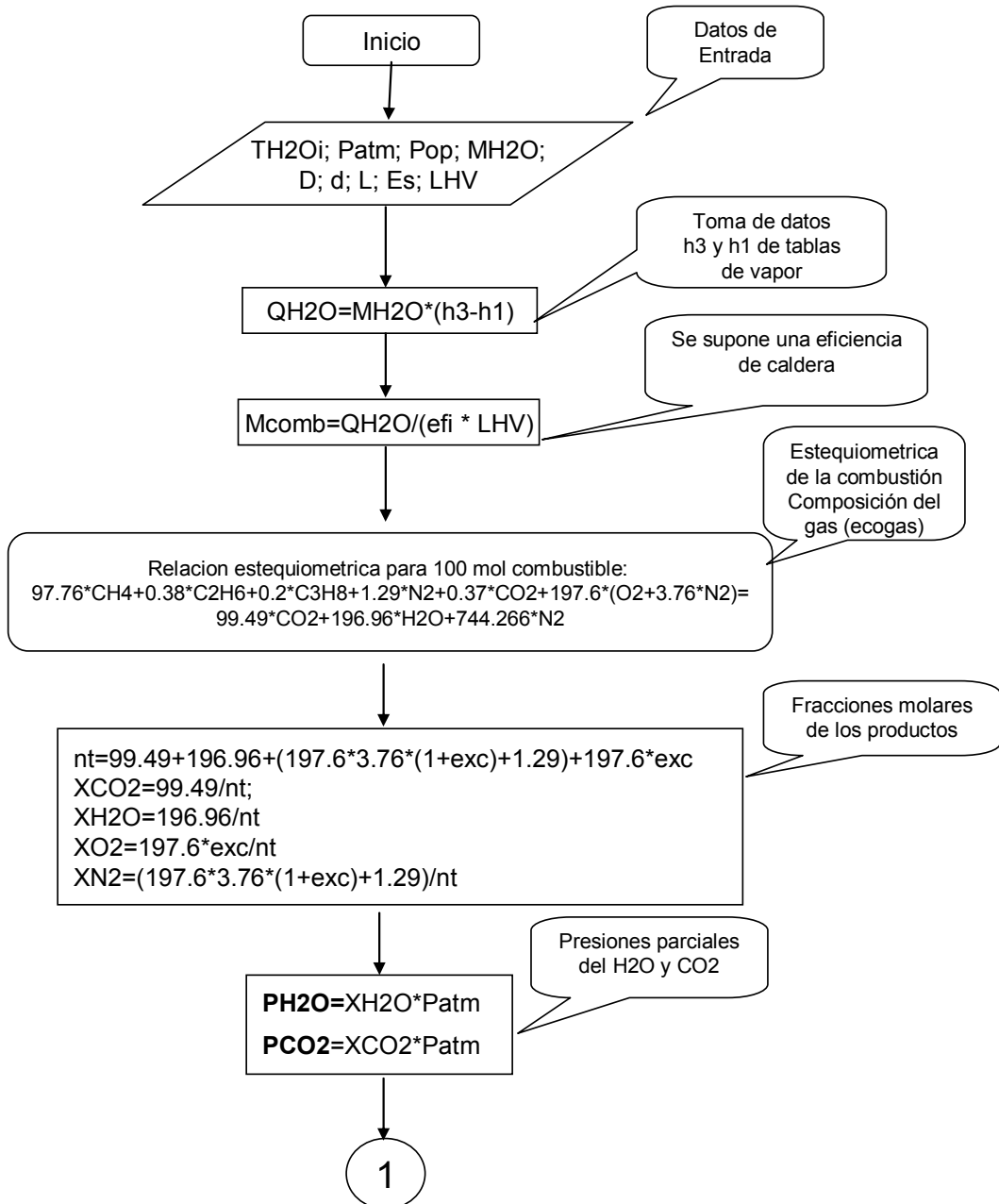
- ✓ AMELL, Andres y BARRAZA, Lorenzo. Quemadores Atmosféricos con llama de Premezcla, Grupo de ciencia y tecnología del gas. Medellín 1994.
- ✓ AMERICAN SOCIETY OF MECHANICAL ENGINEERS. ASME Boiler and Pressure Vessel Code Section VIII y IV.
- ✓ CENGEL, Yunus. Transferencia de Calor. McGraw-Hill México 2004.
- ✓ CHAVARRO, David y MONCADA, Iván. Diseño y Construcción de un sistema de generación de vapor aplicado a baños turco y sauna. Universidad Industrial de Santander. Bucaramanga. 1996.
- ✓ ESPINOSA, José y GOMEZ, Augusto. Proceso de Diseño y Manufactura de una Caldera Pirotubular. Universidad Industrial de Santander, Bucaramanga. 1984.
- ✓ INSTITUTION OF MECHANICAL ENGINEERS. Boiling Heat Transfer in Steam-Generating Units and Heat Exchangers. Birdcage Walk. Westminster. London. 1965.
- ✓ FARR, James R; JAWAD, Maan. H. Guide Book For The Design Of ASME Section IV y VIII Pressure Vessels. ASME Press. 1998.
- ✓ MEGYESY; Eugene F. Manual de Recipientes a Presión, Diseño y Calculo. Limusa S.A. 1998.

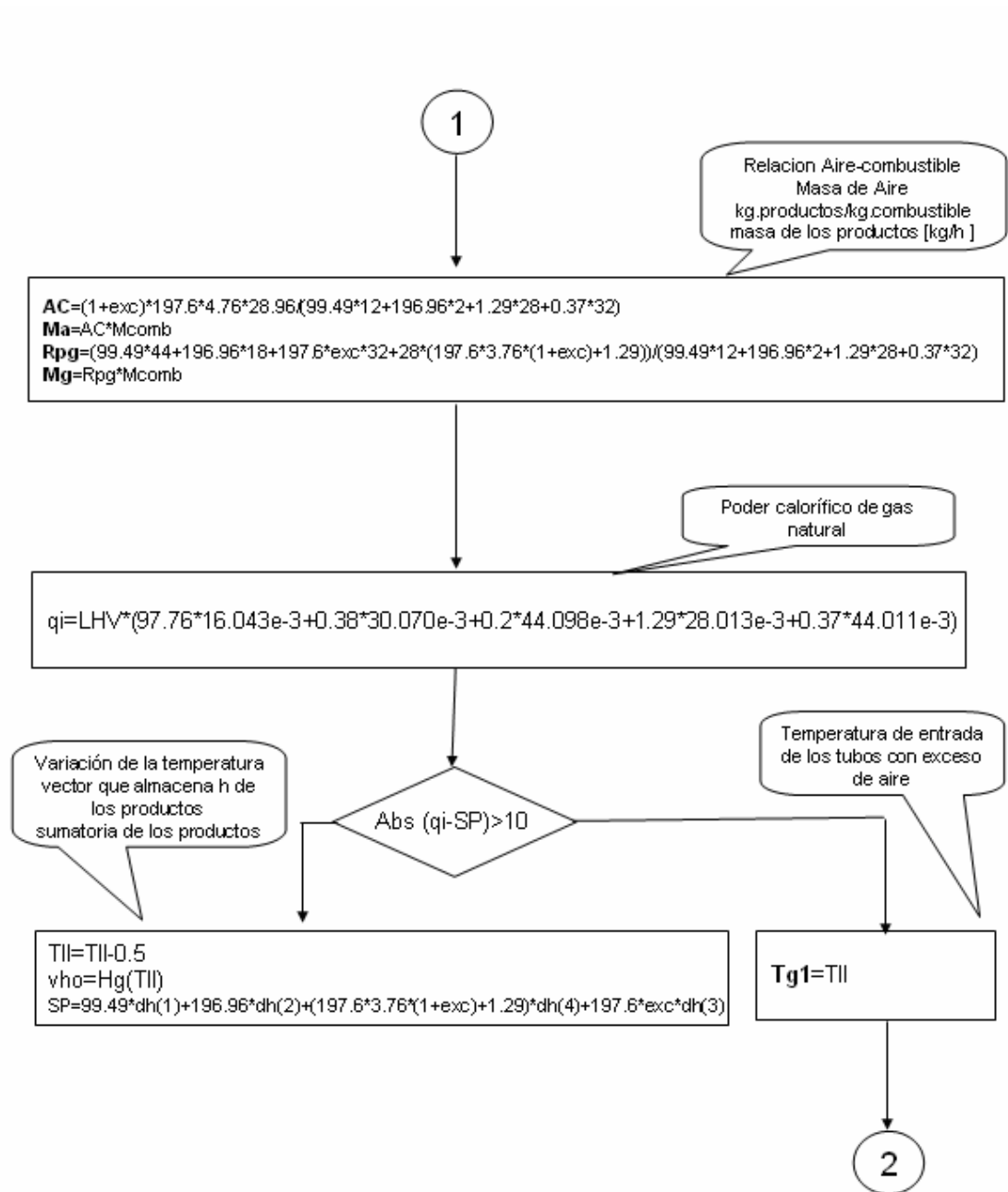
- ✓ SHIELD, Carl D. Calderas; Tipos, Características y sus Funciones. Compañía Editorial Continental, S.A. México. 1976.
- ✓ VASQUEZ, Alejandro. Diseño de una caldera portátil. Universidad Industrial de Santander. Bucaramanga. 1974.
- ✓ WARK, Keneth. Termodinamica. McGraw-Hill. 1993.
- ✓ ECOPETROL, Manual operativo de Calderas.

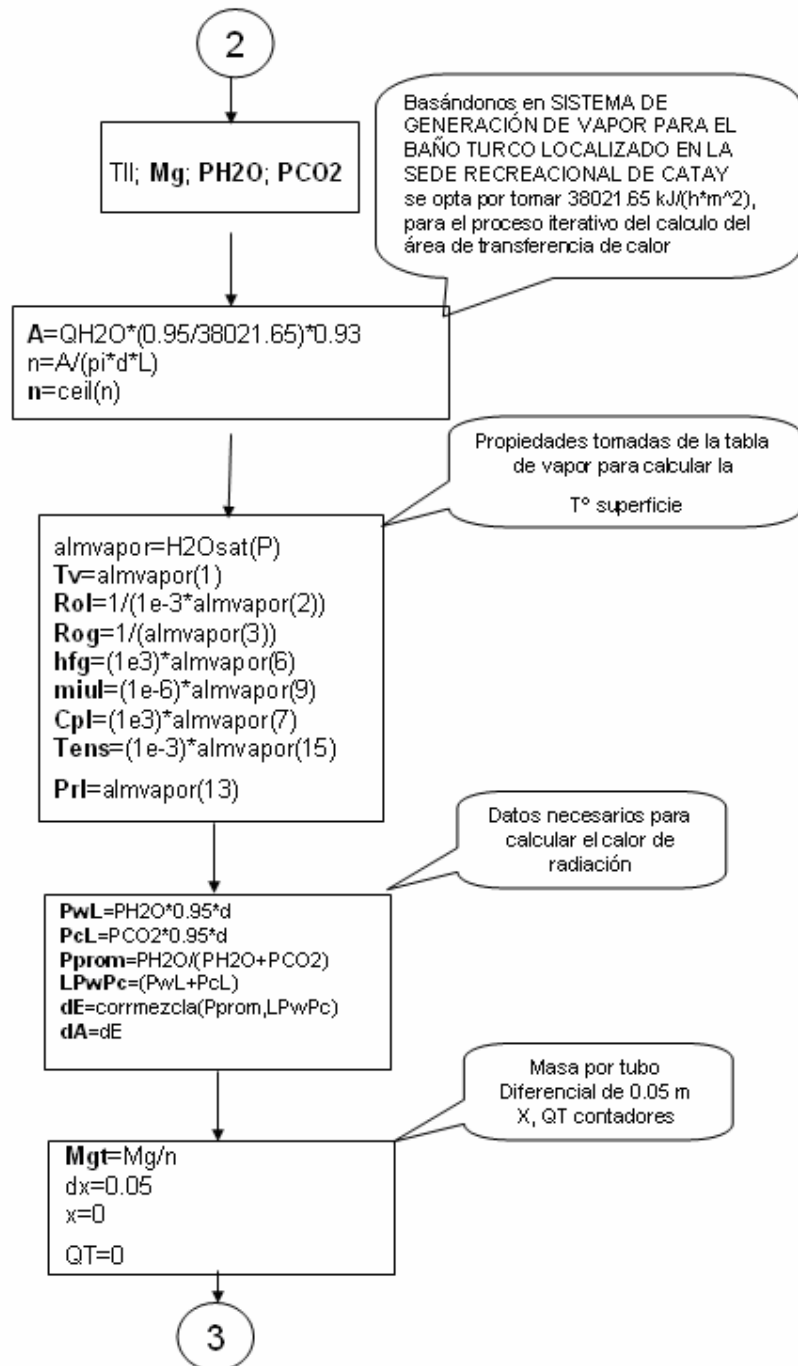
ANEXOS

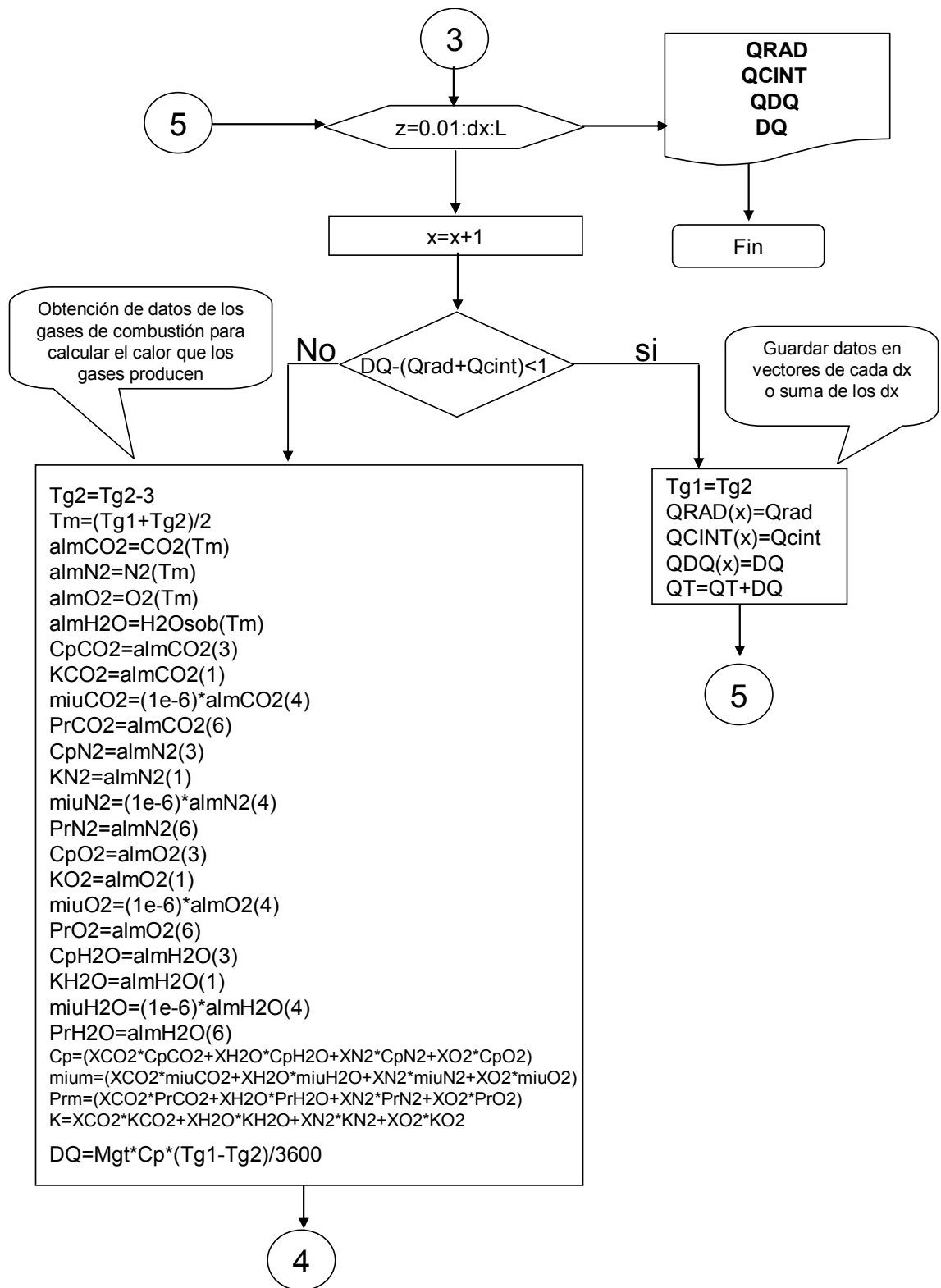
Anexo 1.

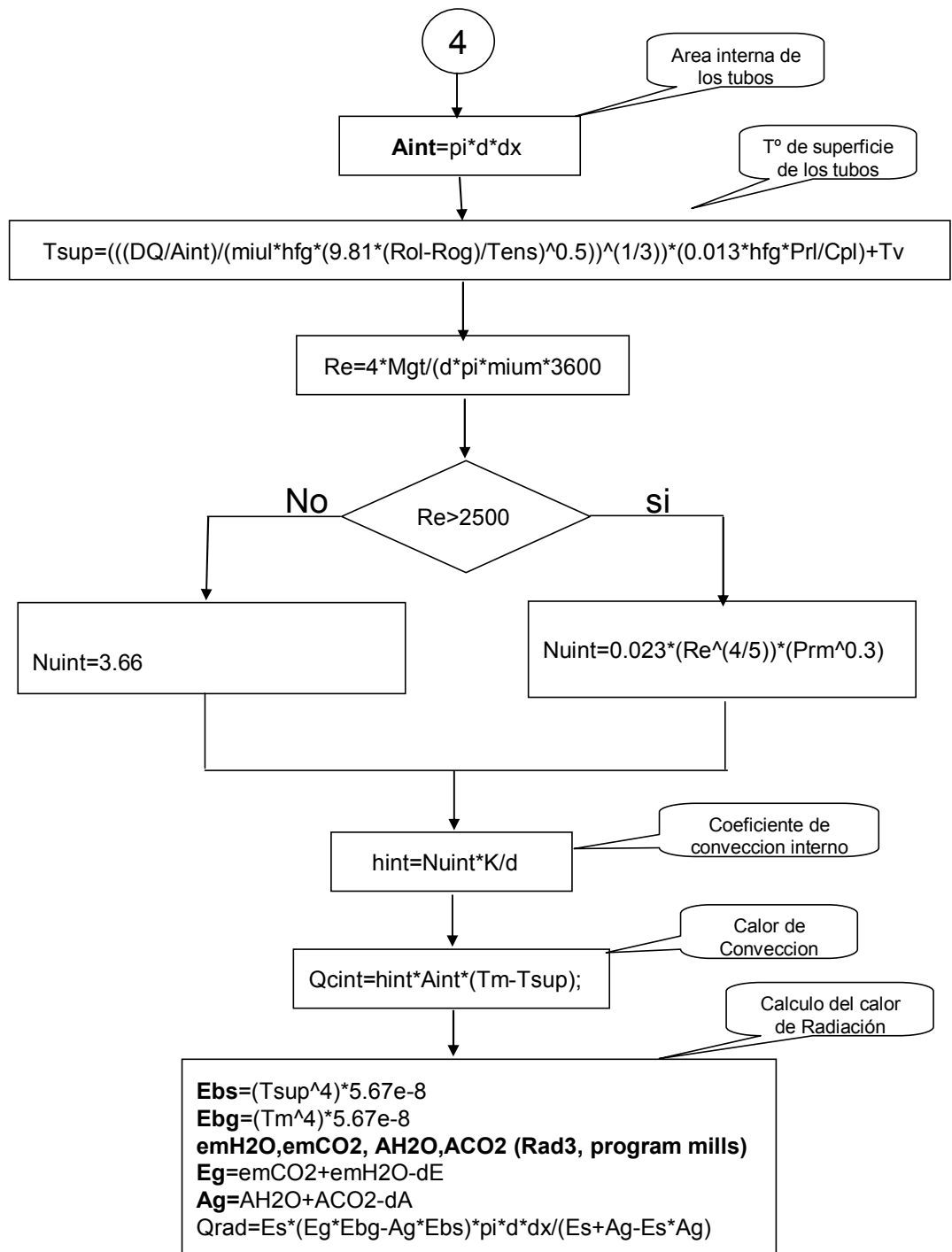
Procedimiento del Diseño Térmico











Nomenclatura

TH2O_i=Temperatura del agua inicial [K]
Patm=Presión atmosférica [atm]
Patmb=Presión atmosférica [bar]
Popb=Presión de trabajo [bar]
MH2O=Masa de vapor requerida [kg]
d=Diámetro interior de los tubos [m]
D=Diámetro exterior de los tubos [m]
L=Longitud de los tubos
Es=Emisividad de la superficie
h₁=h@(TH2O_i)
h₃=h@(Popb)
QH2O=Calor ganado por el Agua [kJ/h]
efi=eficiencia de caldera
LHV=Poder Calórico Inferior del gas natural [kJ/kg]
Mcomb= Flujo de combustible [kg/h]
exc=exceso de aire
nt=# total de moles en los productos
XCO2=fracción molar del CO2
XH2O=fracción molar del H2O
XO2=fracción molar del O2
XN2=fracción molar del N2
PCO2=Presión Parcial del CO2 [atm]
PH2O=Presión Parcial del CO2 [atm]
AC=Relacion Aire-combustible [kgaire/kgcomb]
Ma=Masa de Aire
Rpg=kg.productos/kg.combustible
Mg=masa de los productos [kg/h]
qi=Poder calorifico inferior [kJ]
vho=vector que almacena h de los productos
SP= sumatoria de los productos
TII= T° llama adiabática
Tg1=Temperatura de entrada de los gases
A=área de transferencia de calor
n=numero de tubos
almvapor= almacena las propiedades del vapor saturado @ Poperacion
Tv=Temperatura del agua a Popb
Roi=densidad del agua a x=0 y Popb
Rog=densidad del agua a x=1 y Popb
Hfg=hfg del agua a Popb
miul=viscosidad dinamica del agua Popb
vis= viscosidad cinematica del agua Popb
Cpl=calor especifico del agua a x=0 y Popb
Tens=tensión superficial del agua Popb
PrI= Prant del agua a x=0 y Popb
kl=conductividad térmica del agua a x=0 y Popb
cCO2=corrección de mezcla para el CO2 para Patm diferente 1atm
cH2O=corrección de mezcla para el H2O para Patm diferente 1atm
dx=diferencial del tubo
Tg2= T° del gas en x+dx
Mgt=masa por tubo
Tm=T° media de los gases
almCO2=vector que almacena propiedades de CO2
almN2=vector que almacena propiedades de N2
almO2=vector que almacena propiedades de O2
almH2O= vector que almacena propiedades de H2O
CpCO2=Cp del CO2 @Tm
KCO2=K del CO2 @Tm
miuCO2=viscosidad del CO2 @Tm
PrCO2=Prant del CO2 @Tm
CpN2=Cp del N2 @Tm
KN2=K del N2 @Tm
miuN2=viscosidad del N2 @Tm
PrN2=Prant del N2 @Tm
CpO2=Cp del O2 @Tm
KO2=K del O2 @Tm
miuO2=viscosidad del O2 @Tm
PrO2=Prant del O2 @Tm
CpH2O=Cp del H2O @Tm
KH2O=K del H2O @Tm
miuH2O=viscosidad del H2O @Tm
PrH2O=Prant del H2O @Tm
Cp=calcula el Cp J/Kg °K promedio
mium=calcula la viscosidad promedio
Prm=calcula el Prant promedio
K=calcula K promedio
DQ=calor por energía interna [J/s] de los gases
Aint=diferencial de área interna del tubo
Aext=diferencial de área externa del tubo
Tsup=T° de superficie
Re=Reynold
Nuint=nusselt interno
hint=coeficiente de convección interno de los gases
Qcint=calcula el Qconveccion interno [J/s]de los gases
Rad=Rayleight (Churchill y chu)
Nud= nusselt
hexmax= coeficiente de convección interno de los gases
hext= coeficiente de convección interno de los gases
emH2O=emisividad del H2O
AH2O=absortividad del H2O
emCO2=emisividad del CO2
ACO2=absortividad del CO2
dA=dE=corrección de mezcla
Eg=emisión total de los gases
Ag=absorción total de los gases
Qrad=Calor de radiación [J/s]
TG=vector que almacenado Tm
QRAD=vector que almacena Radiación
QCINT=vector que almacena Convección
QDQ=vector que almacena Qinterno
QT=sumatoria calor ganado por el agua

Anexo 2

PROGRAMA DEL PIC 16F873A

```
/** *****termocupla***** */
*
/*pin a3 controla reley de gas...pin a5
   reley de chispa....c5 ventilador

   float ent;
   float resul_2;
   int
   numeros[10]={0b01000000,0b11111001,
0b00100100,0b00110000,0b10011001,0b
00010010,0b00000011,0b11111000,0b00
000000,0b00010000};
void calcular_menor(float read)
{
    a=0;
    resul_2=modf(read,&ent);
    decimal_1=resul_2*10;
    resul_2=ent/100;
    resul_2=modf(resul_2,&ent);
    entero=ent;
    resul_2=resul_2*10;
    entero2=resul_2;
    resul_2=modf(resul_2,&ent);
    resul_2=resul_2+0.0001;
    entero3=resul_2*10;
}
void calcular_mayor(float read)
{
    a=1;
    read=read/1000;
    resul_2=modf(read,&ent);
    entero=ent;

#include <16f873a.h>
#if defined(__PCM__)
#device *=16 adc=10 //para
trabajo con el conversor
#include <math.h> //para
poder utilizar la instruccion modf
#fuses hs, nowdt
//configuro bits
#use delay (clock=10000000,
restart_wdt)
#byte port_a=5
//direccion de los puertos
#byte port_b=6
#byte port_c=7
#use fast_io(A) //para
poder tomarse como entrada o salida
#use fast_io(B)
#use fast_io(C)
#endif
float resultado,vref,temp,buffer,temp1;
long int dato,dato1;
int contl,conth;
float corte;
int entero,decimal_1,entero2,entero3,a;
long int i;
```

```

        resul_2=resul_2*10;
resul_2=modf(resul_2,&ent);
        entero2=ent;
        resul_2=resul_2*10;
resul_2=modf(resul_2,&ent);
        entero3=ent;
        resul_2=resul_2*10;
        decimal_1=resul_2;
    }
void visualizar (float read)
    {
        if(read==temp)
            {
                if(temp<1000)
                    calcular_menor(read);
                else if(!(temp<1000))
                    calcular_mayor(read);
            }
        if(read==corte)
            {
                if(corte<1000)
                    calcular_menor(read);
                else if(!(corte<1000))
                    calcular_mayor(read);
            }
        for(i=0;i<55;i++)
            {
                port_b=0;
port_b=numeros[decimal_1];
                output_low(pin_c0);
                output_low(pin_c1);
                output_low(pin_c2);
                output_high(pin_c3);

                delay_ms(5);
                port_b=0;
port_b=numeros[entero3];
                if(a==1)
                    output_high(pin_c4);
                //c4 punto display
                if(a==0)
                    output_low(pin_c4);
                output_low(pin_c0);
                output_low(pin_c1);
                output_low(pin_c3);
                output_high(pin_c2);
                delay_ms(5);
                output_high(pin_c4);
                port_b=0;
port_b=numeros[entero2];
                output_low(pin_c0);
                output_low(pin_c3);
                output_low(pin_c2);
                output_high(pin_c1);
                delay_ms(5);

                port_b=0;
port_b=numeros[entero];
                output_low(pin_c1);
                output_low(pin_c3);
                output_low(pin_c2);
                output_high(pin_c0);
                delay_ms(5);
                output_low(pin_c0);
            }
        }
    void termo()

```

```

        {
            dato=read_adc();
            resultado=dato*vref;
            resultado=resultado/120;
            resultado=resultado*1000;
            temp=1.1197+resultado;
temp=temp*25.353;
            //obtengo temperatura
            buffer=temp+60;
            if(temp1<temp)
                temp1=temp;
            if(temp1>buffer)
                corte=temp1-10;
        }
void obtener_dato()
    {
        corte=2.55*conth;
        corte=corte*100;
        corte=corte+contl;
        if(corte>1250)
            corte=corte/10;
    }
void comparar_temp()
    {
        if(temp>=corte)
            output_low(pin_a5);
        //desactivo chispa
        else if(!(temp>=corte))
            output_high(pin_a5);
        //activo chispa
            output_high(pin_a3);
        while(!input(pin_c6))
            {
                output_low(pin_a3);
                output_low(pin_a5);
                termo();
                visualizar(temp);
                termo();
                visualizar(temp);
                termo();
                visualizar(temp);
                obtener_dato();
                visualizar(corte);
                obtener_dato();
                visualizar(corte);
                obtener_dato();
                visualizar(corte);
                temp1=buffer;
            }
    }
    pulsar(float corte)
    {
        if(input(pin_a1))
            //pulsador para subir corte
            corte=corte+10;
        if(input(pin_a2))
            //pulsador para bajar corte
            corte=corte-10;
            termo();
            comparar_temp();
        if(input(pin_a1)||input(pin_a2))
            {
                if(corte<1000)
                    //si corte es menor que
                    1000 multiplico por 10 pa quitar
                    decimal
            }
    }

```

```

        {
            dato1=corte*10;
            dato1=dato1/255;
            conth=dato1;
            dato1=dato1*255;
            dato1=corte*10-
dato1;
        }
else if(corte>=1000)
    {
        dato1=corte;
        dato1=dato1/255;
        conth=dato1;
        dato1=dato1*255;
        dato1=corte-
dato1;
    }
    contl=dato1;
    obtener_dato();
}
}
void leer_temp()
{
    termo();
    comparar_temp();
    visualizar(temp);
}
void leer_corte()
{
    pulsar(corte);
    obtener_dato();
    visualizar(corte);
}
}

void main()
{
    int j;
    setup_adc_ports(RA0_ANALO
G);
    setup_adc(adc_clock_internal);
    set_adc_channel(0);
    set_tris_a(0b000111);
    set_tris_b(0X00);
    set_tris_c(0b01000000);
    port_a=0x00;
    port_c=0x00;
    port_b=0x00;
    corte=200;
    conth=0;
    contl=200;
    inicio:
    delay_ms(2500);
    output_high(pin_c5);
    //activo ventilador
    inicio1:
    output_high(pin_a5);
    //activo chispa
    output_high(pin_a3);
    //activo gas
    vref=5.0/1023;
    for(j=0;j<=4;j++)
        //120seg
        {
            leer_temp();
            if( !bit_test(port_a,5))
                goto salir;
        }
}

```

```

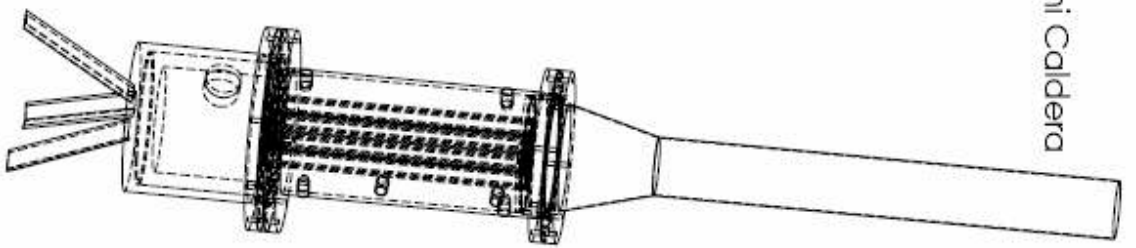
    leer_temp();
if( !bit_test(port_a,5))
    goto salir;
    leer_temp();
if( !bit_test(port_a,5))
    goto salir;
    leer_temp();
if( !bit_test(port_a,5))
    goto salir;
    leer_corte();
if( !bit_test(port_a,5))
    goto salir;
    leer_corte();
if( !bit_test(port_a,5))
    goto salir;
    leer_corte();
if( !bit_test(port_a,5))
    goto salir;
    leer_corte();
if( !bit_test(port_a,5))
    goto salir;
    leer_corte();
if( !bit_test(port_a,5))
    goto salir;
    leer_corte();
}

    goto end;
    salir:
    ver:
for(j=0;j<=4;j++)
    {
        leer_temp();
        leer_temp();
        if( bit_test(port_a,5))
            goto inicio1;
        leer_temp();
        leer_temp();
        leer_corte();
        leer_corte();
        if( bit_test(port_a,5))
            goto inicio1;
        leer_corte();
        leer_corte();
        if( bit_test(port_a,5))
            goto inicio1;
        }
    goto ver;
    end:
output_low(pin_a3);
output_low(pin_a5);
}

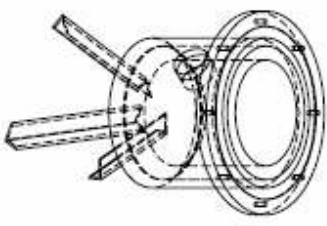
```

ANEXO 3
PLANOS DE MINI CALDERA

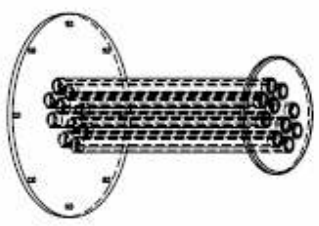
Mini Caldera



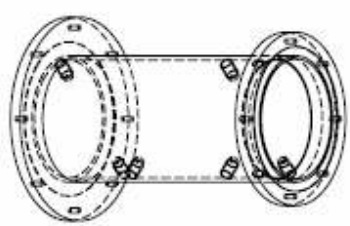
Hogar



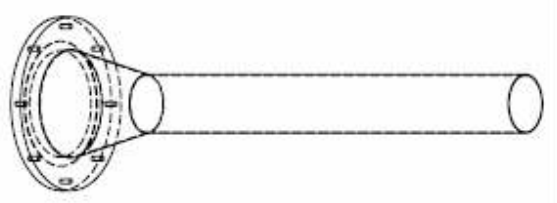
Haz de tubo



CASCO



Chimenea



UNLESS OTHERWISE SPECIFIED:
DIMENSIONS ARE IN MILLIMETER
TOLERANCES: ±0.5
ANGULAR: ±1°

NAME	
DRAWN1	OMAR IGUARAN D.
DRAWN1	DIANA MARTINEZ B.
CHECKED	OMAR GELVEZ A.
DATE	28/04/2008

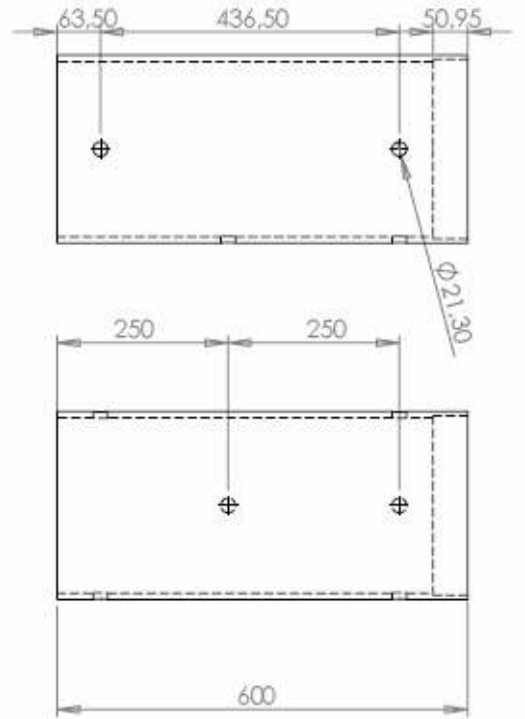
MATERIAL	ACERO
FINISH	N.A.
DO NOT SCALE DRAWING	



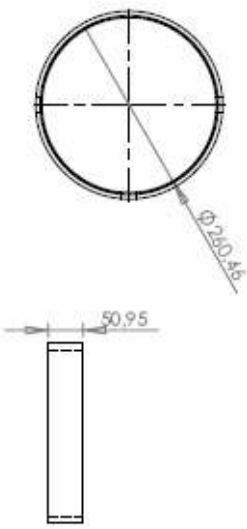
TITLE:
CONJUNTO

MINICALDERA

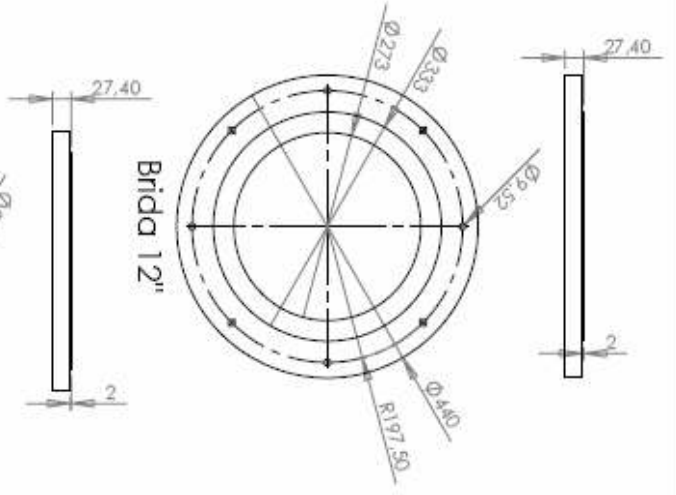
SIZE	DWG. NO.	REV
A	caldera	
SCALE: 1:15WEIGHT:	SHEET 1 OF 4	



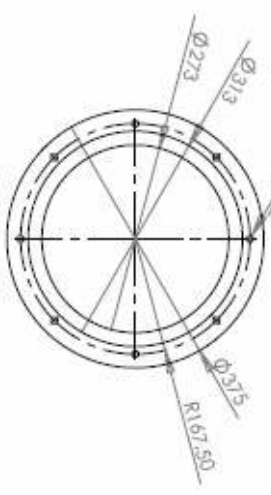
Tubo 10"
shc 40



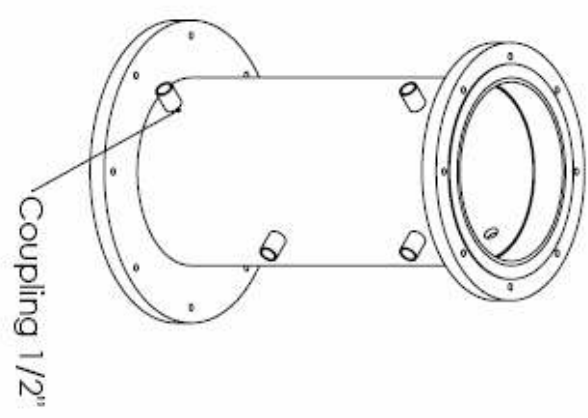
Anillo





Brida 10"



Brida 12"



UNLESS OTHERWISE SPECIFIED:		NAME	
DIMENSIONS ARE IN MILLIMETER		DRAWN	OWAR IGUARAIN D.
TOLERANCES: ±0.5		CHECKED	OWAR GELVEZ A.
ANGULAR: ±1°		DATE	28/04/2008
MATERIAL		TITLE	
ACERO		CASCO	
FINISH		SIZE DWG. NO.	
N.A.		A	
DO NOT SCALE DRAWING		SCALE: 1:10 WEIGHT:	
		SHEET 2 OF 4	
			
		REV	

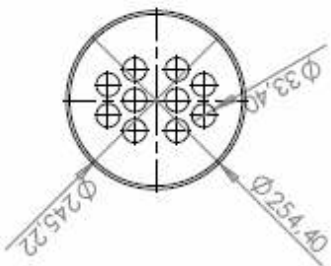
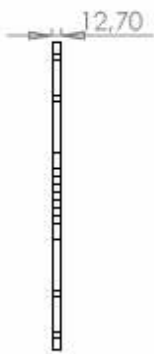
5 4 3 2 1



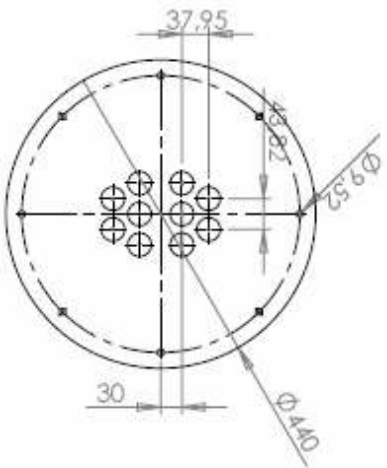
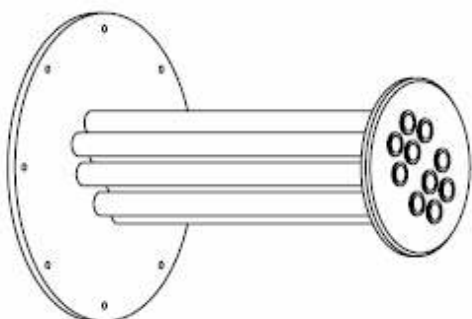
Arreglo Triangular a 30°



DETALLE A
ESCALA 1 : 5



Tubo 1"
shc 80



Placa Porta tubos
inferior

Placa Porta tubos
superior

UNLESS OTHERWISE SPECIFIED:

DIMENSIONS ARE IN MILLIMETER
TOLERANCES: F0.5
ANGULAR: ±1°

NAME

DRAWN OMAR IGUARAN D.

DRAWN DAIANA MARTINEZ B.

CHECKED OMAR GELVEZ A.

DATE 28/04/2008

MINICALDERA

TITLE:

HAZ DE TUBOS

MATERIAL ACERO

FINISH N.A.

DO NOT SCALE DRAWING



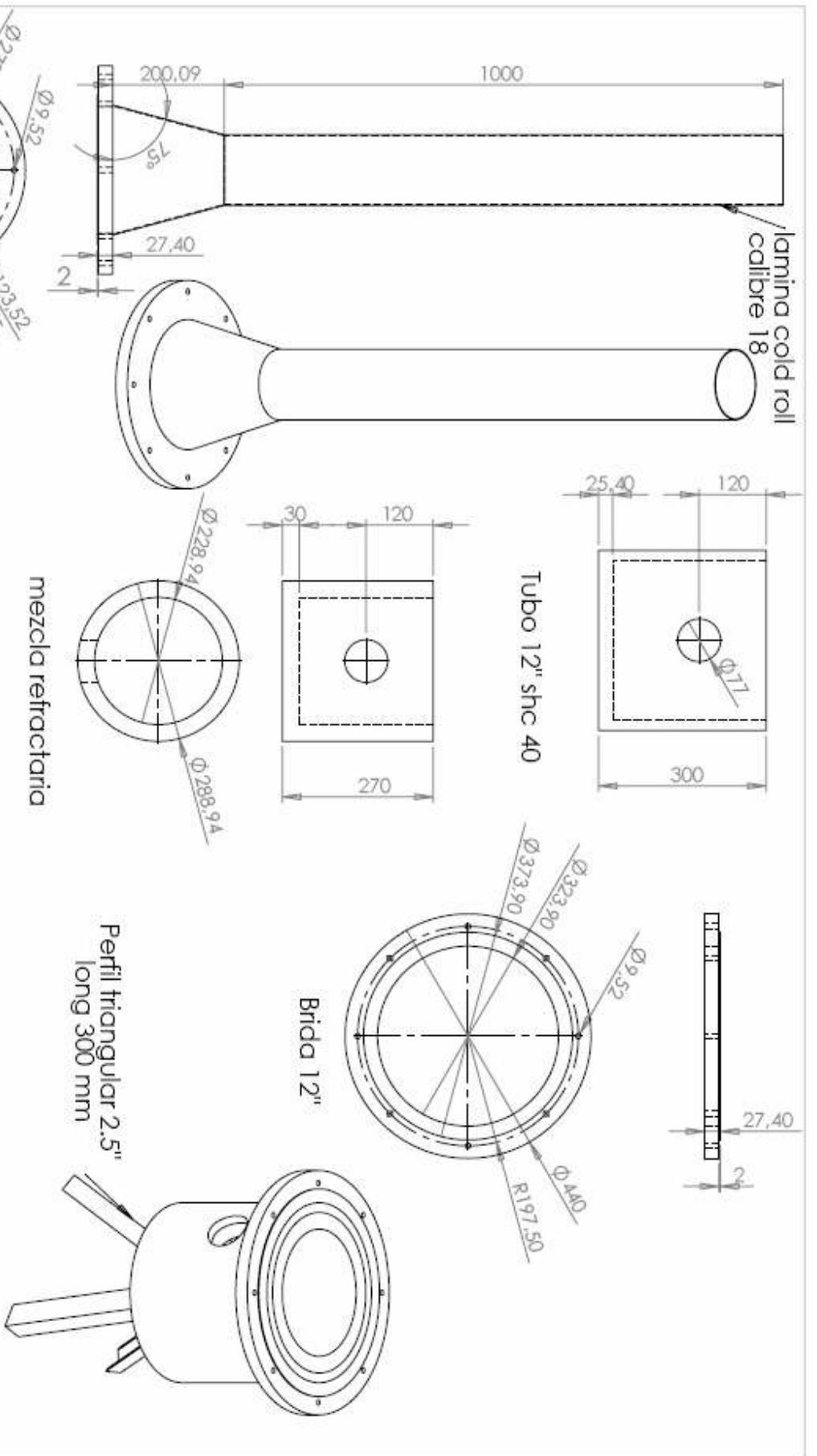
SIZE DWG. NO.

A caldera

REV

SCALE: 1:10 WEIGHT:

SHEET 3 OF 4



UNLESS OTHERWISE SPECIFIED: DIMENSIONS ARE IN MILLIMETER TOLERANCES: ±0.5 ANGULAR ±1°		NAME	
DRAWN	OMAR IGUARAIN D.	DRAWN	DIVANIA MARTINEZ B.
CHECKED	OMAR GELVEZ A.	CHECKED	OMAR GELVEZ A.
DATE	28/04/2008	DATE	28/04/2008
TITLE: CHIMENEA HOGAR		MINICALDERA	
MATERIAL: ACERO		SIZE DWG. NO. A	
FINISH: N.A.		SCALE: 1:10 WEIGHT: SHEET 4 OF 4	
DO NOT SCALE DRAWING		REV	



5 4 3 2 1