

**DISEÑO DE UNA CALDERA PIROTUBULAR QUE USE BIOMASA COMO  
COMBUSTIBLE, PARA LA GENERACIÓN DEL VAPOR DE ARRASTRE DE UN  
DESTILADOR DE ACEITES ESENCIALES**

**KAROL MELISSA ESCORCIA QUIROGA**

**JUAN CARLOS GONZÁLEZ VESGA**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER  
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO-MECÁNICAS  
ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA  
BUCARAMANGA**

**2012**

**DISEÑO DE UNA CALDERA PIROTUBULAR QUE USE BIOMASA COMO  
COMBUSTIBLE, PARA LA GENERACIÓN DEL VAPOR DE ARRASTRE DE UN  
DESTILADOR DE ACEITES ESENCIALES**

**KAROL MELISSA ESCORCIA QUIROGA**

**JUAN CARLOS GONZÁLEZ VESGA**

**Trabajo de grado para optar por el título de  
Ingeniero Mecánico**

**Director**

**Ing. OMAR GELVEZ AROCHA**

**Codirector**

**Ph.D. ELENA E. STASHENKO**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER  
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO-MECÁNICAS  
ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA  
BUCARAMANGA**

**2012**

## DEDICATORIA

*Primero que todo, a mi mami por apoyarme en cada idea que tengo con tanta ternura, amor y sabiduría.*

*A mi hermano JoseFavian por su incondicionalidad y cariño.*

*A mi primo Dani y a mi tíaGeña por su amor y compañía.*

*A mi querido amigo Andres por nunca desaparecer de mi vida.*

*Y a la vida misma porque cada cambio y contradicción que le acompaña me permite aprender y avanzar.*

*Karol Melissa Escorcía Quiroga*

## DEDICATORIA

*Al escultor de la vida por todas sus enseñanzas.*

*A mi madre Marina Vesga por sus grandes consejos y su infinito amor.*

*A mi padre Alvaro González por su ayuda incondicional y su cariño.*

*A mis hermanos por ser el motivo más importante de mi felicidad.*

*A mi amiga Raquel Sofía por brindarme su hermandad desde que nos conocimos.*

*A toda mi familia, amigos y compañeros por hacer parte de mí ser.*

*Juan Carlos González Vesga*

## **AGRADECIMIENTOS**

*Al Ingeniero Omar Gelvez Arocha, docente de la Escuela de Ingeniería Mecánica, por su persistencia, interés, creatividad, conocimiento, formación académica y apoyo en el desarrollo de este proyecto de grado.*

*A todo el CENIVAM y especialmente a la doctora Elena E. Stashenko, al doctor Jairo Martínez y a Camilo Durán por acogernos y acompañarnos con tanta confianza durante todo este proceso.*

*Al ingeniero Jairo Rojas del Colmáquinas por su apoyo y disponibilidad durante la elaboración de este diseño.*

*A todos nuestros amigos y compañeros de la Universidad por su amistad.*

## CONTENIDO

INTRODUCCIÓN .....	21
1 GENERALIDADES.....	23
1.1 CALDERA PIROTUBULAR .....	23
1.2 COMPONENTES DE LA CALDERA DE BIOMASA .....	25
1.2.1 El casco .....	25
1.2.2 Haz de tubos de humo .....	26
1.2.3 Cámara de combustión .....	26
1.2.4 Sistema dosificador.....	26
1.2.5 Cámaras de humo.....	27
1.2.6 Chimenea .....	27
1.2.7 Cubiertas .....	27
1.2.8 Puertas.....	28
1.2.9 Soportes.....	28
1.2.10 Equipos y mecanismos auxiliares.....	28
1.2.11 Componentes de seguridad.....	28
2 TÉCNICAS DE COMBUSTIÓN DE BIOMASA .....	29
2.1 PROCESO DE LA COMBUSTIÓN .....	31
2.1.1 Combustión de la biomasa .....	31
2.1.2 Tipos de combustión.....	33
2.2 DISEÑO EXPERIMENTAL DEL CONCEPTO DEL HORNO .....	39
2.2.1 Montaje 1 .....	41
2.2.2 Montaje 2.....	44
2.2.3 Montaje 3.....	47
2.3 PRUEBA: MEDICIÓN DEL PODER CALORÍFICO DE VARIAS HERBÁCEAS.....	51

2.3.1	Equipos .....	52
2.3.2	metodología.....	52
2.3.3	Resultados.....	54
3	DISEÑO TÉRMICO.....	56
3.1	PROCESO DE COMBUSTIÓN.....	57
3.1.1	Estequiometría.....	57
3.2	CÁLCULO DE SUPERFICIES DE TRASFERENCIA DE CALOR .....	63
3.2.1	Análisis de transferencia de calor.....	64
3.2.2	Análisis de las alternativas de diseño de la caldera .....	70
4	DISEÑO MECÁNICO.....	74
4.1	CÁLCULO DEL ESPESOR DEL CASCO DE LA CALDERA ( <i>t<sub>casco</sub></i> ) .....	75
4.2	CÁLCULO DEL ESPESOR DE LOS TUBOS DE LA CALDERA .....	76
4.2.1	Espesor de los tubos secundarios.....	76
4.2.2	Espesor del tubo principal.....	78
4.3	CÁLCULO DEL ESPESOR DE LA PLACA PORTATUBOS( <i>t<sub>ppt</sub></i> ) .....	79
4.3.1	Área de los tubos secundarios ( <i>a<sub>o</sub></i> ).....	80
4.3.2	Área del tubo principal ( <i>b<sub>o</sub></i> ).....	80
4.3.3	Área transversal interna del casco <i>A</i> .....	80
4.3.4	Área transversal de los agujeros en la placa portatubos <i>C</i> .....	80
4.3.5	Área transversal del casco <i>B</i> .....	81
4.3.6	Deflexión o eficiencia de ligamento $\mu$ .....	81
4.3.7	Presión diferencial <i>P<sub>d</sub></i> .....	81
4.3.8	Expansión diferencial ( $\gamma$ ).....	82
4.3.9	Presión diferencial efectiva <i>P<sub>e</sub></i> .....	83
4.3.10	Determinación del factor <i>kR</i> .....	83
4.3.11	Máximo esfuerzo radial en la placa portatubos <i>P<sub>rmax</sub></i> .....	83
4.3.12	Máximo esfuerzo longitudinal por los tubos <i>P<sub>tmax</sub></i> .....	84
4.4	CÁLCULO DE LOS STAYBOLTS.....	85

4.4.1	Cálculo del paso entre <i>staybolts</i> .....	85
4.4.2	Dimensionamiento de los <i>staybolts</i> .....	85
4.5	LONGITUD DE LA CÁMARA DE RETORNO DE LOS GASES ( <i>LCR</i> ) .....	87
4.6	CÁLCULO DE ABERTURAS Y REFUERZOS .....	87
4.6.1	Cálculo del espesor mínimo de la boquilla de alimentación de agua.	87
4.6.1.1	Área de refuerzo requerida .....	88
4.6.1.2	Área de refuerzo disponible .....	88
4.6.2	Cálculo del espesor mínimo de las boquillas de vapor, y de conexión al control de nivel. ....	90
4.6.3	Distancia entre aberturas .....	92
4.7	CÁLCULO DE LOS SOPORTES DEL EQUIPO .....	93
4.7.1	Esfuerzo flexionante longitudinal ( <i>S1</i> ) .....	94
4.7.2	Esfuerzo cortante Tangencial ( <i>S2</i> ) .....	95
4.7.3	Esfuerzo circunferencial ( <i>S4</i> ).....	96
4.7.4	Esfuerzo en la parte inferior del soporte( <i>S5</i> ).....	96
4.7.5	Diseño de los soportes .....	97
4.8	CHIMENEA.....	99
4.9	ACCESORIOS PARA IZAJE .....	100
4.10	SOLDADURA .....	101
4.11	ESPACIAMIENTO ENTRE TORNILLOS.....	102
5	SELECCIÓN DE COMPONENTES DE CONTROLDE PRESIÓN Y NIVEL.	104
5.1	CONTROL DE PRESIÓN.....	104
5.1.1	Dispositivo seleccionado para el control .....	104
5.1.2	Elementos utilizados en el control.....	105
5.1.3	Comportamiento del control de presión.....	105
5.2	VÁLVULA DE SEGURIDAD .....	106
5.3	CONTROL DE NIVEL DE AGUA.....	108
5.3.1	Dispositivos utilizados en el control.....	109

6	DISEÑO DEL SISTEMA DE TUBERIA DE AGUA Y VAPOR.....	111
6.1	DIMENSIONES DEL LUGAR .....	111
6.1.1	Agua de alimentación para una caldera.....	112
6.1.2	Tanque de alimentación.....	113
6.2	TUBERÍA DEL AGUA DE ALIMENTACIÓN .....	114
6.2.1	Pérdidas en tuberías.....	114
6.2.2	Pérdidas en válvulas.....	115
6.2.3	Pérdidas totales.....	116
6.2.4	Espesor de la tubería.....	117
6.3	TUBERÍA DE SALIDA DE VAPOR.....	118
6.3.1	Pérdidas en tuberías.....	118
6.3.2	Pérdidas en válvulas.....	120
6.3.3	Pérdidas totales.....	120
6.4	BOMBA DE ALIMENTACIÓN.....	121
6.4.1	Operación continua o intermitente.....	121
6.4.2	Capacidad .....	122
6.4.3	Presión de descarga.....	122
6.4.4	Bomba seleccionada .....	123
6.5	ACCESORIOS .....	124
7	PROCESO DE MANUFACTURA Y CONTROL DE CALIDAD.....	127
7.1	Formación del casco:.....	127
7.2	Trazado de las placas portatubos.....	129
7.3	Uniones longitudinales y circunferenciales: .....	129
7.4	Juntas de placas portatubos.....	130
7.5	Staybolts .....	130
7.5.1	Staybolts y stays PFT 28 .....	131
7.5.2	Soldadura en los staysPW19.....	131
7.6	Tubos.....	133

7.6.1	Unión de los tubos PFT-12.2.....	133
7.7	Puertas y aberturas.....	135
7.8	Compuertas de inspección.....	136
7.8.1	Puerta de acceso a la cámara de combustión PFT 42 .....	136
7.8.2	Requerimientos para aberturas de inspección PFT 43.....	136
7.9	Abertura entre caldera y válvula de seguridad PFT 44 .....	136
7.10	Tubería de alimentación PFT 48 .....	137
7.11	Indicadores del nivel de Agua.....	137
7.12	Manómetros PG 60.6.1 .....	138
7.13	Soporte PFT 46 .....	138
7.14	Materiales PW-5.....	138
7.15	Diseño de uniones soldadas PW-9.....	139
7.15.1	Soldadura en ranuraPW9.2 .....	139
7.15.2	Soldaduras en tubos y tuberíasPW9.3.2 .....	141
7.15.3	Conexiones soldadas PW15.....	141
7.15.4	Cuellos y tubos unidos por un solo lado pw16.6 .....	143
7.16	Revisión ultrasónica y radiográfica PW11. ....	143
8	CONCLUSIONES.....	145
9	RECOMENDACIONES .....	147
	BIBLIOGRAFIA.....	148
	ANEXOS.....	151

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Esquema de una caldera pirotubular. ....	24
Figura 2. Componentes de la caldera de biomasa .....	25
Figura 3. Comportamiento de los gases en un ciclón. ....	27
Figura 4. Propiedades y características que influyen en la combustión del combustible .....	31
Figura 5. Temperatura de llama adiabática vs exceso de aire .....	33
Figura 6. Esquema de parrilla en lecho fijo, inclinada.....	36
Figura 7. Esquema de funcionamiento de una parrilla viajera.....	36
Figura 8. Esquema de una parrilla móvil inclinada. ....	37
Figura 9. Esquema de funcionamiento de una parrilla móvil .....	37
Figura 10. Esquema de funcionamiento de una parrilla vibratoria.....	37
Figura 11. Clasificación de sistemas de operación de hornos de parrilla.....	38
Figura 12. Diseño conceptual del quemador. ....	40
Figura 13. Montaje 1 .....	42
Figura 14. Fotografía del segundo montaje y sus respectivas parrillas. ....	44
Figura 15. Fotografía del montaje 3 .....	47
Figura 16. Fotografía de los humos contaminados.....	50
Figura 17. Fotografía de una combustion completa. ....	51
Figura 18. Material recogido despues de una destilación. ....	52
Figura 19. Fotografías de las trituradoras. a) Trapp, b) fina.....	53
Figura 20. Fotografía de la bomba calorimétrica. ....	53
Figura 21. Diseño térmico de la caldera.....	56
Figura 22. Parámetros para el diseño.....	57
Figura 23. Diagrama conceptual de operación de la caldera. ....	57
Figura 24. Interfaz del programa de cálculo de la superficie de calefacción. ....	64
Figura 25. Transferencia de calor desde el gas al agua.....	65
Figura 26. Asilamiento.....	68
Figura 27. Procedimiento para el diseño térmico de la caldera. ....	69
Figura 28. Espesor del casco.....	75
Figura 29. Espesor tubos secundarios .....	76
Figura 30. Presión diferencial.....	82
Figura 31. Staybolts .....	86

Figura 32. Aberturas .....	88
Figura 33. Distancia entre aberturas.....	92
Figura 34. Soportes del equipo .....	94
Figura 35. Diseño de los soportes.....	97
Figura 36. Geometría de los soportes .....	98
Figura 37. Diseño de un ciclón convencional.....	100
Figura 38. Accesorio de izaje.....	101
Figura 39. Espesor soldadura de la placa.....	102
Figura 40. Espaciamento recomendado para pernos.....	102
Figura 41. Bomba de alimentación.....	123
Figura 42. Diagrama de la caldera con sus accesorios y dispositivos de control	124
Figura 43. Cuadratura de las láminas.....	127
Figura 44.. Proceso de rolado .....	128
Figura 45 Vista frontal de la placa portatubos .....	129
Figura 46. <i>Staybolts</i> diagonales. ....	130
Figura 47. Métodos de fijación de tubos a las placas .....	133

## LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Criterios para la selección del bagazo .....	30
Tabla 2. Tecnologías de la combustión de biocombustibles.....	34
Tabla 3. Características físicas y de operación .....	41
Tabla 4. Datos de la prueba del montaje 1. ....	42
Tabla 5. Datos de la prueba 2 del montaje 1. ....	43
Tabla 6. Datos del montaje 2. ....	45
Tabla 7. Datos de la prueba 1 del montaje 3. ....	47
Tabla 8. Datos de la prueba del montaje 3. ....	48
Tabla 9. Tabla de los datos obtenidos en cada prueba .....	54
Tabla 10. Poder calorífico de las 3 herbáceas.....	54
Tabla 11. Composición química del combustible.....	58
Tabla 12. Entalpía de los productos .....	61
Tabla 13. Ecuaciones de balance de masa .....	62
Tabla 14. Resultados de distintas iteraciones que generan 1 kg/min de vapor. ....	71
Tabla 15. Costos de materiales para cada caldera.....	72
Tabla 16. Valores de parámetros dependientes de los resultados de la tabla 17..	73
Tabla 17. Presión de trabajo máxima permisible para los tubos secundarios. ....	77
Tabla 18. Presión de trabajo máxima permisible para el tubo principal. ....	79
Tabla 19. Esfuerzos máximos en la placa portatubos. ....	84
Tabla 20. Reynolds encontrados para el rango de diámetros permitidos por la norma.....	115
Tabla 21. Resultados de iteraciones hechas para el calculo de tuberías .....	116
Tabla 22. Iteraciones para el cálculo de Re.....	119
Tabla 23. Perdidas en la tubería.....	121
Tabla 24. Características de operación de la bomba de alimentación.....	123
Tabla 25. Accesorios de las tuberías de vapor y agua .....	125

## LISTA DE ANEXOS

Anexo A. Factores $k_r$ y $G$ , para la placa portatubos.....	152
Anexo B. Dimensionamiento de accesorios de izaje .....	153
Anexo C. Diseño de juntas soldadas .....	154
Anexo D. Espaciamiento mínimo entre tornillos .....	155
Anexo E. Pressuretrol.....	157
Anexo F. Ficha técnica control de nivel McDonnell.....	159
Anexo G. Presupuesto .....	160
Anexo H. Planos de detalle de la caldera .....	162
Anexo I. Manual de funcionamiento y Mantenimiento de la caldera .....	227

## RESUMEN

### TÍTULO:

DISEÑO DE UNA CALDERA PIROTUBULAR QUE USE BIOMASA COMO COMBUSTIBLE, PARA LA GENERACIÓN DEL VAPOR DE ARRASTRE DE UN DESTILADOR DE ACEITES ESENCIALES\*

### AUTORES:

ESCORCIA QUIROGA, KAROL MELISSA; GONZÁLEZ VESGA, JUAN CARLOS \*\*

### PALABRAS CLAVE:

Caldera pirotubular, biomasa, diseño, generación de vapor, chimenea, tubos de fuego, horno.

### DESCRIPCIÓN

Este documento tiene como objetivo la exposición de los distintos parámetros asociados al diseño de una caldera pirotubular, cuya fuente de energía es la biomasa residual de procesos de destilación. La necesidad de este tipo de caldera surge en el Centro Nacional de Investigaciones para la Agroindustrialización de Especies Vegetales Aromáticas Medicinales Tropicales CENIVAM como respuesta a la baja competitividad que tiene la agroindustria colombiana en la extracción de aceites esenciales, debida a los altos costos de producción que este proceso registra a la fecha.

El funcionamiento óptimo de esta caldera depende en primer lugar de la buena operación del horno, de allí la importancia de la investigación realizada para el diseño del mismo, puesto que la geometría y dimensiones de este deben permitir el máximo aprovechamiento del poder calorífico del biocombustible utilizado.

La caldera diseñada cuenta con 44 tubos de fuego en material A192, un casco en material A106 y aislamiento en lana afelpada. El quemador es un horno tipo parrilla con dos cajones para la ceniza. El prototipo del horno fue construido en ladrillo pero el que queda en planos tendrá además una cubierta de lámina delgada.

El procedimiento de diseño realizado sigue las recomendaciones de la ASME, lo cual garantiza que está dentro de los lineamientos comerciales, demostrando así la importancia de acogerse a los códigos.

---

\* Trabajo de grado – Modalidad investigación.

\*\*Facultad de ingenierías físico-mecánicas, Escuela de ingeniería mecánica, director: Ing. Omar Gelvez Arocha, co-director Ph.D. Elena E. Stashenko

## ABSTRACT

### TITLE:

DESIGN OF A FIRETUBE-BOILER THAT USE BIOMASS AS FUEL FOR DRIVE STEAM GENERATION OF AN ESSENTIAL OILS DISTILLER.\*.

### AUTHORS:

ESCORCIA QUIROGA, KAROL MELISSA; VESGA GONZÁLEZ, JUAN CARLOS \*\*

### KEYWORDS:

Firetube boiler, biomass, design, steam generation, smokestack fire, fire tubes, furnace.

### DESCRIPTION

This paper aims the exposition of the different parameters associated with the design of a firetube boiler, whose energy source is residual biomass of distillation processes. The need of this type of boiler arises at CENIVAM in response to the low competitiveness that Colombian agribusiness has in the extraction of essential oils, due to high production costs that this process recordnow days.

Optimum performance of this boiler depends primarily on good furnace operation; hence the importance of the research for its design, since its geometry and dimensions should allow the maximum use of the calorific value of the biofuel used.

This boiler has 44 fire tubes in material A192, the shell in A515 and the insulation is in felted wool. The burner is a grill type furnace with two drawers for ash. The oven prototype was built in brick but the one left in planes will also have a thin cover.

The design procedure follows the recommendations made by the ASME, ensuring that it is within the commercial lines; this shows the importance of using codes.

---

\*DegreeWork – ResearchMode

\*\*Facultad de ingenierías físico-mecánicas, Escuela de ingeniería mecánica, director: Ing. Omar Gelvez Arocha, co-director **Ph.D. Elena E. Stashenko**

## INTRODUCCIÓN

Hoy en día se ha convertido al aprovechamiento y búsqueda de nuevas energías en un factor fundamental y urgente para la vida humana.

Los procesos industriales, el transporte y la agricultura dependen de los combustibles fósiles principalmente, puesto que el uso e investigación de nuevas energías renovables y aprovechables para realizar trabajo requieren de voluntad política, económica y también cultural; sin embargo, el uso del petróleo a cada momento se hace más insostenible puesto que es un recurso que a diario se agota, y a diario se hace más costoso también.

Por otro lado, y no menos importante, el uso de recursos fósiles es uno de los factores mas influyentes, junto con la política y cultura de consumo, en el nivel de contaminación del agua, el suelo y de emisiones atmosféricas existentes.

Es por las razones expuestas, que el mejor uso de los recursos renovables se ha vuelto indispensable, y en los países desarrollados y en vía de desarrollo se han empezado a destinar recursos económicos a la investigación e implementación de energías amigables con el medio ambiente como la solar, la eólica, la hidráulica y también la proveniente de la biomasa.

En este sentido, el CENIVAM, dedicado a la extracción de esencias naturales, entre otras cosas, decide optimizar su proceso de destilación. Para lo que recurre a la escuela de Ingeniería Mecánica en busca de los conocimientos para el diseño de una caldera que en lugar de usar gas, aproveche el material vegetal que queda tras el proceso de destilación.

El presente trabajo es la respuesta a esa necesidad y también es el resultado de un trabajo de investigación y posteriormente, de diseño de una caldera pirotubular.

Este libro contiene una recopilación de los conceptos adquiridos durante toda la carrera y además aquellos que fueron necesarios para lograr un buen

aprovechamiento del biocombustible. En él, se trata de exponer de forma clara y concisa los conceptos térmicos, mecánicos e hidráulicos aplicados para el diseño del generador de vapor; y además se presenta una alternativa de quemador de material vegetal capaz de mantener una combustión constante y limpia.

# 1 GENERALIDADES

En este trabajo de grado se realizó el diseño de una caldera pirotubular horizontal con una capacidad de producción de valor de 60 kg/h a una presión de diseño de 150 psi, y que usa biomasa residuo de procesos anteriores de destilación como combustible. Para lograr entender el propósito del proyecto, a continuación se presentan los conceptos más importantes.

## 1.1 CALDERA PIROTUBULAR

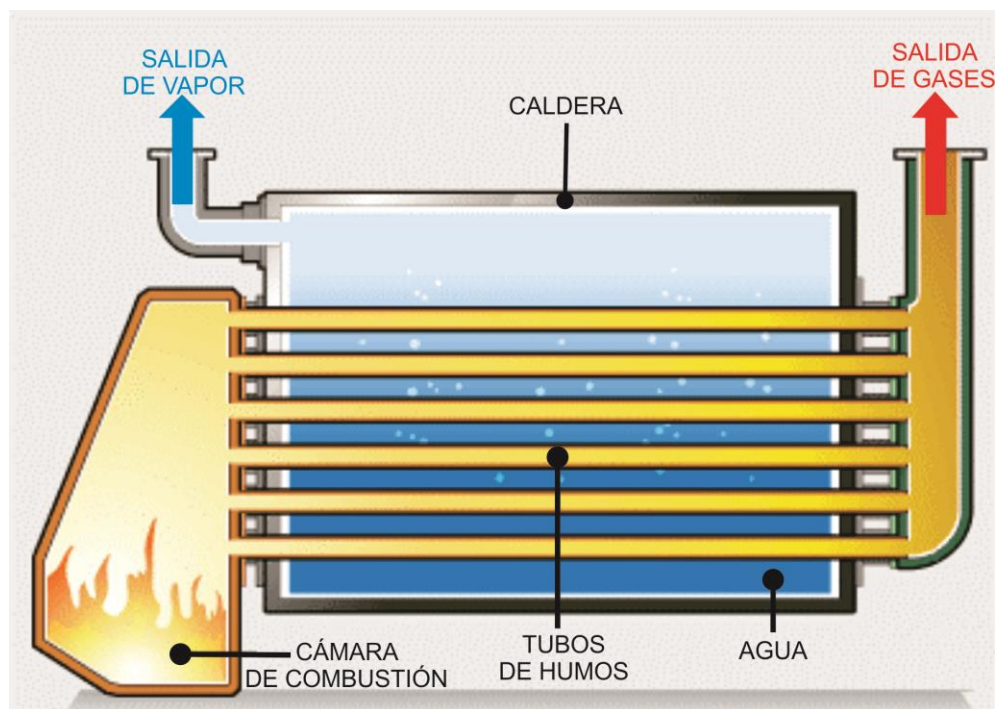
Una caldera es un intercambiador de calor diseñado para generar vapor de agua a una presión determinada de trabajo mediante un proceso de transferencia térmica. La caldera pirotubular es básicamente un tanque atravesado por tubos, donde el flujo de los gases que proviene de la cámara de combustión pasa por el interior de éstos hasta su salida al exterior por la chimenea, con el fin de aumentar la superficie de contacto con el agua para hacerla hervir, como estos vapores están encerrados se incrementa la presión interna y con ello la temperatura de ebullición del agua. Finalmente el vapor se extrae por medio de ductos para ser utilizado en el proceso requerido.

El calor es cedido al agua mediante los mecanismos conocidos de transferencia de calor: conducción, cuando la energía calorífica pasa de una parte a la otra de la pared de los tubos de humo; convección, cuando los tubos se calientan por el contacto con los humos productos de la combustión, y radiación, generada por el intercambio de calor de la llama con las paredes de la cámara de combustión.

Las calderas pirotubulares se pueden clasificar bajo diferentes aspectos entre los más importantes se tiene: según su posición y según el número de pasos; se

pueden clasificar también por el tipo de combustible sobre todo cuando la diferencia esta entre un combustible sólido y un combustible líquido. Para este proyecto se decidió que la configuración de la caldera fuera de tipo horizontal por la ventaja de su gran volumen de almacenamiento de agua sin que presente problemas futuros por pandeo que son muy comunes en las calderas verticales, además, uno de los propósitos del Proyecto es evaluar la viabilidad de implementar los residuos de la destilación de herbáceas como combustible, por lo tanto su configuración demanda la existencia de una cámara de combustión externa, y que el cuerpo de la caldera sea de dos pasos para aprovechar la transferencia de calor cedida por los gases.

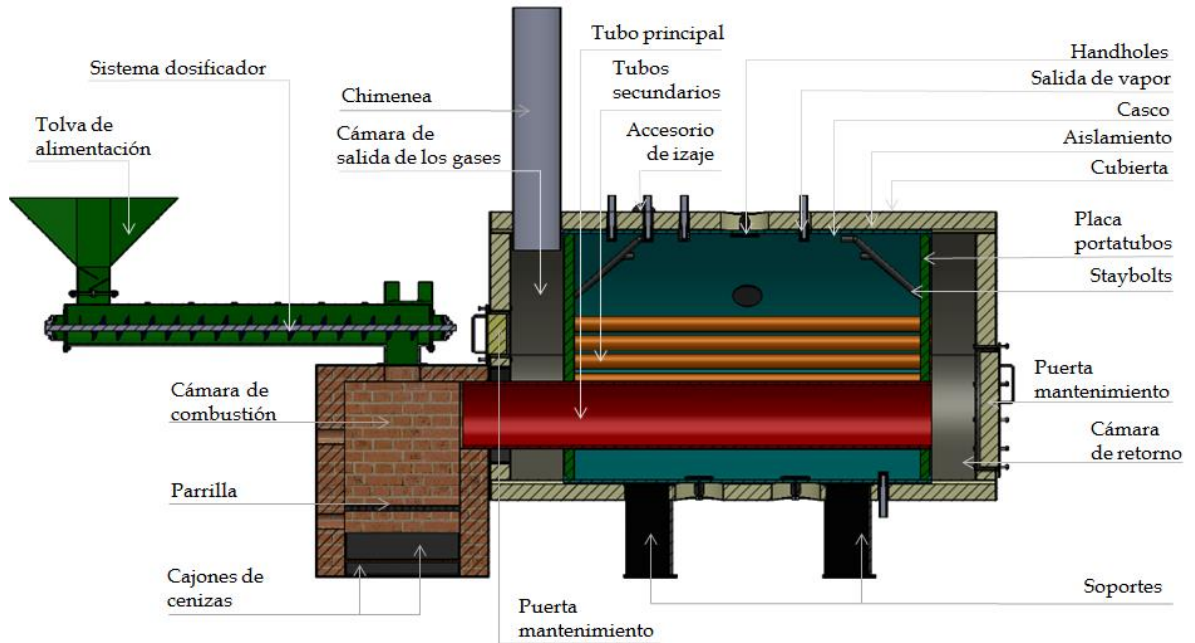
Figura 1. Esquema de una caldera pirotubular.



Fuente: HowStuffworks, Calderas.

## 1.2 COMPONENTES DE LA CALDERA DE BIOMASA

Figura 2. Componentes de la caldera de biomasa



Fuente: Autores

### 1.2.1 El casco

Es el cuerpo de la caldera en cuyo interior estará contenido el haz de tubos de humo. Como recipiente consta básicamente de 2 partes principales: la cámara de agua, es el espacio que ocupa el agua y que según la norma ASME no debe ser inferior a  $2/3$  del diámetro interno del casco; la cámara de vapor, es el espacio comprendido arriba del nivel del agua y donde una vez realizado el intercambio de calor será el contenedor del vapor. Además consta de accesorios de izaje que facilita su transporte y aberturas para su mantenimiento (handholes). Para su diseño se implementó acero ASTM A516 grado 70.

### **1.2.2 Haz de tubos de humo**

Son tubos que se encuentran soportados y unidos en los extremos a la placa portatubos, van expandidos, biselados y pestañeados; o soldados según los criterios de construcción. Es allí donde circulan los gases productos de la combustión y por los cuales se dará el intercambio de calor con el agua. Los pasos en la caldera de biomasa son dos, el primero llamado tubo principal, es un tubo de 10[in] de diámetro y que recibe directamente de la cámara de combustión los gases calientes de dicho proceso, y el segundo llamado tubos secundarios, que son 44 tubos de 2[in] de diámetro por donde retornan los gases hasta su salida por la chimenea. Adicional cuenta con *staybolt*soldados a la placa portatubos, que son tirantes que ayudan a soportar la presión de trabajo de la caldera. En el diseño se implementó ASTM A516 grado 70 para la placa portatubos, un tubo ASTM A106 para el tubo principal, y tubos ASTM A192 como tubos secundarios.

### **1.2.3 Cámara de combustión**

También conocido como hogar, constituye la parte de la caldera donde se realiza la combustión, por medio de la mezcla del aire (comburente) suministrado por un ventilador y el elemento que arde en este caso biomasa (combustible) que llega a la cámara por medio de un dosificador. El hogar lleva ladrillos refractarios pegados entre sí por cemento refractario y está cubierto por una lámina ASTM A516 grado 70 con ¼ [in] de espesor. Esta cámara consta de 3 partes fundamentales: parrilla, que es un arreglo de varillas en forma de rejilla encima de la cual se quema la biomasa; los cajones de ceniza, que son los receptores y almacenes de la ceniza residuo de la combustión; y la salida de los gases, que es la unión entre el hogar y el tubo principal de la caldera.

### **1.2.4 Sistema dosificador**

Es un dispositivo para transportar la biomasa por medio de un tornillo sin fin desde una tolva de entrada que alberga el combustible hasta la cámara de combustión, accionado mediante un moto-reductor acoplado directamente a su eje. El sistema de dosificación fue un trabajo de grado previo al diseño de la caldera.

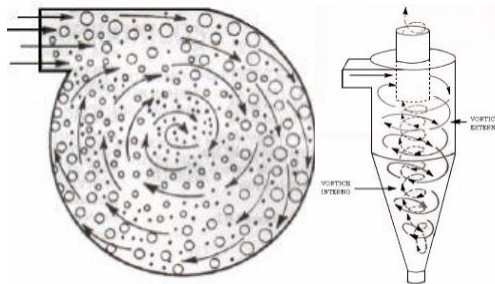
### 1.2.5 Cámaras de humo

Tiene como objetivo captar los gases calientes del tubo principal y reencausarlos hacia el segundo paso del haz de tubos de humo por medio de la cámara de retorno, para posteriormente conducirlos a la chimenea por medio de la cámara de salida de los gases y expulsarlos al ambiente. El diseño implementó acero ASTM A516 grado 70 para las cámaras de humo.

### 1.2.6 Chimenea

Es el ducto que conduce por medio de tiro natural los gases producto de la combustión hacia el ambiente después de que estos atraviesan la caldera. En este proyecto se implementó un ciclón en medio de la chimenea para que remueva el material particulado de la corriente gaseosa, básicamente es una cámara de sedimentación en la que la aceleración gravitacional se sustituye con aceleración centrífuga. En un ciclón los gases entran tangencialmente a la cámara superior y descienden hasta la sección cónica, luego ascienden y salen por un ducto vertical centrado.

Figura 3. Comportamiento de los gases en un ciclón.



Fuente: ECHEVERRI, Carlos. Diseño óptimo de ciclones.

### 1.2.7 Cubiertas

Son láminas esmaltadas lisas de acero inoxidable S304 2B que cubren el cuerpo de la caldera, previo a su montaje el casco es dotado de un aislamiento térmico de fibra de vidrio.

### **1.2.8 Puertas**

Para el acceso a los tubos se dispone de dos puertas localizadas frente a los mismos y ubicadas convencionalmente en las cámaras de humo, estos accesos servirán para la limpieza y mantenimiento de la caldera. En la cámara de combustión se cuenta con una puerta de alimentación para cuando el combustible a utilizar sea de proporciones mayores que las permitidas por el disulfador (residuos de caña, leña y carbón). Todas las puertas son de acero ASTM A516 grado 70.

### **1.2.9 Soportes**

Conocidos también como silletas. Independientemente de las cimentaciones para la caldera, el cuerpo o casco debe montarse en una base de acero estructural, que a su vez descansa sobre el piso. El diseño implementó acero ASTM A283 grado C para los soportes.

Además de los componentes ya expuestos, la caldera está constituida por los siguientes elementos:

### **1.2.10 Equipos y mecanismos auxiliares**

Tanques de alimentación de agua, bombas de alimentación, tratamiento de agua, instalación de tuberías respectiva, ventiladores para la alimentación de aire para la combustión.

### **1.2.11 Componentes de seguridad**

Su función principal es asegurar la producción de vapor y a su vez son los encargados de dar aviso de cualquier situación fuera de lo normal, evitando así accidentes que se podrían reflejar en pérdidas económicas o aun peor en daños directos al operario, dentro de estos componentes se encuentran: la válvula de alivio, el control de presión de seguridad o límite, el control de nivel de agua y su respectivo visor de nivel.

## 2 TÉCNICAS DE COMBUSTIÓN DE BIOMASA

Se denominan biocombustibles a aquellos producidos de manera orgánica, es decir, que provienen de la tierra y los procesos biológicos que se dan en ella. Los restos orgánicos de los cuales proceden habitualmente son: el azúcar, el trigo, el maíz o semillas oleaginosas. Todos estos absorben CO<sub>2</sub> a medida que crecen y lo emiten casi en la misma cantidad que los combustibles convencionales cuando se queman, lo cual da como resultado un ciclo cerrado<sup>1</sup>. En consecuencia, son considerados una fuente de energía renovable menos perjudicial para la atmosfera de la tierra gracias a que disminuyen el efecto invernadero que se produciría en caso de utilizar un combustible fósil.

En la selección del combustible se debe considerar criterios económicos, energéticos y de disponibilidad del mismo. En el caso del presente proyecto se utiliza biomasa residual de procesos de destilación, ya que en la actualidad esta es simplemente desechada y la caldera trabaja con gas, de esta manera se disminuye el gasto en combustible fósil y a la vez se permite la reutilización de un material cuya energía puede ser usada aún. Los desechos de la destilación varían dependiendo de las plantas que se den en el sitio de extracción, algunas de estas pueden ser: *swinglea* y palmarrosa. Debido a la diversidad de plantas con la que se cuenta, en el análisis se utilizan valores y características de bagazo, entendiéndose así a la biomasa<sup>2</sup> húmeda.

Así pues, se deben estudiar los distintos enfoques necesarios en la selección de un combustible, con el fin de que se conozca si este es apto para cumplir con los

---

<sup>1</sup> <http://www.biodisol.com/que-son-los-biocombustibles-historia-produccion-noticias-y-articulos-biodiesel-energias-renovables/>

<sup>2</sup> Materia orgánica originada en un proceso biológico, espontáneo o provocado, utilizable como fuente de energía. Autor: wikipedia

requerimientos que se le impongan. En la tabla 1 se presentan los criterios a evaluar en los combustibles.

Tabla 1. Criterios para la selección del bagazo

<b>CRITERIOS PARA EL ANÁLISIS DEL BAGAZO</b>		
<b>CRITERIO ECONÓMICO</b>	<b>CRITERIO ENERGÉTICO</b>	<b>CRITERIO DE DISPONIBILIDAD</b>
Su uso implica la disminución del gasto en combustible	El bagazo posee un poder calorífico de 10500 kJ/kg <sup>3</sup>	En un día se llegan a realizar hasta 4 procesos de destilación. De cada uno resultan hasta 200 kg de material vegetal de residuo picado <sup>4</sup> .

Fuente: los autores

Por consiguiente, se tiene que para la combustión se posee 800 kg de bagazo, que no representan un gasto extra para los interesados en el proceso, no obstante, se debe garantizar que el combustible cumpla con las necesidades del sistema; por tanto, en primer lugar se debe estudiar el proceso de combustión de la biomasa y en segundo lugar, evaluar cual es el tipo de combustión más adecuado para un combustible sólido y de origen vegetal como este.

---

<sup>3</sup> Grupo de investigación en biomasa y optimización térmica de procesos BIOT

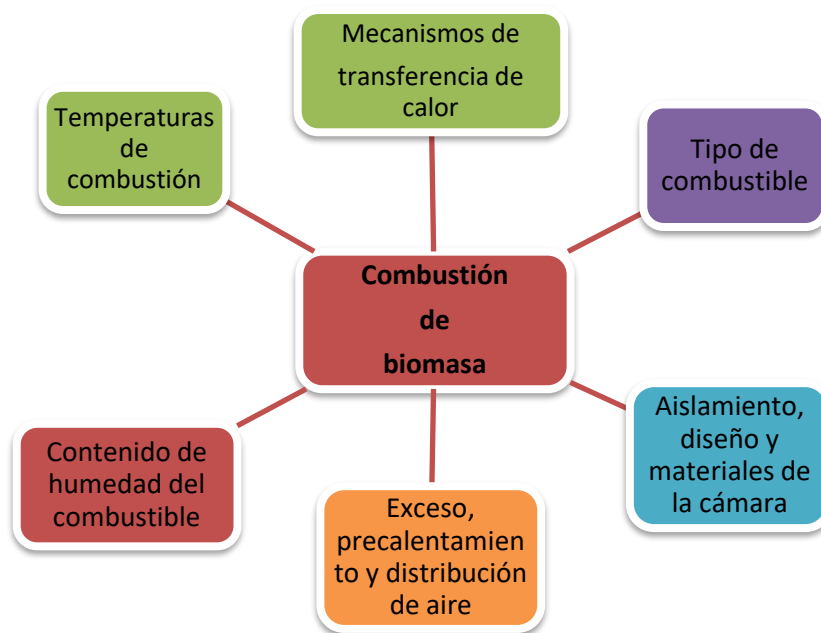
<sup>4</sup> Material picado de 2 a 5 cm de longitud

## 2.1 PROCESO DE LA COMBUSTIÓN

El proceso de la combustión depende principalmente del tipo de combustible que se use y de la aplicación de combustión que se escoja; aunque existen también factores adicionales que se deben definir para lograr una reducción en las emisiones, una alta eficiencia térmica y en el caso específico de las caldera, bajas temperaturas a la salida de la chimenea.

En la figura 4 se presentan las propiedades y características a tener en cuenta durante el proceso de la combustión.

Figura 4. Propiedades y características que influyen en la combustión del combustible



Fuente: los autores

### 2.1.1 Combustión de la biomasa

Este proceso consta de una etapa de secado, de gasificación y de combustión:

- Secado: la humedad es evaporada a temperaturas por debajo de 100°C. Ahora bien, la evaporización gasta energía del proceso de combustión, lo

que ocasiona una baja en la temperatura dentro de la cámara y con esto una disminución en la velocidad de la combustión.

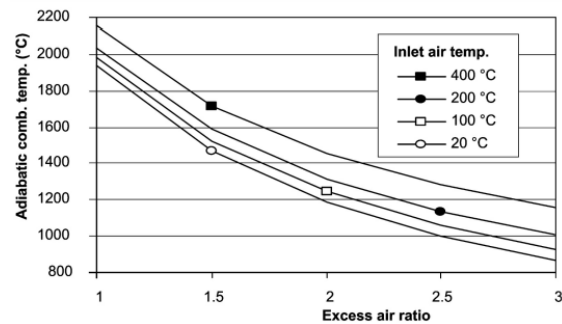
- Gasificación: se refiere a la degradación térmica del gas en presencia de agentes térmicos oxidantes como el aire, oxígeno o agentes oxidantes de CO<sub>2</sub>.
- Combustión: es la oxidación completa del combustible.

Con miras a hacer de la combustión de la biomasa un proceso eficiente en relación con el máximo aprovechamiento posible del poder calorífico que este combustible posee, es importante realizar un análisis detallado de cómo el comportamiento de diferentes variables pueden tener influencia en la manera en que se dé la combustión:

- Mecanismos de transferencia de calor: se refiere a la manera como se transfiere el calor proveniente de la combustión del bagazo. Este calor se almacena en las paredes de la cámara de combustión contribuyendo a que el recinto u hogar se caliente, dando lugar a una cámara cuyo combustible permanecerá encendido más tiempo; pero también significará un calor que no va a ser usado en el aumento de la temperatura con que los gases que ingresaran a la caldera. Hay que hacer notar que mientras más alta sea la temperatura de ingreso de los gases al generador de vapor, será mayor la energía disponible para el cambio de fase del agua líquida a vapor.
- Contenido de humedad del combustible: varía durante el proceso de la combustión, puesto que durante el quemado la humedad se va evaporando y por tanto va disminuyendo. Es importante que el combustible ingrese a la cámara con la menor cantidad de humedad posible, pues se gastaría energía el proceso de secado, en lugar de invertirla en la combustión.
- Exceso, precalentamiento y distribución del aire: el exceso de aire necesario para asegurar una mezcla de aire-biocombustible que termine en una combustión completa debe estar por encima de 1,5. Sin embargo, el exceso de aire tiene gran influencia en la temperatura de los gases a la

salida de la cámara de combustión, porque mantiene una relación directa con temperatura, y un aumento excesivo ocasionaría una caída apreciable en la misma.

Figura 5. Temperatura de llama adiabática vs exceso de aire



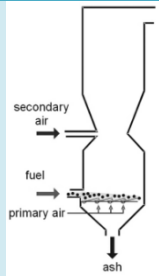
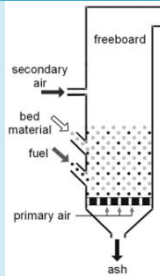
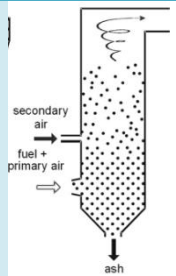
Fuente: Handbook of biomass combustión

- Tipo de combustible: tiene gran influencia durante el proceso de la combustión, ya que características como la composición, la volatilidad, el contenido de carbono, el comportamiento térmico y la densidad constituirán el grupo de condiciones bajo las cuales funcionará el sistema. Teniendo en cuenta que el combustible utilizado para el presente proyecto de grado es de origen vegetal, hay que hacer notar que este tiene bajo contenido de carbono en comparación con el carbón y alto contenido de partículas volátiles, lo cual desempeñará un papel importante durante la combustión y el proceso de transferencia de calor en el interior de la caldera a fuerza de que podría bloquear los tubos de humos del generador de vapor o en el mejor de los casos, simplemente adherirse a sus paredes disminuyendo la transferencia de calor hacia el tanque de agua.

### 2.1.2 Tipos de combustión

En principio se enumeran los tipos de tecnología de combustión existentes para la aplicación de biocombustibles:

Tabla 2. Tecnologías de la combustión de biocombustibles

TECNOLOGÍAS DE LA COMBUSTIÓN DE BIOCOMBUSTIBLES <sup>5</sup>		
Combustión de lecho fijo	Combustión de lecho fluidizado	Combustión de combustible pulverizado
Utiliza hornos de parrilla y fogonero de alimentación por la parte inferior. El aire primario pasa por el lecho, donde tienen lugar los procesos de secado, gasificación y combustión. Los gases de combustión son quemados con la ayuda del aire primario en una zona separada del lecho.	La biomasa es quemada en una mezcla de los gases con el material solido que hay en el lecho, al cual el aire de la combustión entra por debajo. Puede ser lecho fluidizado en burbuja o de circulación.	Es aplicable para combustibles solidos cuyo diámetro de partícula se inferior a 2 mm. Se inyecta en la cámara de combustión una mezcla de aire y combustible por la parte inferior. La combustión tiene lugar mientras el combustible esta en suspensión y se convierte en gas quemado al agregarse el aire secundario.
		

Fuente: los autores

Puesto que el material utilizado como combustible es previamente picado y el tamaño con el que resulta excede los 2 mm, y tampoco se cuenta con una material de residencia en el hogar diferente a las herbáceas trituradas, la tecnología de combustión mas apropiada es la combustión en lecho fijo.

Ahora bien, para la implementación de esta tecnología, antes es necesario el estudio de las distintas configuraciones que el horno pueda tomar.

<sup>5</sup>Información tomada del Handbook of biomasscombustion. Pág. 158

### **2.1.2.1 Configuraciones para la combustión en lecho fijo**

En este tipo de combustión se usan comúnmente los hornos de parrilla, estos pueden ser de tipo fijo, móvil, viajante, rotativo y vibratorio. Todas estas tecnologías tienen ventajas y desventajas específicas, y su selección depende de las propiedades del combustible y de las condiciones en que se use.<sup>6</sup>

En cualquiera de estas tecnologías debe suministrarse aire de forma homogénea para prevenir escoriación<sup>7</sup>, mayor cantidad de ceniza volante y disminuir el exceso de oxígeno necesario para la combustión completa; también se debe garantizar una distribución homogénea del combustible sobre la parrilla, con el fin de evitar agujeros y la liberación de cenizas y partículas volantes sin quemar.<sup>8</sup>

Por otro lado, el uso de cámaras de combustión separadas para el ingreso del aire primario y el secundario permitiría la separación de la zona de gasificación y de oxidación, sin mencionar el hecho de que de esta manera la cama del combustible permanece por fuera de la turbulencia, es decir con un lecho tranquilo, y a la vez se reduce el exceso de aire necesario pues la mezcla aire-gas del biocombustible sería más homogénea.

### **2.1.2.2 Tipos de hornos de parrilla**

- Parrilla fija: Sólo se usan en aplicaciones a pequeña escala, en estos sistemas el combustible es transportado mediante el sistema de alimentación del que se disponga y la gravedad. Dado que la distribución del combustible sobre la parrilla no se puede controlar, este sistema no usa en plantas modernas de combustión de biomasa.

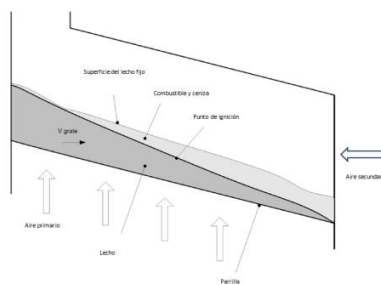
---

<sup>6</sup>Tomado de Handbook of biomass combustion. P. 158

<sup>7</sup>Es una reacción química destructiva entre algún material en el horno y el aire (revisar lo del aire)

<sup>8</sup>Tomado de Handbook of biomass combustion. P. 158

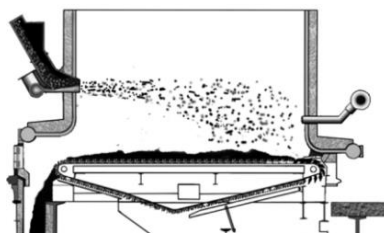
Figura 6. Esquema de parrilla en lecho fijo, inclinada.



Fuente: Handbook of biomass combustion

- Parrilla viajera: El combustible se deposita sobre la parrilla con la ayuda de un tornillo o algún tipo de esparcidor. La cama del combustible no se mueve pero es transportada a través de la cámara desde la parrilla. La velocidad de viaje de la parrilla es ajustada de tal manera que se alcance a quemar todo el combustible.

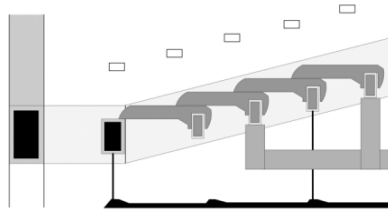
Figura 7. Esquema de funcionamiento de una parrilla viajera.



Fuente: Handbook of biomass combustion, pág 162

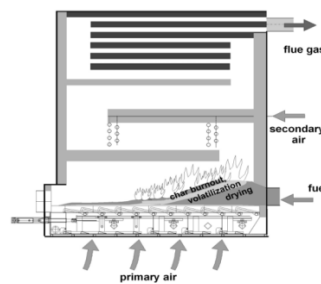
- Parrilla móvil: usualmente consta de una parrilla inclinada, constituida por barras fijas y móviles. Alternando los movimientos horizontales de las secciones móviles hacia adelante y hacia atrás, el combustible es transportando a lo largo de toda la parrilla. El movimiento de la parrilla se consigue utilizando cilindros hidráulicos y su control es más complejo que el usado en las parrillas viajeras.

Figura 8. Esquema de una parrilla móvil inclinada.



Fuente: Handbook of biomass combustion.pág 163

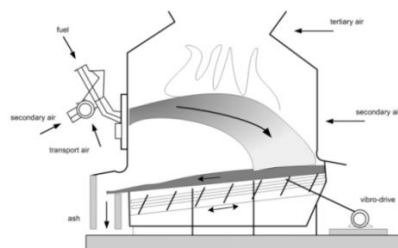
Figura 9. Esquema de funcionamiento de una parrilla móvil



Fuente: Handbook of biomass combustion. pág 163

- Parrilla vibratoria: posee una superficie inclinada localizada sobre muelles. El combustible es alimentado a través de tornillos o esparcidores y el aire primario ingresa por la parte inferior a través de agujeros situados en la superficie inclinada. La vibración de la cadena inhibe la creación de partículas de escoria, lo cual hace a esta tecnología especial para combustibles con tendencias a la escoriación.

Figura 10. Esquema de funcionamiento de una parrilla vibratoria

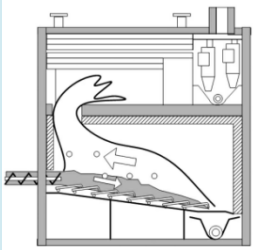
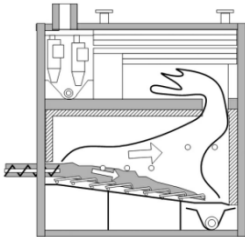
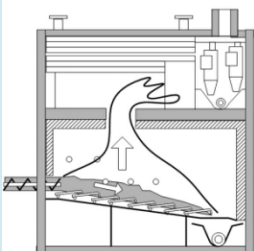


Fuente: Handbook of biomass combustion.pág 166

Ahora, A partir del flujo del combustible y del gas combustible existen 3 sistemas de operación de hornos de parrilla:

1. Flujo en contra-corriente
2. Flujo en co-corriente
3. Flujo cruzado

Figura 11. Clasificación de sistemas de operación de hornos de parrilla

<b>CLASIFICACIÓN DE SISTEMAS DE OPERACIÓN DE HORNOS DE PARRILLA</b>	
<p><b>FLUJO EN CONTRA CORRIENTE</b></p> 	<p>Es el mas utilizado para combustibles con bajo poder calorífico (corteza húmeda, astillas de madera, aserrín). Este sistema requiere una buena mezcla entre el aire secundario y el combustible para evitar el ingreso a la caldera de flujos enriquecidos con los gases no quemados, de modo que no se aumenten las emisiones.</p>
<p><b>FLUJO EN CO-CORRIENTE</b></p> 	<p>Se usa para combustibles secos como los residuos de madera o la paja o en sistemas donde se precalienta el aire primario. Estos sistemas aumentan el tiempo de residencia de los gases no quemados y ayudan a reducir NO<sub>x</sub></p>
<p><b>FLUJO CRUZADO</b></p> 	<p>Es una combinación del sistema del flujo en contracorriente y el co-corriente y son aplicados principalmente en plantas de combustión con cámaras para el aire secundario en forma vertical.</p>

Fuente: los autores

El tipo de sistema de operación más apropiado para las condiciones específicas de este proyecto, es por un lado la parrilla fija, por este proyecto tener una aplicación a pequeña escala que será usada en el campo, y por otro lado el flujo en contra-corriente, por ser el más utilizado en combustibles de bajo poder calorífico como lo es el del material vegetal. En efecto, el poder calorífico del bagazo húmedo esta alrededor de 25% del que posee el gas natural.<sup>9</sup>

Con el fin de conseguir una combustión completa, se debe incorporar en el sistema un aire secundario. Este no se debe mezclar con el aire primario, en miras a lograr un proceso de gasificación y oxidación separado. Además, debe ser de esta manera, pues el ambiente en el que se mueve el aire primario es más calmado, ya que este es introducido directamente al lecho en el que se deposita el material, en cambio, la cámara en la que se desenvuelve el aire secundario expone un comportamiento turbulento, el cual es propicio para una combustión completa.

## **2.2 DISEÑO EXPERIMENTAL DEL CONCEPTO DEL HORNO**

Tras realizar un estudio del concepto teórico que debe delimitar el diseño del horno, es necesario ahora llevar una observación detallada de su comportamiento al funcionar con las distintas clases de herbáceas de las que se disponen para la combustión.

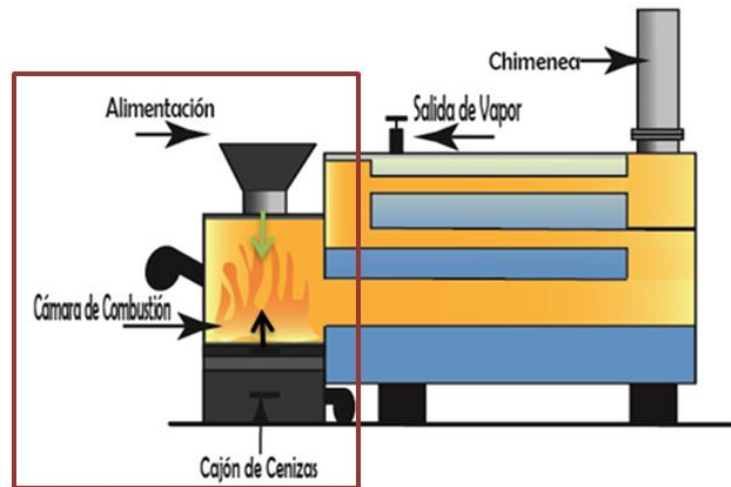
En primer lugar, se plantea un horno que responde al siguiente concepto:

El horno presenta una alimentación por la parte superior y un flujo en contracorriente de los gases en relación con la dirección y el sentido del combustible alimentado. Tiene parrilla fija, entrada de aire primario y secundario y un cajón de cenizas.

---

<sup>9</sup> <http://onsager.unex.es/Apuntes/Termo/Tablas-Tema-3.pdf>

Figura 12. Diseño conceptual del quemador.



Fuente: los autores

Con base en el anterior concepto fue construido un horno en las instalaciones del CENIVAM en la Universidad Industrial de Santander, en el que se realizaron diferentes pruebas que tenían como objetivos:

- Observar la calidad de la combustión, entendiéndose por esta, la observación de que cantidad de material se quema, de que manera lo hace, y que factores influyen sobre esta.
- Medir el tiempo que puede permanecer la cámara sin ser alimentada de forma continua.
- Observar el comportamiento de la llama al variar el combustible y su flujo másico de alimentación.
- Estudiar la factibilidad de un sistema de alimentación por la parte superior del horno.
- Escoger la configuración geométrica que permita una combustión completa del material vegetal.
- Determinar la temperatura de los gases a la salida de la cámara de combustión.

- Comprobar si la energía que emiten los gases de combustión es suficiente para que se genere vapor en una caldera.

El horno fue modificado en 3 oportunidades, variando su tamaño, la localización del tubo de descarga en relación con la distancia que hay desde el punto de ingreso del material y desde la altura en la que se situaría el aire secundario; la forma de la parrilla y la longitud de la chimenea. Los 3 montajes tuvieron las siguientes características:

Tabla 3. Características físicas y de operación

<b>CARACTERÍSTICAS FÍSICAS Y DE OPERACIÓN</b>			
	<b>MONTAJE 1</b>	<b>MONTAJE 2</b>	<b>MONTAJE 3</b>
Dimensiones	60x55x66 cm <sup>3</sup>	60x70x80 cm <sup>3</sup>	60x70x80 cm <sup>3</sup>
Altura del tubo desc.	44 cm	60 cm	60 cm
Aire primario	1 ventilador	1 ventilador	1 ventilador
Aire secundario	Ninguno	1 ventilador	1 ventilador
Parrillas	1 de agujeros	1 de agujeros y 1 de varillas	1 de agujeros y 1 de varillas
Chimenea	2 m. de altura 12 cm de diámetro	4 m. de altura, 12 cm de diámetro	5 m. de altura 12 cm de diámetro
Tubo de descarga	20 cm de longitud 12 cm de diámetro	60 cm de longitud, 12 cm de diámetro	Reducción de diámetro de 12 a 5 cm

Fuente: los fuentes

Las modificaciones realizadas en los montajes 2 y 3 pretenden dar solución problemas encontrados durante las pruebas que les precedían.

### 2.2.1 Montaje 1

En este horno se desarrollaron 2 pruebas diferentes, de las que se obtuvieron los datos que se muestran mas adelante:

Figura 13. Montaje 1



Fuente: los autores

PRUEBA 1: medir el tiempo de quemado de la precarga sin agregar material adicional.

### Variables a analizar

- Comportamiento de la ceniza.
- Cantidad de material quemado.
- Tiempo que tarda en apagarse el fogón

Tabla 4. Datos de la prueba del montaje 1.

MATERIAL	TIEMPO DE QUEMA	OBSERVACIONES

<b>80 g</b>	1 min 15 s	La llama viva dura solo en el primer minuto. La ceniza queda depositada sobre la parrilla
<b>40 g</b>	29 s	La llama viva dura solo 9 s. La ceniza queda depositada sobre la parrilla.
<b>100 g</b>	1 min 50 s	La llama viva dura solo en el primer minuto. La ceniza queda depositada sobre la parrilla
<b>120 g</b>	1 min 39 s	La llama viva dura solo en el primer minuto. La ceniza queda depositada sobre la parrilla.

Fuente: los autores

PRUEBA 2: medir tiempo de quemado con alimentación continua de material.  
Precarga de 1000 g.

### Variables a analizar

- Tiempo que tarda en encenderse el horno al variar el flujo másico.
- Comportamiento de la ceniza.
- Factores que alteran el tiempo de quemado

Tabla 5. Datos de la prueba 2 del montaje 1.

GR. MATERIAL	TIEMPO DE QUEMA	OBSERVACIONES

<b>27 g/min</b>	2 min 20 s	La llama aparece después de 50 segundos de quemado. La ceniza queda depositada sobre la ...
<b>30 g/min</b>	2 min 33 s	La llama aparece después de 44 segundos de quemado La ceniza queda depositada sobre la
<b>60 g/min</b>	2 min 22 s	La llama aparece después de 43 segundos de quemado, y es muy grande. La ceniza queda

Fuente: los autores

### **Análisis de resultados y conclusiones**

- De los datos recopilados se observa que el tiempo de quemado aumenta al haber mayor material vegetal depositado en el hogar y que la rata de alimentación no tiene una influencia visible en cuanto al tiempo que requiere el horno para prenderse.
- Algunos de los factores que pueden estar influyendo en el tiempo de quemado son: la falta de algún material o dispositivo que contribuya al aumento de la temperatura de la cámara y la geometría del montaje realizado.
- Con el fin de obtener unos resultados más favorables, se debe plantear un montaje en el que se incluya una nueva parrilla y un segundo aire que contribuya con el mantenimiento de la llama a temperaturas y tamaños aceptables.
- Es necesario aumentar el diámetro de los agujeros de la parrilla.

#### **2.2.2 Montaje 2**

Este montaje tiene mayor tamaño que el anterior, tiene una parrilla y un ventilador adicional.

Figura 14. Fotografía del segundo montaje y sus respectivas parrillas.



Fuente: los autores

PRUEBA: Medir tiempo de quemado con alimentación continua de material vegetal.

**Variables a analizar**

- Tiempo que tarda en apagarse la llama al no agregar material adicional.
- Comportamiento de la llama.
- Comportamiento de la ceniza.
- Comportamiento del tiro de la chimenea.

Tabla 6. Datos del montaje 2.

CANT. DE MATERIAL	TIEMPO DE QUEMA	OBSERVACIONES
-------------------	-----------------	---------------

<p><b>Precarga: 750 g</b> <b>Rata:52.6 g/min</b></p>	<p>21 min 39 s</p>	<p>Sin aplicar material adicional, la llama duró 5 minutos más. Después de 18 minutos de quemado, se agitó el material del hogar, y la llama se agrando. La mayor parte del tiempo la llama permaneció azul. Queda ceniza aglomerada sobre la parrilla inferior, principalmente. Salen gases por la parte superior del hogar.</p>
<p><b>Precarga: 750 g</b> <b>Rata:54.1 g/min</b></p>	<p>44 min 21 seg</p>	<p>La cantidad de material disponible fue una limitante para el tiempo de quemado. Cada 15 minutos se agito el material de la parrilla superior para desechar la ceniza. Queda ceniza sobre la parrilla inferior, principalmente. Salen gases por la parte superior del hogar.</p>

Fuente: los autores

### **Análisis de resultados y conclusiones**

- El tiempo de quemado tuvo como única limitante en su duración, la cantidad de material disponible para la alimentación de la combustión.
- Al usar el doble de la longitud del tubo horizontal, la dirección de los gases de escape varió durante 2 periodos de tiempo. En el primero, los gases salen por la parte superior del horno y en el segundo comienzan a salir por el ducto de la chimenea.
- Se encontró material vegetal sin quemar en el ducto.
- La implementación de una segunda parrilla y un aire secundario contribuyó a la prolongación del tiempo de quemado
- Aún no es posible asegurar si es necesario agregar al montaje un dispositivo para revolver la biomasa que se deposita en las parrillas para avivar la llama.

### 2.2.3 Montaje 3.

Finalmente, se conecta un calderín de 19 litros y para su conexión se realiza una reducción del tubo de escape. De este nuevo quemador se obtienen resultados de 2 pruebas.

Figura 15. Fotografía del montaje 3



Fuente: los autores

PRUEBA 1: Observación del comportamiento de llama a distintas tasas de alimentación, utilizando distintos materiales.

#### Variables a analizar

- Comportamiento de la ceniza de cada material vegetal.
- Temperatura y comportamiento de la llama con distintos flujos máscicos.
- Temperatura de los gases en la chimenea del calderín.
- Comportamiento del tiro de la chimenea.

Tabla 7. Datos de la prueba 1 del montaje 3.

MASA, Kg	TIEMPO	T_llama	T_gases	Hora	Flujo
----------	--------	---------	---------	------	-------

3.5 de <i>Swinglea</i>	6' 45"	226	489	10:53:00 AM	
	9' 20"	508	620		19 kg/h
	11' 10"	516	605	11:11:00 AM	
4 de <i>Swinglea</i>	2' 50"	992	506	11:11:00 AM	
	6' 49"	896	570		24 kg/h
	10' 29"	966	650	11:23:00 AM	
5 Palmarrosa	3'	994	609	11:26:00 AM	
	6' 32"	804	513		10,34 kg/h
	13' 36"	718	534		
	21' 10"	516	522		
	29' 32"	776	548	12:06:00 PM	
1 Palmarrosa	2' 51"	948	485	12:06:00 PM	10 kg/h
0.5 Palmarrosa	2' 17"	994	467	12:12:00 PM	3,75 kg/h
	7' 51"	982	419	12:22:00 PM	

Fuente: los autores

PRUEBA 2: medición del tiempo requerido para que el calderín de 19 litros empiece a evaporar y de temperaturas generadas durante este proceso.

HORA DE INICIO: 10:46:10 AM

Tabla 8. Datos de la prueba del montaje 3.

MASA, Kg	TIEMPO, min	T_llama °C	T_gases °C	Hora	Flujo másico
<b>6 kg de</b>	14,92	260	199	11:01:05 AM	
	24,58	401	151	11:10:45 AM	
	27,35	351	140	11:13:31 AM	
	30,62	907	305	11:16:47 AM	
	44,33	1129	486	11:30:30 AM	

<b>Palma Rosa</b>	49,47	990	365	11:35:38 AM	6,74 kg/hr
	53,83	1125	377	11:40:00 AM	
	61,37	1189	391	11:47:32 AM	
<b>5 kg de Palma Rosa</b>	0,35	1193	405	11:47:53 AM	5,87 kg/hr
	3,57	1201	471	11:51:06 AM	
	8,03	1212	447	11:55:34 AM	
	SALIDA DE VAPOR			12:35:38 AM	

Fuente: los autores

### **Análisis de resultados y conclusiones**

- La calidad de la combustión esta limitada por el tamaño del material picado, el que a su vez depende de la especie vegetal que se someta al proceso, puesto que las plantas con tallo u hoja ancha tras el triturado terminan con mayor área superficial, y esto hace que la misma turbulencia que generada al interior del horno por el aire secundario, las expulse de la camara o incluso dificulte su ingreso a ella, como sucede con la *Swinglea*.
- La combustión es afectada por la cantidad de ceniza que llega a aglutinarse sobre la parrilla y la superficie externa del horno, generando humos contaminantes. Para solucionar esto se propone retirar la parrilla de agujeros.
- Con el modelo planteado, se observa que los humos y gases no quemados salen en altas cantidades por la parte superior del horno, esto se debe a la restricción que se generó al reducir el diámetro de la tubería que se acopló al calderin. Para solucionar esto es necesario comprobar la factibilidad de la implementación de un tiro forzado mediante un ventilador.

Figura 16. Fotografía de los humos contaminados



Fuente: los autores

- A pesar de presentar una combustión mas incompleta la *Swinglea*, su quema es mas rápida que la presentada en la Palmarosa; esto se debe a que la primera posee tallos y la incineración de estos es mas sencilla que la del material verde.
- Para mantener el horno encendido no se requiere una rata de alimentación muy elevada sino que sea continua. Además, agitando la parrilla se consigue una combustión más limpia, pues se garantiza que la combustión se realice sobre el biocombustible y no sobre el material ya quemado y depositado como ceniza en la parrilla. Una rata de alimentación de 3.75 kg/h puede ser utilizada para el control de presión, en caso de que la alimentación de material combustible deba ser disminuida a su minima expresión sin que esto signifique que el horno se apague.

Figura 17. Fotografía de una combustión completa.



Fuente: los autores

- Se comprueba que la energía del biocombustible utilizado es suficiente para que una caldera de 19L de agua líquida empiece a evaporar después de 1 hora 49 minutos, sin embargo, el flujo másico utilizado fue muy bajo, así que esta es una de las razones por las que el cambio de fase tardó tanto tiempo.

### **2.3 PRUEBA: MEDICIÓN DEL PODER CALORÍFICO DE VARIAS HERBÁCEAS.**

En el laboratorio de metalurgia de la Universidad Industria de Santander se realizaron una serie de pruebas para la medición del poder calorífico de 3 plantas:

- *Swinglea glutinosa*
- PalmarRosa o *Cymbopogon martinii*
- Pronto alivio o *Lippia alba*

Para llevar a cabo estas pruebas se usaron los siguientes instrumentos en el orden en que aparecen:

### 2.3.1 Equipos

- Trituradora fina
- Horno
- Balanza
- Bomba calorimétrica

### 2.3.2 metodología

1. Recoger material que fue destilado previamente.

Figura 18. Material recogido despues de una destilación.



Fuente: los autores

2. Triturar el material con un tamiz fino de 3 a 5 mm: para este proceso inicialmente se usa una trituradora Trapp, la cual deja el material con una longitud de hasta 4 cm y posteriormente se pasa la biomasa por un tritururadora fina.

Figura 19. Fotografías de las trituradoras. a) Trapp, b) fina.



a)



b)

Fuente: Alexander Ramirez

3. Proceso de secado de 1 día.
4. Medición del peso del material seco
5. Medición del poder calorífico: en primer lugar se ubica la muestra en la bomba calorimétrica y se mide una temperatura inicial, luego se aplica corriente eléctrica al alambre de ignición y se mide la temperatura más elevada a la que se transfiere calor desde el material vegetal hasta el cilindro interno de la bomba.

Figura 20. Fotografía de la bomba calorimétrica.



Fuente: los autores

### 2.3.3 Resultados

A continuación se muestran los datos obtenidos.

Tabla 9. Tabla de los datos obtenidos en cada prueba

PLANTA	PODER CALORÍFICO SUPERIOR PCS
<b><i>Cymbopogonmartinii</i></b>	17.532.1 kJ/kg
<b><i>Swinglea glutinosa</i></b>	18.676,7 kJ/kg
<b><i>Lippia alba</i></b>	16.712,9 kJ/kg

Fuente: los autores

Teniendo en cuenta que en el proceso de diseño térmico se usa el poder calorífico inferior, se debe hacer uso de la ecuación\_

$$PCI = PCS - (m * h_{fg})_{H_2O}$$

Ecuación 1

Donde:

PCI es el poder calorífico inferior.

$m_{H_2O}$  es un producto de la combustión, y para pruebas con materiales vegetales se acerca a 0,423 kg por cada kg de combustible.

$h_{fg}$  se halla a presión ambiente<sup>10</sup>.

Finalmente, se encuentra el poder calorífico de cada planta y se presentan a continuación.

Tabla 10. Poder calorífico de las 3 herbáceas.

PLANTA	PODER CALORÍFICO INFERIOR
--------	---------------------------

<sup>10</sup> 1010 mbar

	PCI
<b><i>Cymbopogon martinii</i></b>	16.577.3 Kj/Kg
<b><i>Swinglea glutinosa</i></b>	17.721,9 Kj/Kg
<b><i>Lippia alba</i></b>	15.758,1 Kj/Kg

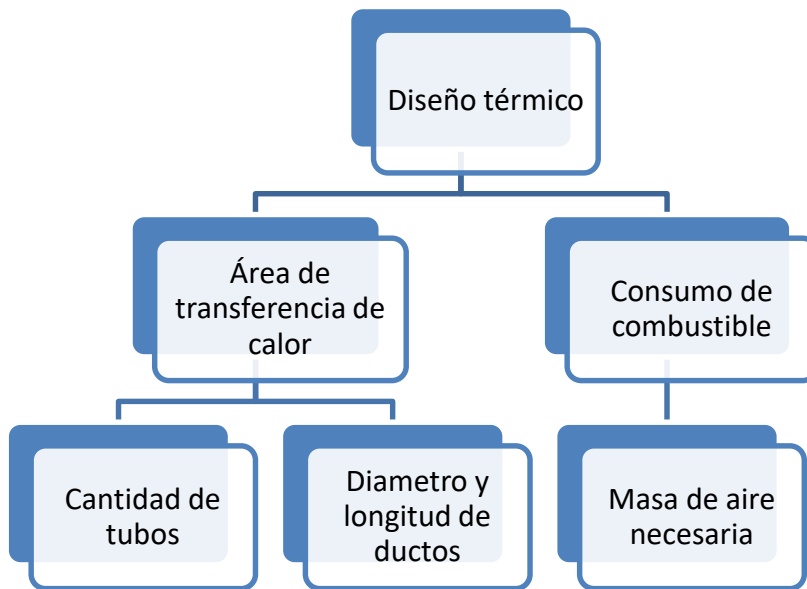
Fuente: los autores

Vale la pena aclarar que los valores de la tabla anterior fueron obtenidos de herbáceas en base seca, en cambio las usadas como combustible tienen un porcentaje de humedad superior al de estas, por lo que conservativamente se decide el uso de un poder calorífico de menor valor: 10500 kJ/kg.

### 3 DISEÑO TÉRMICO

El diseño térmico de esta caldera tiene por objetivo la obtención del área de transferencia, y el consumo de combustible, a partir del requerimiento de flujo de vapor planteado anteriormente.

Figura 21. Diseño térmico de la caldera.

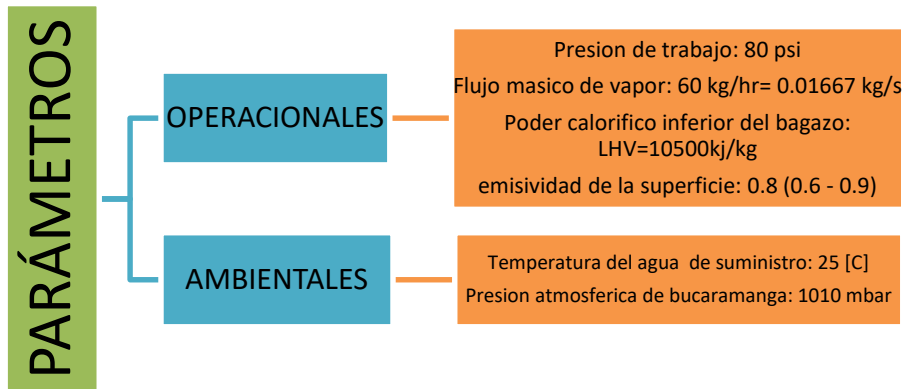


Fuente: los autores

Para el diseño térmico de la caldera se tendrán en cuenta parámetros operacionales, geométricos y ambientales.

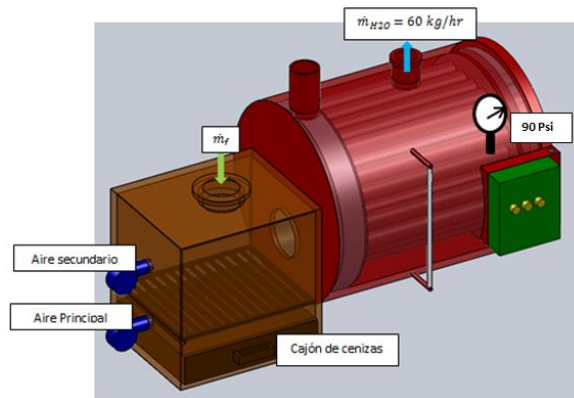
- **Datos para la operación:** son los valores nominales para la operación de la caldera.
- **Datos geométricos:** son los valores de las dimensiones comerciales de los tubos de los que se dispone,
- **Datos ambientales:** se refiere a la temperatura de suministro de agua disponible y la presión atmosférica en Bucaramanga.

Figura 22. Parámetros para el diseño



Fuente: los autores

Figura 23. Diagrama conceptual de operación de la caldera.



Fuente: los autores

### 3.1 PROCESO DE COMBUSTIÓN

#### 3.1.1 Estequiometría

El quemador de la caldera es de tipo parrilla fija y utiliza bagazo como combustible. Debido a que la biomasa de la que se dispone varía dependiendo de la locación de este generador de vapor, y a que la composición de la biomasa no difiere considerablemente de un tipo a otro, se tomaran valores encontrados en unas pruebas realizadas en la Universidad Nacional de Colombia.

Tabla 11. Composición química del combustible.

COMPOSICIÓN QUÍMICA DEL COMBUSTIBLE PARA 1 Kg DE COMBUSTIBLE		
<b>C</b>	53.1 %	$n_c = 44,25$ moles
<b>H</b>	4,7%	$n_H = 23,5$ moles
<b>O</b>	41.7%	$n_O = 13,03$ moles
<b>S</b>	0%	$n_S = 0$ moles
<b>N</b>	1%	$n_N = 0,178$ moles

Fuente: los autores

El planteamiento de la ecuación estequiométrica exige determinar el número de moles de cada componente, para esto se usó la siguiente ecuación:

$$n_i = \frac{Y_i}{M_i}$$

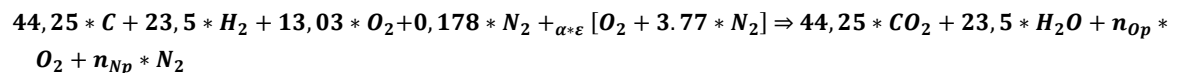
Ecuación 2

$n_i$ , Es el número de moles de cada componente.

$Y_i$ , Es la fracción en masa de cada componente, es un porcentaje.

$M_i$ , Es el peso molecular en g/mol.

Remplazando el número de moles de los reactivos, se llega a la siguiente expresión estequiométrica.



Ecuación 3

En la anterior se observa una ecuación que representa un proceso de combustión completo, puesto que en los productos no hay residuos de metano, CO o H<sub>2</sub>. Para garantizar esto, se escoge un exceso de aire  $\alpha$  que permita que el combustible se queme en su totalidad, no solo teóricamente sino también en la realidad.

Teniendo en cuenta que  $\varepsilon$  es el factor de aireación o coeficiente estequiométrico para el aire, se tiene que las moles de oxígeno y nitrógeno en los productos se determinan de la siguiente manera:

$$n_{Np} = \varepsilon * \alpha * 3.77 + \frac{1}{2} * 2 * n_{N2}$$

Ecuación 4

$$n_{Op} = \varepsilon * (\alpha - 1)$$

Ecuación 5

Donde:

$$\varepsilon = n_C + 2 * \frac{n_H}{4} - 2 * \frac{n_O}{2}$$

Ecuación 6

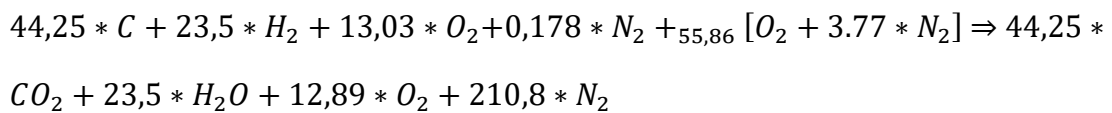
Sustituyendo los valores de la tabla 14 se tiene:

$$\varepsilon = 42,97$$

$$n_{Np} = 210,8 \text{ moles}$$

$$n_{Op} = 12,86 \text{ moles}$$

Finalmente, la ecuación estequiométrica tendrá la siguiente forma:



Ecuación 7

A partir de la ecuación 63 se obtiene el número total de moles en los productos  $n_T$ , de la siguiente manera:

$$n_T = n_C + n_H + n_{Np} + n_{Op}$$

Ecuación 8

Remplazando las moles de cada componente en la ecuación 64, se llega a:

$$n_T = 291,4 \text{ moles}$$

### 3.1.1.1 Temperatura de llama adiabática

También es conocida como temperatura de flama adiabática. Esta se refiere a la temperatura máxima que llegan a tener los productos tras una combustión completa para determinada cantidad de aire teórico.

En el proceso de obtención de la temperatura de llama adiabática  $T_u$ , es necesario determinar la temperatura a la que la sumatoria de entalpías de los reactivos es igual a la de los productos. Para este fin se utilizará la ecuación 65:

$$\Sigma H_R = \Sigma H_P$$

Ecuación 9

### 3.1.1.2 Sumatoria de entalpías de los reactivos

Sustituyendo las entalpías de los reactivos en la ecuación 66, se obtiene:

$$\Sigma H_R = \Delta H_f + hf_{O_2} + hf_{N_2}$$

Ecuación 10

$$\Delta H_f = 10500 \frac{kJ}{kg}, \quad \text{poder calorífico inferior de la biomasa}$$

$$hf_{O_2} = 0$$

$$hf_{N_2} = 0$$

$$\text{Entonces } \Sigma H_R = 10500 \frac{kJ}{kg}$$

### 3.1.1.3 Sumatoria de entalpías de los productos

Usando los valores obtenidos de la estequiometría y las entalpías de los productos para las condiciones ambientales ya especificadas, se reemplaza en la siguiente ecuación:

$$\Sigma H_p = \Delta h_{f_{CO_2}} * \frac{m_{CO_2}}{1000} + \Delta h_{f_{H_2O}} * \frac{m_{H_2O}}{1000} + \Delta h_{f_{N_2}} * \frac{m_{N_2}}{1000} + \Delta h_{f_{O_2}} * \frac{m_{O_2}}{1000}$$

Ecuación 11

Donde:

$$\Delta h_{f_i} = h_{f_i@T_{ll}} - h_{f_i@T_{amb}}$$

Ecuación 12

Introduciendo en el EES las ecuaciones 65, 66, 67 y 68, y asumiendo una temperatura de llama adiabática, se realiza un proceso iterativo hasta encontrar una temperatura a la que la sumatoria de las entalpías sea igual a la de los productos.

$h_{f_i}$  se tomó de las tablas de propiedades de EnginnerEquationSolver EES.

Tabla 12. Entalpía de los productos

Propiedad	Entalpía, kJ/kg
$h_{f_{CO_2@T_{ll}}}$	-7769
$h_{f_{H_2O@T_{ll}}}$	-11194
$h_{f_{N_2@T_{ll}}}$	1158
$h_{f_{O_2@T_{ll}}}$	1071
$h_{f_{CO_2@T_{amb}}}$	-8942
$h_{f_{H_2O_2@T_{amb}}}$	-13423

Fuente: los autores

El software arrojó que para estas condiciones específicas, la temperatura de llama debe ser  $T_{ll} = 1053,22$  °C.

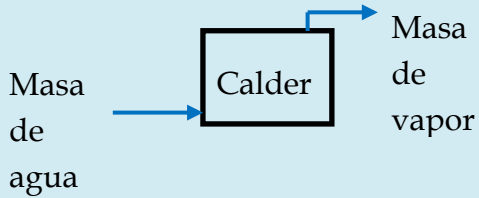
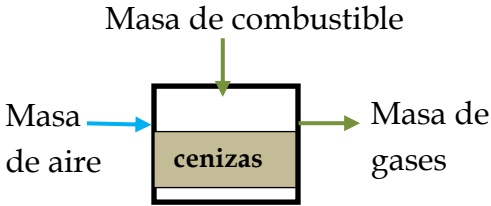
Remplazando los valores de las entalpías en la ecuación 11 se encuentra que la sumatoria de entalpías en los productos es:

$$\Sigma H_p = 10500 \text{ kJ/kg}$$

### 3.1.1.4 Balance de masa

Para la generación de vapor es necesario tener en cuenta 2 balances de masa a realizar. Uno de ellos se relaciona con el agua de alimentación que ingresa a la caldera, y el otro con el biocombustible que se agrega para la combustión.

Tabla 13. Ecuaciones de balance de masa

ESQUEMA DEL BALANCE DE MASA	ECUACIÓN
	<p><b>Ecuación 13</b></p> $m_{agua} = m_{vapor}$
	<p><b>Ecuación 14</b></p> $m_{comb} + m_{aire} - m_{cenizas} = m_{gas}$

Fuente: los autores

Cabe anotar que para obtener una combustión completa de los reactivos es necesario calcular una cantidad de masa de aire necesaria para este fin, que no solo cumpla los requerimientos teóricos sino que también pronostique una quema total del combustible. Para esto se debe considerar la composición molar del aire seco, el cual de manera general se puede expresar como 21% de oxígeno y 79% de nitrógeno; es decir, por 1 kmol de O<sub>2</sub> en la cámara de combustión habrá 3,76 kmol de N<sub>2</sub>, lo cual da como resultado 4,76 kmol de aire. Entonces se tiene:

$$m_{aire} = \frac{\alpha * \varepsilon * 4.76 \text{ moles} * 28.97 \frac{g}{mol}}{1 \text{ kg de combustible}}$$

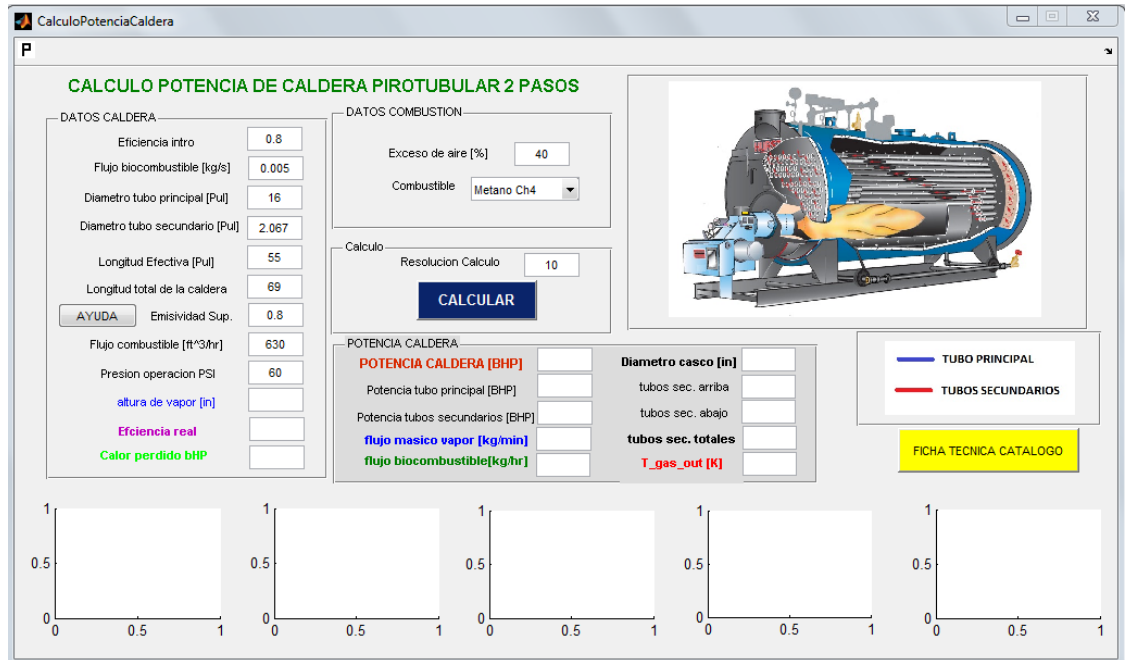
Así pues, para el caso particular de esta caldera se tiene que:

$$m_{aire} = \frac{\alpha * \varepsilon * 4.76 \text{ moles} * 28.97 \frac{g}{mol}}{1 \text{ kg de combustible}} * m_{comb}$$

### 3.2 CÁLCULO DE SUPERFICIES DE TRASFERENCIA DE CALOR

El análisis térmico para halla la superficie de transferencia de calor requerida por la caldera, se realizó por medio de un software de diseño térmico de calderas que se hizo. Este programa se adecuó para el uso de biocombustibles y además se le redujeron las características a variar. Funciona por medio de expresiones termodinámicas, y de transferencia de calor, y en función de la eficiencia requerida para el sistema, el diámetro y longitud de los tubos secundarios y el principal y la cantidad de combustible de alimentación, calcula la potencia de la caldera, el diámetro del casco, la cantidad de tubos secundarios y la temperatura de salida de los gases, para que se produzca un flujo másico de 1kg/min.

Figura 24. Interfaz del programa de cálculo de la superficie de calefacción.



Fuente: los autores

### 3.2.1 Análisis de transferencia de calor

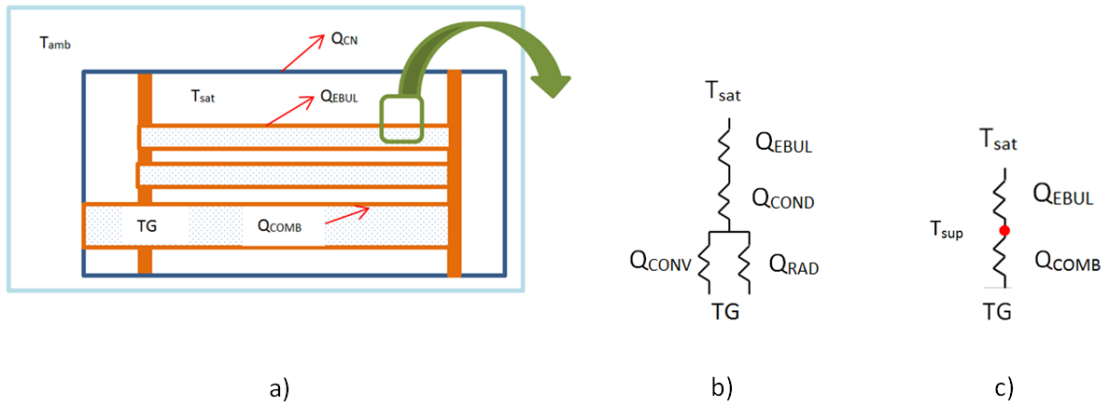
El proceso de transferencia de energía que se lleva a cabo en la caldera se debe a la diferencia de temperaturas existente entre aquella en el interior del tubo principal (TG) y la temperatura en el sitio donde está localizada la caldera ( $T_{amb}$ ).

Con la intención de facilitar el análisis de los mecanismos de transferencia de calor que se presenta, se divide este estudio en 2 partes:

- Transferencia de calor desde el interior de los tubos hasta el agua que se evapora
- Transferencia de calor desde el agua hasta el exterior

### 3.2.1.1 Transferencia de calor desde el gas al agua

Figura 25. Transferencia de calor desde el gas al agua



a) Esquema de transferencia de calor de la caldera. b) Diagrama de resistencias térmicas. c) Diagrama de resistencias suprimiendo el calor de conducción.

Fuente: los autores

La energía disponible en el gas se transfiere a la superficie de los tubos por medio de un mecanismo combinado de convección y radiación  $Q_{comb}$  como se muestra en figura 36b. Esta energía es conducida a través de los tubos hasta el agua por ebullición., la cual se encuentra a la temperatura de saturación  $T_{sat}$  de la presión de operación.

El proceso de conducción que se da a través del material de los tubos se desprecia, puesto que el espesor del tubo es pequeño y la conductividad es grande, esto genera una resistencia térmica muy pequeña<sup>11</sup>. A causa de esto, se presume que la temperatura de superficie  $T_{sup}$  es igual en el interior y exterior del tubo, como se ve en la figura36c. A continuación se presenta la ecuación de este mecanismo de transferencia para mayor claridad.

$$Q_{COND} = \frac{(T_{supi} - T_{supo})}{R_{cond}}$$

Ecuación 17

<sup>11</sup> $R_{cond} = e / (kA)$

$$\text{Donde } R_{cond} = \frac{\ln\left(\frac{D_{po}}{D_{pi}}\right)}{(2*\pi*K_{ais}*L_{efec})}$$

Ecuación 18

Dado que el calor que se transmite del gas a la superficie (calor combinado) y de la superficie al agua (ebullición) dependen de  $T_{sup}$ , se debe calcular una  $T_{sup}$  tal que

$$Q_{EBUL} = Q_{COMB}$$

### 3.2.1.2 Transferencia de calor desde agua hasta el exterior

La pared del casco de la caldera es calentada por la energía que le transfiere el agua, y la diferencia de temperatura existente entre esta superficie y el exterior ocasiona una transferencia de energía hacia el ambiente. Esta transferencia se da por medio de un mecanismo de convección natural  $Q_{CN}$ , mediante la siguiente ecuación:

$$Q_{cn} = h_{cn} * D_{exc} * \pi * L_{total} * (T_{sex} - T_{amb})$$

Ecuación 19

Donde  $h_{cn}$  es el coeficiente de convección natural, y se expresan de la siguiente manera:

$$h_{cn} = \frac{k_{aire} * Nu_{ext}}{D_{exc}}$$

Ecuación 20

$$Nu_{ext} = \left(0,6 + \frac{0,387 * Ra^{\frac{1}{6}}}{\left(1 + \left(\frac{0,559}{Pr_{aire}}\right)^{\frac{9}{16}}\right)^{\frac{8}{27}}}\right)^2$$

Ecuación 21

$$Ra = \frac{9,81 * \beta * (T_{sex} - T_{amb}) * D_{exc}^3}{g^2} * Pr_{aire}$$

Ecuación 22

Se considera que el calor disipado por convección natural al ambiente es energía que no se aprovechó en el cambio de fase del agua, por tanto, se toma como pérdidas.

El conocimiento del calor perdido  $Q_{PERD}$  permite saber la cantidad de calor que realmente se aprovechó del gas, así:

$$Q_{UTIL} = m_{comb} * \Delta H_{comb} - Q_{PERD}$$

Ecuación 23

Donde  $m_{comb} * \Delta H_{comb}$  es el calor total que entrega el combustible Y  $\Delta H_{comb}$  es el poder calorífico del material vegetal.

En este orden de ideas, se tiene que la eficiencia  $\eta$  del sistema se calcula de la siguiente forma:

$$\eta = \frac{Q_{UTIL}}{m_{comb} * \Delta H_{comb}}$$

Ecuación 24

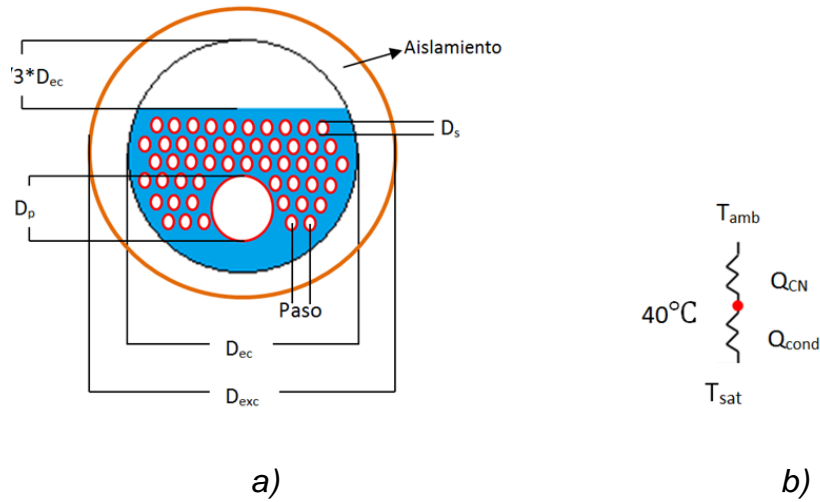
### 3.2.1.3 Cálculo del aislamiento

Gracias a que la superficie externa de la caldera debe permanecer a una temperatura que no cause lesión a sus operarios, se utiliza un material aislante en el exterior del casco que garantice una temperatura externa de 40, tal y como aparece en la figura 37a, por lo que es necesario calcular el espesor del aislamiento<sup>12</sup>.

---

<sup>12</sup>El aislante convencionalmente más usado es la lana afelpada, la cual posee una conductividad térmica  $K_{ais}$  de 0,036 W/mK.

Figura 26. Asilamiento



a) Esquema para la distribución de los tubos en la placa portatubos. b) Diagrama de resistencias térmicas para el cálculo del aislamiento

Fuente: los autores

En el caso de las condiciones de operación de la caldera, se toma de forma conservativa que la temperatura en el exterior del casco es igual a la temperatura de saturación a la presión de operación del sistema, como en la figura 37b. Y a fuerza de que el calor de conducción en el aislante  $Q_{COND}$  y el calor disipado al medio por convección natural son los mismos, se tiene que  $Q_{CN} = Q_{COND}$

Donde

$$Q_{CN} = \frac{T_{sat}-40}{R_{cond}}$$

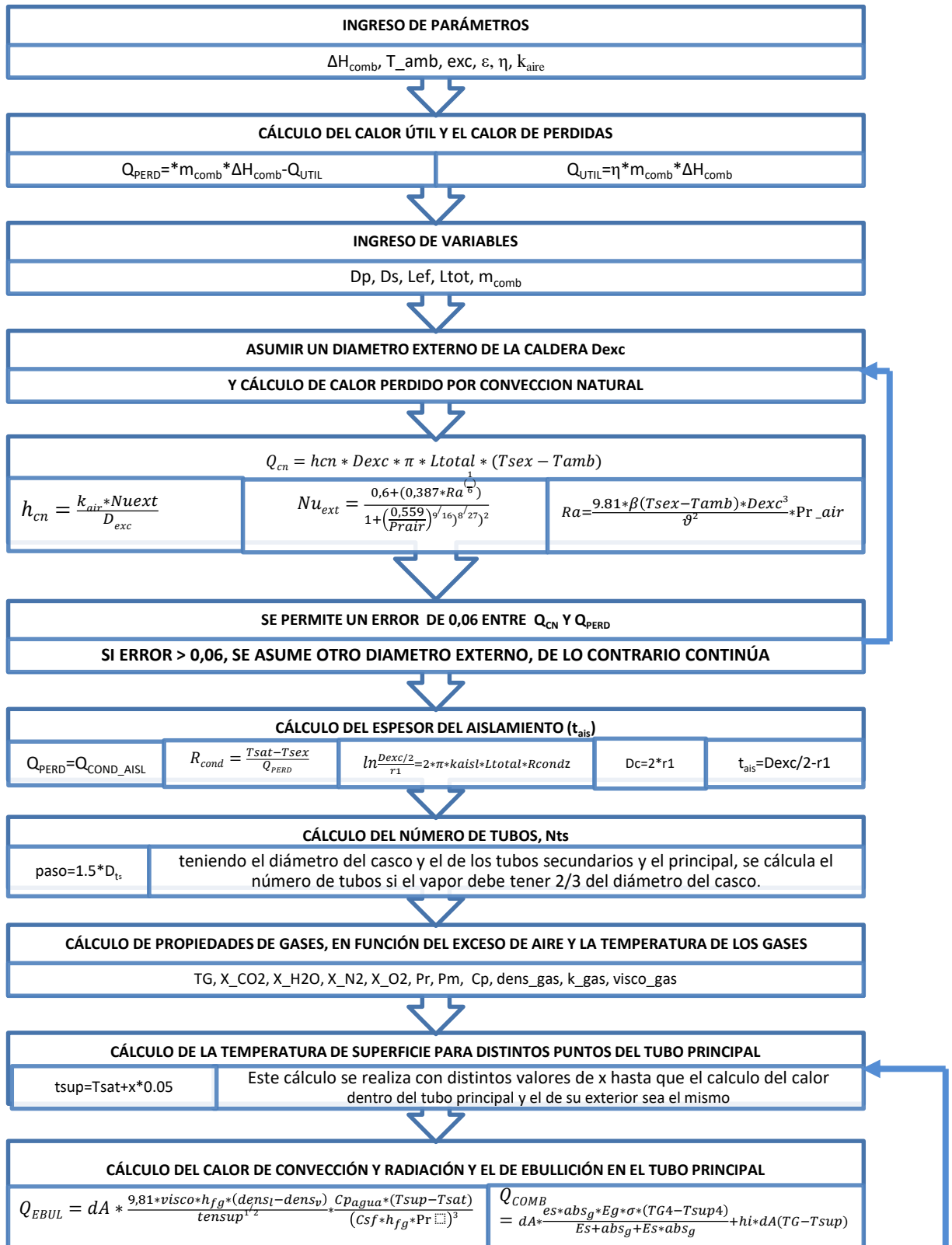
Ecuación 25

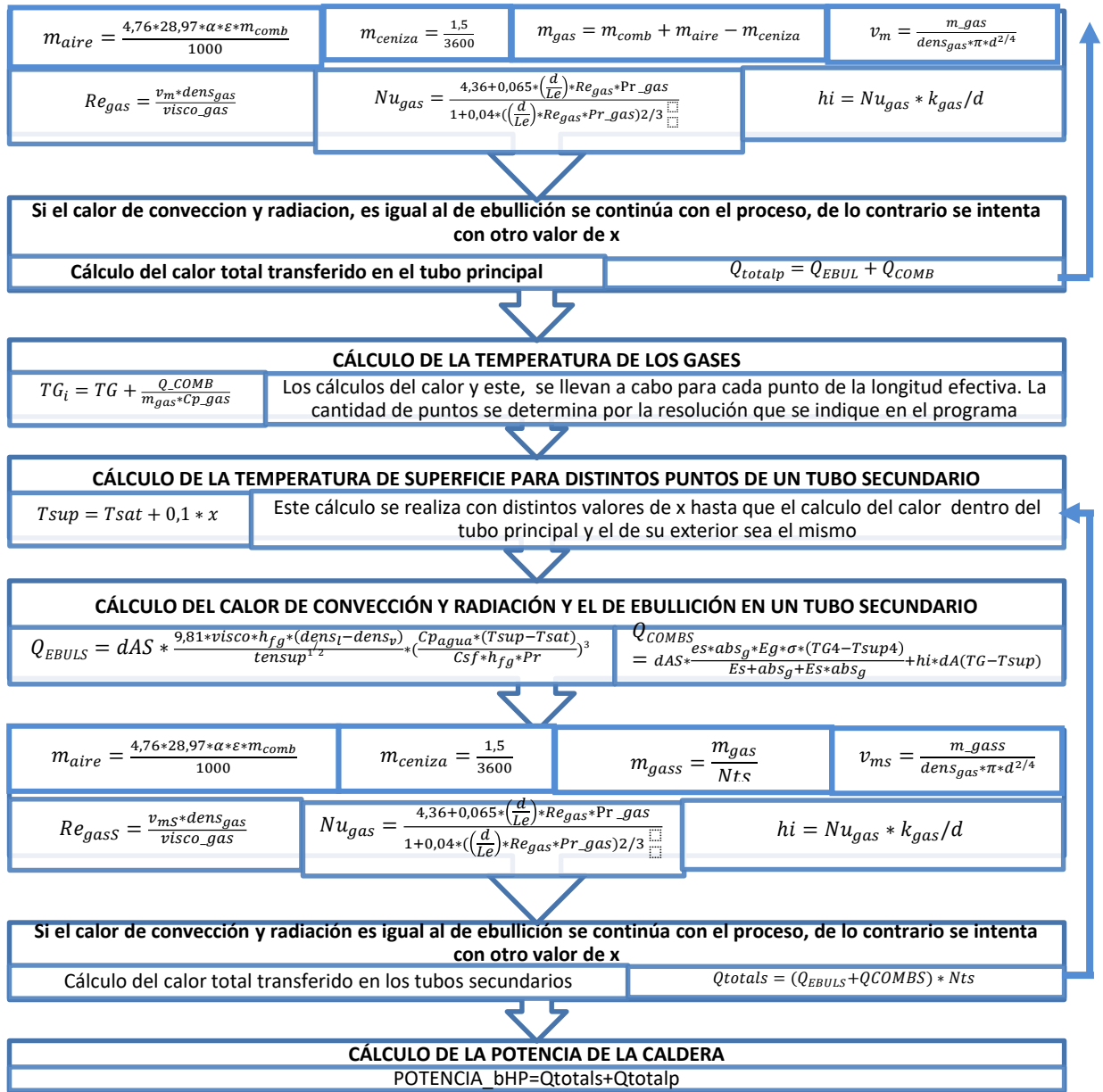
$$R_{cond} = \frac{\ln\left(\frac{D_{exc}}{\frac{D_{dec}}{2}}\right)}{(2 * \pi * K_{ais} * L_{efec})}$$

Ecuación 26

A continuación, en la figura 38 se presenta un algoritmo que describe el funcionamiento del software que fue desarrollado para realizar el diseño térmico de la caldera pirotubular.

Figura 27. Procedimiento para el diseño térmico de la caldera.





Fuente: los autores

### 3.2.2 Análisis de las alternativas de diseño de la caldera

A continuación, en la tabla 17 se presentan los resultados obtenidos a partir de diferentes iteraciones, en las que se variaron:

- el diámetro del tubo principal.
- la longitud efectiva.

Además, gracias a que la cantidad de combustible que se usa no es una limitante, se varió  $m_{comb}$  de modo que el flujo de vapor planteado para cada una de las suposiciones fuera 1 kg/min

Tabla 14. Resultados de distintas iteraciones que generan 1 kg/min de vapor.<sup>13</sup>

Presión de trabajo=60[Psi], 40% de exceso de aire y D.Nominal de tubos secundarios=2[in](diámetro interno=2.067[in]), 30% de humedad en el vapor Suponiendo una eficiencia total del 84%														
	Flujo de Biocombustible		DATOS DE LA CALDERA					Temp. Out de los gases[K]	Potencia de la caldera[BH]	Pérdidas[BHP]	Flujo de vapor [kg/min]	Eficiencia real		
	[kg/s]	[kg/hr]	Diámetro Principal[i]	Diámetro Casco	Número tubos secund.	Longitud Efectiva	Longitud Total							
1	0,0075	27	16	49,8504	50	44	25 19	60	79	551	4,36	1,73	1,0	0,78
2	0,0074	27	14	45,7558	46	43	23 20	60	79	559	4,40	1,62	1,0	0,79
3	0,00765	28	12	49,5354	50	42	25 17	60	79	574	4,37	1,72	1,0	0,78
4	0,00714	26	10	39,4567	40	44	20 24	60	79	562	4,35	1,43	1,0	0,82
5	0,007	25	16	53	53	63	39 24	40	59	554	4,34	1,36	1,0	0,81
6	0,00692	25	14	56,46	57	71	42 29	40	59	539	4,35	1,43	1,0	0,80
7	0,00718	26	12	57,4	58	65	43 22	40	59	563	4,36	1,45	1,0	0,80
8	0,00673	24	10	48,2756	49	72	36 36	40	59	543	4,35	1,26	1,0	0,82
9	0,0073	26	16	51,7402	52	49	26 23	48	67	569	4,34	1,51	1,0	0,79
10	0,0073	26	14	51,7402	52	51	26 25	48	67	568	4,36	1,51	1,0	0,79
11	0,00711	26	12	53,6299	54	60	40 20	48	67	545	4,36	1,56	1,0	0,79
12	0,007	25	10	43,55	44	60	32 28	48	67	548	4,48	1,32	1,0	0,81

Fuente: los autores

Luego de tener estos resultados, se observa que todos cumplen con el requerimiento exigido por el cliente, no obstante, para la selección de la mejor caldera posible es importante encontrar la opción cuyo costo no sacrifique la eficiencia o la cantidad de calor que se tiene disponible para el cambio de fase.

En la tabla anterior se aprecia que la caldera 4, 5, 8 y 12 son las que tienen la mejor eficiencia. Sin embargo, la caldera 4 no tiene características térmicas que la hagan sobresalir de manera evidente sobre las demás opciones y en cambio sus dimensiones geométricas hacen de ella una elección más robusta y costosa, ya que tiene el diámetro de casco tiene hasta 10 pulgadas más que las otras calderas opcionadas, sin mencionar que el número de tubos podría significar un aumento en costos de fabricación y mantenimiento.

<sup>13</sup>Las opciones resaltadas son las más convenientes en función de su costo y eficiencia

Para tener una idea de los costos reales de los materiales que la opción 4, 8 y 12 podrían implicar, a continuación se muestra en la tabla\_ el resultado de las cotizaciones realizadas en la Compañía general de acero y Ferretería Reina.

Tabla 15. Costos de materiales para cada caldera.

	Cotización								
	Tubos secundarios			Portatubos			Casco	Tubo Principa	Valor Total
	Cantidad	Precio Unitario	Valor tubos	Cantidad	Precio unitario	Valor placas	Valor	Valor	
1	11	\$ 122.641,00	\$ 1.349.051,00	2	\$ 3.636.067,90	\$ 7.272.135,80	\$ 2.741.530,61	\$ 657.967,35	\$ 12.020.684,75
2	11	\$ 122.641,00	\$ 1.349.051,00	2	\$ 3.077.567,87	\$ 6.155.135,74	\$ 2.522.208,16	\$ 575.721,43	\$ 10.602.116,32
3	11	\$ 122.641,00	\$ 1.349.051,00	2	\$ 3.636.067,90	\$ 7.272.135,80	\$ 2.741.530,61	\$ 493.475,51	\$ 11.856.192,91
4	11	\$ 122.641,00	\$ 1.349.051,00	2	\$ 2.327.083,45	\$ 4.654.166,91	\$ 2.193.224,49	\$ 411.229,59	\$ 8.607.671,99
5	13	\$ 122.641,00	\$ 1.594.333,00	2	\$ 4.085.485,89	\$ 8.170.971,78	\$ 1.937.348,30	\$ 438.644,90	\$ 12.141.297,97
6	15	\$ 122.641,00	\$ 1.839.615,00	2	\$ 4.725.433,84	\$ 9.450.867,68	\$ 2.083.563,26	\$ 383.814,28	\$ 13.757.860,23
7	13	\$ 122.641,00	\$ 1.594.333,00	2	\$ 4.892.692,96	\$ 9.785.385,93	\$ 2.120.117,00	\$ 328.983,67	\$ 13.828.819,60
8	15	\$ 122.641,00	\$ 1.839.615,00	2	\$ 3.492.079,61	\$ 6.984.159,22	\$ 1.791.133,33	\$ 274.153,06	\$ 10.889.060,61
9	9	\$ 122.641,00	\$ 1.103.769,00	2	\$ 3.932.771,04	\$ 7.865.542,08	\$ 2.280.953,47	\$ 526.373,88	\$ 11.776.638,42
10	9	\$ 122.641,00	\$ 1.103.769,00	2	\$ 3.932.771,04	\$ 7.865.542,08	\$ 2.280.953,47	\$ 460.577,14	\$ 11.710.841,68
11	10	\$ 122.641,00	\$ 1.226.410,00	2	\$ 4.241.109,60	\$ 8.482.219,19	\$ 2.368.682,44	\$ 394.780,41	\$ 12.472.092,04
12	10	\$ 122.641,00	\$ 1.226.410,00	2	\$ 2.815.770,98	\$ 5.631.541,96	\$ 1.930.037,55	\$ 328.983,67	\$ 9.116.973,18

Fuente: los autores

De acuerdo a los costos de la tabla 18 se nota que las calderas 4, 8 y 12 son las más económicas. Ahora, se observa que la opción 4 y 8 tienen la potencia y eficiencia térmica más alta, en este caso es 4,35 bHP y 82%, respectivamente.

Así que en este caso, en el que la cantidad de combustible a utilizar no es una limitante, también se debe analizar el aspecto geométrico y de mantenimiento, pues algunas de las diferencias más notables entre estas dos posibilidades es la cantidad de tubos y el diámetro del casco, de lo que se tiene que la opción 4, la cual también es más económica, tiene menor diámetro de casco y menos tubos que la opción 8. Así pues, se concluye que la caldera mas favorable en los aspectos térmico, funcional y económico es la opción numero 4.

En resumen, en la tabla 19 se muestran los resultados de las ecuaciones planteadas para la caldera seleccionada.

Tabla 16. Valores de parámetros dependientes de los resultados de la tabla 17.

PARÁMETRO	CANTIDAD
Diámetro del casco: $D_{ec}$ [in]	40
Diámetro del tupo principal: $D_p$ [pulg]	10
Diámetro de tubos secundarios: $D_s$ [pulg]	2,067
Espesor del aislamiento [pulg]	3,21
Masa de aire: $m_{aire}$ [kg/hr]	213,2
Masa de combustible: $m_{COMB}$ [kg/hr]	26
Masa de gas: $m_{gas}$ [kg/hr]	237,6
Numero de tubos secundarios :Nts	44
Calor perdido: $Q_{PERD}$ [Bhp]	1,43
Calor útil: $Q_{UTIL}$ [Bhp]	4,35

Fuente: los autores

## 4 DISEÑO MECÁNICO

Los cálculos del diseño se realizaron de acuerdo al código *ASME*, para calderas y recipientes a presión sección I, II y VIII, y la norma *TEMA*, para intercambiadores de calor. También se tuvo en cuenta algunas apreciaciones dadas en los libros *Manual de recipientes a presión*, de Eugene F. Megyesy, y *Design of process equipment* por KantiK. Mahajan, que a su vez están basados en las normas previamente mencionadas.

**Presión de operación:** presión manométrica a la cual estará sometida la caldera en condiciones de operación normal

$$P_{op} = 90 \text{ [psi]} \quad \text{Ecuación 27}$$

**Presión de diseño:** para efectos de cálculos es la máxima presión que soportaría la caldera en condiciones extremas, según la norma puede ser 30[psi] mayor que la presión de operación o un 10% mayor que esta (se toma la mayor de las dos).

$$P_{dis} = P_{op} + 30 = 120 \text{ [psi]} \quad \text{Ecuación 28}$$

$$P_{dis} = 1,1 * P_{op} = 99 \text{ [psi]} \quad \text{Ecuación 29}$$

Sin embargo debido a que los componentes encontrados en la industria local no se pueden tarar a menos de 150 [psi] se toma como presión de diseño 150 [psi].

$$P = 150 \text{ [psi]} \quad \text{Ecuación 30}$$

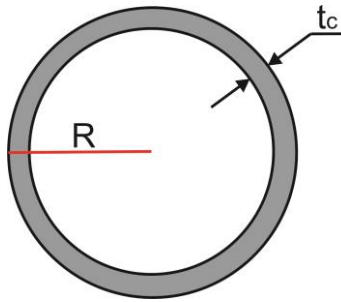
**Temperatura de diseño:** se define como la temperatura utilizada en el diseño de la caldera, según la norma, no debe ser menor a 650[°F]= 618[K]

$$T_{dis} = 750 \text{ [°F]} = 672 \text{ [K]} \quad \text{Ecuación 31}$$

#### 4.1 CÁLCULO DEL ESPESOR DEL CASCO DE LA CALDERA ( $t_{casco}$ )

Según el código ASME sección VIII división 1 UG-27: tubos sometidos a presión interna, para el casco.

Figura 28. Espesor del casco



Fuente: Autores.

$$t_c = \frac{P * R}{S * E - 0,6 * P} + C_A = 0,3477[in]$$
$$\frac{150 * 20,5}{13900 * 1 - 0,6 * 150} + \frac{1}{8} = 0,3477 [in]$$

Ecuación 32

$S = 13900 [psi]$ , Esfuerzo de tensión permisible para el material a temperatura de diseño, según tabla UCS-23, pág. 313 sección VIII, subsección C para el ASTM A516 de grado 70 (acero seleccionado).

$E=1$ , Eficiencia para uniones soldadas a condición de que toda la soldadura de refuerzo quede a ras con la superficie.

$C_A = \frac{1}{8} [in]$ , Tolerancia al desgaste por corrosión.

$R = \frac{D_{EC}}{2} = \frac{41}{2} = 20,5[in]$ , Radio externo del cuerpo.

$D_{EC} = 41[in]$ , Diámetro externo del casco de conformidad con los cálculos realizados previamente en el diseño térmico.

Según la norma TEMA, el espesor mínimo para diámetros de 40[in] a 60[in] debe ser 0,5[in], por tanto se selecciona éste como espesor del cuerpo.

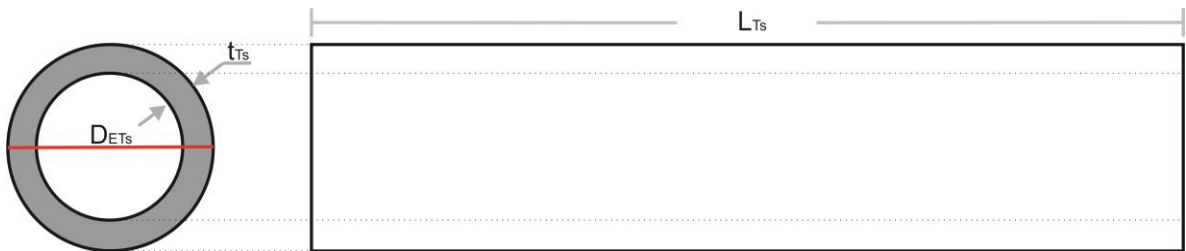
$$t_{casco} = \frac{1}{2} [in]$$

## 4.2 CÁLCULO DEL ESPESOR DE LOS TUBOS DE LA CALDERA

### 4.2.1 Espesor de los tubos secundarios

Para los tubos secundarios se seleccionó un ASTM A192, que son los tubos para calderas disponibles en la industria local con un diámetro nominal de 2[in] y con longitud de 6,1[m]=240,15[in]. El espesor se determinó conforme se muestra a continuación.

Figura 29. Espesor tubos secundarios



Fuente: Autores.

Según la sección VIII división 1 UG-28: tubos sometidos a presión externa,  $r_{1Ts}$  y  $r_{2Ts}$ , son relaciones empleadas para comprobar el espesor mínimo requerido en los tubos secundarios:

$$r_{1Ts} = \frac{D_{ETS}}{t_{Ts}}$$

Ecuación 33

$$r_{2Ts} = \frac{L_{Ts}}{D_{ETs}}$$

Ecuación 34

$D_{ETs} = 2,375$  [in], Diámetro externo de los tubos secundarios de acuerdo con los cálculos mostrados en el diseño térmico.

$t_{Ts}$ , Espesor de los tubos secundarios.

$L_{Ts} = 60$  [in], Longitud de los tubos secundarios.

Según código ASME, sección II, parte D, pág. 828, Tabla G, se determina un factor  $A_{Ts}$  y según pág. 830, Tabla CS-1, se determina un factor  $B_{Ts}$ .

Se calcula el valor de la presión de trabajo externa máxima permisible para los tubos secundarios ( $P_{aTs}$ ), con la siguiente ecuación:

$$P_{aTs} = \frac{4 * B_{Ts}}{3 * r_{1Ts}}$$

Ecuación 35

Tabla 17. Presión de trabajo máxima permisible para los tubos secundarios.

$t_{Ts}$ [in]	$r_{1Ts}$	$r_{2Ts}$	$A_{Ts}$	$B_{Ts}$ [psi]	$P_{aTs}$ [psi]
0,05	47,5	25,2	0,442x10-3	5170	145
0,1	23,7	25,2	0,177x10-3	7645	429
0,15	15,8	25,2	0,493x10-2	7724	650
0,2	11,8	25,2	0,111x10-1	7876	884
0,3	7,9	25,2	0,174x10-1	8032	1352

Fuente: los autores

El tubo del espesor seleccionado debe tener la capacidad para resistir una presión máxima permisible mayor que la presión de diseño, por tanto se puede observar en la tabla que desde un espesor de 0,1[in] dicha norma se cumple, ahora bien se debe agregar  $\frac{1}{8}$ [in] por tolerancia al desgaste por corrosión y estandarizar el espesor, por tanto se selecciona un tubo ASTM A192 calibre 160 ( $t_{Ts} = 0,343''=8,71$ [mm]).

#### 4.2.2 Espesor del tubo principal

Para el tubo principal se seleccionó un tubo ASTM A106, tubo de acero para servicios a temperaturas intermedias y altas.

Según la sección VIII división 1 UG-28: tubos sometidos a presión externa,  $r_{1Tp}$  y  $r_{2Tp}$ , son relaciones empleadas para comprobar el espesor mínimo requerido en el tubo principal:

$$r_{1Tp} = \frac{D_{ETp}}{t_{Tp}}$$

Ecuación 36

$$r_{2Tp} = \frac{L_{Tp}}{D_{ETp}}$$

Ecuación 37

$D_{ETp} = 10,75$  [in], Diámetro externo del tubo principal (de acuerdo con los cálculos mostrados en el diseño térmico).

$t_{Tp}$ , Espesor del tubo principal.

$L_{Tp} = 60$  [in], longitud del tubo principal sometida a presión.

Según código ASME, sección II, parte D, pág. 828, Tabla G, se determina un factor  $A_{Tp}$  y según pág. 830, Tabla CS-1, se determina un factor  $B_{Tp}$ .

Se calcula el valor de la presión de trabajo externa máxima permisible para el tubo principal ( $P_{aTp}$ ), con la siguiente ecuación:

$$P_{aTp} = \frac{4 * B_{Tp}}{3 * r_{1Tp}}$$

Ecuación 38

Tabla 18. Presión de trabajo máxima permisible para el tubo principal.

$t_{Tp}$ [in]	$r_{1Tp}$	$r_{2Tp}$	$A_{Tp}$	$B_{Tp}$ [psi]	$P_{aTp}$ [psi]
0,1	107,5	5,58	2,18x10-4	2471	30
0,2	53,7	5,58	5,95x10-4	4843	120
0,3	35,8	5,58	1,41x10-3	5942	221
0,4	26,8	5,58	1,97x10-3	6098	302
0,5	21,5	5,58	3,08x10-3	6291	390

Fuente: los autores

El tubo del espesor seleccionado debe tener la capacidad para resistir una presión máxima permisible mayor que la presión de diseño, por tanto se puede observar en la tabla que desde un espesor de 0,3[in] dicha norma se cumple, ahora bien se debe agregar  $\frac{1}{8}$  [in] por tolerancia al desgaste por corrosión y estandarizar el espesor, por tanto se selecciona un tubo ASTM A106 calibre 60 ( $t_{Ts} = 0,5'' = 12,7$  [mm]).

### 4.3 CÁLCULO DEL ESPESOR DE LA PLACA PORTATUBOS ( $t_{ppt}$ )

Se siguió el procedimiento implementado en el libro *Design of processequipment, chapter 5: Fixedtubesheetdesign*, para calcular el espesor de la placa portatubos y

se seleccionó el acero ASTM A516 (recomendado por el libro anteriormente nombrado).

#### 4.3.1 Área de los tubos secundarios ( $a_o$ )

$$a_o = \frac{\pi}{4} * (D_{ETS}^2 - D_{ITS}^2) = \frac{\pi}{4} * (2,375^2 - 1,639^2) = 2,32[in^2]$$

Ecuación 39

$D_{ITp} = 1,639 [in]$ , Diámetro interno de los tubos secundarios.

$D_{ETS} = 2,375 [in]$ , Diámetro externo de los tubos secundarios.

#### 4.3.2 Área del tubo principal ( $b_o$ )

$$b_o = \frac{\pi}{4} * (D_{ETp}^2 - D_{ITp}^2) = \frac{\pi}{4} * (10,75^2 - 9,75^2) = 16,1[in^2]$$

Ecuación 40

$D_{ITp} = 9,75 [in]$ , Diámetro interno del tubo principal.

$D_{ETp} = 10,75 [in]$ , Diámetro externo del tubo principal.

#### 4.3.3 Área transversal interna del casco ( $A$ )

$$A = \frac{\pi}{4} * (D_{IC}^2) = \frac{\pi}{4} * (40^2) = 1257[in^2]$$

Ecuación 41

$D_{IC} = 40 [in]$ , Diámetro interno del casco.

#### 4.3.4 Área transversal de los agujeros en la placa portatubos( $C$ )

$$C = \frac{\pi}{4} * (D_{ETS}^2 * n + D_{ETp}^2) = \frac{\pi}{4} * (2,375^2 * 44 + 10,75^2) = 285,7[in^2]$$

Ecuación 42

$D_{ETS} = 2,375$  [in], Diámetro externo de los tubos secundarios.

$n = 44$ , Número de tubos secundarios.

$D_{ETp} = 10,75$  [in], Diámetro externo del tubo principal.

#### 4.3.5 Área transversal del casco ( $B$ )

$$B = \frac{\pi}{4} * (D_{EC}^2 - D_{IC}^2) = \frac{\pi}{4} * (41^2 - 40^2) = 63,62[in^2]$$

Ecuación 43

$D_{IC} = 40$  [in], Diámetro interno del casco.

$D_{EC} = 41$ [in], Diámetro externo del casco.

#### 4.3.6 Deflexión o eficiencia de ligamento( $\mu$ )

$$\mu = \frac{A - C}{A} = \frac{1257 - 285,7}{1257} = 0,7727$$

Ecuación 44

$$Q = \frac{E_{TS} * n * a_o + E_{Tp} * b_o}{E_s * B} = \frac{27,52 * 10^6 * 44 * 1,075 + 30,24 * 10^6 * 11,91}{26,08 * 10^6 * 63,62} = 1,987$$

Ecuación 45

$E_s = 26,08 * 10^6$ [psi], Módulo de elasticidad del casco.

$E_{TS} = 27,52 * 10^6$ [psi],Módulo de elasticidad de los tubos secundarios.

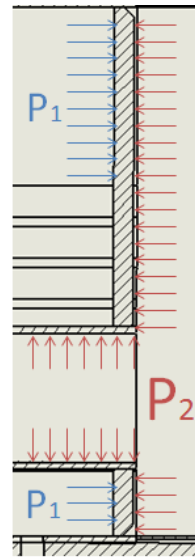
$E_{Tp} = 30,24 * 10^6$ [psi], Módulo de elasticidad del tubo principal.

#### 4.3.7 Presión diferencial ( $P_d$ )

$$P_d = P_1 - P_2 - \left[ \frac{P_2 * (n * a_o + b_o)}{A - C} \right]$$

$$= 150 - 14,696 - \left[ \frac{14,696 * (44 * 1,075 + 11,91)}{1257 - 285,7} \right] = 133,5 \text{ [psi]}$$

Figura 30. Presión diferencial



Fuente: Autores.

$P_1 = P = 150 \text{ [psi]}$ , Presión por fuera de los tubos (presión de diseño).

$P_2 = 14,696 \text{ [psi]}$ , Presión dentro de los tubos (presión ambiente).

#### 4.3.8 Expansión diferencial ( $\gamma$ )

$$\gamma = \alpha_t * \theta_t - \alpha_s * \theta_s$$

$\alpha_s$ , Coeficiente de expansión térmica del casco.

$\theta_s$ , Temperatura del casco.

$\alpha_t$ , Coeficiente de expansión térmica de los tubos.

$\theta_t$ , Temperatura de los tubos.

Se desprecia porque los coeficientes de expansión térmica son muy pequeños ( $6,596 * 10^{-6} [in/in^{\circ}F]$ ),  $\gamma \approx 0$ .

#### 4.3.9 Presión diferencial efectiva ( $P_e$ )

$$P_e = P_d + \gamma * \left[ \frac{E_{Ts} * n * a_o + E_{Tp} * b_o}{A - C} \right] = 133,5 [psi]$$

Ecuación 48

#### 4.3.10 Determinación del factor ( $kR$ )

$$kR = 1,08 * \left[ \frac{E_{Ts} * n * a_o + E_{Tp} * b_o}{L * h^3 * E_p * (A - C)} \right]^{\frac{1}{4}}$$

Ecuación 49

$h = t_{ppt} = 1,5 [in]$ , Espesor de la placa portatubos.

$L = L_{Ts} = 60 [in]$ , Longitud de los tubos.

$E_p = 26,08 * 10^6 [psi]$ , Módulo de elasticidad de la placa portatubos.

Con el  $kR$  calculado se encuentran los valores para  $G_1, G_2, G_3$  y  $G_4$  (ver anexo A), entrando en la tabla 1, del libro *Design of processequipment, chapter 5: Fixedtubesheetdesign*, pág. 163, que son factores que se utilizan para determinar los máximos esfuerzos en la placa portatubos.

#### 4.3.11 Máximo esfuerzo radial en la placa portatubos ( $Pr_{max}$ )

$$Pr_{max} = \left[ \frac{P_e - P_2 * \left( \frac{A}{A-C} \right) * Q}{4 * (Q * G_1 + G_2)} \right] * \left[ \frac{D_{EC}}{h} \right]^2$$

Ecuación 50

#### 4.3.12 Máximo esfuerzo longitudinal por los tubos ( $Pt_{max}$ )

$$Pt_{max1} = \left[ \frac{A - C}{n * a_o + b_o} \right] * \left[ Pd - \left( \frac{G_3 * \left[ P_e - P_2 * \left( \frac{A}{A-C} \right) * Q \right]}{Q + G_4} \right) \right]$$

Ecuación 51

ó

$$Pt_{max2} = \left[ \frac{A - C}{n * a_o + b_o} \right] * \left[ Pd - \left( \frac{G_4 * \left[ P_e - P_2 * \left( \frac{A}{A-C} \right) * Q \right]}{Q + G_4} \right) \right]$$

Ecuación 52

Tabla 19. Esfuerzos máximos en la placa portatubos.

$t_{ppt}$ [in]	kR	$G_1$	$G_2$	$G_3$	$G_4$	$Pr_{máx}$ [psi]	$Pt_{máx1}$ [psi]	$Pt_{máx2}$ [psi]
0,5	16.07	54.55	82.14	-0.954	28.54	844	1121	362
1	9.55	9.601	43.4	-0.636	8.529	644	1144	459
1,5	7.05	5.562	25.04	-0.535	5.7	495	1152	514
2	5.68	4.156	16.57	0.312	4.481	405	1059	552
2,5	4.80	3.362	11.89	-0.389	3.729	346.6	1150	584
3	4.19	2.829	8.993	-0.634	3.206	305.8	1193	611

Fuente: los autores

Se puede observar que los esfuerzos son mucho menores que el esfuerzo a la tracción del material (11700 [psi]). Según código ASME, sección I, parte PFT 9.2.1, pág. 124, Tabla 9.2.1, en ningún caso el espesor de la placa portatubos puede ser menor a 7/16 [in]. El espesor de la placa para este diámetro recomendado por fabricantes en la industria de calderas (COLMAQUINAS) es de

1,5[in], por tanto se selecciona una placa portatubos ASTM A516 de grado 70 con éste espesor.

$$t_{ppt} = 1\frac{1}{2} [in]$$

#### 4.4 CÁLCULO DE LOS STAYBOLTS

##### 4.4.1 Cálculo del paso entre *staybolts*

Según el código ASME sección I división 1 PG-46, pág. 34.

$$t = p * \sqrt{\frac{P}{S * C}} = 6,24[in]$$

Ecuación 53

$t = \frac{7}{16} [in]$ , mínimo espesor de la placa portatubos según código ASME, sección I, parte PFT 9.2.1

$P = 150[psi]$ , presión de diseño.

$S = 13900[psi]$ , Esfuerzo de tensión permisible para el material ASTM A516 grado 70 a temperatura de diseño.

$C = 2,2$ , para staybolts soldados a placas con mínimo espesor de 7/16 [in].

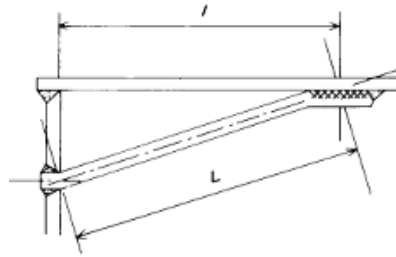
$p$ , paso entre staybolts, se selecciona un paso de 7[in].

Por recomendaciones del código se selecciona un diámetro para los staybolts de 1[in], que se construirán de varilla ASTM A36, que es la más utilizada para este tipo de elementos.

##### 4.4.2 Dimensionamiento de los *staybolts*

Según el código ASME sección I división 1 PFT-32, pág. 135.

Figura 31. Staybolts



Fuente: Código ASME PFT 32, pág.135

$$A_{st} = a_{st} * L_{st}/l_{st}$$

Ecuación 54

$A_{st}$ , Área de la sección diagonal del *staybolt*.

$a_{st}$ , Área de la sección horizontal del *staybolt*.

Como se seleccionó una varilla de sección transversal constante  $A_{st} = a_{st}$

$L_{st}$ , es la longitud diagonal del *staybolt*.

$l_{st}$ , es la distancia horizontal de entre la placa portatubos y el extremo del *staybolt*.

Por recomendaciones de la norma cuando la sección transversal de los *staybolts* es constante,  $L_{st}$  debe ser mayor a  $1,15 * l_{st}$ , entonces una muy buena relación entre estas longitudes será:

$$L_{st} = 1,4 * l_{st}$$

Ecuación 55

$$L_{st}^2 = l_{st}^2 + Y_{st}^2$$

Ecuación 56

$Y_{st}$ , mínima distancia entre el *staybolt* con el casco, según la norma lo mínimo es el paso entre *staybolts*=7[in].

Entonces,  $L_{st} = 10[in]$  y  $l_{st} = 7,2[in]$

#### 4.5 LONGITUD DE LA CÁMARA DE RETORNO DE LOS GASES ( $L_{CR}$ )

Debido a que las cámaras de retorno y salida de los gases no están sometidas a altas presiones, para su diseño se seleccionó lámina de acero ASTM A516 de espesor de  $\frac{1}{4}$  [in], por criterio de los diseñadores se determinó la longitud.

$$L_{CR} * P_{casco} = 1,33 * A_{Fr}$$

Ecuación 57

$$L_{CR}=6,573[in] \approx 180[mm]$$

$A_{Fr} = 621[in^2]$ , Área de flujo de los gases proyectada en forma rectangular.

$P_{casco} = 125,66[in]$ , Perímetro interno del casco.

#### 4.6 CÁLCULO DE ABERTURAS Y REFUERZOS

##### 4.6.1 Cálculo del espesor mínimo de la boquilla de alimentación de agua.

Basado en el libro *Manual de recipientes a presión, parte I, capítulo 5: Registros* pág 106.

$$t_{rn} = \frac{P * R}{S * E - 0,6 * P} = 0,0105[in]$$

Ecuación 58

$S = 15000 [psi]$ , Esfuerzo de tensión permisible para el material a temperatura de diseño, para el ASTM A53 grado B.

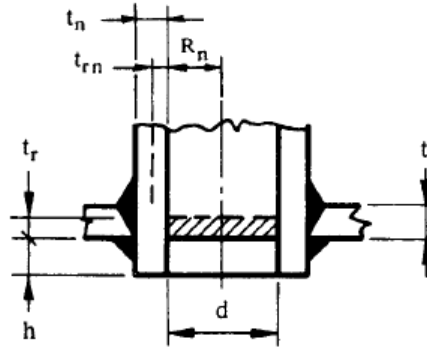
$E=1$ , Eficiencia para uniones soldadas a condición de que toda la soldadura de refuerzo quede a ras con la superficie.

$R=0,9375[in]$ , Radio interno del cuerpo.

$P = 150 [psi]$ , Presión de diseño.

Por tanto se selecciona una boquilla ASTM A53 grado B de espesor  $t_n = 0,250[in]$ , y de 5" de longitud.

Figura 32. Aberturas



Fuente:Manual de recipientes a presión pág. 109

#### 4.6.1.1 Área de refuerzo requerida ( $A_R$ )

$$A_R = t_r * d = 0,6873[in^2]$$

Ecuación 59

$t_r = t_c = 0,3477[in]$ , espesor mínimo requerido para el casco (previamente calculado).

$d = 1,875 [in]$ , diámetro interno de la boquilla.

#### 4.6.1.2 Área de refuerzo disponible ( $A_D$ )

- $A_1$ , exceso en el casco (se toma el mayor)

$$A_{11} = (t - t_r) * d = 0,2502[in^2]$$

Ecuación 60

$t = 0,5[in]$ , espesor del casco seleccionado.

$$A_{12} = (t - t_r) * (t_n + t) * 2 = 0,2002[in^2]$$

Ecuación 61

$t_n = 0,250[in]$ , espesor de la boquilla seleccionada.

- $A_2$ , exceso en el cuello de la boquilla (se toma el menor)

$$A_{21} = (t_n - t_{rn}) * 5 * t = 0,5988[in^2]$$

Ecuación 62

$$A_{22} = (t_n - t_{rn}) * 5 * t_n = 0,2994[in^2]$$

Ecuación 63

- $A_3$ , exceso en extensión hacia el interior

$$A_3 = t_n * 2 * h = 0,3125[in^2]$$

Ecuación 64

$$h = 2,5 * t_n = 0,625[in]$$

Ecuación 65

$h$ , extensión de la boquilla hacia el interior del recipiente.

- $A_4$ , Área de soldadura de filete

$$A_4 = \frac{\pi}{4} * ((d_e + (2 * r_s))^2 - d_e^2) = 2,062[in^2]$$

Ecuación 66

$d_e = 2,375[in]$ , diámetro externo de la boquilla.

$r_s = 0,25[in]$ , radio del filete de soldadura.

- $A_5$ , Área de soldadura de filete interior  $A_5 = A_4$

Ecuación 67

Entonces,

$$A_D = A_1 + A_2 + A_3 + A_4 + A_5 = 4,9[in^2]$$

Ecuación 68

Como ésta área es mayor que la requerida para el refuerzo, no se necesita de refuerzo adicional.

#### 4.6.2 Cálculo del espesor mínimo de las boquillas de vapor, y de conexión al control de nivel.

Siguiendo el procedimiento anterior.

$$t_{rn} = \frac{P * R}{S * E - 0,6 * P} = 0,007718[in]$$

Ecuación 69

$S = 15000 [psi]$ , Esfuerzo de tensión permisible para el material a temperatura de diseño, para el ASTM A53 grado B.

$E=1$ , Eficiencia para uniones soldadas a condición de que toda la soldadura de refuerzo quede a ras con la superficie.

$R=0,69[in]$ , Radio interno del cuerpo.

$P = 150 [psi]$ , Presión de diseño.

Por tanto se selecciona una boquilla ASTM A53 grado B de espesor  $t_n = 0,140[in]$ , y de 5" de longitud.

##### 4.6.2.1 Área de refuerzo requerida ( $A_R$ )

$$A_R = t_r * d = 0,506[in^2]$$

Ecuación 70

$t_r = t_c = 0,3477[in]$ , espesor mínimo requerido para el casco (previamente calculado).

$d = 1,380 [in]$ , diámetro interno de la boquilla.

##### 4.6.2.2 Área de refuerzo disponible ( $A_D$ )

- $A_1$ , exceso en el casco (se toma el mayor)

$$A_{11} = (t - t_r) * d = 0,1842[in^2]$$

Ecuación 71

$t = 0,5[in]$ , espesor del casco seleccionado.

$$A_{12} = (t - t_r) * (t_n + t) * 2 = 0,1708[in^2]$$

Ecuación 72

$t_n = 0,140[in]$ , espesor de la boquilla seleccionada.

- $A_2$ , exceso en el cuello de la boquilla (se toma el menor)

$$A_{21} = (t_n - t_{rn}) * 5 * t = 0,3307[in^2]$$

Ecuación 73

$$A_{22} = (t_n - t_{rn}) * 5 * t_n = 0,0926[in^2]$$

Ecuación 74

- $A_3$ , exceso en extensión hacia el interior

$$A_3 = t_n * 2 * h = 0,098[in^2]$$

Ecuación 75

$$h = 2,5 * t_n = 0,35[in]$$

Ecuación 76

$h$ , extensión de la boquilla hacia el interior del recipiente.

- $A_4$ , Área de soldadura de filete

$$A_4 = \frac{\pi}{4} * ((d_e + (2 * r_s))^2 - d_e^2) = 1,5[in^2]$$

Ecuación 77

$d_e = 1,66[in]$ , diámetro externo de la boquilla.

$r_s = 0,25[in]$ , radio del filete de soldadura.

- $A_5$ , Área de soldadura de filete interior

$$A_5 = A_4$$

Entonces,

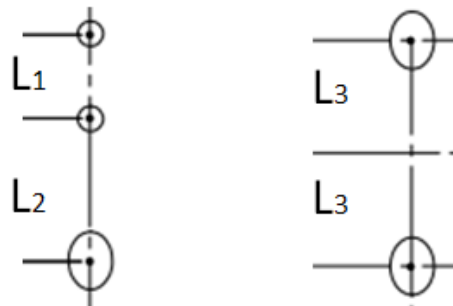
$$A_D = A_1 + A_2 + A_3 + A_4 + A_5 = 3,362[in^2]$$

Como ésta área es mayor que la requerida para el refuerzo, no se necesita de refuerzo adicional.

#### 4.6.3 Distancia entre aberturas

Según el código ASME sección I división PG-32.1.2: Múltiples aberturas, pág.22.

Figura 33. Distancia entre aberturas.



Fuente:Autores.

Se calcula un factor K para todos los casos.

$$K = \frac{P * D_{EC}}{1,82 * S * t_{casco}} = \frac{150 * 41}{1,82 * 13900 * 0,5} = 0,487$$

$S = 13900 [psi]$ , Esfuerzo de tensión permisible para el casco a temperatura de diseño.

$P = 150 [psi]$ , Presión de diseño.

$D_{EC} = 41[in]$ , Diámetro externo del casco.

$t_{casco} = \frac{1}{2}[in]$ , Espesor del casco.

Se calcula la distancia mínima entre boquillas( $L_{m1}$ ), entre boquillas y *handholes*( $L_{m2}$ ), y entre *handholes*( $L_{m3}$ ).

$$L_{m1} = \frac{2A}{2(1-K)} = \frac{2 * 1,25}{2(1-0,487)} = 2,43[in] = 62[mm]$$

Ecuación 81

$A = 1,25 [in]$ , Diámetro externo de las boquillas.

$B = 4 [in]$ , Diámetro externo de los *handholes*.

$$L_{m2} = \frac{A+B}{2(1-K)} = \frac{1,25+4}{2(1-0,487)} = 5,12[in] = 128[mm]$$

Ecuación 82

$$L_{m3} = \frac{2B}{2(1-K)} = \frac{2 * 4}{2(1-0,487)} = 7,8[in] = 198[mm]$$

Ecuación 83

Para efectos de planos de detalle, una buena distribución y un rango de seguridad más alta, las distancias seleccionadas son:

$L_1 = 150[mm]$ , Distancia entre boquillas.

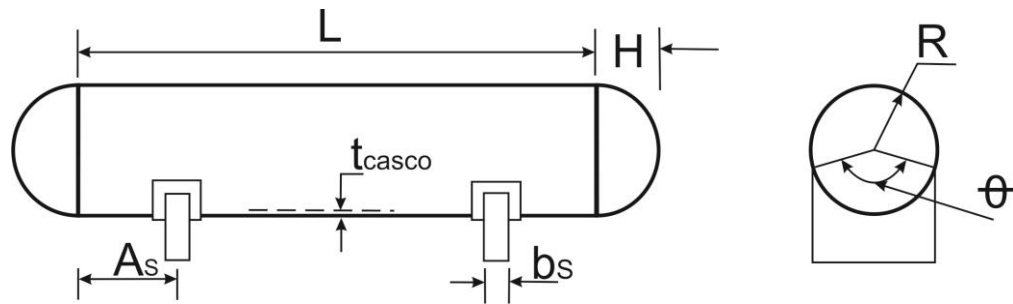
$L_2 = 250[mm]$ , Distancia entre boquillas y *handholes*.

$L_3 = 200[mm]$ , Distancia entre *handholes*.

#### **4.7 CÁLCULO DE LOS SOPORTES DEL EQUIPO**

Basado en el libro *Manual de recipientes a presión, parte I, capítulo 4: Esfuerzos en recipientes horizontales grandes soportado por silletas* pág 96.

Figura 34. Soportes del equipo



Fuente: Autores

#### 4.7.1 Esfuerzo flexionante longitudinal ( $S_1$ )

##### 4.7.1.1 Esfuerzo en las silletas ( $S_{1silletas}$ )

$$S_{1silletas} = \frac{Q_S * A_S * \left[ 1 - \left( \frac{1 - \frac{A_S}{L} + \frac{R^2 - H^2}{2 * A_S * L}}{1 + \frac{4 * H}{3 * L}} \right) \right]}{K_1 * R^2 * t_{casco}}$$

$$= \frac{2533 * 11 * \left[ 1 - \left( \frac{1 - \frac{11}{60} + \frac{20,5^2 - 10,8^2}{2 * 11 * 60}}{1 + \frac{4 * 10,8}{3 * 60}} \right) \right]}{0,335 * 20,5^2 * 0,5} = 44,6 [psi]$$

Ecuación 84

$Q_S = 2533 [lb]$ , Carga sobre una de las silletas.

$A_S = 11 [in]$ , Distancia entre el cabezal y el soporte (en ningún caso debe ser mayor que 0,2 veces la longitud del recipiente, para este caso no mayor a 12[in])

$H = 10,8 [in]$ , Profundidad de las tapas.

$K_1 = 0,335$ , factor k tomado de la pág 88 del *Manual de recipientes a presión*, depende del ángulo de agarre.

$\theta = 120^\circ$ , Angulo de agarre.

$L = 60 [in]$ , longitud del recipiente de cabezal a cabezal.

$R = 20,5 [in]$ , Radio externo del casco.

$t_{casco} = 0,5[in]$ , espesor del casco.

#### 4.7.1.2 Esfuerzo a la mitad del claro ( $S_{1claro}$ )

$$S_{1claro} = \frac{\frac{Q_S * L}{4} * \left[ \frac{1 + 2 * \left( \frac{R^2 - H^2}{L^2} \right) - \frac{4 * A_S}{L}}{1 + \frac{4 * H}{3 * L}} \right]}{\pi * R^2 * t_{casco}}$$

$$S_{1claro} = \frac{\frac{2533 * 60}{4} * \left[ \frac{1 + 2 * \left( \frac{20,5^2 - 10,8^2}{60^2} \right) - \frac{4 * 11}{60}}{1 + \frac{4 * 10,8}{3 * 60}} \right]}{\pi * 20,5^2 * 0,5} = 15,88[psi]$$

Ecuación 85

Para el material del casco ASTM A516, el valor del esfuerzo permitido es  $\sigma = 17500[psi]$ .

#### 4.7.1.3 Esfuerzo debido a la presión interna

$$S_{pint} = \frac{P * R}{2 * t_{casco}} = \frac{150 * 20,5}{2 * 0,5} = 3075[psi]$$

Ecuación 86

La suma de los esfuerzos de tensión:  $15,88 + 3075 = 3090,88[psi]$ , no es mayor que el valor del esfuerzo en la costura circunferencial:  $17500 * 0,85 = 14875[psi]$ .

El esfuerzo de compresión no es factor, en vista de que  $\frac{t_{casco}}{R} > 0,005$ ;  $\frac{0,5}{20,5} = 0,0244$

#### 4.7.2 Esfuerzo cortante Tangencial ( $S_2$ )

Como  $A_S > \frac{R}{2}$  y no se usa anillo, la ecuación que se aplica es:

$$S_2 = \frac{K_2 * Q_S}{R * t_{casco}} * \left[ \frac{L - 2 * A_S}{L + \frac{4}{3} * H} \right] = \frac{1,171 * 2533}{20,5 * 0,5} * \left[ \frac{60 - 2 * 11}{60 + \frac{4}{3} * 10,8} \right] = 150,6[psi]$$

Ecuación 87

$K_2 = 1,171$ , Factor k tomado del *Manual de recipientes a presión* pág. 88, depende del ángulo de agarre.

$S_2$  cumple porque según la norma no deberá exceder 0,8 veces el esfuerzo a tensión permisible del material del casco:  $17500 * 0,8 = 14000 [psi]$ .

#### 4.7.3 Esfuerzo circunferencial ( $S_4$ )

Como  $L < 8 * R$  y  $A_S > \frac{R}{2}$ , la ecuación a aplicar es:

$$S_4 = - \left[ \frac{Q_S}{(4 * t_{casco}) * (b_S + 1,56 * (R * t_{casco})^{\frac{1}{2}})} \right] - \left[ \frac{12 * K_6 * Q_S * R}{L * t_{casco}^2} \right]$$

Ecuación 88

$$= - \left[ \frac{2533}{(4 * 0,5) * (10 + 1,56 * (20,5 * 0,5)^{\frac{1}{2}})} \right] - \left[ \frac{12 * 0,02 * 2533 * 20,5}{60 * 0,5^2} \right]$$

$$= -923,4 [psi]$$

$K_6 = 0,02$ , Factor k hallado gráficamente del *Manual de recipientes a presión* pág. 89, depende del ángulo de agarre.

$S_4$  cumple porque según la norma no deberá exceder 1,5 veces el valor del esfuerzo a la tensión del material del casco:  $17500 * 1,5 = 26250 [psi]$ .

#### 4.7.4 Esfuerzo en la parte inferior del soporte ( $S_5$ )

$$S_5 = - \left[ \frac{K_7 * Q_S}{t_{casco} * (b_S + 1,56 * (R * t_{casco})^{\frac{1}{2}})} \right]$$

Ecuación 89

$$= - \left[ \frac{0,760 * 2533}{0,5 * (10 + 1,56 * (20,5 * 0,5)^{\frac{1}{2}})} \right] = -281,2 [psi]$$

$K_7 = 0,760$ , Factor k tomado del *Manual de recipientes a presión* pág. 88, depende del ángulo de agarre.

$S_5$  cumple porque según la norma no deberá exceder 0,5 veces el valor a compresión del límite de fluencia del material del casco:  $38000 * 0,5 = 19000 [psi]$ .

#### 4.7.5 Diseño de los soportes

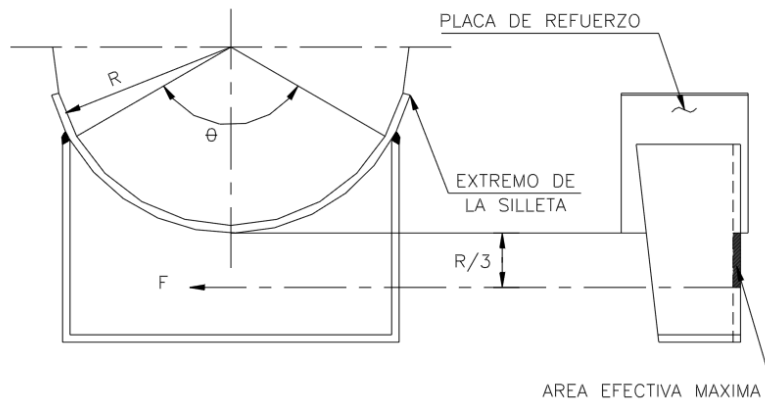
En su sección más baja, la silleta debe resistir la fuerza horizontal (F). La sección transversal eficaz de la silleta que resiste esta carga es igual a la tercera parte del radio del recipiente (R).

$$F = K_{11} * Q_S = 0,204 * 2533 = 516,73 [lb]$$

Ecuación 90

$K_{11} = 0,204$ , Factor k tomado del *Manual de recipientes a presión* pág. 96, depende del ángulo de agarre.

Figura 35. Diseño de los soportes



Fuente: manual de recipientes a presión, pág 96

El material de la silleta es acero ASTM A283C calidad estructural para aplicación en general, con espesor de la placa de 0,25 [in].

Para soportar esta fuerza el área efectiva ( $A_{efec}$ ) de la placa debe ser:

$$A_{efec} = \frac{R}{3} * 0,25 = \frac{20,5}{3} * 0,25 = 1,708[in^2]$$

Ecuación 91

#### 4.7.5.1 Esfuerzo soportado ( $\sigma_{Sop}$ )

$$\sigma_{Sop} = \frac{F}{A_{efec}} = \frac{516,73}{1,708} = 302,5[psi]$$

Ecuación 92

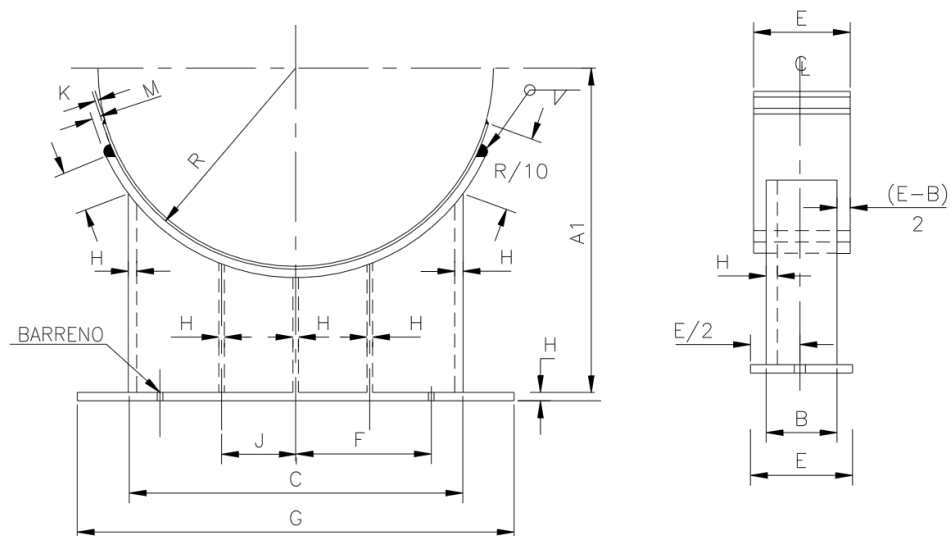
#### 4.7.5.2 Esfuerzo permitido ( $\sigma_p$ )

$$\sigma_p = \frac{2}{3} * 13750 = 9166[psi]$$

Ecuación 93

El espesor seleccionado para la placa alma del soporte es satisfactorio para la fuerza horizontal F. Para soportes implementados en recipientes horizontales tipo sileta con diámetro de 24[in] a 144[in], El libro *Diseño y cálculo de recipientes a presión*, recomienda la siguiente geometría:

Figura 36. Geometría de los soportes



Fuente: Diseño y cálculo de recipientes a presión, pág.135.

Las dimensiones de las diferentes cotas fueron tomados de la tabla: soporte para recipientes horizontales pág. 135, aunque se hicieron unas modificaciones en la altura para que los soportes estuvieran en acorde con todo el sistema, los cambios realizados están de acuerdo al código ASME que dice que la caldera debe estar como mínimo a 12[in] del suelo. (ver planos)

#### 4.8 CHIMENEA

El diámetro de salida de los gases 8[in], que es la dimensión recomendada por los fabricantes de calderas locales para equipos del tamaño y capacidad similares al del proyecto. Para el cálculo de la altura mínima de la chimenea se tomaron las recomendaciones dadas en el libro *Termotecnia 4ª edición*, de Vicente L.pág.292

$$\frac{d_{Ch}}{H_{Ch}} = \frac{1}{25}$$

Ecuación 94

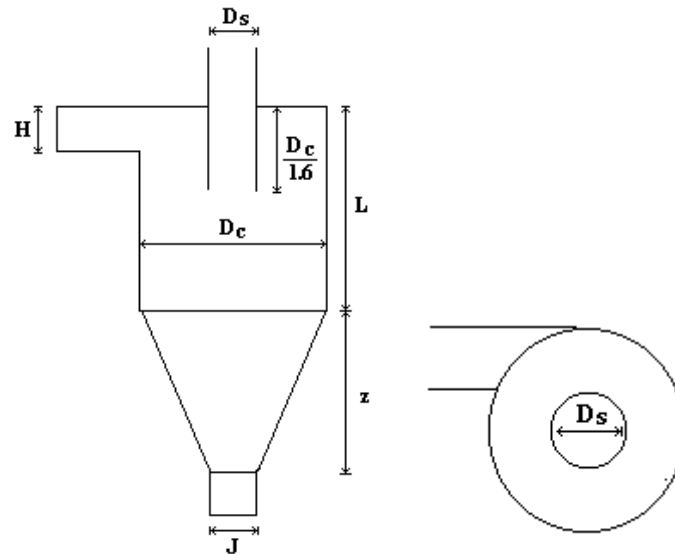
$$H_{Ch} = 25 * 203,2 = 5080[mm]$$

$d_{Ch} = 8[in] = 203,2[mm]$ , Diámetro de la chimenea.

$H_{Ch}$ , Altura de la chimenea.

Las relaciones geométricas convencionales para el diseño de un ciclón se pueden observar en la figura.

Figura 37. Diseño de un ciclón convencional.



Fuente. <http://www.monografias.com/trabajos14/ciclon-disenio/ciclon-disenio.shtml>

$H = 8[in]$ , Diámetro de la chimenea.

$D_c = 2 * H = 16[in]$ , Diámetro del ciclón.

$L = 2 * D_c = 16[in]$ , Altura del cilindro.

$Z = 2 * D_c = 16[in]$ , Altura del cono.

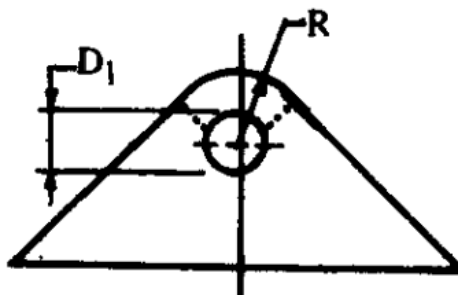
$D_s = \frac{D_c}{2} = 8[in]$ , Diámetro de la salida de los humos.

$D_s = \frac{D_c}{4} = 4[in]$ , Diámetro de la salida del polvo.

#### 4.9 ACCESORIOS PARA IZAJE

Para determinar las medidas y espesores de los accesorios de izaje se siguieron las recomendaciones dadas por el libro *Manual de recipientes a presión, parte I, capítulo 13: Temas diversos* pág. 213.

Figura 38. Accesorio de izaje.



Fuente. Diseño y cálculo de recipientes a presión, pág.214.

$$t_i = \frac{P_{Carga}}{2 * S * \left(R_o - \frac{D_o}{2}\right)} = \frac{8650}{2 * 11688 * \left(2 - \frac{1\frac{1}{8}}{2}\right)} = 0,257[in]$$

Ecuación 95

$t_i$ , Mínimo espesor para el accesorio de izaje.

$P_{caldera} = 2638,2[kg] = 5816,23[lb]$ , Peso total de la caldera (llena a tope de agua).

$P_{carga} = 8650[lb]$ , Peso de la carga a soportar (ver anexo B).

$S = 11688 [psi]$ , Esfuerzo de tensión permisible para el ASTM A285 de grado C (acero seleccionado para el accesorio de izaje).

$R_o = 2[in]$ , Radio de la oreja (ver anexo B).

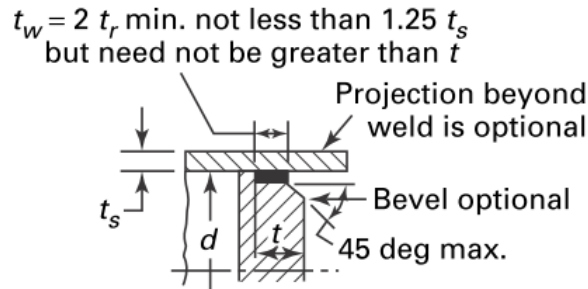
$D_o = 1\frac{1}{8} [in]$ , Diámetro del agujero de la oreja (ver anexo B).

Para la construcción de los accesorios de izaje se selecciona un espesor de  $\frac{1}{2} [in]$ .

#### 4.10 SOLDADURA

Según el código ASME sección I figura PG-31, se calcula el espesor del cordón de soldadura entre la placa portatubos y el casco.

Figura 39. Espesor soldadura de la placa



Fuente. Código ASME sección I, pág.19.

$$t_{w1} = 2 * t_r = 2 * 0,3477 = 0,7[in] \cong 19 [mm]$$

Ecuación 96

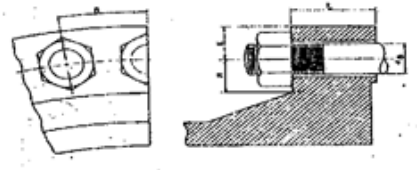
$$t_{w2} = 1,25 * t_s = 1,25 * 0,5 = 0,625[in] \cong 16[mm]$$

Ecuación 97

Para determinar los espesores de las juntas se siguieron las recomendaciones dadas por el libro *Manual de recipientes a presión, parte IV, capítulo 5: Diseño de juntas soldadas* pág. 440 (ver anexo C).

#### 4.11 ESPACIAMIENTO ENTRE TORNILLOS

Figura 40. Espaciamento recomendado para pernos.



Fuente: norma TEMA, R-10: Apertamiento final.

Para los tornillos usados en las puertas de mantenimiento (3/8"x5" grado 8<sup>14</sup>) se tomaron las recomendaciones del libro: *Design of processequipment*, pág. 70. (ver anexo D)

- Esfuerzo de apriete en los tornillos  $S_i$

<sup>14</sup>Tienen esfuerzo admisible de 30,000 psi a la temperatura de diseño.

Según el libro *Diseño en ingeniería mecánica* de Shigley para conexiones reutilizables

$$S_i = 0,75 * S_p = 0,75 * (30000) = 22500 \text{ [psi]}$$

Sp, Esfuerzo permisible del perno a temperatura de diseño.

$$S_i = \frac{F_i}{A_t}$$

$$F_i = 22500 * \left( \frac{\pi * \frac{3^2}{4}}{4} \right) = 2485 \text{ [lb]}$$

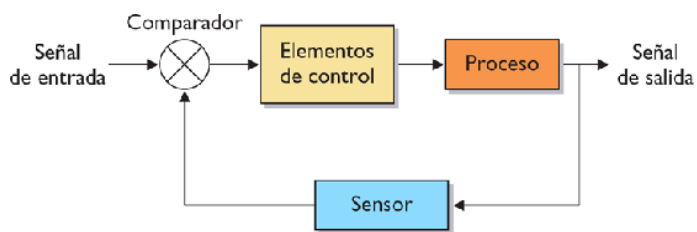
Fi, Fuerza de apriete que puede soportar el tornillo.

At, área transversal del tornillo.

## 5 SELECCIÓN DE COMPONENTES DE CONTROLDE PRESIÓN Y NIVEL

La operación segura de una caldera pirotubular requiere de un control estricto de variables como la presión y el nivel, ya que un exceso de alguna de ellas puede ocasionar un desastre. El lazo de control apropiado para este caso es de tipo cerrado, y responde al diagrama de la figura 40.

Figura 40. Esquema de un lazo de control cerrado



Fuente: [www.kalipedia.com](http://www.kalipedia.com)

### 5.1 CONTROL DE PRESIÓN

El control de presión que utilice esta caldera debe ser simple y práctico, ya que la presión que maneja es baja y que su capacidad también lo es. Por otro lado, puede ser de tipo on-off o continuo, esto depende de la facilidad de control que presente el quemador, en el caso del horno de esta caldera, se encontró que el tiempo máximo que este puede permanecer sin ser alimentado y teniendo llama viva esta alrededor de 1 minuto, por esto, pensar en un control on-off puede ser poco confiable, ya que durante las pruebas nunca se hizo un estudio del tiempo que le toma a una caldera bajar su presión, por esta razón, se opta por el uso de un control continuo.

#### 5.1.1 Dispositivo seleccionado para el control

Pressuretrolcontroller es un dispositivo de control utilizado para dar seguridad operacional a la caldera. Actúa como un limitador de presión, por medio de un circuito eléctrico que va conectado al variador de frecuencia del motor del dosificador de biomasa.

En el presente proyecto se seleccionó un pressuretrol Honeywell de la serie L404F1102. Este es un dispositivo de control modular de presión que tiene un circuito interno de conmutación rápida, el cual abre o cierra al generarse cambios en la presión. Su rango de presión va de 10 a 150 psi, maneja un diferencial o rango de operación permisible de 10 a 22 psi y su conexión se debe hacer a una fuente de voltaje de 220 V (ver anexo E). Su ajuste se hace mediante un tornillo.

Figura 41. Imagen externa de un pressuretrol



Fuente: Georgia-market.com

### 5.1.2 Elementos utilizados en el control

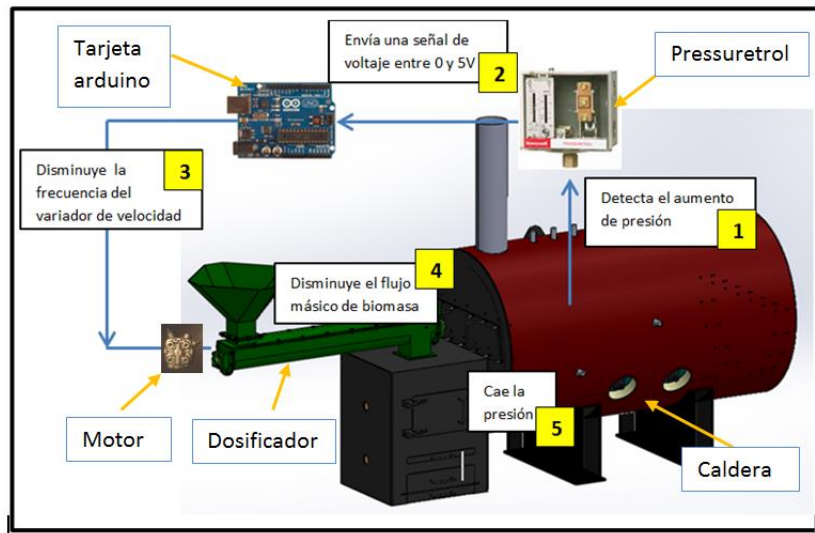
Con base en los elementos de la figura 40, se tiene que:

- Señal de entrada: Esta dada por el operario que ajusta el pressuretrol a la presión de operación requerida y con el rango de oscilación deseado.
- Sensor: El pressuretrol detecta la presión a la que se encuentra la caldera y envía una señal de voltaje.
- Elemento de control: Una tarjeta de adquisición de datos Arduino.
- Proceso: El variador de frecuencia que conectado al motor del dosificador actúa frente a las órdenes dadas por el elemento de control.

### 5.1.3 Comportamiento del control de presión

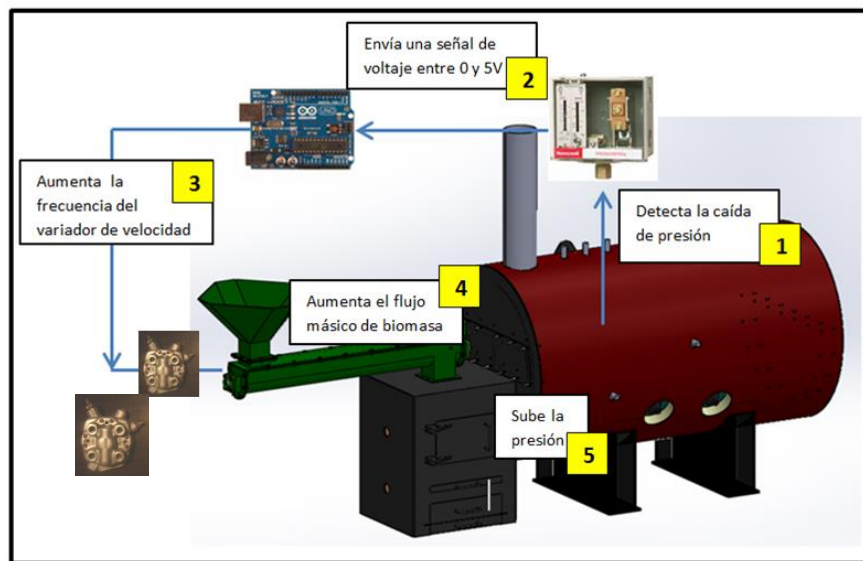
En caso de que la presión en el interior de la caldera alcance su límite máximo debe representar el comportamiento esquematizado en la figura 42. Y si por el contrario cae al límite mínimo, debe seguir la secuencia dada en la figura 43.

Figura 42. Diagrama de funcionamiento del pressuretrol cuando se sube la presión.



Fuente: los autores

Figura 43. Lazo de control presión, cuando hay una caída.



Fuente: los autores

## 5.2 VÁLVULA DE SEGURIDAD

Es importante que la caldera tenga un dispositivo de protección para prevenir subidas de presión más allá de la presión de diseño.

Este dispositivo se dispara cuando la presión alcanza un punto determinado, y permanece abierta hasta que baje nuevamente la presión. Estas válvulas normalmente son de resorte de carga directa.

El número total de válvulas de seguridad que se usen en la caldera, depende del área total de transferencia de calor  $A_T$ , según recomendación de la Sección I de la ASME en el párrafo PG 67.2.

$$A_T = A_{tubos_S} + A_{tubo_p} + A_{camara} + A_{cam_{retorno}} + A_{cam_{salida}}$$

Ecuación 98

Del software de modelamiento SOLIDWORKS se tiene que:

$$A_{tubos_S} = 41,5 \text{ pies}^2 \quad A_{tubo_p} = 6 \text{ pies}^2 \quad A_{camara} = 18,96 \text{ pies}^2$$

$$A_{cam_{retorno}} = 2,35 \text{ pies}^2 \quad A_{cam_{salida}} = 5,5 \text{ pies}^2$$

Entonces se tiene que el área total de transferencia de calor es 76,31 pies<sup>2</sup>, y por este valor ser menor a 500 pies<sup>2</sup> solo es necesario el uso de una única válvula de seguridad. Además, se tiene que para una presión de diseño de 150 psi y esta área de transferencia, el mínimo diámetro permitido para la válvula es de 1 ½ pulgada.

Para este caso en particular, se seleccionó una válvula TECVAL de un 1 ½ pulgada, ya que la presión a la que operará de forma regular tan solo es 80 o 90 psi, dependiendo de las necesidades inmediatas del cliente.

Figura 44. Válvula de seguridad seleccionada



Fuente: Colmaquinas

### 5.3 CONTROL DE NIVEL DE AGUA

Con el fin de permitir la operación automática de la caldera, es necesario utilizar un control de nivel que permita accionar la bomba de alimentación en el momento en que el indicador muestre la altura del agua por debajo del mínimo, y apagarla cuando el nivel regresa al valor máximo permitido.<sup>15</sup>

Un modelo que aplica a la función mencionada en el párrafo anterior es el McDonnell, el cual consiste de un flotador que actúa sobre un interruptor eléctrico.

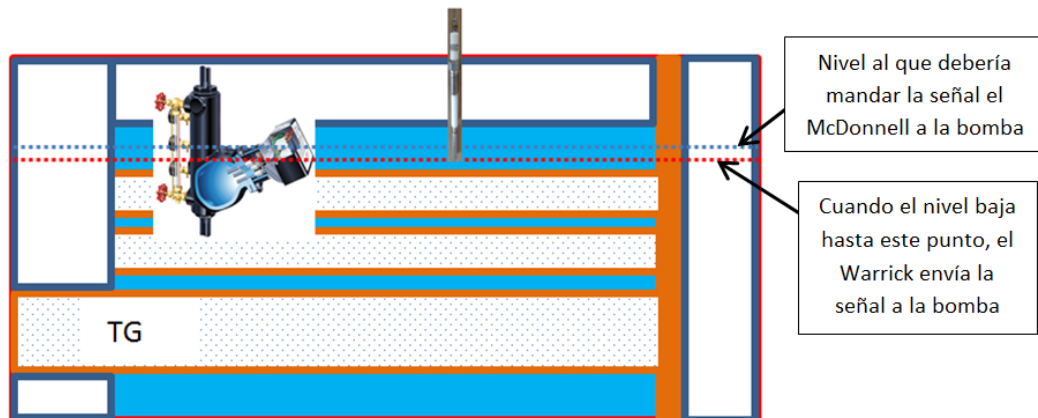
Para esta caldera las series mas apropiadas son el 157s y el 150s por ser utilizadas para presiones de diseño de 150 psi, sin embargo, se escogió 157s (ver anexo F) por ser más utilizado en calderas horizontales. El McDonnell 157s incluye el indicador de nivel, válvulas de cierre superior e inferior y la válvula de purga para desalojar sedimentos. Su conexión se debe realizar a una fuente de voltaje de 220 V.

Aunque las bondades del McDonnell parecen ser suficientes para asegurar el funcionamiento del generador de vapor, es necesario utilizar también un electrodo de nivel Warrick a modo de prevención de que el otro dispositivo no perciba la baja de nivel. El esbozo de esta situación se presenta en el esquema de la figura 45.

---

<sup>15</sup> Control on-off

Figura 45. Esquema de los dispositivos seleccionados para el control de nivel.



Fuente: los autores

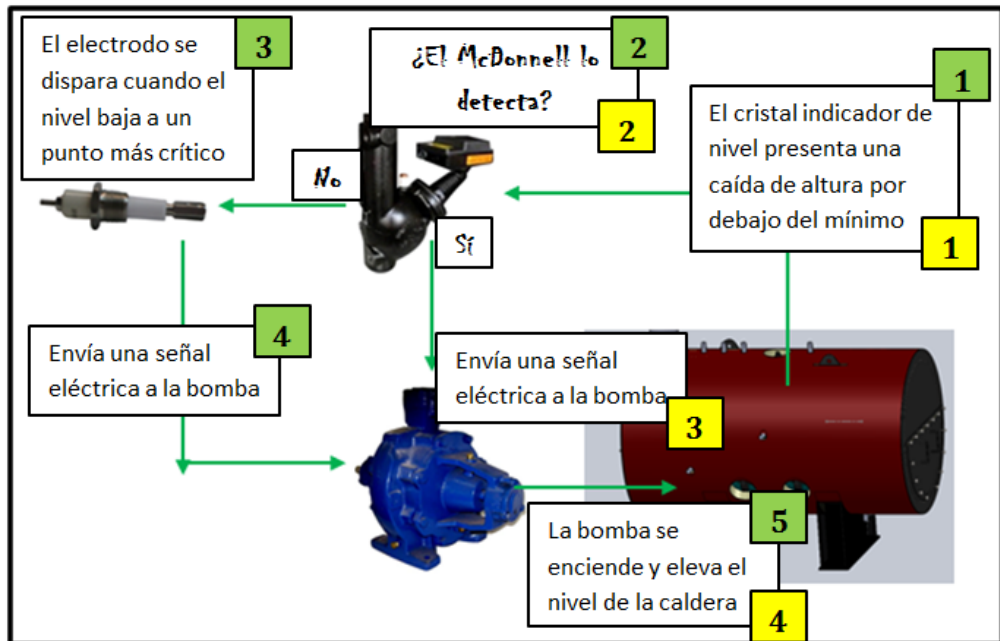
### 5.3.1 Dispositivos utilizados en el control

A pesar de ser un control de nivel on-off, posee un sensor extra. Este dispositivo hace del diagrama de la figura\_ un sistema de doble lazo. A continuación se da una breve explicación de cada elemento.

- Señal de entrada: Esta dada por el fabricante de la caldera, el cual ajusta la altura del nivel que proporciona el mejor funcionamiento de la caldera.
- Sensor 1: El flotador del McDonnell detecta cuando el nivel del agua llega a su punto límite y envía una señal a la bomba.
- Sensor 2: El electrodo del Warrick detecta cuando el nivel del agua llega a un punto más crítico y el McDonnell no envió ninguna señal.
- Elemento de control: el centro de mando recibe la señal del sensor y dispara el interruptor
- Proceso: El interruptor de la bomba se enciende o apaga

La figura 46 muestra el lazo de control a seguir en caso de una disminución de la altura en el indicador de nivel.

Figura 46. Esquema de lazo de control de nivel



Fuente: los autores

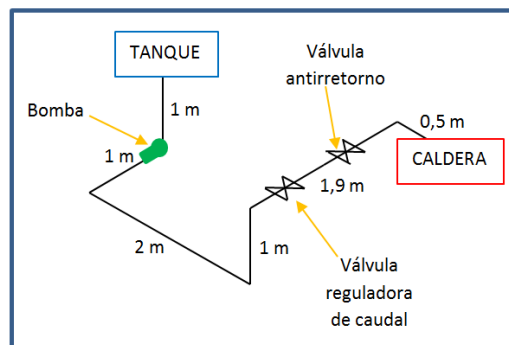
## 6 DISEÑO DEL SISTEMA DE TUBERIA DE AGUA Y VAPOR

El diseño de tuberías constituye el diseño de la tubería del agua de alimentación y la del vapor de salida. Para esto, en primer lugar es necesario conocer las dimensiones del sitio donde se va a ubicar el generador de vapor y en segundo lugar, proponer una configuración de la tubería, tanque y bomba de alineación, y accesorios como codos, válvulas.

### 6.1 DIMENSIONES DEL LUGAR

Para ubicar la caldera se cuenta con un lugar de 4\*3 metros. La figura 40 muestra las dimensiones propuestas para la tubería.

Figura 47. Esquema de la línea de alimentación de agua



Fuente: Los autores

Por tanto, se tiene una tubería de 7,4 metros, 5 codos, una bomba, 2 válvulas y un tanque de alimentación. De modo que teniendo en mente estas cantidades es menester de los autores de este proyecto el encontrar un diámetro de tubería que ofrezca los requerimientos que el sistema de generación de vapor le imponga.

Para empezar se debe conocer el tamaño del tanque de alimentación y el caudal de ingreso del agua a la caldera.

### 6.1.1 Agua de alimentación para una caldera

Partiendo del balance de masa de agua de la ecuación 13 se tendría que el cálculo del agua de alimentación debe hacerse de acuerdo a la ecuación 98.

$$V_{agua} = \dot{m}_{vapor} * \vartheta_{agua}$$

Ecuación 99

Pero de acuerdo al modo de operación de la caldera de este proyecto, en el que el control de nivel es de tipo on-off, el agua de alimentación debe calcularse de acuerdo al tiempo que deba tomarle a la caldera volver a su nivel de agua inicial.

Para realizar este cálculo se debe conocer el volumen de agua que a proveer a la caldera, y en que tiempo hacerlo. En la figura 41 se indica el nivel mínimo que debe tener siempre la caldera, y el nivel que se debe intentar mantener durante la operación. Según las recomendaciones de la Sección I de la ASME párrafo PG60 se tiene que nivel que debe mantener la caldera debe estar 3 pulgadas por encima de la parte mas alta de la última fila de tubos, y el mas bajo mínimo a 1 pulgada desde mismo punto.

Del software de modelamiento se tiene que el volumen de agua que hay en ese espacio es:

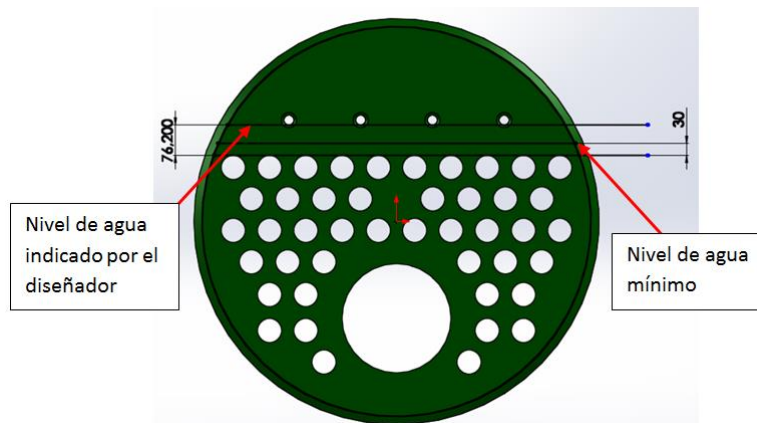
$$V = 16 \text{ galones}$$

Teniendo en cuenta que después de bajarse el nivel hasta el punto mínimo, este debe regresar a su punto normal en corto tiempo, pues se debe evitar que los tubos no estén totalmente cubiertos de agua, ya que esto causa su rápido deterioro.

Figura 48. Esquema de los niveles de agua de la caldera<sup>16</sup>

---

<sup>16</sup> Unidades de la dimensiones en mm



Fuente: los autores

Para este proyecto se ha considerado un tiempo de reposición de agua  $t_r$  de 1,5 minutos, el cual no es tan corto como para incrementar los gastos de proyecto al tener que comprar una bomba mas grande, o una tubería de mayor diámetro, pero tampoco tan largo para causar alguna dificultad en el funcionamiento de la caldera.

Luego el caudal de reposición  $\dot{V}_{agua}$  es 10,67 gpm.

### 6.1.2 Tanque de alimentación

Este componente del sistema de alimentación de agua debe tener un volumen mínimo a fin de que el generador de vapor pueda funcionar durante el tiempo total de la destilación, el cual puede tomar hasta 1 ½ horas, por lo que se considerara un tiempo  $t$  de funcionamiento de la caldera de 3 horas, tomando así un factor de seguridad de 2.

Entonces se tiene:

$t=3$  horas, tiempo destinado para la operación de la caldera

$$m_{agua} = \dot{m}_{vapor} * t$$

Ecuación 100

Y se sabe que:

$$\rho_{agua} = \frac{m_{agua}}{v_{tanque}}$$

Ecuación 101

Teniendo en cuenta que la masa de vapor es 60 kg/hr llega a que la masa de agua  $m_{agua}$  es 180 kg y finalmente se encuentra que el volumen del tanque de agua de almacenamiento es 53 galones.

## 6.2 TUBERÍA DEL AGUA DE ALIMENTACIÓN

Partiendo de las dimensiones del sitio donde se dispondrá la caldera pirotubular, y de la longitud para las tuberías planteadas en la figura 40, es necesario ahora realizar un cálculo de las pérdidas que determinado diámetro de tubería pueda generar, puesto que este debe ser seleccionado de acuerdo al rendimiento energético que proporcione, a los costos que implique y a las recomendaciones encontradas en la sección I de la norma ASME para calderas, parte PG59 y PG61<sup>17</sup>.

Entonces, tomando las orientaciones del libro Flujo de fluidos en válvulas, accesorios y tuberías de Crane y el caudal de agua calculado, se procede al cálculo de las pérdidas de la siguiente manera:

### 6.2.1 Pérdidas en tuberías

Bien es sabido que el flujo en tuberías está acompañado de rozamiento de las partículas de fluido entre sí, lo cual genera una pérdida de la energía disponible<sup>18</sup>. La ecuación general de la pérdida de presión de Darcy se conoce como:

$$h_{lt} = f * \left(\frac{L}{D}\right) * \frac{vel^2}{2 * g}$$

Ecuación 102

Donde el coeficiente de fricción  $f$  es:

<sup>17</sup> El diámetro de la tubería debe estar entre 1 in y 2 ½ in

<sup>18</sup>Flujo de fluidos de Crane, pag 18

$$f = \frac{64}{Re} \text{ , para régimen laminar (Re<2000)} \quad \text{Ecuación 103}$$

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = -2 \cdot \log\left(\frac{2,51}{Re \cdot \sqrt{f}}\right) \text{ , para la zona de completa turbulencia (Re>4000)} \quad \text{Ecuación 104}$$

Reynolds se calcula mediante:

$$Re = D * vel * \frac{\rho}{\mu}$$

Ecuación 105

En la tabla 20 se muestran los resultados obtenidos para el Reynolds.

Tabla 20. Reynolds encontrados para el rango de diámetros permitidos por la norma.

Diámetro, in	Reynolds
<b>0,9512</b>	201283
<b>1,017</b>	188327
<b>1,15</b>	166848
<b>1,6</b>	119247
<b>1,9</b>	100767

Fuente: los autores

Para el cálculo de las demás variables, como por ejemplo la velocidad del fluido, se debe recurrir al uso de los parámetros ya calculados o escogidos, como son el caudal y el diámetro que inicialmente se asume para la tubería, como el la ecuación 105.

$$vel = \frac{4 * \dot{v}_{agua}}{\pi * D^2}$$

Ecuación 106

### 6.2.2 Pérdidas en válvulas

Este sistema esta constituido únicamente por una válvula antirretorno y una reguladora de caudal.

El cálculo de estas perdidas se realiza de la siguiente forma:

$$h_{lvr} = K_{rl} * \frac{vel_i^2}{2 * g}, \text{ Para válvulas reguladoras de caudal.}$$

Ecuación 107

Donde  $K_{rl} = 340 * f_{tn}$

Ecuación 108

Y  $f_{tn} = 0,023$ , tomado del de Crane de la pagina A24

$$h_{lcl} = K_{cl} * \frac{vel_i^2}{2 * g}, \text{ Para válvulas antirretorno.}$$

Ecuación 109

Donde  $K_{cl} = 50 * f_{tn}$

Ecuación 110

### 6.2.3 Pérdidas totales

Las perdidas totales en la tubería equivalen a la sumatoria de las perdidas en la tubería, codos y válvulas.

$$h_{ltot} = h_{lt} + h_{lvr} + h_{lcl}$$

Ecuación 111

Tras realizar el proceso iterativo, variando diferentes diámetros y evaluando las perdidas para cada uno, se encuentran los siguientes resultados:

Tabla 21. Resultados de iteraciones hechas para el calculo de tuberías

Diámetro, in	Pérdidas, m
<b>0,9512</b>	27,35
<b>1,25</b>	5,6
<b>1,5</b>	1,834
<b>1,75</b>	0,8
<b>2</b>	0,5

Fuente: los autores

En base a la tabla es posible afirmar que la disminución mas notoria de las perdidas se da hasta el diámetro de 1,5 pulgadas, mas allá de este diámetro el decremento de las pérdidas no valoriza la inversión hecha en la tubería, ya que este aumenta con el diámetro.

Por esta razón, se escoge un diámetro interno de 1,5 pulgada.

#### 6.2.4 Espesor de la tubería

La sección I de la ASME en el parágrafo PG58, recomienda el uso de la norma ASME B31.1 para tuberías de potencia, donde se sugiere para el cálculo del espesor la ecuación 111.

$$t_m = \frac{P * D_o}{2 * (SE + P * y)} + A$$

Ecuación 112

Donde

P es la presión de operación de la caldera, en este caso se tomará un valor de 120 psi para ser conservativos.

Do es el diámetro externo de la tubería.

SE es el máximo esfuerzo permitido para un material<sup>19</sup> sometido a presión interna.

A<sup>20</sup> es un espesor adicional que se agrega como compensación al material removido en la elaboración de la rosca.

y<sup>21</sup> es un coeficiente de corrección.

Usando el diámetro interno D de 1.5 pulgadas, se encuentra un espesor  $t_m = 0,2$  pulgadas.

---

<sup>19</sup> acero al carbono: 10700 psi, según tabla del apéndice A

<sup>20</sup> A=0,16, valor tomado del parágrafo 102,4

<sup>21</sup> y = 0,4

### 6.3 TUBERÍA DE SALIDA DE VAPOR

El diseño de esta tubería se realiza hasta que llega a una caja distribuidora de vapor. Se debe garantizar que las pérdidas al llegar a esta sean tan pequeñas, que el vapor salga prácticamente con la presión de operación para la cual fue diseñada la caldera.

Ahora, para este diseño en primer lugar se debe conocer el caudal del vapor, por lo cual se usa la siguiente expresión:

$$\rho_{vapor} = \frac{\dot{m}_{vapor}}{\dot{v}_{vapor}}$$

Ecuación 113

Se sabe por tablas que  $\rho_{vapor}$  es 4,292 kg/m<sup>3</sup>a 120 psi<sup>22</sup> y el flujo másico continúa siendo 60 kg/h.

Entonces se tiene que el caudal  $\dot{v}_{vapor}$  es 61,55 gpm.

#### 6.3.1 Pérdidas en tuberías

Las pérdidas en la tubería se realizan mediante la ecuación de Darcy

$$h_{lt} = f * \left(\frac{L}{D}\right) * \frac{vel^2}{2 * g}$$

Ecuación 114

Donde el coeficiente de fricción  $f$  es:

$$f = \frac{64}{Re} , \text{ para régimen laminar (Re}<2000)$$

Ecuación 115

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = -2 * \log\left(\frac{2,51}{Re * \sqrt{f}}\right) , \text{ para la zona de completa turbulencia (Re}>4000)$$

Ecuación 116

---

<sup>22</sup>Se toma este valor para garantizar que la tubería soportará aun en caso de un sobre-presurización

$$Re = D * vel * \frac{\rho}{\mu}$$

Ecuación 117

Tras realizar suponer distintos diámetros para el cálculo del Reynolds, se obtienen los siguientes valores:

Tabla 22. Iteraciones para el cálculo de Re

Diámetro, pulg	Re
<b>1</b>	56667
<b>1,25</b>	45334
<b>1,5</b>	37778
<b>2</b>	28334

Fuente: Los autores

De lo cual se concluye que el régimen de este fluido es turbulento, puesto que no se va a seleccionar una tubería de gran diámetro, ya que esto incrementaría los gastos, quizás de forma injustificada, sin embargo, este tema es aclarado más adelante.

Se tiene que para tubería de hierro galvanizado el factor de fricción  $f$  es 0,032.

Para el cálculo de las demás variables, como por ejemplo la velocidad del fluido, se debe recurrir al uso de los parámetros ya calculados o escogidos, como son el caudal y el diámetro que inicialmente se asume para la tubería. En este caso, el de el vapor, se observa un incremento notable de la velocidad puesto que esta depende del caudal, el que a su vez es inversamente proporcional a la densidad del vapor, de la que cabe resaltar que disminuyó apreciablemente en comparación con la del líquido.

Así se llega a:

$$vel = \frac{4 * \dot{v}_{agua}}{\pi * D^2}$$

Ecuación 118

### 6.3.2 Pérdidas en válvulas

Este sistema esta constituido únicamente por una válvula antirretorno y una reguladora de caudal.

El cálculo de estas perdidas se realiza de la siguiente forma:

$$h_{lvr} = K_{rl} * \frac{vel_t^2}{2 * g}, \text{ Para válvulas reguladoras de caudal.}$$

Ecuación 119

$$\text{Donde } K_{rl} = 340 * f_{tn}$$

Ecuación 120

$$\text{Y } f_{tn} = 0,023$$

$$h_{lcl} = K_{cl} * \frac{vel_t^2}{2 * g}, \text{ Para válvulas antirretorno.}$$

Ecuación 121

$$\text{Donde } K_{cl} = 50 * f_{tn}$$

Ecuación 122

### 6.3.3 Pérdidas totales

Las perdidas totales en la tubería equivalen a la sumatoria de las perdidas en la tubería, codos y válvulas.

$$h_{ltot} = h_{lt} + h_{lvr} + h_{lcl}$$

Ecuación 123

Después de realizar el cálculo de pérdidas para cada diámetro supuesto, se encontraron los siguientes resultados:

Tabla 23. Perdidas en la tubería.

DIAMETRO, PULG	PERDIDAS, m
1	44,61
1,25	17,12
1,5	7,867
1,75	4,092
2	2,329

Fuente: los autores

De los valores anteriores, se puede concluir que las pérdidas que se puedan generar a partir del uso de una tubería de 1 pulgada o 2 no superan 1 psi. Por lo tanto, se considera que la selección de un diámetro de 2 pulgadas no retribuye tanto en energía, como sí en el posible incremento de los costos. En consecuencia la tubería de vapor tendrá un diámetro interno de 1 pulgada.

## 6.4 BOMBA DE ALIMENTACIÓN

En el proceso de selección de la bomba de alimentación se deben tener en cuenta los siguientes criterios:

- Operación continua o intermitente
- Capacidad
- Presión de descarga

### 6.4.1 Operación continua o intermitente

La forma de operación depende del tipo de caldera en la que se utilice, por ejemplo, en la mayoría de calderas de tubos de fuego la operación es intermitente; esto se debe a que el control de nivel de estas calderas trabaja con un flotador que esta conectado a un switch, este hace que la bomba pare o arranque dependiendo de la altura del agua en el interior de la caldera.

Al seleccionar la bomba, debe considerarse que las calderas en ocasiones pueden trabajar hasta al 200% de su capacidad.

### 6.4.2 Capacidad

Se entiende por capacidad al caudal que la bomba pueda entregar, pero siempre dependiendo de la presión de descarga y de la carga neta de succión requerida.

Para calderas pirotubulares se recomienda el uso de bombas regenerativas o tipo turbina ya que la carga que deben soportar es alta. Además estas bombas son ideales para operación intermitente.

Por otro lado, con base en cálculos realizados previamente se tiene que el caudal de agua de alimentación es de 10,67 gpm, por lo que la capacidad de la bomba debe ser este valor, o superarlo.

### 6.4.3 Presión de descarga

En el cálculo de la presión de descarga de la bomba de alimentación de la caldera del presente proyecto se deben tener en cuenta los siguientes puntos:

- Presión de operación de la caldera
- Pérdidas en la tubería
- Pérdidas en los accesorios

Con base en las dimensiones del sistema de alimentación planteado en la figura 40 y del principio de Bernoulli<sup>23</sup> se tiene:

$$\frac{v_t^2}{2 * g} + \frac{P_t}{\rho * g} + z_t + h_f = \frac{v_c^2}{2 * g} + \frac{P_c}{\rho * g} + z_c$$

Ecuación 124

Donde  $h_f$  es la cabeza de la bomba.

Sustituyendo las dimensiones de la figura 40, se llega a:

$$h_f = \frac{P_c - P_t}{\rho * g}$$

Ecuación 125

---

<sup>23</sup>Las perdidas son muy pequeñas, así que se desprecian

Sustituyendo la presión de operación y la presión ambiente a la que ingresa el agua, se tiene que la cabeza de la bomba es 74 metros y la presión de descarga sería 105,31 psi.

#### 6.4.4 Bomba seleccionada

La bomba de alimentación para esta caldera es una HIDROMAC F5T.

Figura 41. Bomba de alimentación.



Fuente: Colmaquinas

Esta bomba tiene las siguientes características:

Tabla 24. Características de operación de la bomba de alimentación.

PROPIEDAD	CANTIDAD
<b>Caudal [gpm]</b>	16

<b>Velocidad [rpm]</b>	1750
<b>Cabeza [m]</b>	180
<b>Presión máxima de succión [psi]</b>	75
<b>Presión hidrostática máxima [psi]</b>	450

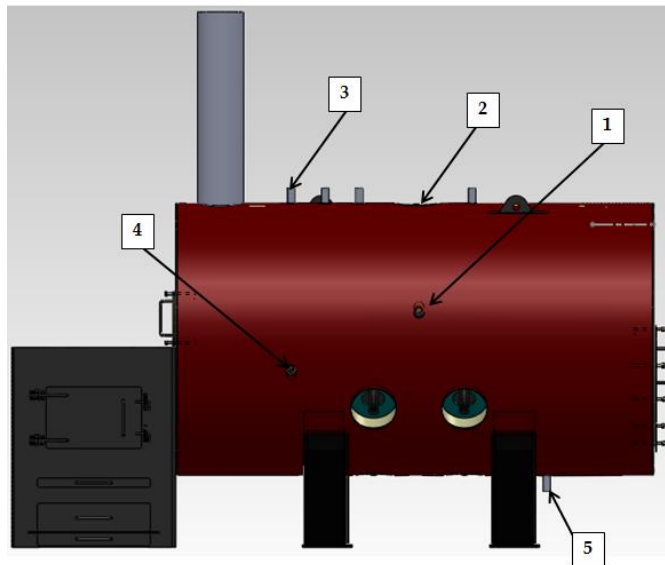
Fuente: los autores

## 6.5 ACCESORIOS

Se denomina accesorios a todas las válvulas que estén conectadas a la tubería de vapor o a la de alimentación y también, se incluye entre estos la válvula de purga.

A continuación, en la figura 42, se ilustra la ubicación de cada accesorio.

Figura 42. Diagrama de la caldera con sus accesorios y dispositivos de control



Fuente: los autores

1. En este punto va conectada la tubería de alimentación de agua, sobre esta tubería se localiza la válvula reguladora de agua y la antirretorno.
2. Se conecta la tubería de vapor, en ella se ubica la válvula reguladora de vapor.
3. Instalación de electrodo de Warrick.

4. Instalación del control de nivel McDonnell, en su tubería se ubica el dispositivo de control de presión.
5. Instalación de la válvula de purga.

En la siguiente tabla se presentan las válvulas utilizadas.

Tabla 25. Accesorios de las tuberías de vapor y agua

ACCESORIO	DESCRIPCIÓN
	<p><b>VÁLVULA REGULADORA DE CAUDAL:</b> Esta en la tubería de alimentación de agua, justo antes de la válvula antirretorno. Regula la cantidad de caudal que debe pasar hacia la caldera.</p> <p>Se seleccionó una válvula de globo de acción eléctrica, marca Honeywell serie V5011N1073</p>
	<p><b>VÁLVULA REGULADORA DE VAPOR:</b> esta ubicado en la tubería de vapor y regula su paso hasta el punto de distribución del mismo.</p>
	<p><b>VÁLVULA ANTIRRETORNO:</b> Esta en la línea de alimentación justo al lado de la caldera. Su función es evitar el retorno de agua cuando se detiene el funcionamiento de la bomba de alimentación.</p>



VÁLVULA DE PURGA: también se le conoce como válvula de extracción de fondo. Ubicada en el fondo de la caldera, se encarga de extraer los sólidos que se depositan en el fondo de la misma.

Se seleccionó una válvula tipo guillotina, marca EVERLASTING serie 4010-S (57)

Fuente: los autores

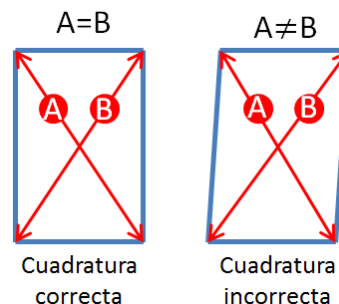
## 7 PROCESO DE MANUFACTURA Y CONTROL DE CALIDAD

La caldera se fabricará para que cumpla con los estándares de seguridad, resistencia y durabilidad. Todos los elementos del equipo deben asegurarse contra desplazamiento, flexiones y otros deterioros, para garantizar una operación continua y satisfactoria, y los soportes deben mantener las distancias correctas determinadas en el diseño mecánico. Durante la construcción de la caldera cada procedimiento debe ser supervisado, evaluado y aprobado para lograr una alta seguridad en su posterior operación. El inspector de control de calidad está encargado de realizar las respectivas evaluaciones, como procesos de manufactura, dimensionamiento, ensamblaje, pruebas no destructivas para comprobar la calidad de los materiales y aprobar la soldadura. Para la construcción de los diferentes componentes de la caldera se utilizarán recomendaciones del código ASME.A continuación se describirán los puntos importantes durante el proceso de manufactura de la caldera y se referencian los respectivos enunciados de la norma.

### 7.1 Formación del casco:

Una vez adquirida la placa se procede a comprobar su cuadratura midiendo las diagonales de la misma.

**Figura 43.** Cuadratura de las láminas

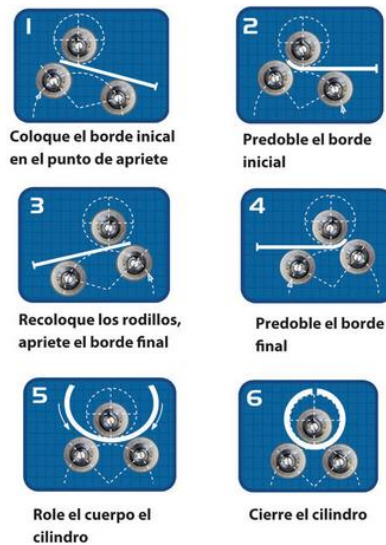


Fuente: Los autores

Las placas se deben cortar por: mecanizado, punzonado, cizallamiento o arco eléctrico. PG 76.1, PG 76.2.

Previo al rolado se predoblan los extremos para garantizar un trabajo totalmente cilíndrico. En el casco se permite una distorsión del 1% debido a que no queda circular en todos los lados.

Figura 44.. Proceso de rolado



Fuente: <http://www.thefabricator.com/article/Array/un-resumen-sobre-las-maquinas-roladoras>

PW27.1 la resistencia de la soldadura es permitida dentro de las limitaciones de espesor y diámetro de PG9.5, excepto las soldaduras a tope circunferenciales y las uniones soldadas resistentes a presión no están restringidas. La resistencia de la soldadura de uniones que no están sometidas a presión no están restringidas, excepto las de PW27.2.

PW27.5 cuando se suelda UNS N06230 con metal de relleno de la misma composición nominal que el metal base, solo se permiten procesos GMAW y GTAW.

TABLA PW3 muestra las tolerancias de alineamiento de secciones a ser soldadas a tope.

PW33.1 el desplazamiento máximo no puede ser mayor que los de la TABLA PW3.

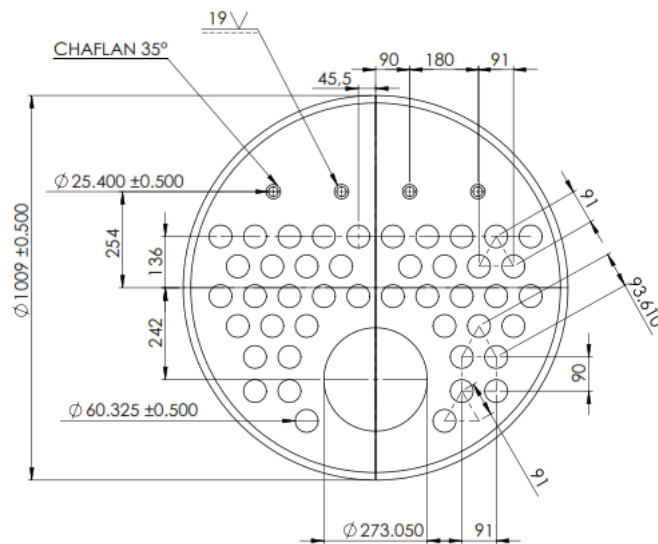
## 7.2 Trazado de las placas portatubos

Una vez cortada la lámina se procede al trazo de los agujeros respectivos para el tubo principal, los tubos secundarios y los *staybolts*.

El trabajo de maquinado de los agujeros se realizará en un taladro radial, uniendo las dos placas portatubos con puntos de soldadura provisionales, para evitar desplazamientos y garantizar la debida alineación de los agujeros.

Los agujeros de los tubos en la placa portatubos deben ser perforados y escariados donde el metal es más grueso que el requerido para la expansión, PG-79.

**Figura 45** Vista frontal de la placa portatubos



Fuente: Los autores.

## 7.3 Uniones longitudinales y circunferenciales:

PW1.23 Todos los soldadores deben estar calificados por QW-301.2 sección 9.

PW35.1 la soldadura a tope debe ser de completa penetración. Para garantizar que la soldadura de ranura esta completamente llena de tal forma que la superficie del metal de la soldadura en cualquier punto no esta por debajo de la superficie de los materiales base adyacentes, soldadura de metal debe ser agregada como refuerzo en cada cara de la soldadura. El espesor del refuerzo de la soldadura en cada cara no debe exceder lo de la tabla.

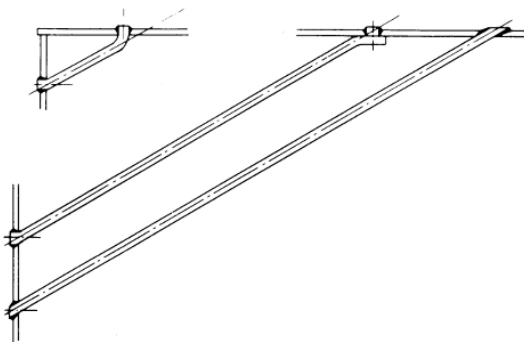
#### 7.4 Juntas de placas portatubos

Uniendo una placa no bridada al casco por soldadura:

- La placa es soportada por tubos o staybolts o ambos.
- Toda la unión soldada está a través del casco o *wrappersheet*, PFT-11.4.2.
- La soldadura es de total penetración, igual al espesor total de la placa portatubos y aplicada de un lado o de los dos, PFT-11.4.3
- El casco, donde se expone a los gases y no al agua, no debe extenderse más de 1/8 [in] a través de la cara externa de la placa. PFT-11-4-4.

#### 7.5 Staybolts

Figura 46. Staybolts diagonales.



Fuente: Código ASME PW19, pág. 87.

Para su instalación deben ser taladradas la placaportatubos mínimo ½[in] de profunda. Los *staybolts* que no son perpendiculares a la superficie mínimo deben tener tres hilos de rosca de acoplamiento. Si se suelda y son diagonales PW 19, se debe unir a la superficie del casco, pero no al cabezal, por soldadura de filete.

El tamaño de la soldadura no debe ser menor que 3/8 [in].

$$Area\ staybolt = \frac{Carga\ en\ el\ staybolt}{S}$$

Ecuación 126

S, esfuerzo admisible PG 23,1.

Carga en el *staybolt*, ver PFT 27.

#### **7.5.1 StayboltsystaysPFT 28**

En la determinación del área neta transversal de taladrado o perforado del *staybolt*, la sección transversal del agujero debe ser deducida.

PFT 28.2 la longitud del *staybolt* entre soportes debe ser medida desde la superficie interna de las placas. Los esfuerzos se basan solo en tensión, para *staybolts* diagonales PFT 32.

La sección transversal más pequeña del *staybolt* no es menor que 1[in] de diámetro y los requerimientos de PG 46.8.

#### **7.5.2 Soldadura en los staysPW19**

Soldadura en los *stays* debe ser usada en lugar de roscas, y debe ser de acuerdo a PW19.1 hasta PW19.8.

PW19.1 los *stays* deben ser insertados en unos agujeros avellanados a través de la placa, excepto en PW19.4 y unidos con soldadura de completa penetración. El área de la soldadura medida en el cortante paralelo a la porción del *stay* extendiéndose a través de la placa, no debe ser menor que 1.25 veces el área requerida para el *stay*, pero en ningún caso el tamaño de la soldadura debe ser menor que 3/8 in (10mm).

PW19.2 el final de los *stays* no debe estar cubierto por metal de soldadura y la cara de las soldaduras. No deben estar por debajo de las superficies externas de las placas.

PW19.3 el final de los *stays* insertados a través de la placa no deben proyectar más de 3/8 in (10mm) a través de las superficies expuestas a productos de combustión.

PW19.4 los *stays* diagonales deben ser unidos a la superficie interna del casco, pero no a la cabeza, solo por soldadura de filete, como en fig. PW19.4 a,b.

PW19.4.1 la soldadura de filete no debe ser menor que 3/8 in (10mm) de tamaño y debe continuar la longitud total de cada lado de la porción del *stay* en contacto con el casco. El producto de longitud total de estas soldadura por su garganta no debe ser menor que 1.25 veces el área transversal requerida para el *stay*. Un cordón de soldadura a través del extremo del *stay* es opcional pero no se debe tener en cuenta para calcular el área requerida de cordón de soldadura.

PW19.5 el paso de los *stays* unidos por soldadura a las superficies debe cumplir con PFT27.

PW19.6 la soldadura se debe realizar de tal manera que los excesos de soldadura aplicada no se proyecten a través de la superficie de la placa en la raíz de la soldadura.

PW19.7 la soldadura debe ser tratada con calor después de aplicada como en PW39.

## 7.6 Tubos

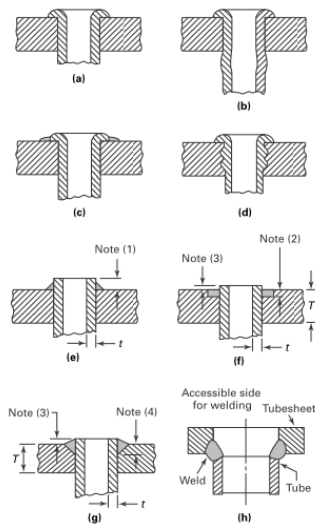
### 7.6.1 Unión de los tubos PFT-12.2

- Expandido y biselado como en PFT -12.1 a,b,d.
- Expandidos, biselado y sellados por soldadura como en fig. 12.1c.
- Expandidos y sellados por soldadura como en fig. 12.1e
- Soldados como en fig. 12.1f,g.

Si son expandidos y soldados:

- PFT 12.2.1.1 cuando no se usa bisel o moldeador el tubo no puede pasar a través de los tubos una distancia mayor de espesor del tubo  $D/8$  [in], lo cual sería el máximo. O no más de 2 veces el espesor del tubo o  $1/4$  [in], lo cual sería lo mínimo, como en la figura PFT-12.1 e.

Figura 47. Métodos de fijación de tubos a las placas



a. Expandido y biselado; b. Expandido, biselado y soldado; c. Expandido y soldado; d. Expandido y biselado, con asiento ranurado; e. soldado; f. Rolado con soldadura en rebaje; g. Soldado con cordón en una ranura; h.

Soldado con parcial o no inserción del tubo en la placa.

Fuente. Código ASME sección I, pág.126

- PFT 12.2.1.2 La placa debe ser biselada hasta una profundidad igual al espesor de los tubos. donde el hueco es biselado, la proyección del tubo

a través de la placa no debe exceder la distancia igual al espesor del tubo. La profundidad del biselado no debe ser menor que el espesor de tubo (como en fig. PFT-12.1f, g), excepto cuando el espesor del tubo sea mayor o igual a 0,15[in].

- PFT 12.2.1.3 en tipos de uniones soldadas como en e, y c los tubos deben ser expandidos antes y después deben ser soldados. En los tipos f y g, los tubos deben ser expandidos.
- PFT 12.2 la expansión de los tubos por el método *prosser* debe emplearse en combinación con el método de unión de “sellados por soldadura”, como en PFT-12.1b.
- PFT 12.2.3 después de “sellado por soldadura” como en fig. 12.1c,e una prueba individual hidrostática debe hacerse.
- PFT 12.2.4 la superficie interna del agujero del tubo en cualquier forma de unión, debe ser ranurado biselado.
- PFT 12.2.5 los bordes afilados de los agujeros de los tubos deben ser desgados en ambos lados de la placa con un filo u otra herramienta.
- PFT 12.2.6 las uniones soldadas de los tubos de PFT-12.1 h, deben realizarse con una parcial o ninguna inserción dentro de los tubos en la placa, los siguientes requerimientos deben tenerse en cuenta para esta unión:
  - a. Los materiales de los tubos y las placas se deben restringir a P-No1, P-No3 o P-No4.
  - b. La temperatura de diseño máxima en la unión soldada no debe exceder 700[°F] =370[°C].
  - c. La soldadura debe ser de total penetración desde el diámetro interno del tubo. La garganta de la soldadura debe ser mayor o igual al espesor del tubo. El *rootpass* debe realizarse usando el proceso GTAW.
  - d. El Pwht de PW-39 es obligatorio, las excepciones a PWHT de la tabla PW-39 no deben aplicar.

- e. En adición a los requerimientos de la sección 9, antes de hacer la soldadura, cada soldador y operador de soldadura debe demostrar su habilidad para alcanzar la soldadura de completa penetración y mínimo espesor, mediante 6 procesos exitosos de piezas de prueba. Las piezas de prueba deben ser soldados en una maqueta del proceso de soldadura, la maqueta debe ser de posición idéntica, y materiales como los del proceso de soldadura. Las piezas de prueba deben ser visualmente examinadas para verificar completa penetración y seccionar para verificar el mínimo espesor de la soldadura. Los resultados deben ser registrados y mantenidos con el record de calificaciones de desempeño.
- f. Cada superficie soldada en el diámetro interior del tubo debe recibir una partícula magnética o un líquido para la examinación de penetración de acuerdo con los apéndices A-260 o A-270. En adición, la examinación visual de la superficie soldada en el diámetro externo del tubo debe hacerse. El máximo número de soldaduras, pero en ningún caso menos del 50% deben ser examinadas visualmente. El examen visual debe mostrar penetración total de la raíz de la unión y libres de grietas.
- g. *Staytubes* PFT 31, cuando los tubos se usan para soportar las placas portatubos estos deben tener una sección transversal de acuerdo a PG49.
- h. PFT 31.2 espesor requerido de la placa.

### **7.7 Puertas y aberturas.**

PFT 40, para realizar los agujeros de las puertas se debe usar soldadura de arco o gas, permitiendo que la placa alrededor de la abertura permanezca según PFT 27,6 y PFT 27.7.

No se necesita ningún cálculo para determinar la necesidad de compensación en las aberturas de las puertas entre placas de agua. El espesor requerido para las aberturas se debe determinar de acuerdo a PFT 51. El espesor de puertas cuya forma no es circular se debe determinar según PG46 usando 2,1 o 2,2 para el factor c. No se necesita radiografiar las uniones soldadas.

## **7.8 Compuertas de inspección**

*Handhole*, es un agujero de inspección de hierro fundido (norma SA-278), con dimensiones mínimas  $2\frac{3}{4}$ [in] \*  $3\frac{1}{2}$  [in].

El espacio por donde se desliza la compuerta no debe ser menor a  $\frac{11}{16}$ [in].

Ninguna junta que se use en el *handhole* puede tener un espesor mayor a  $\frac{1}{4}$  [in].

### **7.8.1 Puerta de acceso a la cámara de combustión PFT 42**

Para hornos con menos de 24[in] la abertura debe ser  $2\frac{3}{4}$  [in]\* $3\frac{1}{2}$  [in] o tan mayor como sea posible. Si el quemador se puede retirar de la caldera para inspección y limpieza no se necesita una abertura separada.

### **7.8.2 Requerimientos para aberturas de inspección PFT 43**

Debe haber suficientes aberturas de inspección, *hanholes* para limpiar por barrido de agua el sedimento de la caldera.

Todas las aberturas deben seguir los requerimientos desde PG-32 hasta PG-44.

### **7.9 Abertura entre caldera y válvula de seguridad PFT 44**

La abertura de conexión entre la caldera y la válvula de seguridad debe ser al menos el área de la entrada de la válvula.

Una boquilla o forro debe instalarse dentro de la abertura del casco para encajar la válvula de seguridad.

Ninguna válvula se debe instalar entre la válvula de seguridad y la caldera o en la tubería de descarga entre la válvula de seguridad y la atmósfera. Cuando se usa una tubería de descarga, el área transversal no debe ser menor que el área total de la salida de la válvula.

#### Montaje de la válvula de seguridad PG 71.3

- No se debe conectar a través de ninguna tubería
- La instalación de las válvulas de hierro fundido en calderas de alta temperatura está prohibido.
- La válvula de seguridad debe conectarse por soldadura, PG71.6
- El orificio de drenaje no puede ser menor de  $\frac{1}{4}$  [in] en diámetro, PG 73.1.5

#### 7.10 Tubería de alimentación PFT 48

El agua de alimentación se debe descargar a  $\frac{3}{5}$  de la longitud desde el final de la caldera que está sujeta a los gases más caliente del horno por encima de la hilera de tubos centrales.

La tubería de alimentación debe ser llevada a través del casco, lo más lejos posible del punto de descarga del agua de alimentación de la manera especificada. Para una superficie de purga en PG 59.3.2 y ser bien fijados por dentro del casco por encima de los tubos.

#### 7.11 Indicadores del nivel de Agua

Si  $P > 100$  [psi] el cristal debe tener una conexión para drenaje. El mínimo tamaño de las tuberías que conectan la columna de agua a la caldera debe ser según PG 60.2.4. No es necesario usar simultáneo *wáter gageglasses* y *watercolum*.

### 7.12 Manómetros PG 60.6.1

- Debe conectar al espacio con vapor o a la columna de agua o a su conexión de vapor.
- Debe ponerse una válvula o grifo entre el medidor y la caldera.
- La conexión a la caldera  $D > \frac{1}{4}$  [in]
- El dial del medidor debe graduarse a aproximadamente el doble de la presión a la que está tarada la válvula de seguridad, nunca menos de  $1 \frac{1}{2}$  de esta presión.

### 7.13 Soporte PFT 46

El diseño y unión de las sillas, orejas izadoras y otros soportes deben seguir los requerimientos de PG 22.1 y PG 55

PFT 46.4 Una caldera con un diámetro de hasta 54 [in] debe ser soportada por un tipo de suspensión externa como PFT 46.3, por no menos de 2 orejas de acero a cada lado. Si se usan más de 4, deben ser arregladas por partes, las orejas de cada par no pueden estar separadas a más de 2[in] (fig. PFT 46.1)

En la fig. PFT 46.2 muestra un diseño aceptable de izadoras por unión soldada para una caldera horizontal con el requerimiento adicional que el pin de colgadero estar situado en la línea de centro de la superficie de contacto soldada.

El aislamiento, silletas u otros soportes deben ser arreglados de tal forma que las aperturas de inspección sean accequibles. Según PFT 46.6 los soportes tener un claro mínimo de 12[in] entre casco y el suelo.

### 7.14 Materiales PW-5

Los esfuerzos permisibles están dados en la tabla 1<sup>a</sup> y B de la sección II, parte D, para la sección I y para la soldadura grupo *P-number* de la sección 9.

PW5.2 al carbón o acero aleado que tenga un contenido de carbón mayor al 0,35% no debe ser usado en construcciones soldadas o ser moldeados por oxicorte o cualquier otro proceso de corte térmico.

PW5.4 los electrodos de soldadura y el material de relleno deben ser seleccionados para proveer un depósito de metal de soldadura de composición química y propiedades mecánicas compatibles con los materiales que van a ser unidos y las condiciones de servicio anticipadas.

PW5.5 Acero encerrado y semimuerto no deben ser unidos por la inercia y la acción continua de fricción en los procesos de soldadura.

PW5.6 Para soldaduras de retención de presión en 2 ¼ cr-1 Mo materiales distintos a soldadura a tope circunferencial menos o igual a 3 ½ [in] en el diámetro externo, cuando las temperaturas de diseño exceden 850[°F] (455[°C]) el metal de soldadura debe tener un contenido de carbón mayor al 0,05%

### **7.15 Diseño de uniones soldadas PW-9**

Longitudinales circunferenciales y otras uniones de material en cascos y otras partes a presión, excepto las provistas en PG31, PG39, PW41, PWT-11, deben ser de soldadura a tope de total penetración. La soldadura debería ser de doble soldadura a tope, pero puede ser también de soldadura a tope individual con el material de relleno adhiriendo por un solo lado para llevar a cabo una completa penetración.

#### **7.15.1 Soldadura en ranuraPW9.2**

Las dimensiones y la forma de los límites a ser unidos por soldadura a tope deberían ser tales para permitir la fusión completa y la unión de completa penetración.

PW27.2 la soldadura de espárragos por arco y la resistencia de la soldadura de espárragos debe ser usada para uniones no sometidas a

presión, que tengan la función de llevar una carga o no. El tamaño del esparrago debe estar limitado a un diámetro de 1 in.

PW27.3 la soldadura de “electroescoria” debe ser usada para soldadura a tope solo en acero inoxidable del tipo listado en PW5.3 y aceros ferríticos.

PW9.3 uniones entre materiales de distinto espesor, excepto los propuestos en PW9.3.2, una sección de transición cónica que tiene una longitud no menor que 3 veces el desplazamiento entre las superficies adyacentes como en fig PW-9.1, deben ser provistas en uniones entre materiales de distinto espesor por más de  $\frac{1}{4}$  de el espesor del material más delgado o por más de  $\frac{1}{8}$  [in].

La sección de transición debe ser formada por cualquiera que provea un cono uniforme, la soldadura debe estar parcial o completamente en la sección cónica o adyacente a ella. Ver fig PW-9.1

Este párrafo no se puede usar en uniones entre tubos, tubos y placas.

PW9.3.1 Aleación de los cascos y recipientes (incluyendo tuberías o tubos usados en el casco)

En uniones de casco longitudinales, las líneas centrales de espesores adyacentes deben ser alineadas con tolerancias de fabricación como en PW-33 alternativamente, las líneas medias de las placas de distinto espesor deben ser desplazadas de tal forma que el diámetro interno o externo de la superficie más delgada y de tal forma que el diámetro interno o externo de la superficie más delgada y de la gruesa formen una superficie continua, teniendo en cuenta:

- La razón de espesores entre la más delgada y la más gruesa no debe ser mayor a 2:1
- La Tmax de diseño no debe exceder 750[°F]

### **7.15.2 Soldaduras en tubos y tuberías PW9.3.2**

Cuando se soldán juntos componentes de distinto diámetro o espesor, la transición se debe hacer por cualquier proceso que de un cono uniforme, la alineación debe ser con PW34.

PW9.4 se prohíben las uniones por esquinas, como en fig PW9.2

PW10 los recipientes deben ser precalentados y tratados con calor después de la soldadura como en PW-38 y PW-39

### **7.15.3 Conexiones soldadas PW15**

Boquillas y otras conexiones y su compensación debe unirse a los recipientes por soldadura de arco o gas. Se debe proveer suficiente soldadura y compensación en algún lado del plano a través del centro de la abertura, paralelo al eje longitudinal del recipiente, para desarrollar la fuerza requerida. Ver fig. PW-15 para ejemplos de cálculos.

PW15.1.1 los factores de corrección de esfuerzo en PW15.2 debe aplicarse a todas las soldaduras.

PW15.1.2 la fuerza de la soldadura de filete debe ser basada en  $\frac{1}{2}$  del área sometido a corte, computado en el diámetro medio de la soldadura.

PW15.1.3 la fuerza de la soldadura de ranura debe ser basada en  $\frac{1}{2}$  del área sujeta a corte o tensión, computada usando la mínima dimensión de profundidad de soldadura en la dirección en consideración.

PW 15.2 los valores de esfuerzos permisibles para soldaduras de filete y ranura en porcentajes

- Soldadura de ranura a tensión 74%
- Soldadura de ranura a corte 60%
- Soldadura de filete a corte 49%

PW15.3 placas y boquillas de compensación unidas al exterior del recipiente deben estar provistas con al menos un orificio de aviso (tamaño máx. ¼ [in] para la tubería del grifo o rosca del tubo). Eso puede ser aprovechado para una compensación preliminar del aire y ensayos en espuma de jabón para pruebas de estanqueidad de soldaduras que sellan el interior del recipiente. Estos agujeros de aviso deben dejarse abiertos cuando el recipiente está en servicio.

PW15.4 cuando las caras del extremo de la boquilla o cuellos de *manhole* se mantienen sin soldar en todo el casco, estas caras no deben ser cortadas por cizallamiento a menos que se remueva como mínimo 1/8 [in] de metal adicional por cualquier método que produzca un acabado suave.

PW 16.1 excepto para lo permitido en PW16.5 y PW16.6, las boquillas y las conexiones a los cascos se deben realizar por completa penetración aplicada por uno o ambos lados soldadura de penetración parcial aplicada por ambos lados, o de filete y penetración parcial en lados opuestos. En adición a los cálculos de fuerza requeridos en PG37, la localización y tamaño de la unión de soldadura para boquillas y otras conexiones se hacen de acuerdo a este párrafo.

PW16.3 El examen radiográfico de uniones soldadas puede ser omitida excepto en aquellos casos que el código lo exija. Y excepto para las “boquillas insertadas” similares a las de fig. PW16.1 q-1, a-2, q-3, q-4.

PW16.4 accesorios como los de fig. PW16.1 u2, v2, w2, x que no excedan NPS3 (DN80) deben ser unidas por soldadura que están exentos de requerimientos de tamaño distintos a los especificados en PW15.1.

PW16.5. accesorios con rosca interna que no excedan NPS3 (DN80) deben ser unidas por soldadura que están exentos de requerimientos de tamaño distintos a los especificados en PW15.1.

#### **7.15.4 Cuellos y tubos unidos por un solo lado pw16.6**

Deben ser unidos por penetración parcial o soldadura de filete por uno de los lados solamente, ya sea en el exterior o en el interior del casco, de acuerdo a :

- a. Cuando el cuello o tubo es unido solo por el exterior, una soldadura de ranura debe ser cortada en la superficie hasta una profundidad no mayor que  $t_n$  en el eje longitudinal de la abertura. Se recomienda un rebajo de  $1/16$  in de profundo se haga en el fondo de la ranura en la cual se centre la boquilla. La dimensión  $t_w$  de la unión soldada no debe ser menor que  $t_n$  ni menor que  $1/4$  in (6mm). Ver fig. PW16.1 y,z.
- b. Cuando el cuello o tubo es unido solo desde el interior, la profundidad de la soldadura de ranura debe ser al menos de  $1 \frac{1}{4} t_{min}$ . Un claro radial entre el agujero del casco y el diámetro de la boquilla en el lado no soldado, no debe exceder las tolerancias dadas en kg como en PW16.1 a. Esas uniones deben satisfacer las normas para refuerzos de aberturas, excepto que ningún material en el cuello de la boquilla debe ser contado como un refuerzo.

#### **7.16 Revisión ultrasónica y radiográfica PW11.**

Uniones de soldadura a tope requirieron examen radiográfico y termo-gráfico como en la tabla PW11.

La experiencia ha demostrado que la unión por soldadura a tope no requiere examen radiográfico y ultrasónico, pero estas reglas dan un servicio seguro y confiable incluso si contiene imperfecciones que deben ser reveladas después del examen.

NPS, tamaño nominal de tubería

RT, examen radiográfico

UT, examen ultrasónico

PW11.3 para usar la tabla PW11, el tamaño y espesor de soldadura a tope en las uniones es definida como el más grande y grueso de los bordes de apoyo después de la preparación del borde.

La falta de nitidez geométrica  $U_g$  es definida por la ecuación.

$$U_g = F \cdot d / D$$

Ecuación 127

D, distancia desde la fuente de radiación hasta la soldadura.

d, distancia desde el lado de la fuente de la soldadura a la película.

F, tamaño de la fuente, la máxima dimensión proyectada de la fuente de radiación (o punto focal efectivo) en el plano perpendicular a la distancia D desde la soldadura.

PW14 cualquier tipo de apertura que requiera compensación (PG32 hasta PG44) debe ser localización en unión soldada.

## 8 CONCLUSIONES

- Se diseñó una caldera pirotubular que produce 60 [kg/h] de vapor de arrastre a una presión de 90 [psi] para la extracción de aceites esenciales, cuyo combustible es biomasa residual de procesos destilación.
- El diseño de una caldera pirotubular que use biomasa residuo de otro proceso, en lugar de usar combustibles fósiles, contribuye a la reducción de los costos de operación y es un paso más en el proceso de investigación e innovación de nuevas fuentes de energía que proveen conocimiento científico, tecnológico y bienes de gran valor agregado, altamente competitivos en la industria de la destilación en los diferentes mercados.
- Se seleccionaron dispositivos para el control de nivel y presión, necesarios para garantizar el funcionamiento seguro de la caldera pirotubular bajo las condiciones de operación establecidas, asegurando la integridad de todo el personal que esté alrededor de la misma.
- Se realizaron los planos de taller de cada uno de los componentes de la caldera de acuerdo a las recomendaciones de la ASME.
- Se redactó un manual de funcionamiento y mantenimiento de la caldera de biomasa, que ha de servir de consulta a quien este directamente ligado a la operación del equipo.
- Se comprobó que el poder calórico de las herbáceas es bajo en comparación con el de otros combustibles fósiles e incluso, el de otros de tipo renovable.
- La quema de herbáceas requiere una alimentación continua del material vegetal, por ser su combustión un proceso rápido y delicado debido a su bajo poder calórico. Se hace esta afirmación a partir de las pruebas realizadas en los 3 montajes del horno que se construyó.

- Control de presión de un quemador de alimentación continua debe hacerse mediante un controlador que constantemente regule la cantidad de material vegetal que ingrese a la cámara.

## 9 RECOMENDACIONES

- Aunque las pruebas que se realizaron sobre la cámara de combustión llegaron a satisfacer la demanda de los diferentes parámetros de operación de la caldera, cabe resaltar este diseño solo estudia la alternativa de alimentación por la parte superior del horno, y dado que el campo del estudio de la biomasa como fuente de energía es muy amplio, se debe seguir la investigación sobre esta cámara de combustión abordando temas como la alimentación por parte del dosificador desde diferentes ubicaciones en la cámara, la geometría de la misma y la distribución del aire.
- Debido a los elevados costos que presenta la construcción de una única caldera pirotubular de estas características, se recomienda la adaptación de un modelo comercial a las condiciones específicas que se planteen.
- Dado que la caldera será localizada en el campo, para la instalación de los dispositivos de control se recomienda el diseño de un circuito eléctrico para amplificar la señal de voltaje de 110V a 220V, o en su defecto la implementación de un transformador amplificador.

## BIBLIOGRAFIA

- ❖ **AMERICAN SOCIETY OF MECHANICAL ENGINEERS.** Asme boiler and pressure vessel code. 2007. Sección I, II y VIII.
- ❖ **AMERICAN SOCIETY OF MECHANICAL ENGINEERS.** Powerpiping. 2001. Sección B31.1 y B1.2.
- ❖ **ASTM.** Standard Specification for Seamless Carbon Steel Boiler Tubes for High-Pressure Service. Disponible en internet:  
[http://enterprise.astm.org/filtrexx40.cgi?+REDLINE\\_PAGES/A192A192M.htm](http://enterprise.astm.org/filtrexx40.cgi?+REDLINE_PAGES/A192A192M.htm)
- ❖ **CAJAMARCA, Francisco.** Diseño y construcción de una caldera pirotubular horizontal de tres pasos de 50 BHP. Ecuador: Escuela superior politécnica del ejército sede Latacunga. 2001.
- ❖ **CALDERON, Christian.** Ciclones convencionales. Medellín: Universidad nacional de Colombia. Disponible en internet:  
<http://www.monografias.com/trabajos14/ciclon-disenio/ciclon-disenio.shtml>
- ❖ **CAMPS, Manuel y MARCOS, Francisco.** Biocombustibles. 2 ed. Madrid.: EDICIONES MUNDI-PRENSA, 2008. p. 138-165.
- ❖ **CENGEL, Yunus y BOLES, Michael.** Termodinámica. 6ed. McGraw-Hill., p. 766-796.
- ❖ **COLMAN, Anthon.** Manual de calderas. Madrid: MAC GRAW - HILL, 2000. p. 11- 24.
- ❖ **DIVISIÓN DE INGENIERÍA DE CRANE.** Flujo de fluidos en válvulas, accesorios y tuberías. 1ed. McGraw-Hill., p. 1.1 -2.17.
- ❖ **ECHEVERRI, Carlos.** Diseño optimo de ciclones. Medellín: Universidad de Medellín, 2006.
- ❖ **ENERGY PRODUCTS GROUP.** Piping components for energy systems. Catálogo 722.

- ❖ **ESPINOZA, Jose y GOMEZ, Augusto.** Diseño y manufactura de una caldera pirotubular. Bucaramanga: Universidad industrial de Santander.1984.
- ❖ **INCROPERA, Frank.** Fundamentos de transferencia de calor. México Pearson educación. 1999
- ❖ **INSTITUTO DE ENERGÍA Y TERMODINÁMICA DE LA UPB.** Curso de Calderas. Bucaramanga: I SEMINARIO DE EQUIPOS Y SERVICIOS DIRIGIDO A LA SUSCRIPCIÓN DE SEGUROS GENERALES, 2010.p. 1-12.
- ❖ **LOO, Sjaak y KOPPEJAN,Jaap.**Thehandbook of biomasscombustion and co-firing.1ed. London: EARTHSCAN, 2008. P. 8, 134-135, 140, 155.
- ❖ **MAHAJAN, Kanti.** *Design of process equipment.* 2ed. Tulsa: PUBLISHING, INC. Cap 2 y 5.
- ❖ **MARADEY, Juan.** Termodinámica aplicada. 1ed. Colombia: Universidad industrial del Santander. Cap. Combustión.
- ❖ **MARTINEZ, Diana y IGUARAN, Omar.** Diseño y construcción de una minicaldera pirotubular para el laboratorio de transferencia de calor. Bucaramanga: Universidad industrial de Santander. 2008.
- ❖ **MEGYESY, Eugene.** Manual de recipientes a presión, diseño y calculo. 1ed. México, DF: LIMUSA, 1999.
- ❖ **QUAAK, Peter; KNOEF, Harrie y STASSEN, Hubert.** Energyfrombiomass: a review of combustion and gasificationtechnologies. Washington D.C.: WORLD BANK TECHNICAL PAPER, 1999. p. 26-48.
- ❖ **REVILLA, Carlos.** Generación de potencia [en línea]. Falcón: BLOGGER. [consultado 5 de agosto de 2011]. Disponible en internet: <http://generaciondepotencia.blogspot.com/>
- ❖ **RINCÓN, Sonia.** Generación energética a partir de biomasa residual colombiana. Bogotá, DC: Universidad nacional de Colombia, 2009.
- ❖ **SHIELD, Carl.** Calderas, tipos, características y sus funciones. 1ed. México, D.F.: CONTINENTAL S.A., 1976. p. 12, 34, 51.
- ❖ **SMITH, Marion y STINSON, Karl.** Fuels and combustion. 1ed. New York: MCGRAW HILL BOOK COMPANY, INC., 1952. p. 237-254.

- ❖ **THE BABCOCK AND WILCOX COMPANY.** Steamitsgeneration and use. 41ed. Barberton:THE BABCOCK AND WILCOX COMPANY, 2008. Cap. 17
- ❖ **VICENTE, L.** Termotecnia. 4ed. España: ARIE.

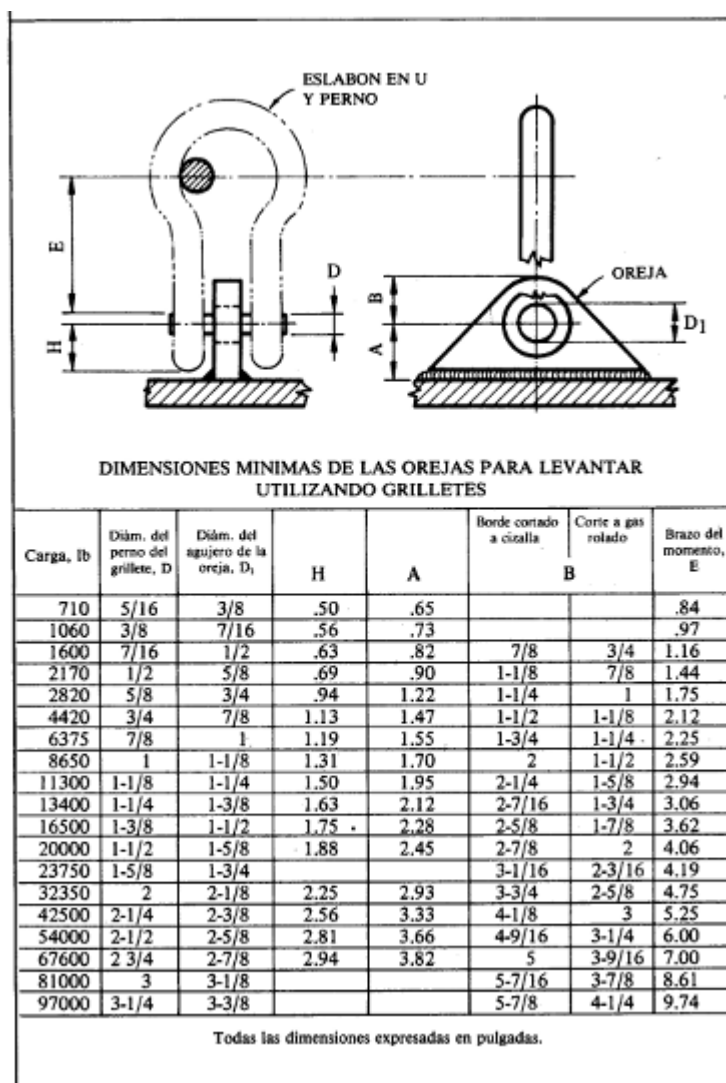
## **ANEXOS**

Anexo A. Factores  $k_r$  y  $G$ , para la placa portatubos

$kR$	$G_1$	$G_2$	$G_3$	$G_4$
0	0.800	0.800	+1.000	1.000
0.5	0.809	0.810	+0.998	1.002
1.0	0.820	0.844	+0.966	1.029
1.5	0.871	0.993	+0.836	1.14
2.0	1.012	1.412	+0.546	1.40
2.5	1.34	2.40	+0.121	1.79
3.0	1.88	4.24	-0.306	2.25
3.5	2.36	6.36	-0.608	2.69
4.0	2.75	8.53	-0.741	3.10
4.5	3.10	10.75	-0.727	3.47
5.0	3.43	13.1	-0.619	3.83
5.5	3.77	15.8	-0.541	4.18
6.0	4.12	18.7	-0.515	4.54
7.0	4.82	25.3	-0.529	5.26
8.0	5.54	33.1	-0.564	5.97
9.0	6.26	41.8	-0.602	6.68
10.0	6.98	51.6	-0.642	7.39
12.0	8.43	74.3	-0.727	8.81
14.0	9.88	101.1	-0.816	10.23
16.0	11.33	132.0	-0.907	11.65
18.0	12.80	167.2	-0.999	13.06
20.0	14.25	206.4	-1.091	14.48

Fuente: *Design of process equipment, chapter 5: Fixed tubesheet design*, pág. 163

Anexo B. Dimensionamiento de accesorios de izaje



Fuente:Manual de recipientes a presión, parte I, capítulo 13: Temas diversos pág. 213.

## Anexo C. Diseño de juntas soldadas

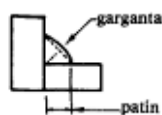
### DISEÑO DE JUNTAS SOLDADAS PARA MIEMBROS ESTRUCTURALES

#### SOLDADURA DE RANURA

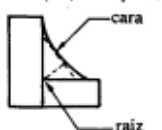
Las soldaduras de ranura son por lo general una continuación del metal de base. Con este tipo de soldadura se asigna la misma resistencia a la soldadura que a los miembros que une.

#### SOLDADURA DE FILETE

Dimensión de la soldadura



El tamaño de una soldadura de filete de lados iguales es la dimensión del cateto del triángulo rectángulo más grande de 45° que pueda inscribirse en la sección transversal de la soldadura.



El tamaño de una soldadura de filete de patines desiguales es la distancia más corta de la raíz a la cara de la soldadura.

Dimensión de la garganta =  $0.707 \times$  dimensión del patín.

Tamaño mínimo de soldadura\*

Esesor de la placa más gruesa, pulg.	1/2	3/4	1	1 1/4	1 1/2	Más de 1 1/2
Tamaño mínimo de la soldadura de filete, pulg.	3/16	1/4	5/16	3/8	1/2	5/8

\* El tamaño de la soldadura no necesita ser mayor que el espesor de la parte más delgada que una.

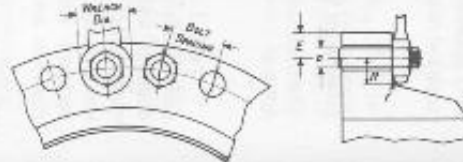
Fuente:Manual de recipientes a presión, parte IV, capítulo: Diseño de juntas soldadas.pág. 213.

Anexo D. Espaciamiento mínimo entre tornillos

Bolt Size ø	Coarse Thread Series		B Thread Series	Nut Dimensions		Minimum			Maximum Fillet Radius r	Wrench Diameter
	Threads per Inch	Root Area Sq. In.	Root Area Sq. In.	Across Flats	Across Corners	Bolt Spacing	Radial Distance R	Edge Distance E		
1/2	13	.126	--	3/8	.969	1 1/4	1 3/8	3/4	1/4	1 1/2
3/8	11	.202	--	1 1/8	1.175	1 1/2	1 3/8	3/4	5/16	1 3/4
3/4	10	.302	--	1 1/4	1.383	1 3/4	1 3/4	1 3/8	3/8	2 1/8
7/8	9	.419	--	1 3/8	1.589	2 1/8	1 3/4	1 3/8	3/8	2 3/8
1	8	.551	.551	1 3/8	1.796	2 1/4	1 3/4	1 1/2	3/8	2 5/8
1 1/8	7	.693	.728	1 1/2	2.002	2 1/2	1 1/2	1 3/4	7/16	2 3/4
1 1/4	7	.890	.929	2	2.209	2 3/8	1 3/4	1 3/4	9/16	3 1/4
1 3/8	6	1.054	1.155	2 1/8	2.416	3 1/8	1 3/4	1 3/4	9/16	3 1/2
1 1/2	6	1.294	1.405	2 3/8	2.622	3 1/4	2	1 1/2	3/4	3 3/4
1 5/8	5 1/2	1.515	1.680	2 3/8	2.828	3 1/2	2 1/4	1 3/4	3/4	4
1 3/4	5	1.744	1.980	2 3/4	3.035	3 3/4	2 1/4	1 3/4	3/4	4 1/4
1 7/8	5	2.049	2.304	2 1/2	3.242	4	2 3/4	1 3/4	3/4	4 1/2
2	4 1/2	2.300	2.652	3 1/4	3.449	4 1/4	2 1/2	2	1 1/2	4 3/4
2 1/4	4 1/2	3.020	3.423	3 1/2	3.862	4 3/4	2 3/4	2 1/4	1 1/2	5 1/4
2 1/2	4	3.715	4.292	3 3/4	4.275	5 1/4	3 1/4	2 3/4	1 3/4	5 3/4
2 3/4	4	4.618	5.259	4 1/4	4.688	5 3/4	3 3/4	2 3/4	3/4	6 1/2
3	4	5.621	6.324	4 3/4	5.102	6 1/4	3 3/4	2 3/4	1 3/4	7

Bolt and nut dimensions are those given in ANSI B18.2

\*(Courtesy of Energy Products Group)



Fuente: *Design of process equipment, chapter 2: Flange design, pág. 70*



L404F1102

Pressuretrol® Controllers, Auto recycle, 10 psi to 150 psi



#### Overview

Provide operating control with automatic limit protection for pressure systems up to 300 psi (2068 kPa).

#### Features

- Use with steam, air, noncombustible gases, or fluids non-corrosive to pressure sensing element.
- Models have snap-acting switching to open or close a circuit on pressure rise.
- Have adjustable differentials.
- Adjustments are made by screws on top of case.
- Mount using 1/4 inch -18 NPT internal pipe threads or surface mount through base of case.
- Groundscrew terminal.

#### Product Specifications

Description	Pressuretrol® Controllers, Auto recycle, 10 psi to 150 psi
Application	Provide control of steam, air, non-combustible gases or non-corrosive fluids
Operating Range (psi)	10 to 150 psi
Operating Range (kPa)	69 to 1034 kPa
Mounting	1/4 in. NPT internal thread or surface mount through back of case
Switch Operation	Auto recycle
Switching Action	SPDT snap action, make R-W, break R-B on pressure rise
Sensor Element	Stainless Steel diaphragm
Pipe Connections, Main or	1/4 in. NPT internal thread

High Pressure		
Dimensions (in.)		4 31/32 in. high x 4 1/2 in. wide x 2 3/4 in. deep
Dimensions (mm)		126 mm high x 114 mm wide x 70 mm deep
SwitchContact (120 Vac)	Ratings	8.0 AFL, 48.0 ALR, 10.0 A resistive
SwitchContact (240 Vac)	Ratings	5.1 AFL, 30.6 ALR, 5.0 A resistive
Maximum Operating Pressure (psi)	Sustained	225 psi
Maximum Operating Pressure (kPa)	Sustained	1551 kPa
PressureDifferential (psi)		10 to 22 psi
PressureDifferential (kPa)		60 to 152 kPa
DifferentialType		Subtractive
TemperatureRange (F)		-35 F to +150 F
TemperatureRange (C)		-37 C to +66 C
ElectricalConnections		Screwterminals
Approvals, UnderwritersLaboratoriesInc		Listed: File No. MP466, Guide No. MBPR
Approvals, StandardsAssociation	Canadian	Certified: File No. LR1620, Guide No. 400-E-O
Approvals, (formerly IRI)	Swiss RE	Acceptable

Fuente: <http://energysaving.corecommerce.com/Honeywell-L404F1102-Pressuretrol-Controller.html>

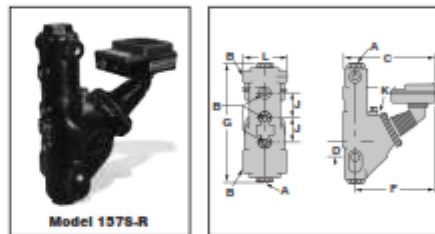
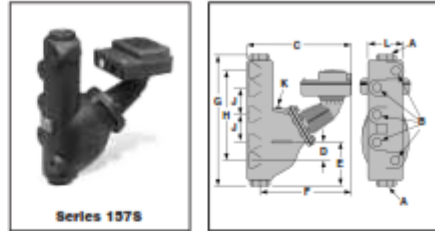
**Low Water Cut-Offs – Mechanical  
For Steam Boilers**

**Series 157S**       
**Low Water Cut-Off/Pump Controllers**

- For residential, commercial and industrial low or high pressure boiler applications
- For boilers of any steaming capacity
- Monel bellows provides corrosion resistance
- Float chamber with integral water column provided
- Snap action for high temperature service
  - 1 Single pole, single throw switch for pump control
  - 1 Single pole, double throw switch for low water cut-off and alarm actuation
- Optional features
  - Manual reset
  - Integral conductance probes for additional levels and greater operating differential-Model 157S-RBP-MD
  - 1" or 1 1/4" NPT equalizing tappings
  - 1/2" or 3/4" NPT tappings for gauge glass/tri-cock installations
  - BSPT threads
- Maximum pressure 150 psi (10.5 kg/cm<sup>2</sup>)
- For new electronic 150E Series see page 37

**Model 157S-MD**

- Maximum differential operation**
- Prevents nuisance burner shutdowns in low pressure applications
  - Maximum operating pressure 50 psi (3.5 kg/cm<sup>2</sup>)
  - For additional information see page 48



**Electrical Ratings**

Voltage	Cut-off and Pump Circuits Rating (Amperes)		Pilot Duty
	Full Load	Locked Rotor	
120 VAC	7.4	44.4	345 VA at 120 or 240 VAC
240 VAC	3.7	22.2	

Alarm Circuit Rating (Amperes)	
Voltage	Amps
120 VAC	1
240 VAC	1/2

**Ordering Information**

Model Number	Part Number	Description	Weight lbs. (kg)
157S	173502	150S low water cut-off w/water column	39.7 (18.0)
<b>157S-MD</b>	<b>173603</b>	<b>157S w/maximum differential</b>	<b>39.7 (18.0)</b>
157S-A	173702	157S w/alternate tappings	39.5 (17.9)
157S-A-M	173802	157S-A w/manual reset	39.5 (17.9)
157S-M	175402	157S w/manual reset	39.7 (18.0)
<b>157S-M-MD</b>	<b>175412</b>	<b>157S-M w/maximum differential</b>	<b>39.7 (18.0)</b>
157S-R	176220	157S w/alternate tappings	42.0 (19.0)
157S-R-M	177306	157S-R w/manual reset	42.0 (19.0)
<b>157S-RBP-MD</b>	<b>176503</b>	<b>157S w/2 integral conductance probes</b>	<b>31.0 (23.1)</b>
157S-RL	176902	157S w/alternate tappings	42.0 (19.0)
157S-RL-M	177006	157S-RL w/manual reset	42.0 (19.0)

**Dimensions, in. (mm)**

Model	A NPT	B NPT	C	D	E	F	G	H	J	K NPT	L
157S	1	1/2	13 3/4 (339)	2 3/8 (59)	4 13/16 (125)	11 1/4 (298)	16 (406)	11 1/2 (292)	3 1/2 (89)	3/4	5 1/2 (149)
157S-A	1 1/4	3/4	13 3/4 (339)	2 3/8 (59)	4 13/16 (125)	11 1/4 (298)	16 (406)	11 1/2 (292)	3 1/2 (89)	3/4	5 1/2 (149)
157S-R	1	1/2	13 3/4 (339)	2 1/4 (57)	5 1/2 (149)	11 1/4 (298)	17 (432)	11 1/2 (292)	3 1/2 (89)	3/4	6 1/4 (159)
157S-RL	1 1/4	1/2	13 3/4 (345)	3 1/2 (89)	5 1/2 (149)	11 1/4 (298)	17 (432)	12 1/4 (324)	3 1/2 (89)	3/4	6 1/4 (159)

Fuente: McDonnell & Miller, General catalog, pág. 49.

## Anexo G. Presupuesto

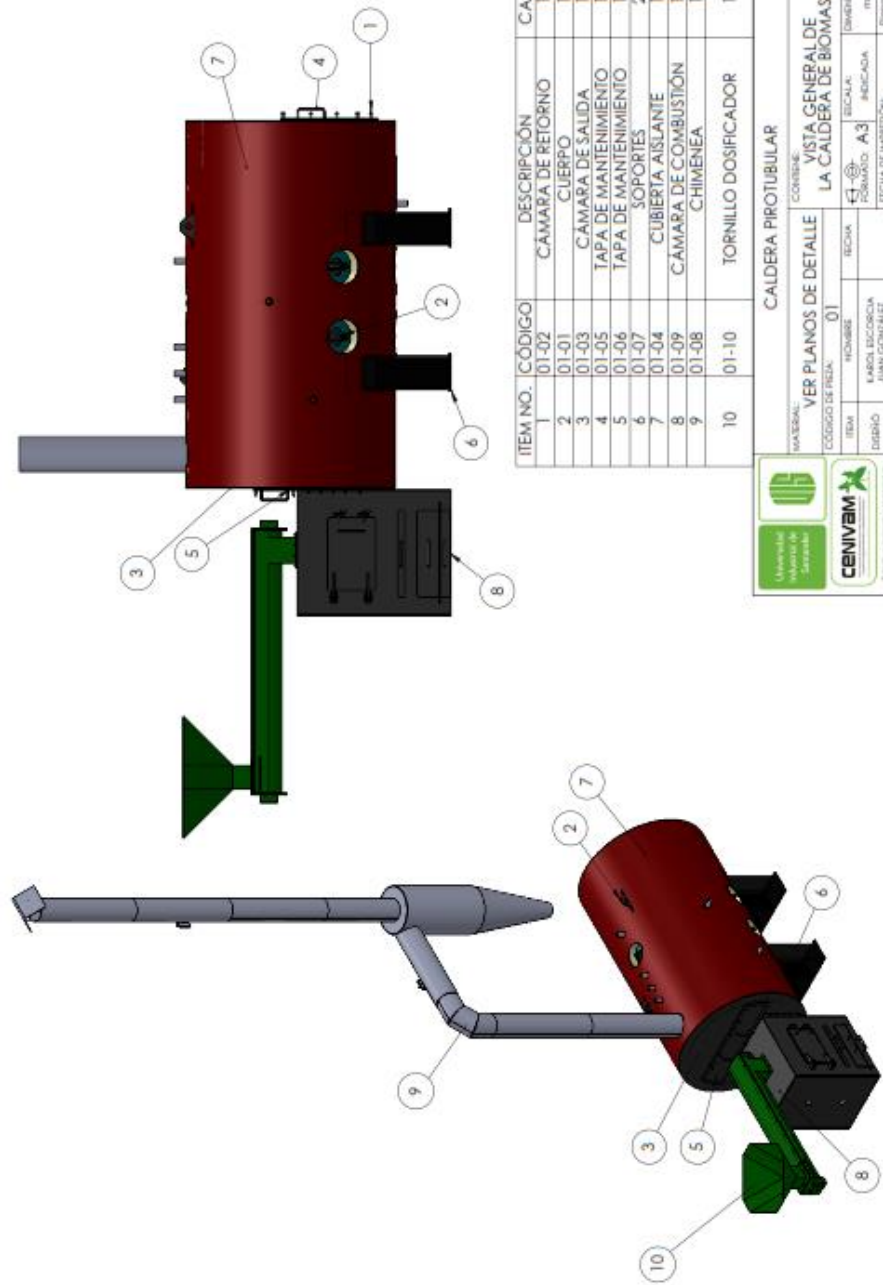
Costo de la caldera							
Modelo	Datos Tomados de Solidworks	Descripción	Cant.	peso[kg]	Costo unitario	Costo total	
1	CUERPO			909.5			
	PIEZA: 01-01-01	LÁMINA A516 G70 1/2"	1	484.2	\$ 1,162,085.95	\$ 1,162,085.95	
	PIEZA: 01-01-02	LÁMINA A516 G70 1 1/2"	1	181.7	\$ 436,179.20	\$ 436,179.20	
	PIEZA: 01-01-03	TUBO A192 2"	11	91.2	\$ 122,641.00	\$ 1,349,051.00	
	PIEZA:01-01-04	TUBO A106 10" CAL.40	1	117.0	\$1,859,074.00	\$ 1,859,074.00	
	PIEZA: 01-01-05-01	STAYBOLT TIPO 1	4	7.2	\$ 17,179.12	\$ 68,716.49	
	PIEZA:01-01-05-02	STAYBOLT TIPO 2	4	5.4	\$ 13,049.24	\$ 52,196.95	
	PIEZA:01-01-09	UNIÓN A/CX300 DE 1 1/4"X5"	6	0.0	\$ 5,000.00	\$ 30,000.00	
	PIEZA:01-01-10	HANHOLES STD 4"X3"	8	0.0	\$ 353,500.00	\$ 2,828,000.00	
	PIEZA:01-01-12	LÁMINA A516 G70 1/2"	2	22.7	\$ 54,485.22	\$ 108,970.43	
	2	CÁMARA DE RETORNO			113.4		
		PIEZA: 01-02-01	LÁMINA A516 G70 1/4"	1	42.4	\$ 101,659.88	\$ 101,659.88
PIEZA: 01-02-02		LÁMINA A516 G70 1/4"	1	3.6	\$ 8,616.68	\$ 8,616.68	
PIEZA: 01-02-03		LÁMINA A516 G70 1/4"	1	5.9	\$ 14,105.75	\$ 14,105.75	
PIEZA: 01-02-04		LÁMINA A516 G70 1/4"	1	22.1	\$ 52,933.68	\$ 52,933.68	
PIEZA: 01-02-05		LÁMINA A516 G70 1/4"	1	37.5	\$ 89,895.79	\$ 89,895.79	
PIEZA: 01-02-07		LANA P/COLCHONETA CON MALLA 3"	1	2.1	\$ 15,956.73	\$ 15,956.73	
PIEZA:01-02-06		ARANDELA PLANA HIERRO 3/8"	15		\$ 18.60	\$ 279.00	
PIEZA:01-02-08		TUERCA HEX G8 3/8"x5"	15		\$ 31.20	\$ 468.00	
PIEZA:01-02-09		TORNILLO HEX G8 3/8"x5"	15		\$ 375.60	\$ 5,634.00	
3	CÁMARA DE SALIDA			132.2			
3	CÁMARA DE SALIDA			132.2			
	PIEZA: 01-03-01	LÁMINA A516 G70 1/4"	1	44.5	\$ 106,799.03	\$ 106,799.03	
	PIEZA: 01-03-02	LÁMINA A516 G70 1/4"	2	0.7	\$ 1,764.40	\$ 3,528.80	
	PIEZA: 01-03-03	LÁMINA A516 G70 1/4"	1	3.3	\$ 7,876.10	\$ 7,876.10	
	PIEZA: 01-03-04	LÁMINA A516 G70 1/4"	1	3.6	\$ 8,585.41	\$ 8,585.41	
	PIEZA: 01-03-05	LÁMINA A516 G70 1/4"	1	29.1	\$ 69,836.92	\$ 69,836.92	
	PIEZA: 01-03-06	LÁMINA A516 G70 1/4"	1	4.7	\$ 11,191.09	\$ 11,191.09	
	PIEZA:01-03-07	LÁMINA A516 G70 1/4"	1	46.4	\$ 111,277.79	\$ 111,277.79	
	PIEZA:01-03-13	ARANDELA PLANA HIERRO 3/8"	13		\$ 18.60	\$ 241.80	
	PIEZA:01-03-12	TUERCA HEX G8 3/8"x5"	13		\$ 31.20	\$ 405.60	
	PIEZA:01-03-08	TORNILLO HEX G8 3/8"x5"	13		\$ 375.60	\$ 4,882.80	
	PIEZA:01-03-11	LANA P/COLCHONETA CON MALLA 3"	1	2.5	\$ 18,796.84	\$ 18,796.84	
	4	CUBIERTA AISLANTE			91.3		
		PIEZA: 01-04-01	LANA P/COLCHONETA CON MALLA 3"	1	31.7	\$ 240,201.76	\$ 240,201.76
PIEZA: 01-04-02		LÁMINA S304 2B 0.9mm	1	56.3	\$ 441,852.26	\$ 441,852.26	
PIEZA: 01-04-03		TORNILLO CABEZA PLANA PUNTA BROCA 1/8"x2"	22		\$ 24.60	\$ 541.20	
PIEZA: 01-04-04		LÁMINA S304 2B 0.9mm	1	3.3	\$ 25,858.76	\$ 25,858.76	
5	TAPA DE MANTENIMIENTO CÁMARA DE RETORNO			52.7			
	PIEZA: 01-05-01	LÁMINA A516 G70 1/4"	1	22.2	\$ 53,264.38	\$ 53,264.38	
	PIEZA: 01-05-02	LÁMINA A516 G70 1/4"	1	6.6	\$ 15,885.67	\$ 15,885.67	
	PIEZA: 01-05-03	LÁMINA A516 G70 1/4"	1	22.1	\$ 53,011.17	\$ 53,011.17	
	PIEZA: 01-05-04	VARILLA 3/8"	1	0.1	\$ 350.94	\$ 350.94	
	PIEZA: 01-05-05	CORDÓN SEALCO 1/4"MT-5010	2.47		\$ 4,400.00	\$ 10,868.00	
	PIEZA: 01-05-06	LANA P/COLCHONETA CON MALLA 3"	1	1.7	\$ 12,839.08	\$ 12,839.08	
6	TAPA DE MANTENIMIENTO CÁMARA DE SALIDA			29.2			
	PIEZA: 01-06-01	LÁMINA A516 G70 1/4"	1	15.8	\$ 37,988.65	\$ 37,988.65	
	PIEZA: 01-06-02	LÁMINA A516 G70 1/4"	2	0.8	\$ 1,828.44	\$ 3,656.88	
	PIEZA: 01-06-03	LÁMINA A516 G70 1/4"	1	11.7	\$ 28,129.02	\$ 28,129.02	
	PIEZA: 01-06-04	VARILLA 3/8"	1	0.1	\$ 350.94	\$ 350.94	
	PIEZA: 01-06-05	CORDÓN SEALCO 1/4"MT-5010	2.16		\$ 4,400.00	\$ 9,504.00	
	PIEZA: 01-06-06	LANA P/COLCHONETA CON MALLA 3"	1	0.7	\$ 5,476.49	\$ 5,476.49	
7	SOPORTES			172.0			
	PIEZA: 01-07-01	LÁMINA A516 G70 1/4"	2	11.5	\$ 27,565.13	\$ 55,130.27	
	PIEZA: 01-07-02	LÁMINA A283 GC 1/2"	2	23.2	\$ 41,848.90	\$ 83,697.81	
	PIEZA: 01-07-03	LÁMINA A283 GC 1/4"	2	37.4	\$ 67,274.37	\$ 134,548.74	
	PIEZA: 01-07-04	LÁMINA A283 GC 1/4"	2	58.1	\$ 104,615.22	\$ 209,230.44	
	PIEZA: 01-07-05	LÁMINA A283 GC 1/4"	2	6.6	\$ 11,951.39	\$ 23,902.78	
	PIEZA: 01-07-06	LÁMINA A283 GC 1/4"	2	7.5	\$ 13,422.58	\$ 26,845.17	
	PIEZA: 01-07-07	LÁMINA A283 GC 1/4"	2	7.5	\$ 13,422.58	\$ 26,845.17	
	PIEZA: 01-07-08	LÁMINA A283 GC 1/2"	2	20.2	\$ 36,320.89	\$ 72,641.78	

8	CHIMENEA			116.5		
	PIEZA: 01-08-01	LÁMINA A516 G70 1/4"	2	17.6	\$ 42,162.75	\$ 84,325.50
	PIEZA: 01-08-02	LÁMINA A516 G70 1/4"	5	19.6	\$ 47,012.92	\$ 235,064.58
	PIEZA: 01-08-03	LÁMINA A516 G70 1/4"	1	31.4	\$ 75,342.73	\$ 75,342.73
	PIEZA: 01-08-04	LÁMINA A516 G70 1/4"	1	16.5	\$ 39,710.86	\$ 39,710.86
	PIEZA: 01-08-05	TORNILLO HEX G8 3/8" x2"	8		\$ 261.00	\$ 2,088.00
	PIEZA: 01-08-06	LÁMINA A516 G70 1/4"	1	3.3	\$ 7,818.60	\$ 7,818.60
	PIEZA: 01-08-07	LÁMINA A516 G70 1/4"	1	21.1	\$ 50,577.97	\$ 50,577.97
	PIEZA: 01-08-08	LÁMINA A516 G70 1/4"	4	1.6	\$ 3,784.07	\$ 15,136.27
	PIEZA: 01-08-09	LÁMINA A516 G70 1/4"	1	5.4	\$ 12,990.61	\$ 12,990.61
	PIEZA: 01-08-10	VARILLA 3/8"	4	0.1	\$ 134.25	\$ 536.98
9	CÁMARA DE COMBUSTIÓN					
	PIEZA: 01-09-01	LADRILLO REFRACTARIO U-33	200		\$ 11,000.00	\$ 2,200,000.00
	PIEZA: 01-09-02-01	LÁMINA A516 G70 1/4"	1	77.5	\$186,092.72	\$ 186,092.72
	PIEZA: 01-09-02-02	LÁMINA A516 G70 1/4"	1	27.6	\$ 66,188.36	\$ 66,188.36
	PIEZA: 01-09-02-03	LÁMINA A516 G70 1/4"	1	21.6	\$ 51,758.93	\$ 51,758.93
	PIEZA: 01-09-02-04	LÁMINA A516 G70 1/4"	1	22.4	\$ 53,873.10	\$ 53,873.10
	PIEZA: 01-09-03-01	LÁMINA A516 G70 1/4"	1	18.1	\$ 43,439.72	\$ 43,439.72
	PIEZA: 01-09-03-02	LÁMINA A516 G70 1/4"	1	2.5	\$ 5,994.64	\$ 5,994.64
	PIEZA: 01-09-03-03	LÁMINA A516 G70 1/4"	1	3.1	\$ 7,402.88	\$ 7,402.88
	PIEZA: 01-09-03-04	VARILLA 3/8"	1	0.1	\$ 350.94	\$ 350.94
	PIEZA: 01-09-04-01	LÁMINA A516 G70 1/4"	1	13.6	\$ 32,578.3	\$ 32,578.28
	PIEZA: 01-09-04-02	LÁMINA A516 G70 1/4"	1	1.1	\$ 2,719.5	\$ 2,719.54
	PIEZA: 01-09-04-03	LÁMINA A516 G70 1/4"	1	1.4	\$ 3,330.0	\$ 3,330.00
	PIEZA: 01-09-04-04	VARILLA 3/8"	1	0.1	\$ 350.9	\$ 350.94
	PIEZA: 01-09-05	LÁMINA A516 G70 1/4"	1	3.3	\$ 7,938.3	\$ 7,938.31
	PIEZA: 01-09-06-01	LÁMINA A516 G70 1/4"	2	1.0	\$ 2,282.6	\$ 4,565.23
	PIEZA: 01-09-06-02	VARILLA 3/8"	15	0.3	\$ 644.4	\$ 9,665.69
	PIEZA: 01-09-06-03	LÁMINA A516 G70 1/4"	1	1.0	\$ 2,348.9	\$ 2,348.95
	PIEZA: 01-09-06-04	VARILLA 3/8"	1	0.1	\$ 350.9	\$ 350.94
	PIEZA: 01-09-07-01	LÁMINA A516 G70 1/4"	2	0.6	\$ 1,491.22	\$ 2,982.44
	PIEZA: 01-09-07-02	LÁMINA A516 G70 1/4"	4	0.4	\$ 898.61	\$ 3,594.42
	PIEZA: 01-09-07-03	VARILLA 3/8"	1	0.1	\$ 350.94	\$ 350.94
	PIEZA: 01-09-07-04	LÁMINA A516 G70 1/4"	1	5.6	\$ 13,537.11	\$ 13,537.11
	PIEZA: 01-09-07-05	LÁMINA A516 G70 1/4"	1	5.7	\$ 13,598.67	\$ 13,598.67
	PIEZA: 01-09-07-06	LÁMINA A516 G70 1/4"	1	4.1	\$ 9,922.35	\$ 9,922.35
	PIEZA: 01-09-07-07	LÁMINA A516 G70 1/4"	2	0.2	\$ 585.68	\$ 1,171.36
	PIEZA: 01-09-07-08	VARILLA 3/8"	2	0.1	\$ 128.48	\$ 256.97
	PIEZA: 01-09-07-09	CORDÓN SEALCO 1/4"MT-5010	1.22		\$ 4,400.00	\$ 5,368.00
	PIEZA: 01-09-07-10	LADRILLO REFRACTARIO U-33	3		\$ 11,000.00	\$ 33,000.00
	SOLDADURA	E7018	11	11	\$ 6,700.00	\$ 73,700.00
<b>TOTAL</b>						<b>\$13,459,890.69</b>
				Peso total	1683.2	
				Peso del agua	955	
				Peso con el agua a tope	2638.2	

Anexo H. Planos de detalle de la caldera

Fuente: Los Autores

REV	OBSERVACIONES	FECHA	REALIZO	APROBADO



ITEM NO.	CÓDIGO	DESCRIPCIÓN	CANT.
1	01-02	CAMARA DE RETORNO	1
2	01-01	CUERPO	1
3	01-03	CAMARA DE SALIDA	1
4	01-05	TAPA DE MANTENIMIENTO	1
5	01-06	TAPA DE MANTENIMIENTO	1
6	01-07	SOPORTES	2
7	01-04	CUBIERTA AISLANTE	1
8	01-09	CAMARA DE COMBUSTION	1
9	01-08	CHIMENEA	1
10	01-10	TORNILLO DOSIFICADOR	1




**VER PLANOS DE DETALLE**  
 MATERIAL: VER PLANOS DE DETALLE  
 CÓDIGO DE PIEZA: 01  
 ITEM: HOMBRE  
 DISEÑO: EMBOL ESCOBAR  
 APROBADO: JUAN GONZALEZ  
 REVISOR: ING. OMAR DELVEZ

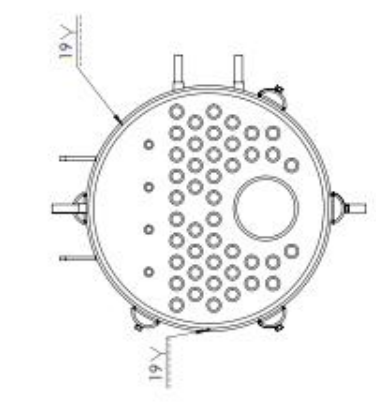
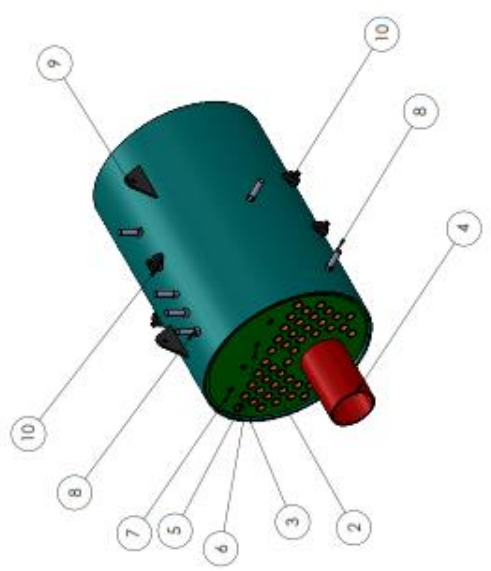
**CONCRETO:**  
**LA CALDERA DE BIOMASA**  
 ESCALA: A3  
 FECHA DE IMPRESIÓN:   
 ARCHIVO:   
 INVENTOR:   
 PUNTO: 1



ITEM NO.	CÓDIGO	DESCRIPCIÓN	PESO [KG]	C. ANT.
1	01-01-01	LAMINA ASTM A516 G70 12,7mm	484,2	1
2	01-01-02	LAMINA ASTM A516 G70 38,1 mm	181,7	2
3	01-01-11	SOLDADURA E7018		1
4	01-01-04	TUBO ASTM A106 273,05mm cal 40	117	1
5	01-01-03	TUBOS ASTM A192 60,33mm esp 3,91	91,2	44
6	01-01-05-01	STAYBOLT TIPO 1	7,2	4
7	01-01-05-02	STAYBOLT TIPO 2	5,4	4
8	01-01-09	UNION A/CX300 DE 11/4"		7
9	01-01-12	LAMINA ASTM A 516 G70 12,7mm	22,7	2
10	01-01-10	HANDHOLES Std 101.6x76,2		8

<b>CALDERA PIROTUBULAR</b>	
MATERIAL:	CANTIDAD:
INDICADOS	CONJUNTO 1. CUERPO DE LA CALDERA
CODIGO DE TELA: 01-01	RESCALDA: A3
ITEM: MONSIE	FECHA DE IMPRESION:
DISEÑO: EMBOL ESCOBICA JUAN GONZALEZ	PROYECTO:
APROBADO: ING. OMAR GELVEZ	ARCHIVO:
REVISADO:	



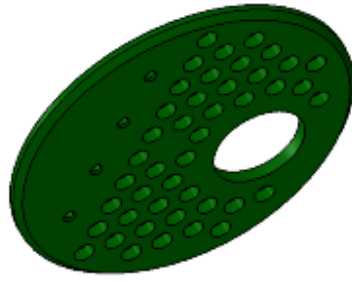
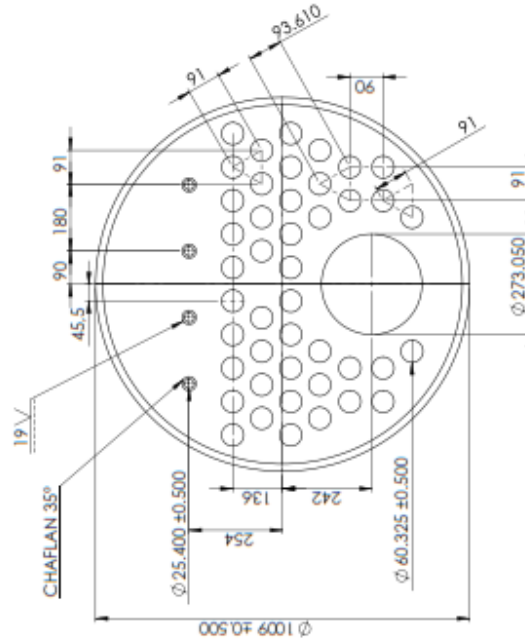
REV	COMENTARIOS	FECHA	REALIZADO	APROBADO





NOTA: TUBOS SECUNDARIOS EXPANDIDOS CON MANDRIL Y SOLDADOS CON ELECTRODOS E7018

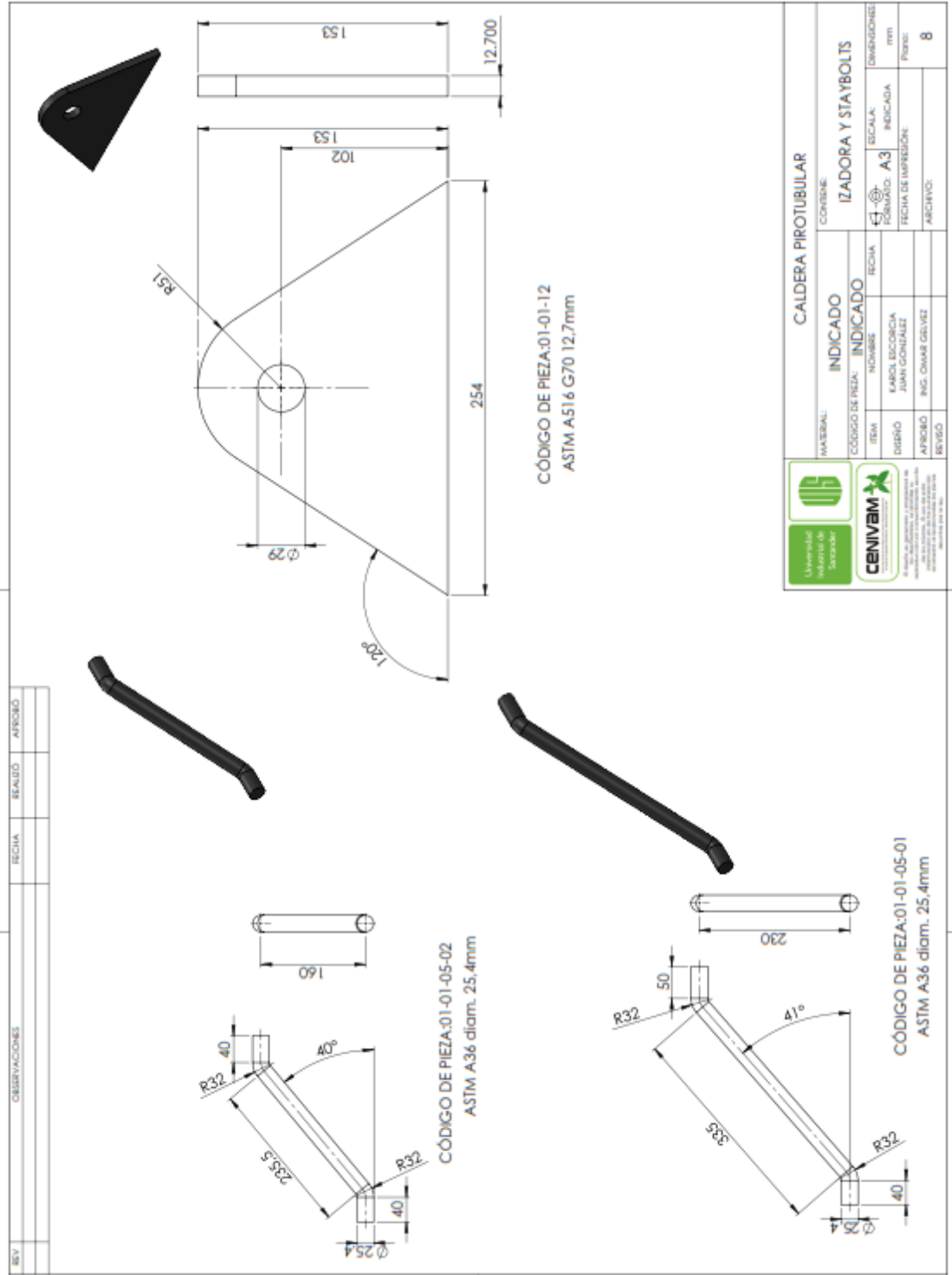
		<b>CALDERA PIROTUBULAR</b>	
MATERIAL: ASTM A192 60.33mm calibre 160		CONTENIDO: TUBO SECUNDARIO	
CÓDIGO DE PIEZA: 01-01-03		ESCALA: A3	
DISEÑO: JUAN CLAYTON	NOMBRE:	FECHA DE IMPRESIÓN:	DIMENSIONES: mm
APROBADO: ING. OMAR DELVIZ	FECHA:	ARCHIVO:	PÁGINA: 6

REV	RESERVACIONES	FECHA	REALIZADO	APROBADO

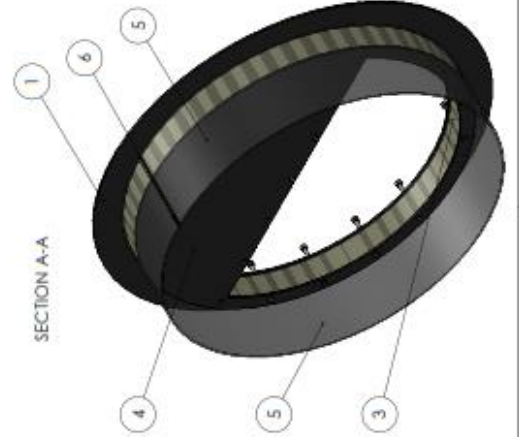
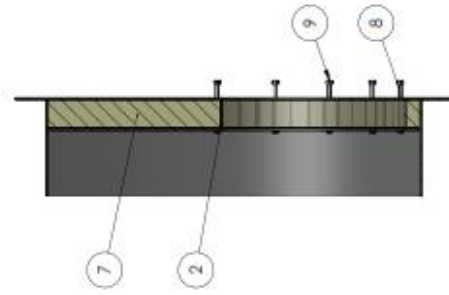
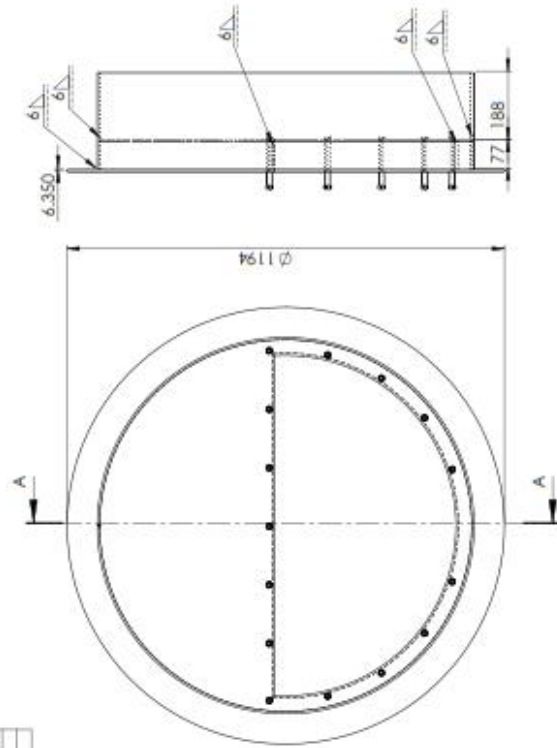


 		<b>CALDERA PIROTUBULAR</b> CONTENIDO:	
MATERIAL: <b>ASTM A516 G70 38,1mm</b>		<b>PLACA PORTATUBOS</b>	
CÓDIGO DE PIEZA: <b>01-01-02</b>		ESCALA: <b>A3</b>	
ITEM: <b>KAROL ECONOMIA</b>	NOMBRE: <b>JUAN GONZALEZ</b>	INDICADA:	DIMENSIONES:
DISEÑO:	INGENIERO:	FECHA DE EMISIÓN:	PÁGINA:
APROBADO:	ING. DINAR GELVEZ	ARCHIVO:	<b>5</b>





BSV	OBSERVACIONES	FECHA	REALIZO	APROBADO



SECTION A-A

ITEM NO.	CÓDIGO	DESCRIPCIÓN	PESO	CANT
1	01-02-05	LAMINA ASTM A516 G70 6.35mm	37.5	1
2	01-02-02	LAMINA ASTM A516 G70 6.35mm	3.6	1
3	01-02-03	LAMINA ASTM A516 G70 6.35mm	5.9	1
4	01-02-04	LAMINA ASTM A516 G70 6.35mm	22.1	1
5	01-02-01	LAMINA ASTM A516 G70 6.35mm	42.4	1
6	01-02-06	CORDÓN ELECTRODO E7018		
7	01-02-07	LANA P/COUCHONETA CON MALLA 3"	2.1	1
8	01-02-08	TORNILLO HEX G8 UNC 3/8"x5"		15
9	01-02-09	TUERCA HEX G8 UNC 3/8-16		15

**MATERIAL:** INDICADO

**CONCRETE:** CÁMARA DE RETORNO

**INDICADO:** 01-02

**FECHA:** 01-02

**REVISOR:** CAROL ESCOBAR

**DISEÑO:** JUAN GONZALEZ

**APROBADO:** RIC. OMAR GELVEZ

**REVISED:**

**ITEM:** CÁMARA DE RETORNO

**FORMA:** A3

**FECHA DE IMPRESIÓN:**

**ARCHIVO:**

**PROYECTO:** 9

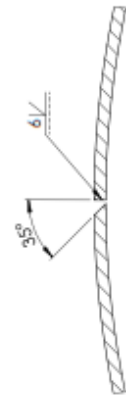
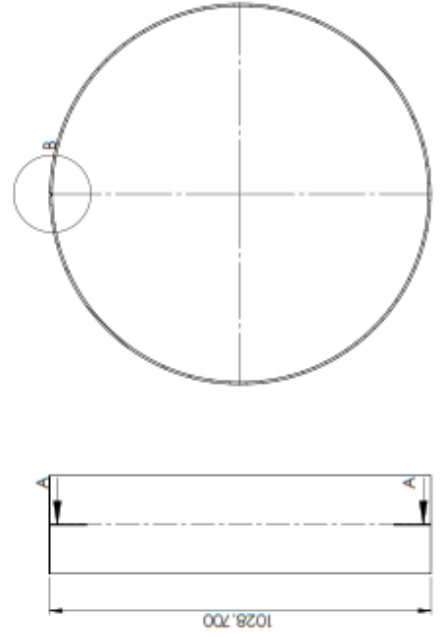
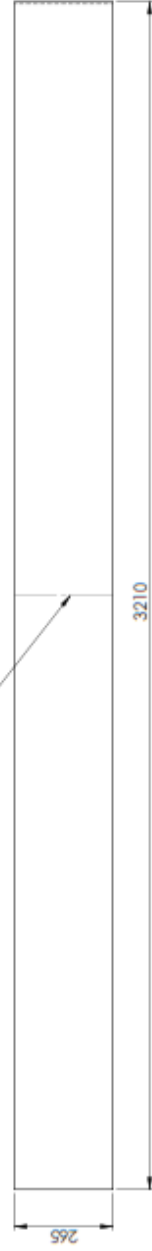
**COMPANIA:** CALDERA PIROTUBULAR

**LOGOS:**

REV	DESCRIPCIONES	FECHA	REALIZADO	APROBADO



**PIEZA ROLADA**



DETAIL B  
SCALE 1:2

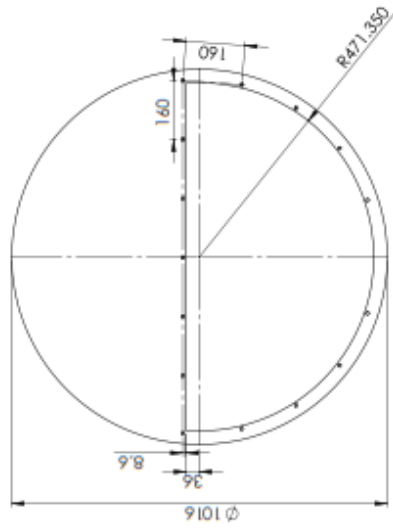
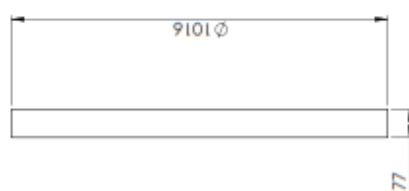
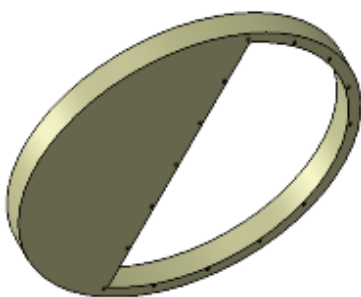
SOLDADURA CON ELECTRODO E7018

		<b>CALDERA PIROTUBULAR</b> CONTENIDO:	
MATERIAL: ASTM A516 G70 6.35mm		<b>CAMARA DE RETORNO</b>	
CODIGO DE PIEZA: 01-02-01		ITEM:	ESCALA:
NOMBRE:		FECHA:	DIMENSIONES:
KAROL ESCOBAR JUAN GONZALEZ		DIBUJO:	INDICADA:
APROBADO: ING. OMAR GOMEZ		FECHA DE IMPRESION:	mm
REVISO:		ARCHIVO:	Plano:
10		10	

SECTION A-A

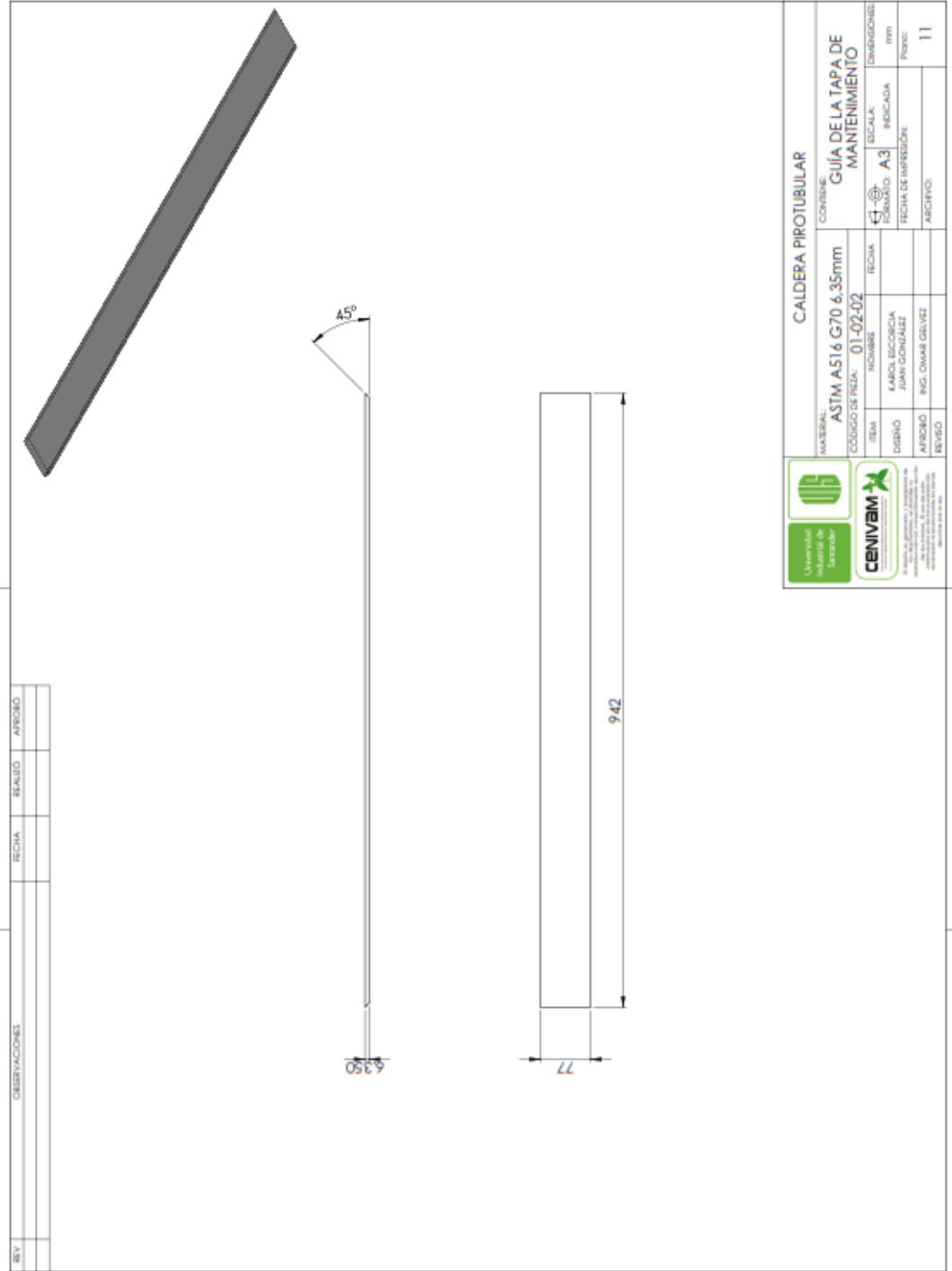


BSV	REVISIONES	FECHA	REALIZADO	APROBADO



CALDERA PIROTUBULAR			
MATERIAL: LANA P/COLCHONETA CON MALLA esp 3"		CONTENIDO: AISLANTE CAMARA DE RETORNO	
CODIGO DE PIEZA: 01-02-07		FECHA:	FECHA DE IMPRESION:
ITEM:	NOMBRE:	FECHA:	FECHA DE IMPRESION:
DISEÑO:	ING. ENGENHARIA JUAN GONZALEZ	FECHA:	FECHA DE IMPRESION:
APROBADO:	ING. OMAR GELVEZ	FECHA:	FECHA DE IMPRESION:
REVISO:		FECHA:	FECHA DE IMPRESION:
DIMENSIONES:			15
UNIDAD:			mm
ESCALA:			INDICADA
FORMA:			A3
ARQUIVO:			

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER**  
**CENIVIM**  
 CENTRO NACIONAL DE INVESTIGACIONES Y DESARROLLO TECNOLÓGICO  
 INSTITUTO TECNOLÓGICO DE INVESTIGACIONES Y DESARROLLO TECNOLÓGICO  
 AV. BOGOTÁ 100, BOGOTÁ, COLOMBIA  
 TEL: +57 (1) 253 1200  
 WWW.CENIVIM.UIS.EDU.CO

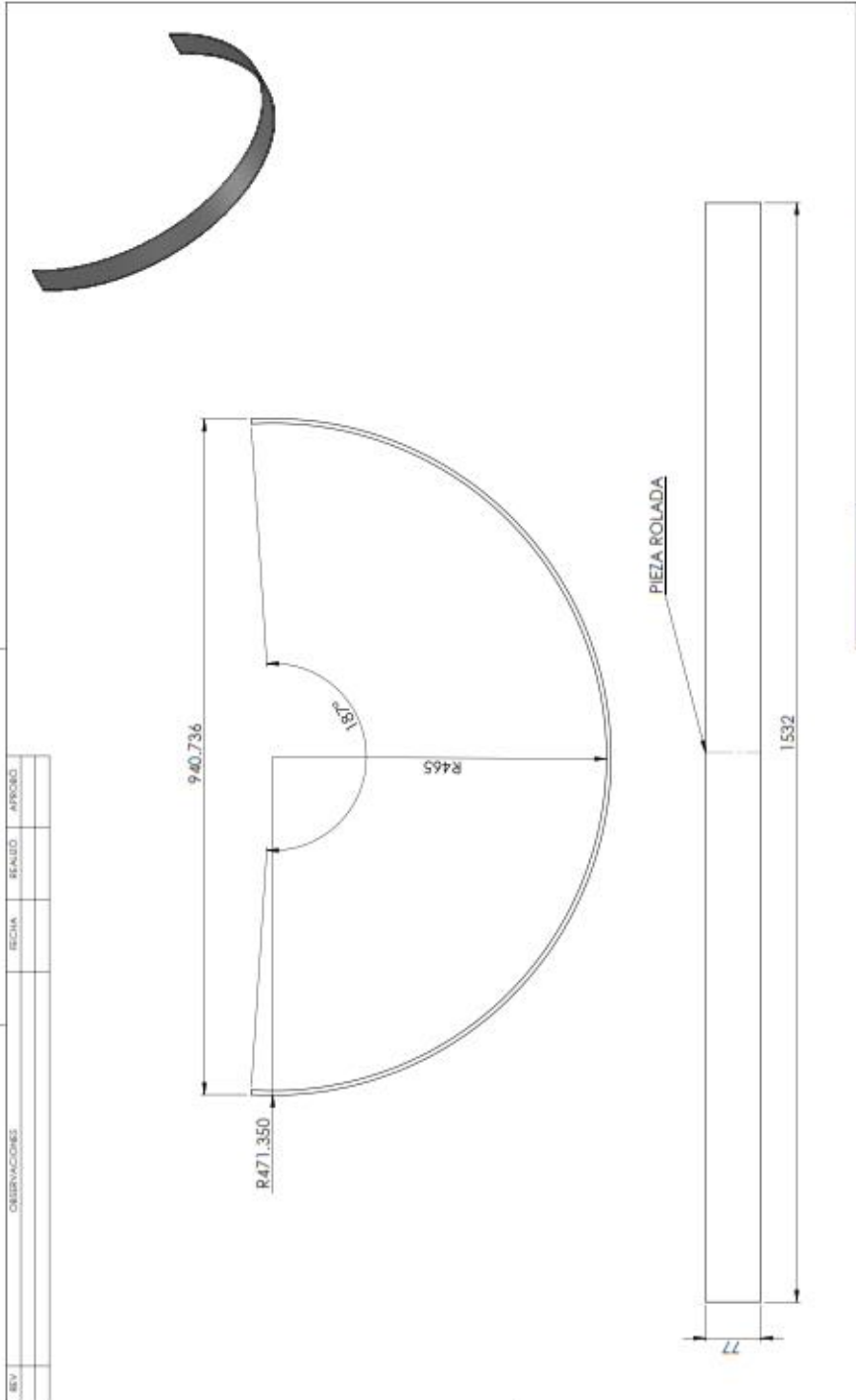


REV	OBSERVACIONES	FECHA	REALIZO	APROBO

		<b>CALDERA PIROTUBULAR</b>	
<b>MATERIAL:</b> ASTM A516 G70 6.35mm		<b>CONTIENE:</b> GUÍA DE LA TAPA DE MANTENIMIENTO	
<b>CODIGO DE PROJ.:</b> 01-02-02		<b>ESCALA:</b> INDICADA	
<b>ITEM:</b>	<b>NOMBRE:</b>	<b>FECHA:</b>	<b>INDICADA:</b>
<b>DESBRO:</b> EIBOL ESCOBICA	<b>FECHA DE IMPRESION:</b>	<b>INDICADA:</b>	<b>INDICADA:</b>
<b>APPROBADO:</b> ING. OMAR CEVEZ	<b>ARCHIVO:</b>	<b>INDICADA:</b>	<b>INDICADA:</b>
<b>REVISADO:</b>			<b>PAGINA:</b> 11



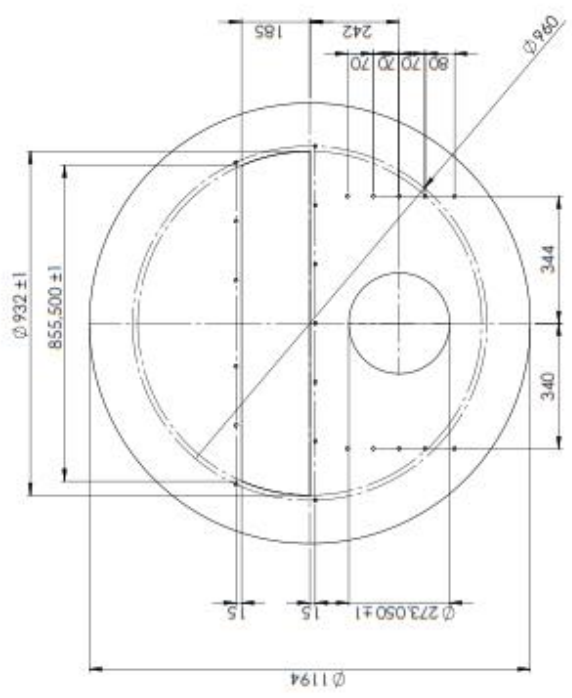
REV	DESCRIPCIONES	FECHA	REALIZADO	APROBADO



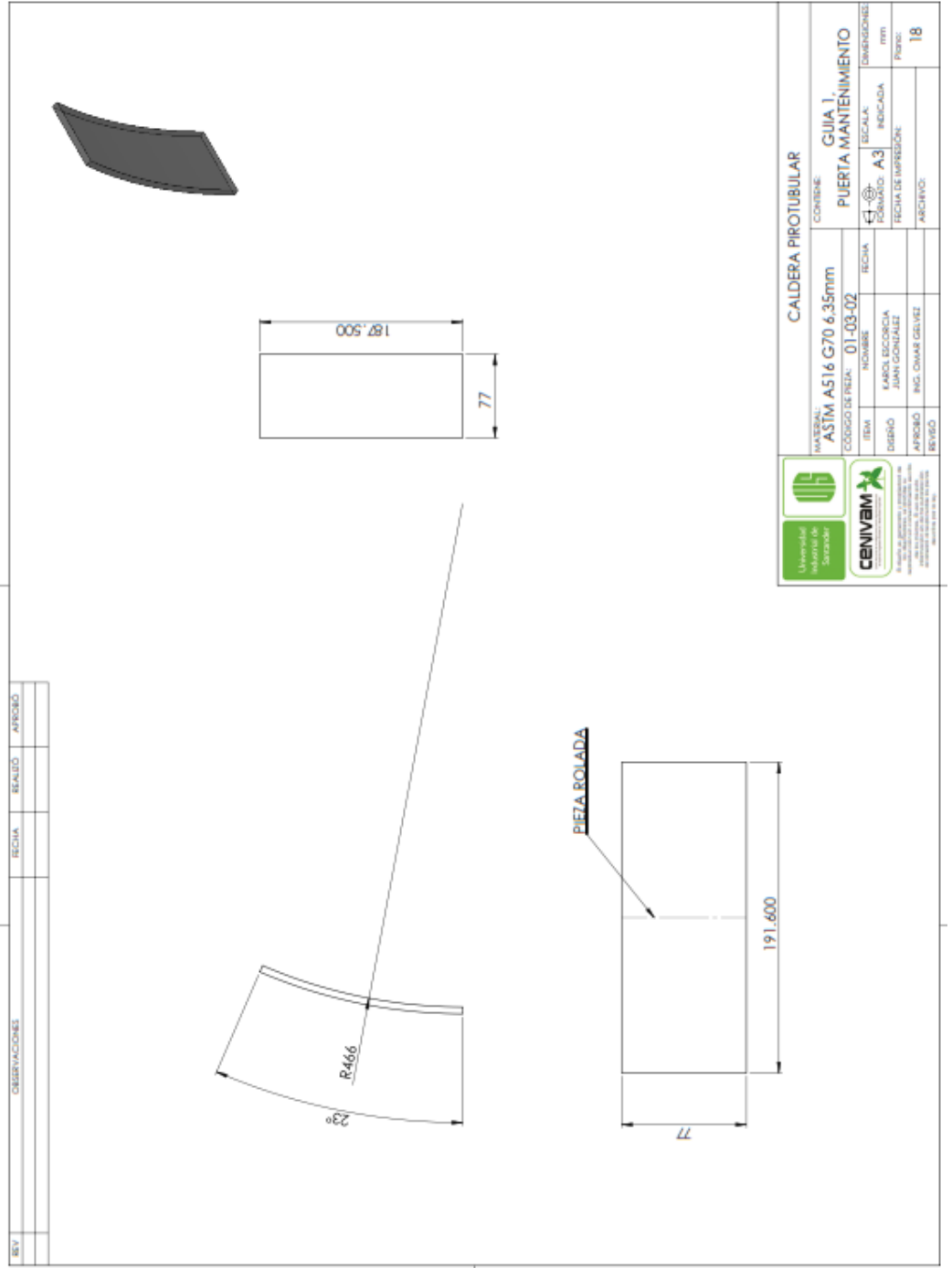
		<b>CALDERA PIROTUBULAR</b>	
MATERIAL: <b>ASTM A516 G70 6.35mm</b>		CONTENIDO: <b>GUIA TAPA DE MANTENIMIENTO</b>	
CODIGO DE PIEZA: <b>01-02-03</b>		ESCALA: <b>A3</b>	
ITEM: <b>01</b>	NOMBRE: <b>01-02-03</b>	FECHA:	DIMENSIONES:
DISEÑO: <b>KAROL ESCOBICA</b>	DISEÑADO: <b>JUAN GONZALEZ</b>	FECHA DE IMPRESIÓN:	ITEM:
APROBADO:	P.A.C. ORIANE GELVEZ	ARCHIVO:	PÁGINA:
REVISED:	REVISED:	REVISED:	TOTAL: <b>12</b>



BSV	CERRACIONES	FECHA	REALIZO	AÑO

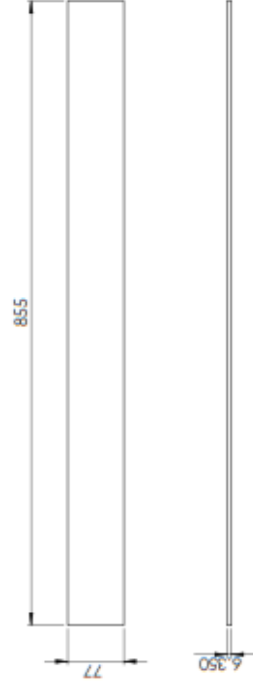
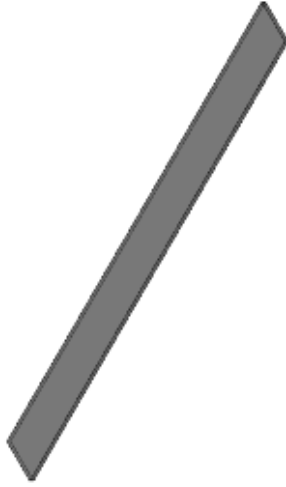


				<b>CALDERA PIROTUBULAR</b>	
MATERIA: ASTM A516 G70 6.35mm		CÓDIGO DE PIEZA: 01-03-01		CONTENIDO: TAPA CAMARA DE SALIDA DE GASES	
ITEM	NOMBRE	FECHA	ESCALA	INDICADA	DIVISIONES
0001	MAROL ESCOBICA JUAN GONZALEZ		NÚMERO: A3	INDICADA	ITEM
APROBADO	ING. OMAR CALVEZ		FECHA DE IMPRESION:		FIGURA:
REVISADO			ARCHIVO:		17



<b>UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERIA</b>		<b>CENIVAM</b>	
INSTITUTO VICE-RECTORAL DE INVESTIGACION Y DESARROLLO TECNOLÓGICO Av. Pedro de Mendoza s/n, Lima 15001, Perú Teléfono: (51) 1 476 0200, 476 0201, 476 0202, 476 0203, 476 0204, 476 0205, 476 0206, 476 0207, 476 0208, 476 0209, 476 0210 Fax: (51) 1 476 0211, 476 0212, 476 0213, 476 0214, 476 0215, 476 0216, 476 0217, 476 0218, 476 0219, 476 0220 E-mail: cenivam@unin.edu.pe		INSTITUTO VICE-RECTORAL DE INVESTIGACION Y DESARROLLO TECNOLÓGICO Av. Pedro de Mendoza s/n, Lima 15001, Perú Teléfono: (51) 1 476 0200, 476 0201, 476 0202, 476 0203, 476 0204, 476 0205, 476 0206, 476 0207, 476 0208, 476 0209, 476 0210 Fax: (51) 1 476 0211, 476 0212, 476 0213, 476 0214, 476 0215, 476 0216, 476 0217, 476 0218, 476 0219, 476 0220 E-mail: cenivam@unin.edu.pe	
<b>CALDERA PIROTUBULAR</b>			
MATERIAL: <b>ASTM A516 G70 6.35mm</b>		CONTIENE: <b>GUIA 1</b>	
CÓDIGO DE PIEZA: <b>01-03-02</b>		<b>PUERTA MANTENIMIENTO</b>	
ITEM: <b>01</b>	NOMBRE: <b>KAROL ESCOBAR JUAN GONZALEZ</b>	FECHA: <b> </b>	ESCALA: <b>A3</b>
DESIGNO: <b> </b>	FECHA DE IMPRESION: <b> </b>	INDICADA: <b> </b>	INDICADA: <b> </b>
APROBADO: <b> </b>	ING. DINAIR GELVEZ	FECHA DE IMPRESION: <b> </b>	INDICADA: <b> </b>
REVISADO: <b> </b>		ARCHIVO: <b> </b>	
			DIMENSIONES: Formato: <b>18</b> mm

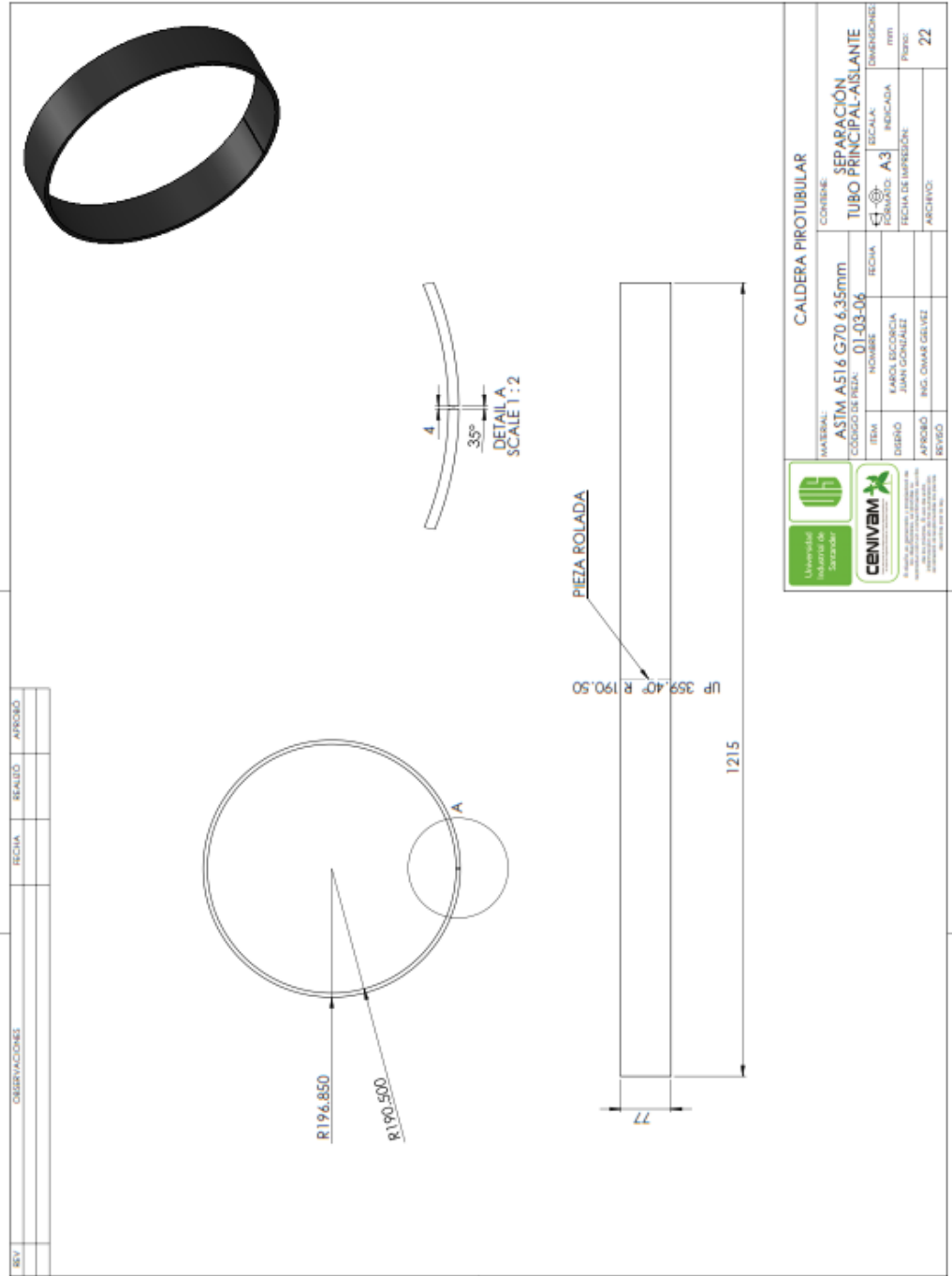
REV	OBSERVACIONES	FECHA	REALIZADO	APROBADO

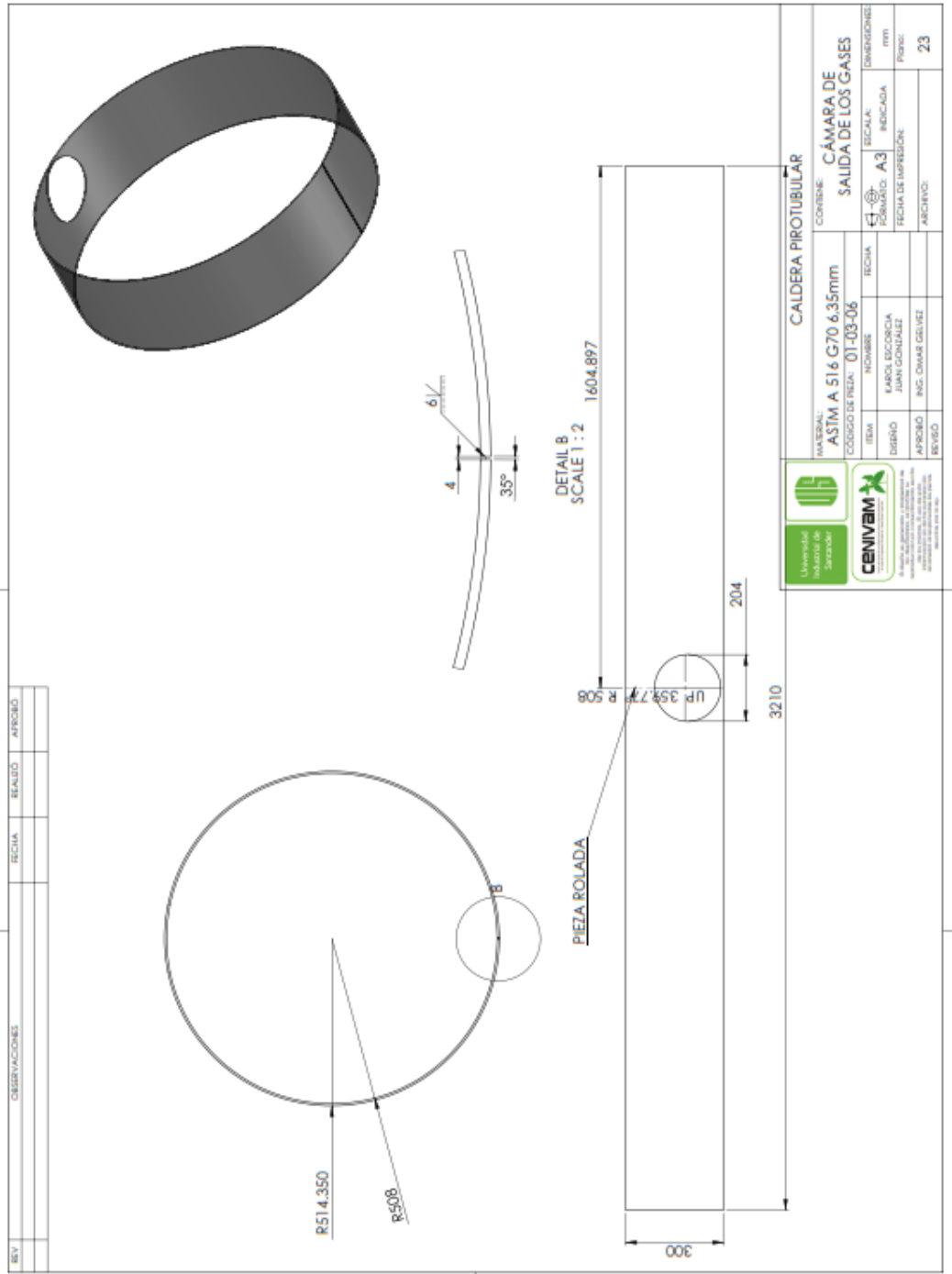


			
<b>CALDERA PIROTUBULAR</b>			
MATERIAL: <b>ASTM A516 G70 6.35mm</b>		CONTENIDO: <b>GUÍA 2</b>	
CODIGO DE PIEZA: <b>01-03-03</b>		INDICACION: <b>PUERTA DE MANTENIMIENTO</b>	
ITEM	NOMBRE	FECHA	ESCALA
DISEÑO	ING. CAROL ESCOBAR JUAN GONZALEZ		INDICADA
APROBADO	ING. OMAR CELVEZ		
REVISO			
FECHA DE IMPRESIÓN:			
ARCHIVO:			19

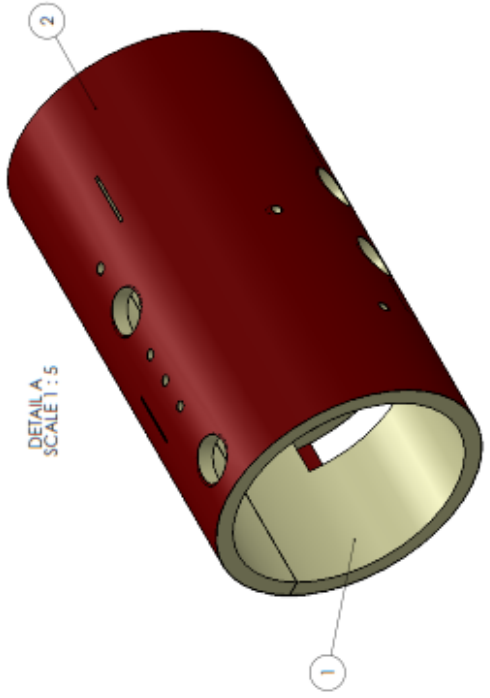
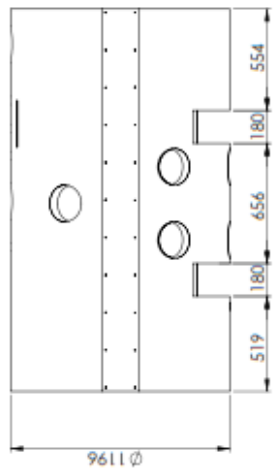
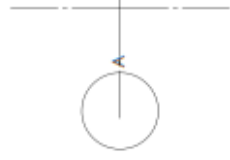
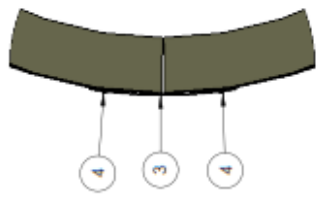








REV	OBSERVACIONES	FECHA	REALIZO	APROBO



DETAL A  
SCALE 1:5

ITEM NO.	CÓDIGO	DESCRIPCIÓN	PESO [kg]	CANT.
1	01-04-01	LANA P/COILCHONEITA CON MALLA 3"	31,7	1
2	01-04-02	LAMINA S304 28 0,9mm	56,3	1
3	01-04-04	LAMINA S304 28 0,9mm	3,3	1
4	01-04-03	TORNILLO CABEZA PLANA PUNTA DE BROCA 1/8"x2		22

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SUCRE**

**CENIVIM**  
CENTRO NACIONAL DE INVESTIGACIONES Y DESARROLLO TECNOLÓGICO

**MATERIAL:** INDICADO  
**CÓDIGO DE PREZ:** 01-04

**CONTIENE:** CUBIERTA AISLANTE

ITEM	NOMBRE	FECHA	ESCALA	DIMENSIONES
	KAROL ESCOBICA		A3	mm
	JUAN GONZALEZ			
	ING. OMAR GELVEZ			

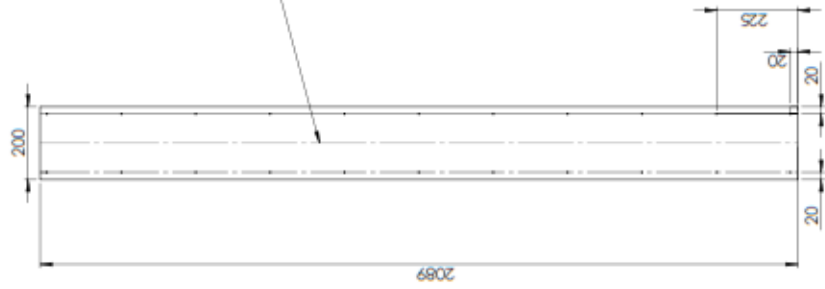
**APROBÓ:** **REVISÓ:**

**FECHA DE IMPRESIÓN:** **ARCHIVO:**

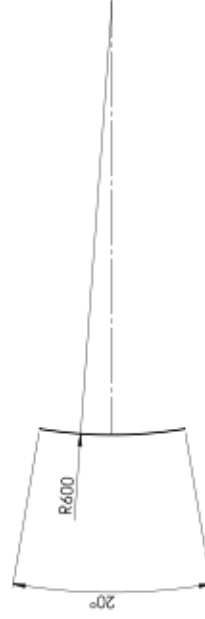
**PÁGINA:** 24



REV	FECHA	REALIZADO	APROBADO

OBSERVACIONES

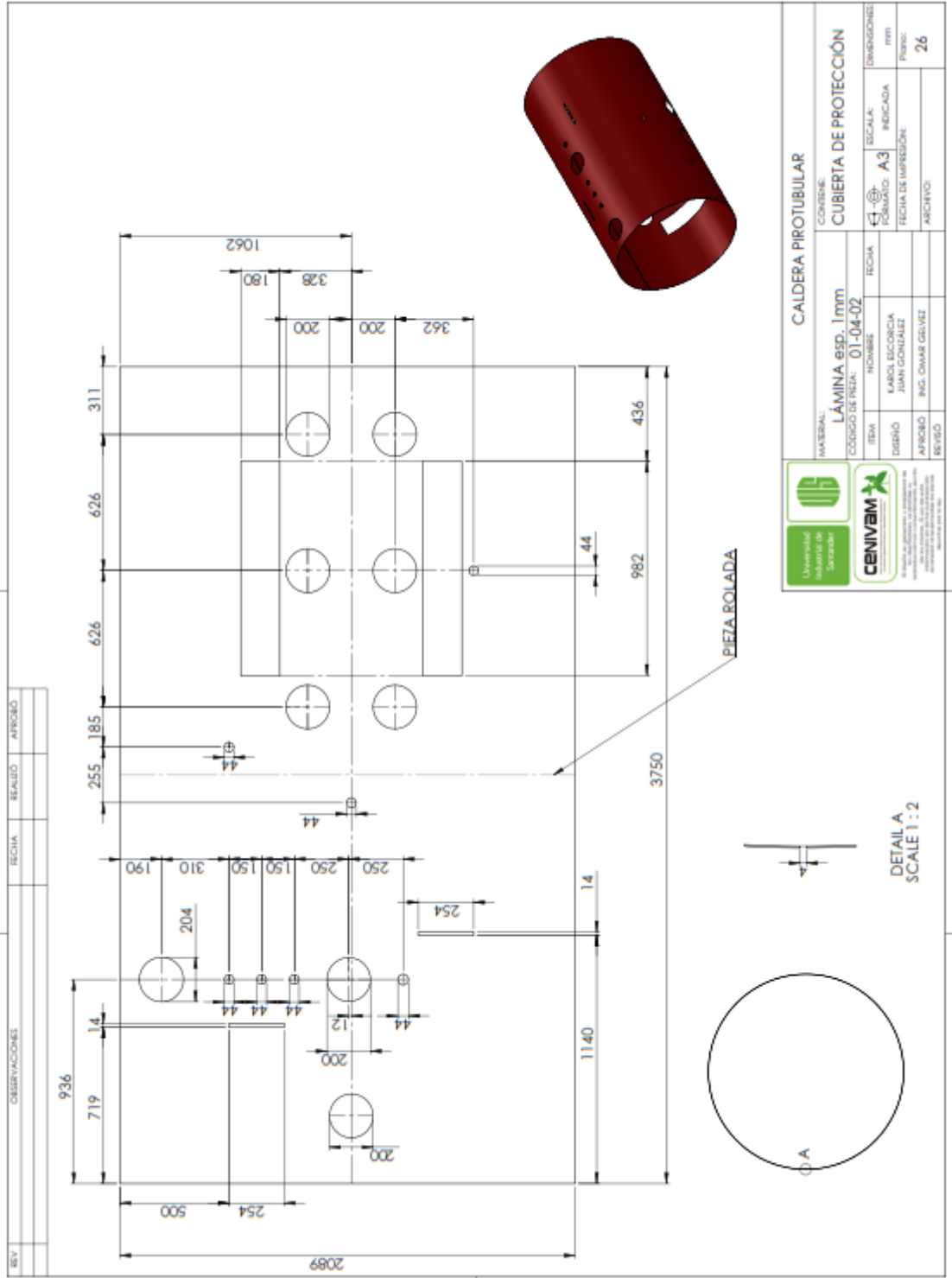


PIEZA ROLADA



 		<b>CALDERA PIROTUBULAR</b>	
MATERIAL: <b>LAMINA esp 1mm</b>		CONTENIDO: <b>CIERRE DE LA CUBIERTA</b>	
CÓDIGO DE PIEZA: <b>01-04-04</b>		ESCALA: <b>A3</b>	
ITEM: <b>DIBUJO</b>	NOMBRE: <b>JUAN GONZALEZ</b>	FECHA DE IMPRESIÓN:	DIMENSIONES: <b>mm</b>
APROBADO: <b>ING. OMAR GELVEZ</b>	REVISADO:	RECIBIDO:	PÁGINA: <b>27</b>



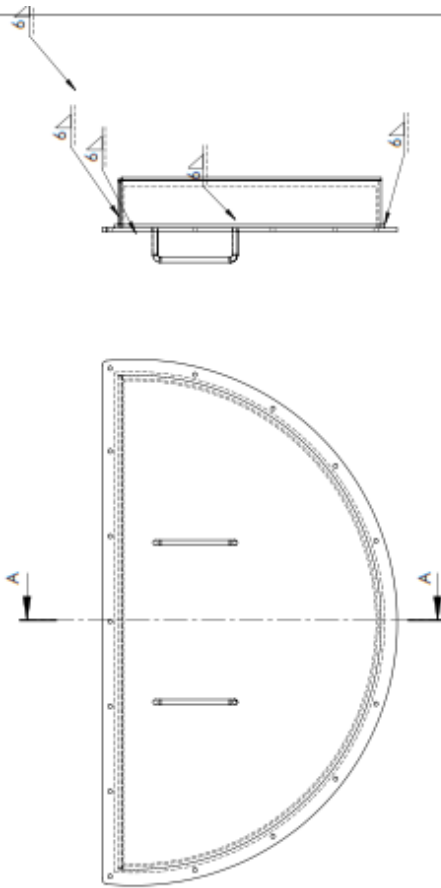


REV	DESCRIPCIONES	FECHA	REALIZO	APROBADO

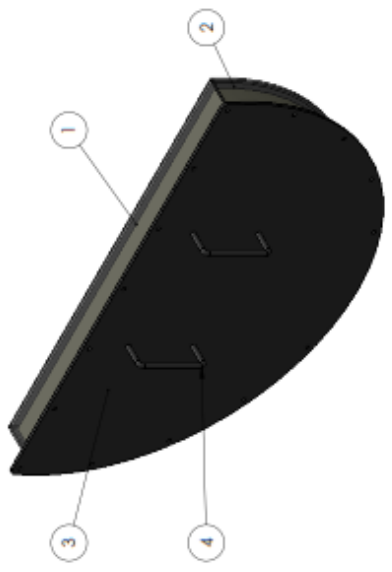
UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTO DOMINGO		UNIVERSITY OF SANTO DOMINGO		UNIVERSITY OF SANTO DOMINGO	
CENIVAM		CENIVAM		CENIVAM	
INSTITUTO VENEZOLANO DE INVESTIGACIONES CIENTÍFICAS Y TECNOLÓGICAS VENEZUELA		INSTITUTO VENEZOLANO DE INVESTIGACIONES CIENTÍFICAS Y TECNOLÓGICAS VENEZUELA		INSTITUTO VENEZOLANO DE INVESTIGACIONES CIENTÍFICAS Y TECNOLÓGICAS VENEZUELA	
CALDERA PIROTUBULAR					
CONTIENE: CUBIERTA DE PROTECCIÓN					
MATERIAL:	LÁMINA esp. 1mm	FECHA:		ESCALA:	
CODIGO DE PIEZA:	01-04-02	NOMBRE:		INDICADA:	
ITEM:		DISEÑO:	KAROL ESCOBARCA JUAN GONZALEZ	FECHA DE IMPRESIÓN:	
APROBADO:		REVISADO:		ARCHIVO:	
DIMENSIONES:					26
Unidad:					mm

DETAIL A  
SCALE 1:2

REV	COMENTARIOS	FECHA	REALIZADO	APROBADO



SECTION A-A  
SCALE 1:7



CORDÓN DE SOLDADURA CON ELECTRODO E7018 DE 1/8"

ITEM NO.	CÓDIGO	DESCRIPCIÓN	PESO [Kg]	CANT.
1	01-05-01	LAMINA ASTM A516 G70 6.35mm	22.2	1
2	01-05-02	LAMINA ASTM A516 G70 6.35mm	6.6	1
3	01-05-03	LAMINA ASTM A516 G70 6.35mm	15	1
4	01-05-04	VARILLA A36 3/8"	0.1	2
5	01-05-06	LANA P/COLCHONETA CON MALLA 3"	1.7	1
6	01-05-05	CORDÓN SEALCO 1/4"MT-5010		1

UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER

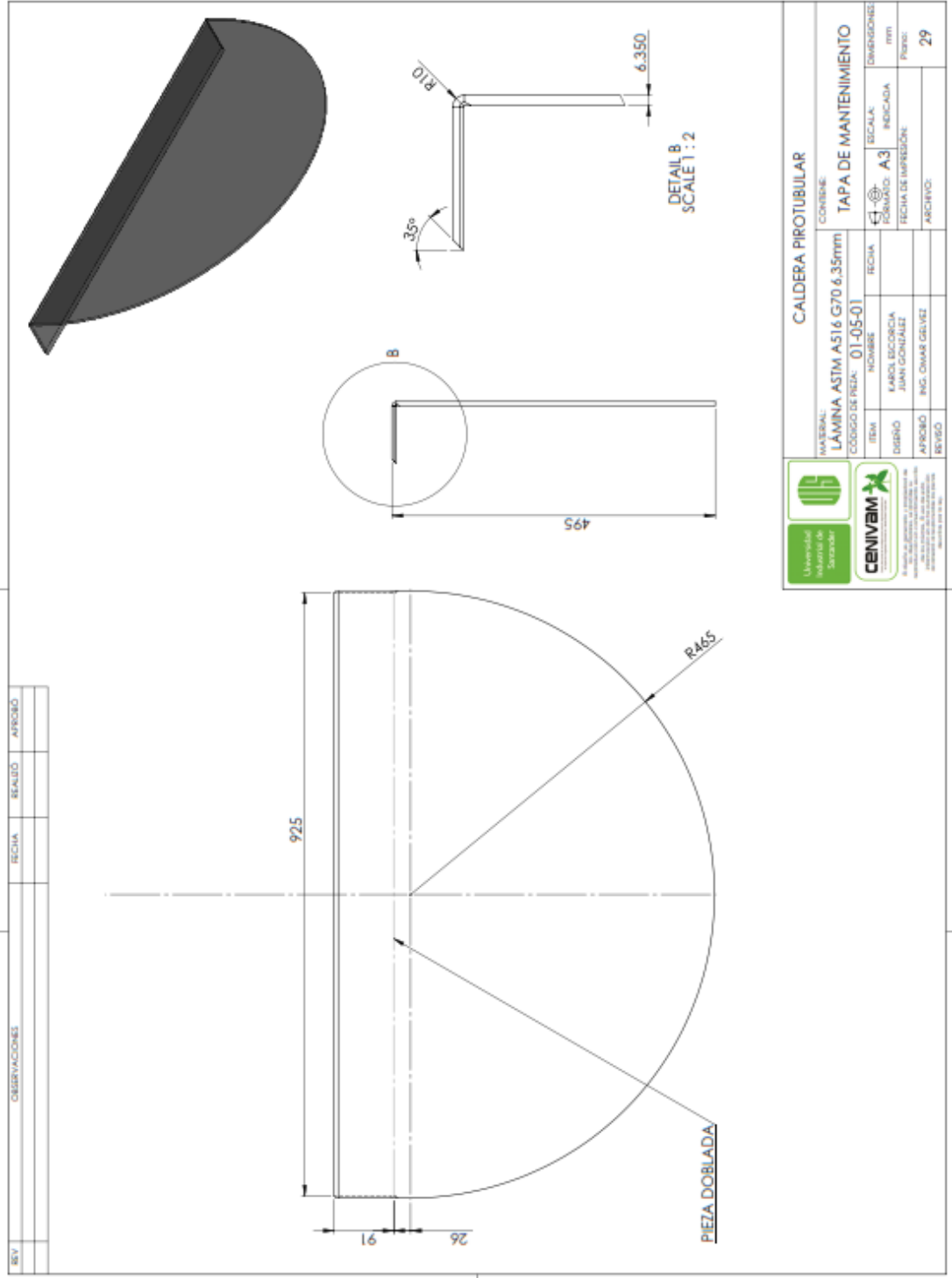
CENIVAM

CONTRATO: CALDERA PIROTUBULAR

INDICADO: TAPA DE MANTENIMIENTO CAMARA DE RETORNO

MATERIAL:	INDICADO	FECHA	FECHA	FECHA	FECHA	FECHA	FECHA	FECHA	FECHA
CÓDIGO DE REA:	01-05								
ITEM:									
DESIGNO:									
APROBADO:									
REVISADO:									

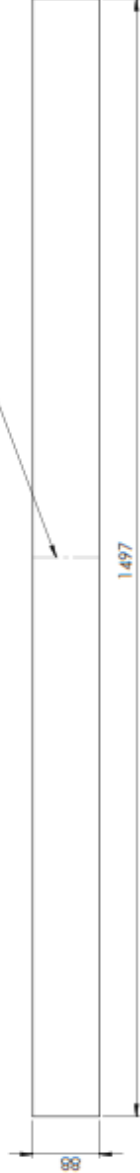
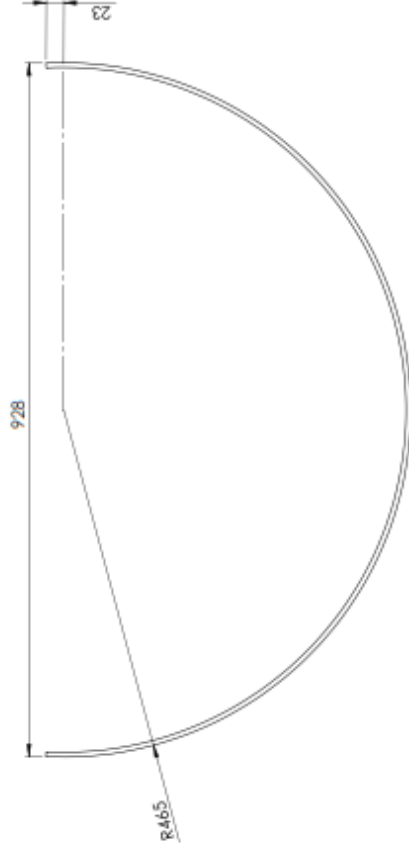
FECHA DE IMPRESIÓN: 28



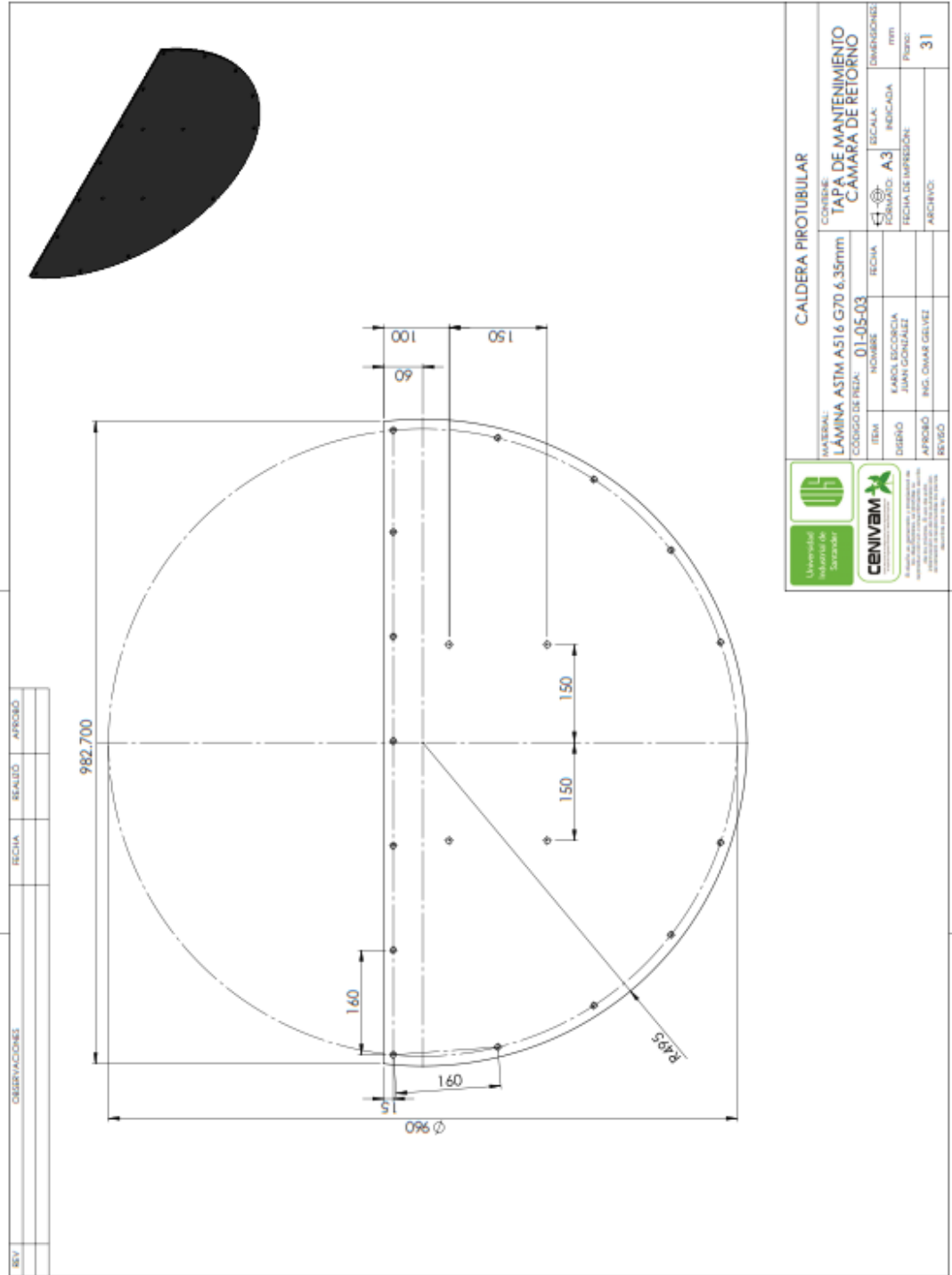
REV	DESCRIPCIONES	FECHA	REALIZADO	APROBADO

 		<b>CALDERA PIROTUBULAR</b> CONTENIDO: <b>LÁMINA ASTM A516 G70 6.35mm</b> <b>TAPA DE MANTENIMIENTO</b>	
ITEM:	01-05-01	FECHA:	
NOMBRE:	KAROL ESCOBAR	ESCALA:	A3
DISEÑO:	JUAN GONZALEZ	INDICADA:	
APROBADO:	ING. DINAIR GELVEZ	FECHA DE IMPRESIÓN:	
REVISADO:		ARCHIVO:	29

REV	DESCRIPCIONES	FECHA	REALIZADO	APROBADO



UNIVERSIDAD NACIONAL DE SARAHUAY		CENIVAM		CENIVAM	
<b>CALDERA PIROTUBULAR</b>					
MATERIAL: LÁMINA ASTM A516 G70 6.35mm					
CONTIENE: TAPA DE MANTENIMIENTO					
CÁMARA DE RETORNO					
ITEM	NO. NOMBRE	FECHA	ESCALA	INDICADA	DIMENSIONES
01	KAROL ESCOBAR JUAN GONZALEZ	01-05-02	A3	mm	mm
FECHA DE IMPRESIÓN:					30
APROBADO: ING. OMAR GELVEZ					
REVISADO:					



REV	DESCRIPCIONES	FECHA	REALIZO	APROBO

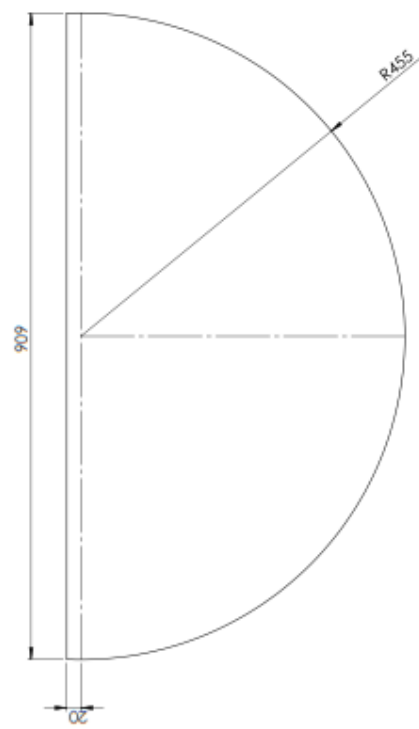
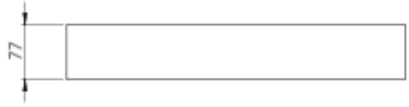
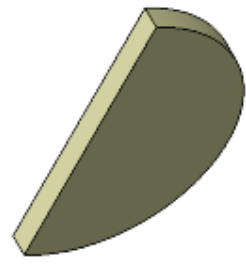




MATERIAL:		CODIGO DE PREL:		FECHA		INDICACIONES:		
VARILLA A36 3/8"		01-05-04				MANUBRIO TAPA CÁMARA DE MANTENIMIENTO		
ITEM:	NOMBRE:	FECHA:	INDICACIONES:	FECHA DE IMPRESIÓN:	INDICACIONES:	ITEM:	INDICACIONES:	
001	KAROL ESCOBAR		A3					
002	JUAN GONZALEZ							
APROBO:	ING. OMAR DELVEZ							
REVISO:								
CALDERA PIROTUBULAR							Plano:	32



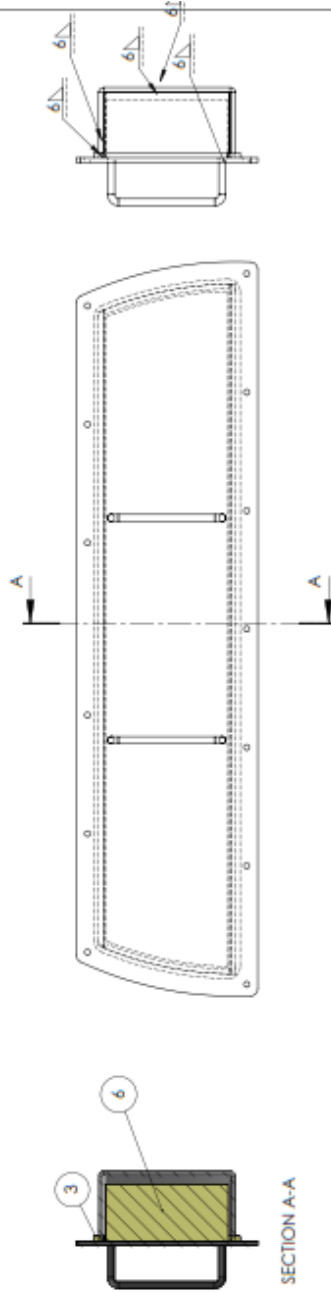


BSV	OBSERVACIONES	FECHA	REALIZADO	APROBADO



 		<b>CALDERA PIROTUBULAR</b> CONTENIDO: <b>ASLANTE TAPA DE MANTENIMIENTO</b>	
MATERIAL: LANA P/COLOCHONETA CON MALLA		ESCALA: A3	
CODIGO DE REA: 01-05-06		FECHA DE IMPRESIÓN:	
ITEM:	NOMBRE:	FECHA:	ARCHIVO:
DISEÑO:	ELABORACIÓN: JUAN GONZALEZ	FECHA DE IMPRESIÓN:	ARCHIVO:
APROBADO:	ING. OMAR GELVEZ	FECHA DE IMPRESIÓN:	ARCHIVO:
REVISADO:		FECHA DE IMPRESIÓN:	ARCHIVO:
DIMENSIONES:			mm
PAGES:			<b>34</b>

REV	DESCRIPCIONES	FECHA	REALIZO	APROBÓ



CORDÓN DE SOLDADURA CON ELECTRODO E7018 1/8"

ITEM NO.	CÓDIGO	DESCRIPCIÓN	PESO [kg]	CANT.
1	01-06-01	LAMINA ASTM A516 G70 6.35mm	15.8	1
2	01-06-02	LAMINA ASTM A516 G70 6.35mm	0.8	2
3	01-06-05	CORDÓN SEALCO 1/4" MI-5010	11.7	1
4	01-06-03	LAMINA ASTM A516 G70 6.35mm	0.1	2
5	01-06-04	VARILLA A36 3/8"	0.7	1
6	01-06-06	LANA P/COLCHONETA CON MALLA 3"	0.7	1

**UNIVERSIDAD NACIONAL DE SUCRE**

**CENIVAM**

Centro de Estudios e Investigaciones Científicas y Tecnológicas

Av. España s/n, Barrio Universitario, Sucre - Bolivia

Tel: +591 2 255 10000

www.cenivam.unsucre.edu.bo

**MATERIAL:** INDICADO

**CÓDIGO DE PREL:** 01-06

ITEM	NOMBRE	FECHA	ESCALA	DIMENSIONES
01	KAROL ESCOBAR		A3	mm
02	JUAN GONZALEZ		A3	mm

**DISEÑO:** ING. DINAIR GELVEZ

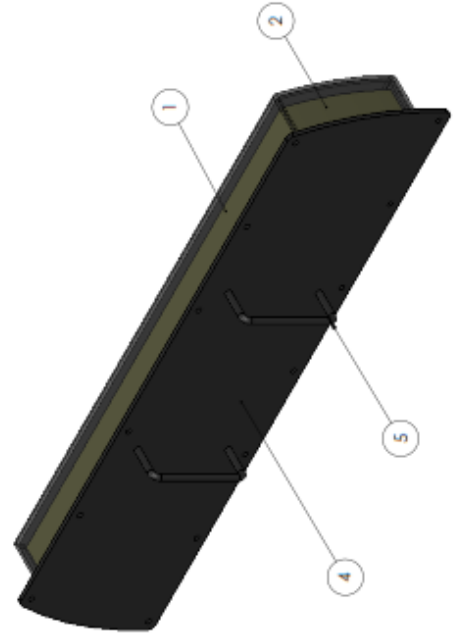
**APROBÓ:** ING. DINAIR GELVEZ

**REVISÓ:** \_\_\_\_\_

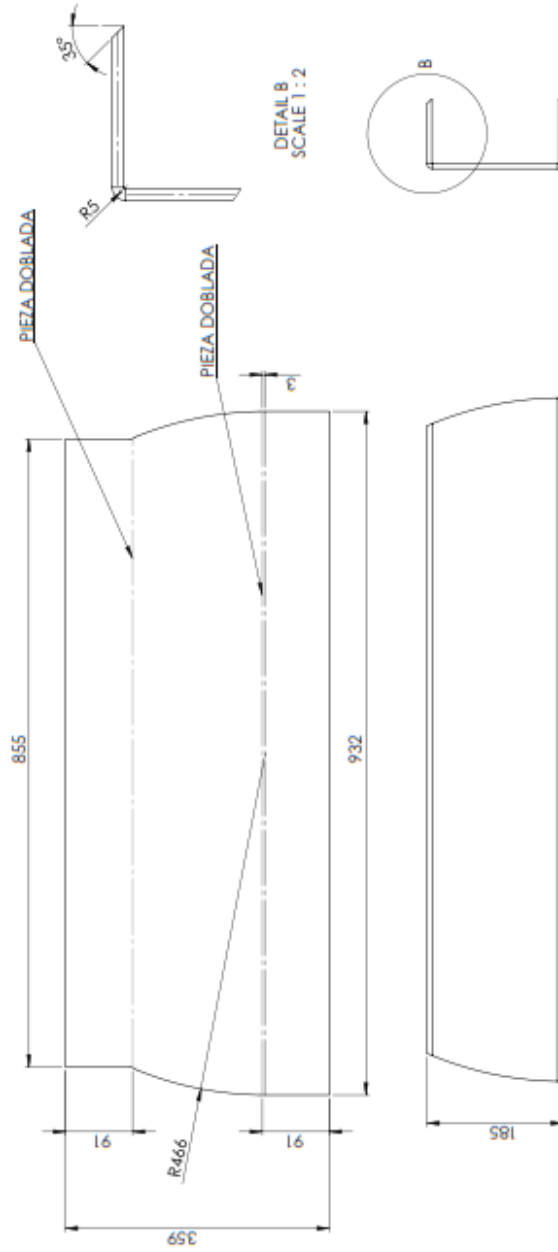
**FECHA DE IMPRESIÓN:** \_\_\_\_\_

**ARCHIVO:** \_\_\_\_\_

**PÁGINA:** 35



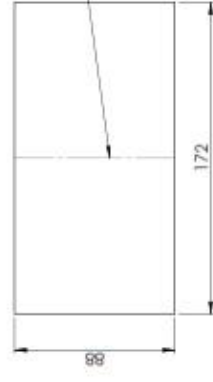
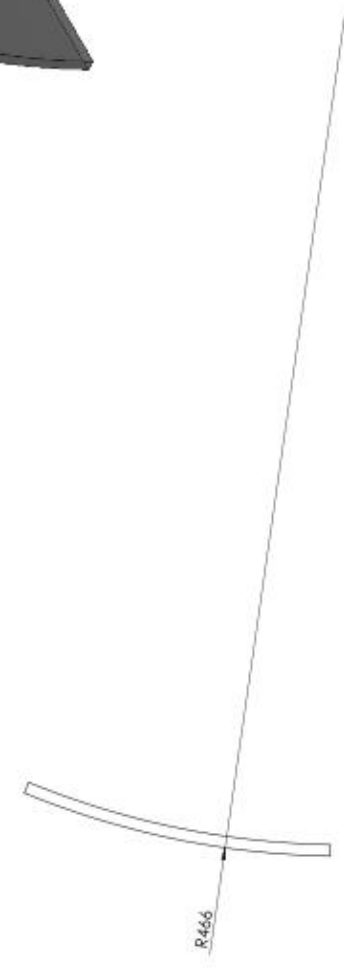
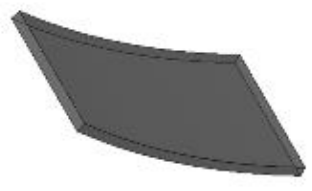
BSV	OBSERVACIONES	FECHA	REALIZO	APROBADO



DETAIL B  
SCALE 1 : 2

		<b>CALDERA PIROTUBULAR</b>	
MATERIAL: LÁMINA ASTM A516 G70 6.35mm CONTENIDO: TAPA DE MANTENIMIENTO CAMARA DE SALIDA			
ITEM	NOMBRE	FECHA	ESCALA
01	KAROL ESCOBARCA JUAN GONZALEZ		A3
DESIGNO	FECHA DE IMPRESIÓN	INDICADA	mm
APROBADO	ING. ONAIR GELVEZ		
REVISADO		ARCHIVO:	36

REV	DESCRIPCIONES	FECHA	SEALBO	APROBADO



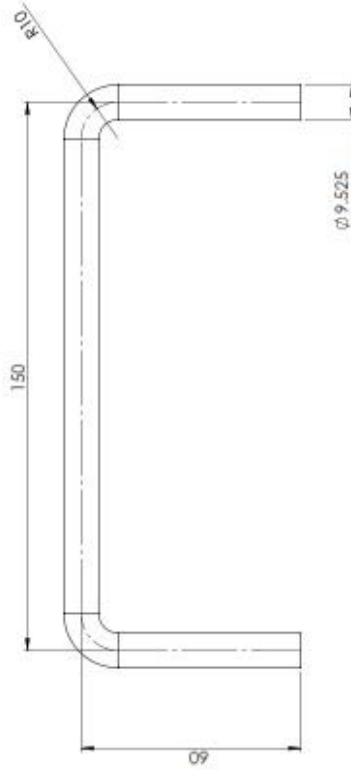
**CENIVAM**  
CENTRO NACIONAL DE INVESTIGACIONES Y DESARROLLO TECNOLÓGICO

**CALDERA PIROTUBULAR**

CONTIENE:  
**TAPA DE MANTENIMIENTO  
CAMARA DE SALIDA**

MATERIAL: LÁMINA ASTM A516 G70 6.35mm	FECHA:	REVISIÓN:	ESCALA:	EMERGENCIAS:
CÓDIGO DE PIEZA: 01-06-00	FECHA:	FECHA DE IMPRESIÓN:	INDICADA:	mm
REV:	NOMBRE:	FECHA DE IMPRESIÓN:	FECHA DE IMPRESIÓN:	Página:
DISEÑO: KAROL ECCORCIA JUAN GONZALEZ	APROBADO: ING. OMAR GILVEZ	ARCHIVO:		<b>37</b>

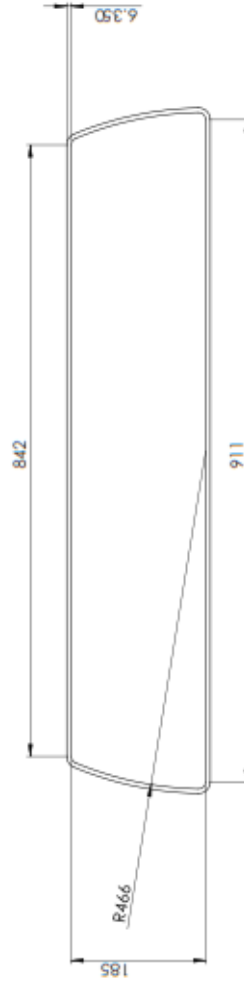
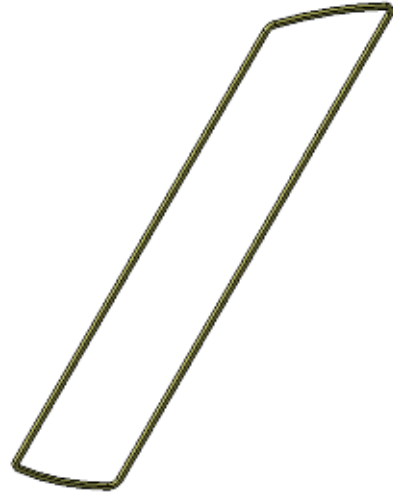
BSV	OBSERVACIONES	FECHA	SEALDO	AÑO/SEM




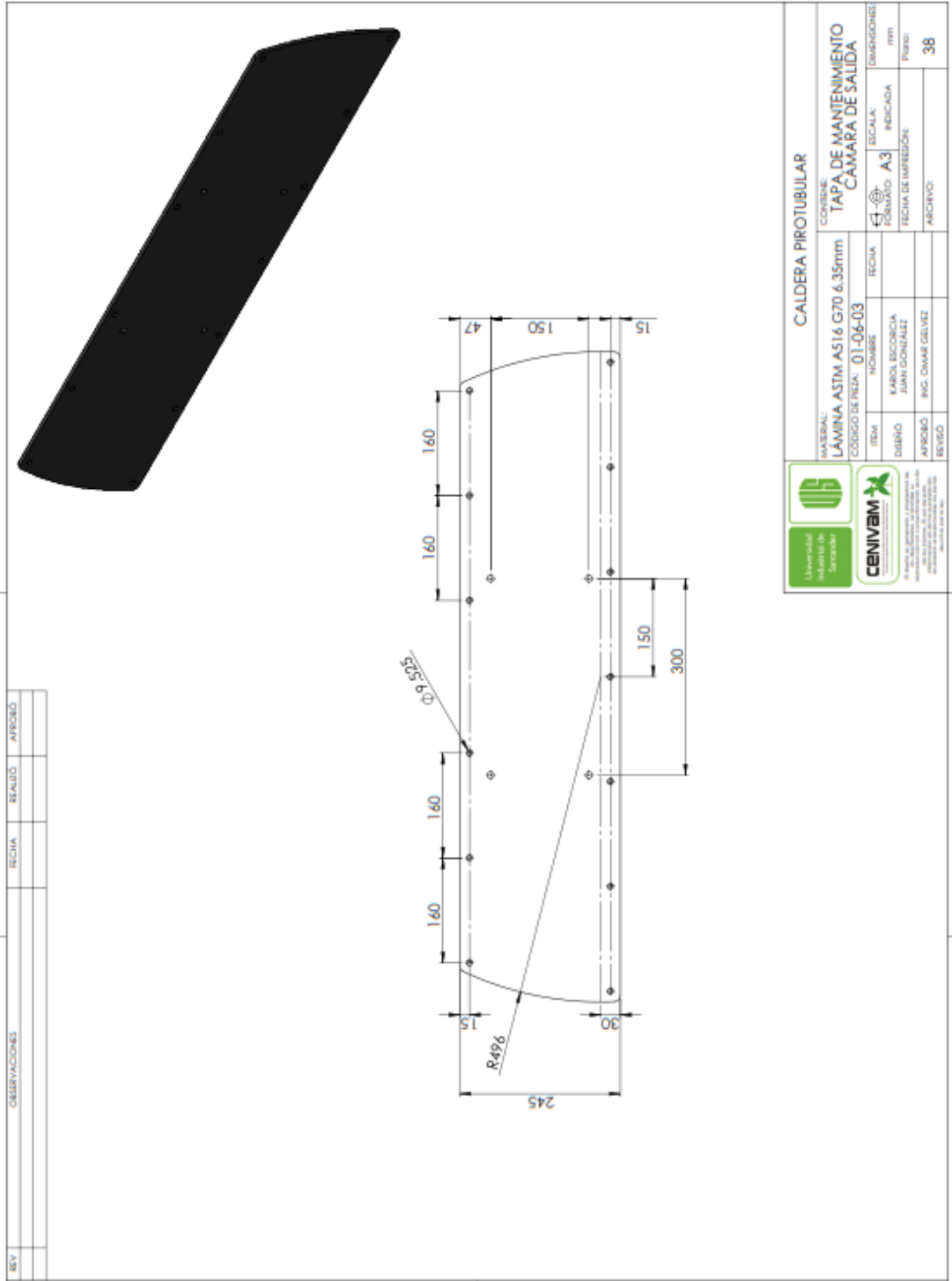
 		<b>CALDERA PIROTUBULAR</b>	
CONTIENE:			
<b>VARILLA 3/8"</b>			
<b>MANUBRIO TAPA CÁMARA DE MANTENIMIENTO</b>			
MATERIAL:	CÓDIGO DE PREL:	FECHA:	UNIDAD DE MEDIDA:
VARILLA 3/8"	01-06-04	01-06-04	MM
ITEM:	NOMBRE:	FECHA DE IMPRESIÓN:	FIGURA:
01	MANUBRIO TAPA CÁMARA DE MANTENIMIENTO	01-06-04	39
DISEÑO:	ING. CHANÉ DEL VIZ	ARCHIVO:	
APROBADO:			
REVISADO:			

REV	FECHA	REALIZADO	APROBADO

OBSERVACIONES



 		<b>CALDERA PIROTUBULAR</b>	
CONTENIDO: <b>TAPA DE MANTENIMIENTO CAMARA DE SALIDA</b>			
MATERIAL:	CODIGO DE PREL: 01-06-05	FECHA:	INDICACIONES:
ITEM:	NOMBRE:	FECHA:	FECHA:
DESBRO:	ELABOR: ESCOBICA	FECHA:	FECHA:
APROBADO:	JUAN GONZALEZ	FECHA:	FECHA:
REVISADO:	ING. OMAR CELVEZ	FECHA:	FECHA:
		ARCHIVO:	40

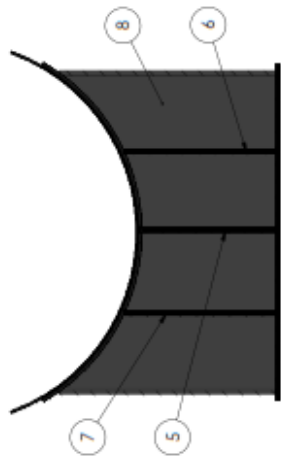


CALDERA PIROTUBULAR			
MATERIAL:	CONDICIÓN:	ESCALA:	DIMENSIONES:
LÁMINA ASTM A516 G70 6.35mm	TAPA DE MANTENIMIENTO CÁMARA DE SALIDA	A3	mm
CODIGO DE PIEZA: 01-06-03	FECHA:	INDICADA:	Plano:
ITEM:	NOMBRE:	FECHA DE IMPRESIÓN:	ARCHIVO:
DISEÑO:	ING. ESCOBAR		
APROBADO:	ING. OMAR DELVEZ		
REVISADO:			

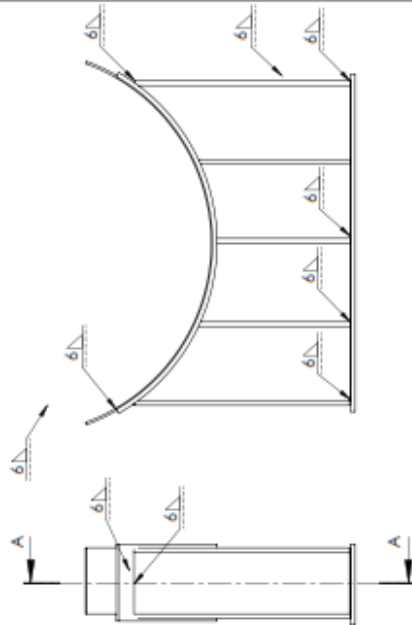
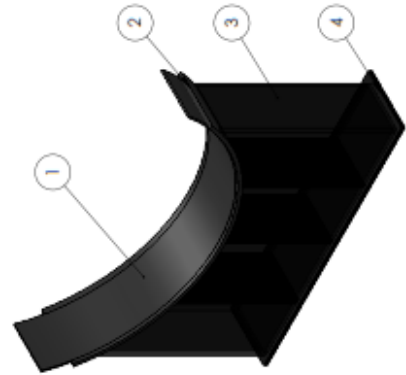




REV	COMENTARIOS	FECHA	REALIZADO	APROBADO



SECTION A-A



CORDÓN DE SOLDADURA CON ELECTRODO E7018 DE 1/8"

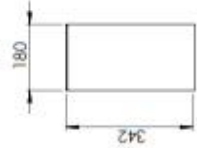
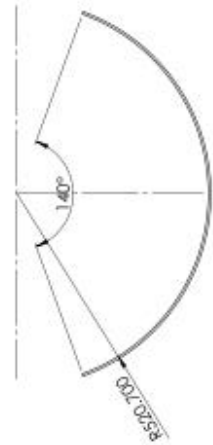
ITEM NO.	CÓDIGO	DESCRIPCIÓN	PESO	CANT.
1	01-07-01	LAMINA ASTM A516 G70 6.35mm	11.5	1
2	01-07-02	LAMINA ASTM A283 12.7mm	23.2	1
3	01-07-04	LAMINA ASTM A283 6.35mm	98.1	1
4	01-07-08	LAMINA ASTM A283 12.7mm	20.2	1
5	01-07-05	LAMINA ASTM A283 12.7mm	6.6	1
6	01-07-06	LAMINA ASTM A283 12.7mm	7.5	1
7	01-07-07	LAMINA ASTM A283 12.7mm	7.5	1
8	01-07-03	LAMINA ASTM A283 6.35mm	37.4	1

**INDICADO**  
 MATERIAL: CALDERA PIROTUBULAR  
 CÓDIGO DE PIEZA: 01-07  
 CONTENIDO: SOPORTE DE LA CALDERA

ITEM	NOMBRE	FECHA	ESCALA	EMENDACIONES
1	KAROL ESCOBICA		A3	
2	JUAN GONZALEZ			

DISEÑO: KAROL ESCOBICA  
 APROBADO: ING. OMAR GELVEZ  
 FECHA DE IMPRESIÓN:   
 ARCHIVO:   
 PÁGINA: 42

REV	COMENTARIOS	FECHA	EFALDO	APPROB

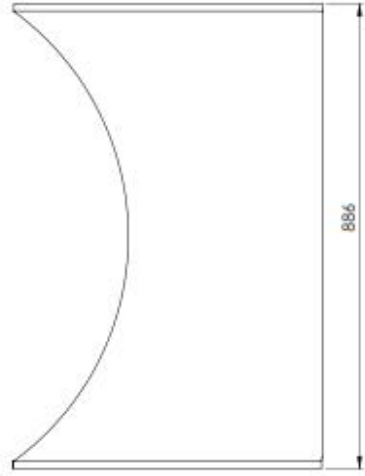
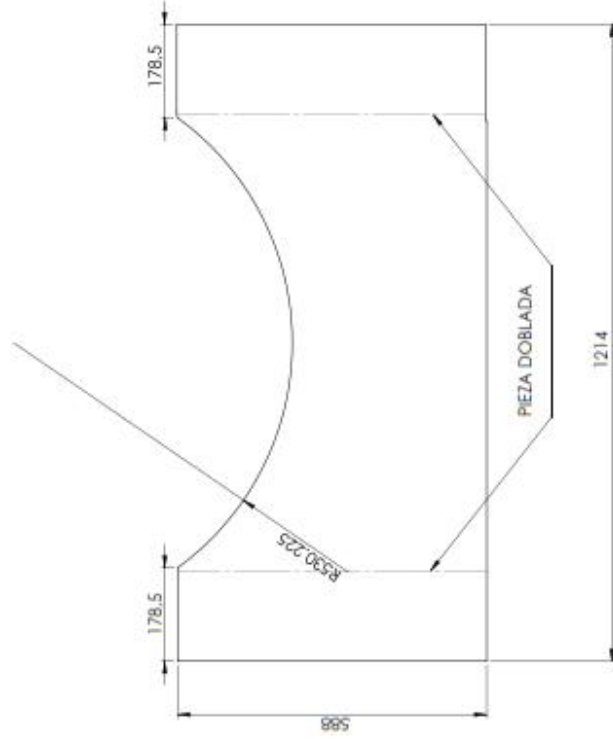


			
<b>CALDERA PIROTUBULAR</b>			
<b>MATERIAL:</b> LÁMINA ASTM A516 G70 6.35mm		<b>COURSE:</b> SOPORTE DE LA CALDERA	
<b>CODIGO DE PIEZA:</b> 01-07-01		<b>ITEM:</b>	<b>TECNOLOGIA:</b>
<b>ITEM:</b>	<b>NOMBRE:</b>	<b>FECHA:</b>	<b>ESCALA:</b>
<b>DISEÑO:</b>	<b>KAROL ESCOBICA JUAN GONZALEZ</b>		<b>INDICADA:</b>
<b>APPROB:</b>	<b>ING. OMAR GELVEZ</b>		<b>FECHA DE IMPRESION:</b>
<b>REVISO:</b>			<b>ARCHIVO:</b>
			<b>DIMENSIONE:</b>
			<b>mm</b>
			<b>Formato:</b>
			<b>A3</b>
			<b>43</b>



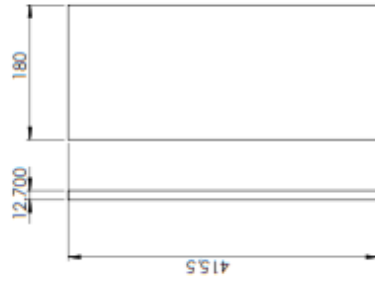


REV	DESCRIPCIONES	FECHA	ELABO	APROB

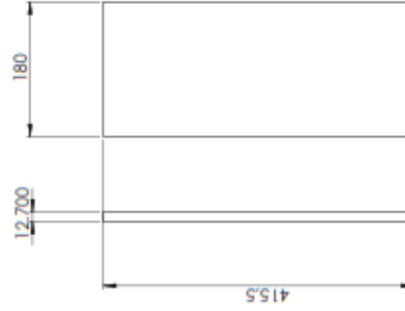


UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERIA				CENIVIAM			
<b>CALDERA PIROTUBULAR</b>							
CONEXION: <b>SOPORTE DE LA CALDERA</b>							
MATERIAL: <b>LAMINA ASTM A283 6.35mm</b>		ITEM:		FECHA:		DISEÑADOR:	
CODIGO DE PIEZA: <b>01-07-04</b>		NOMBRE:		FECHA DE IMPRESION:		ITEM:	
DISEÑO:		FABRICACION:		INDICADA:		PESO:	
APROBADO:		ING. OMAR DELVEZ		A3		46	
REVISO:				ARCHIVO:			

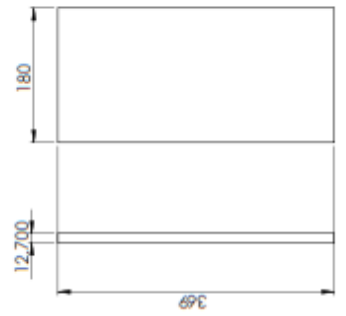
BSV	OBSERVACIONES	FECHA	SEALDO	AFORNO



CÓDIGO DE PIEZA:01-07-06

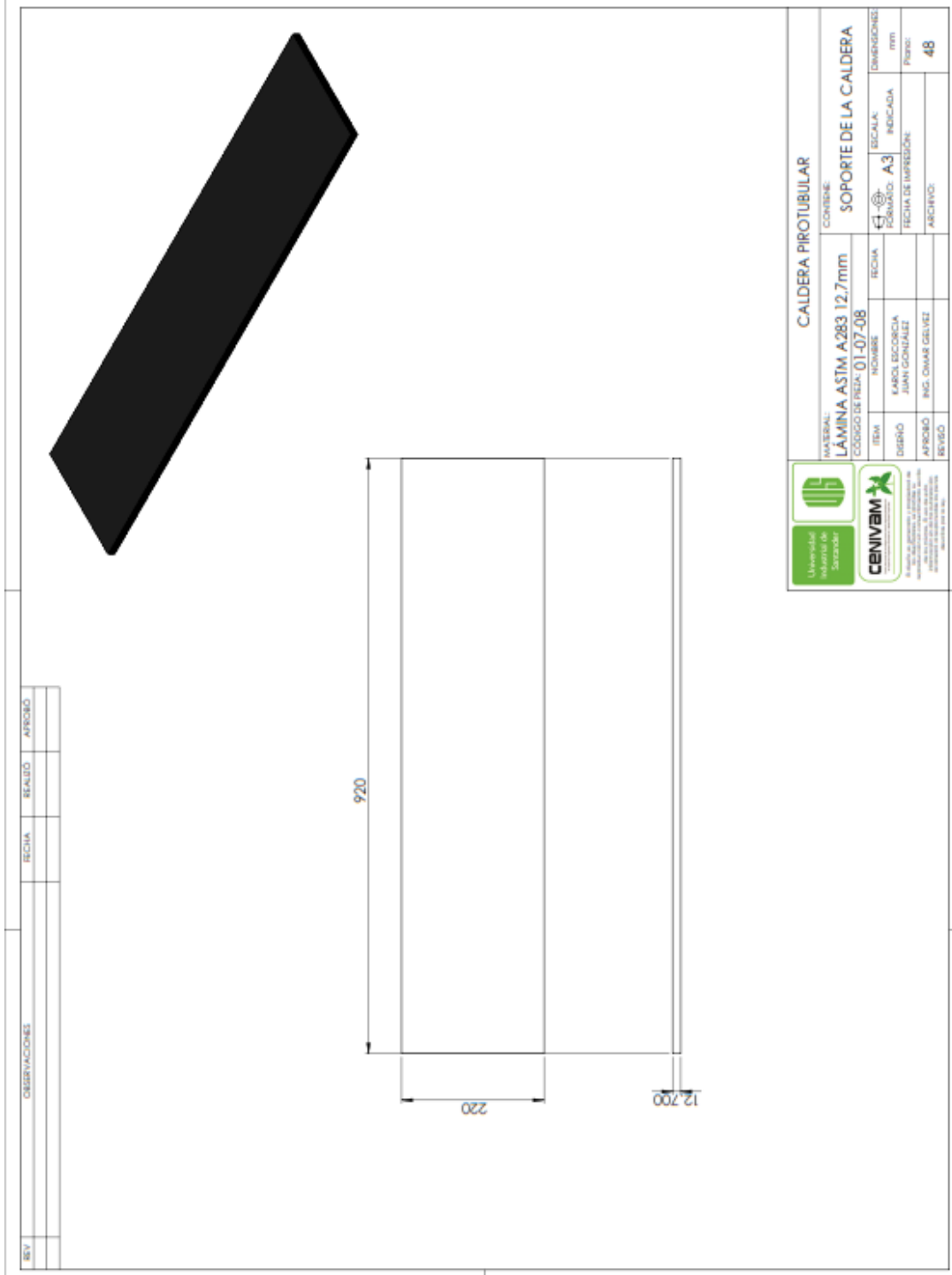


CÓDIGO DE PIEZA:01-07-07

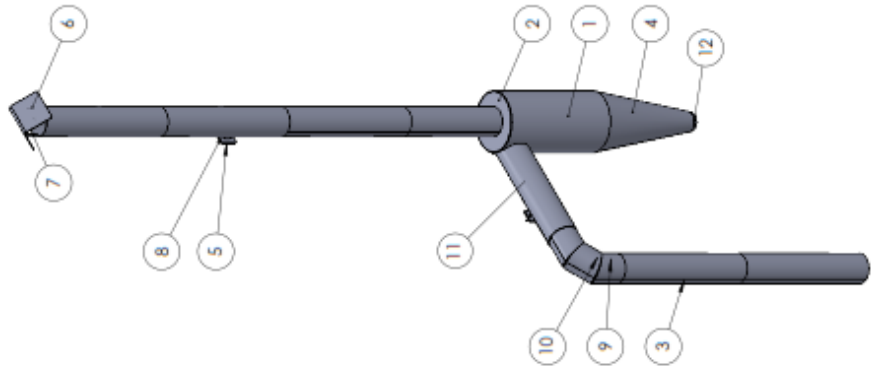


CÓDIGO DE PIEZA:01-07-05

		<b>CALDERA PIROTUBULAR</b>	
<b>MATERIAL:</b> LÁMINA ASTM A283 12.7mm		<b>CONTIENE:</b> SOPORTE DE LA CALDERA	
<b>CODIGO DE PIEZA:</b> INDICADA	<b>FECHA:</b>	<b>ESCALA:</b> INDICADA	<b>DIMENSIONES:</b>
<b>ITEM:</b>	<b>NOMBRE:</b>	<b>FECHA DE IMPRESIÓN:</b>	<b>PIEZAS:</b>
<b>DISEÑO:</b>	<b>ELABORADOR:</b>	<b>FECHA DE IMPRESIÓN:</b>	<b>PIEZAS:</b>
<b>AFORNO:</b>	<b>ING. OMAR GELVEZ</b>	<b>ARCHIVO:</b>	<b>47</b>
<b>REVISO:</b>			



REV	OBSERVACIONES	FECHA	REALIZADO	APROBADO

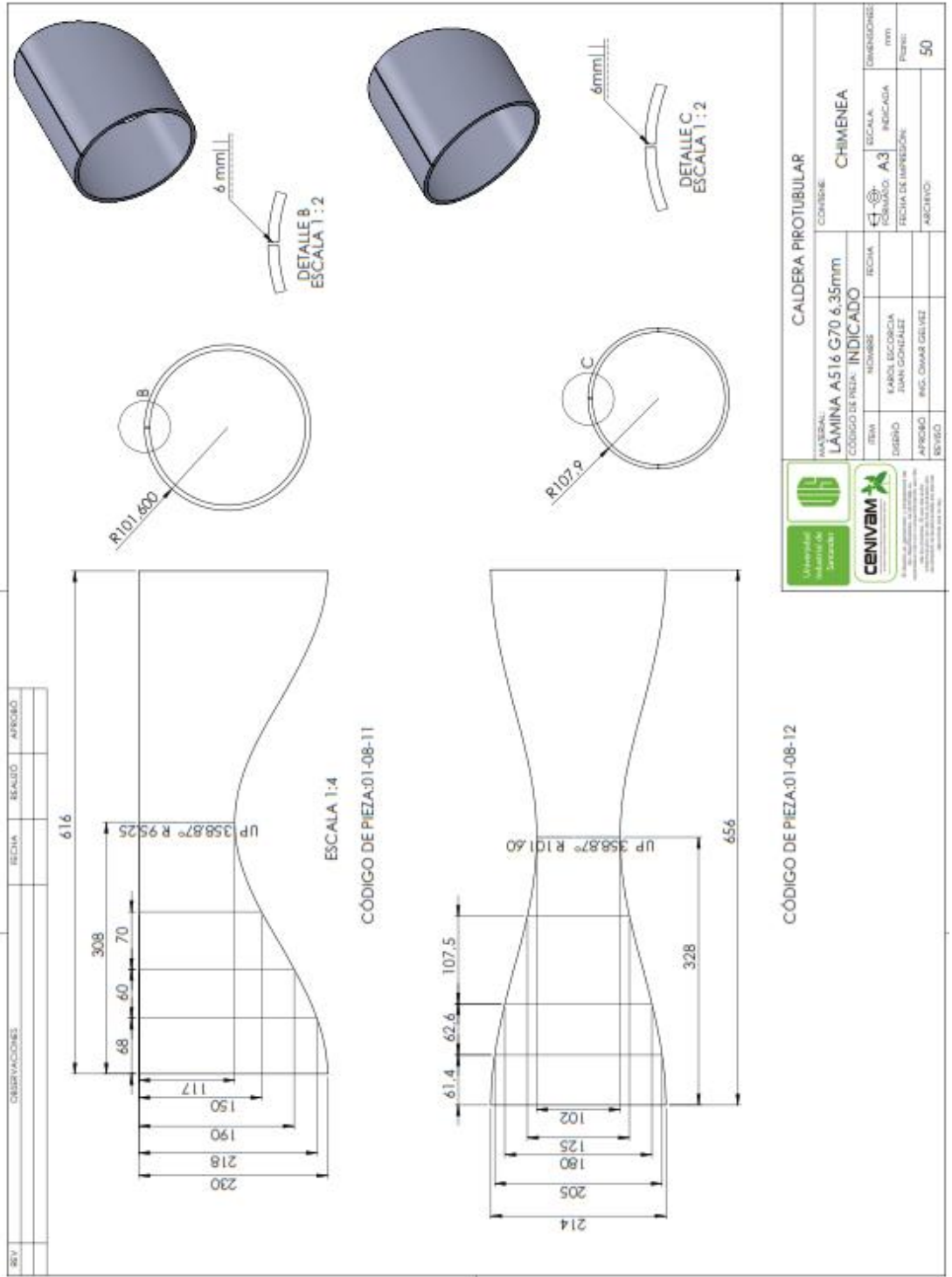


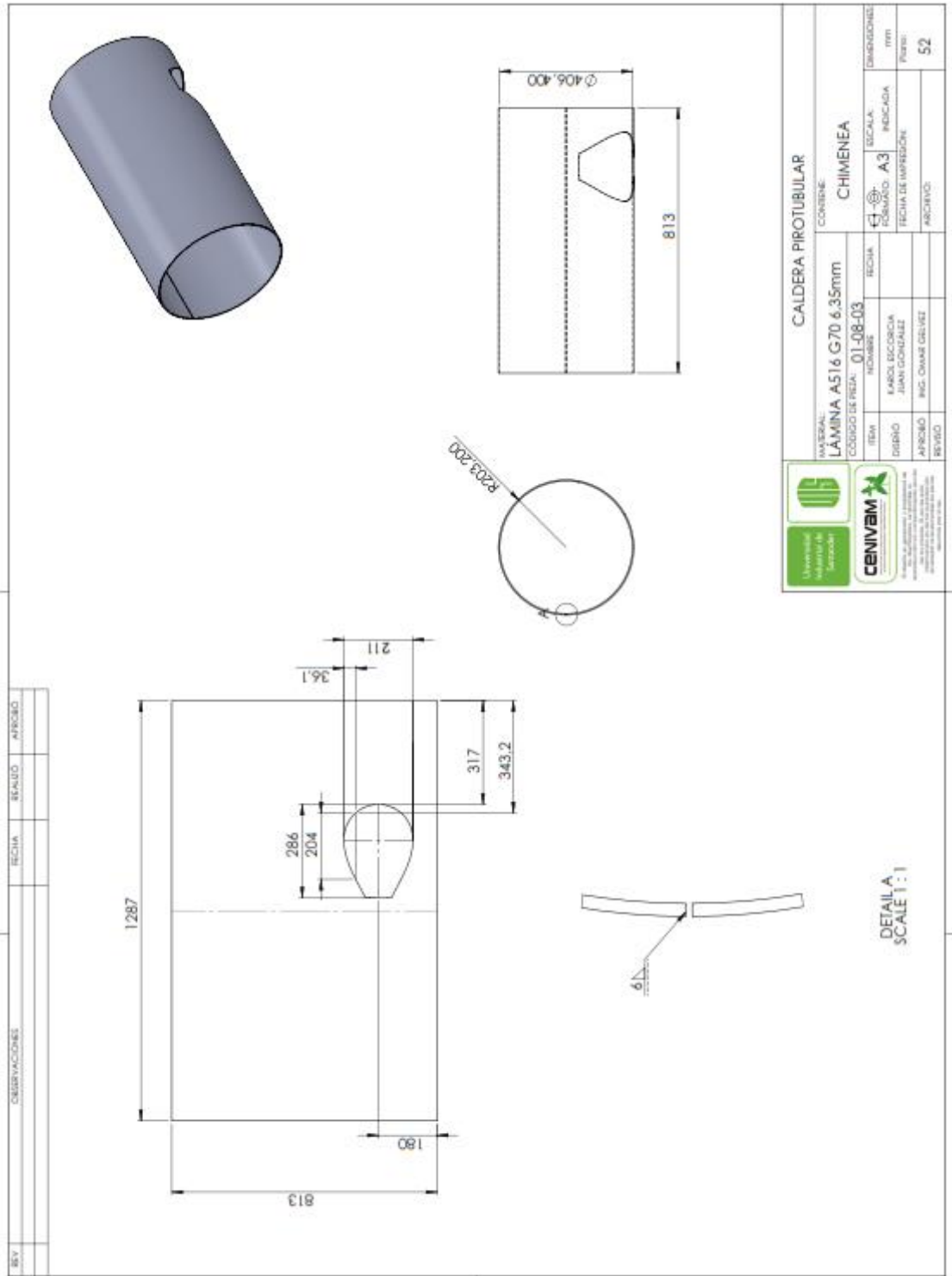
N.º DE ELEMENTO	N.º DE PIEZA	DESCRIPCIÓN	CANTIDAD
1	01-08-03	LÁMINA ASTM A516 G70 esp. 6.35mm	1
2	01-08-06	LÁMINA ASTM A516 G70 esp. 6.35mm	1
3	01-08-02	LÁMINA ASTM A516 G70 esp. 6.35mm	6
4	01-08-07	LÁMINA ASTM A516 G70 esp. 6.35mm	1
5	01-08-08	LÁMINA ASTM A516 G70 esp. 6.35mm	4
6	01-08-09	LÁMINA ASTM A516 G70 esp. 6.35mm	1
7	01-08-10	VARILLA A 36 3/8"	4
8	01-08-01	TORNILLO HEXAGONAL 3/8" X 2"	8
9	01-08-11	LÁMINA ASTM A516 G70 esp. 6.35mm	2
10	01-08-12	LÁMINA ASTM A516 G70 esp. 6.35mm	1
11	01-08-04	LÁMINA ASTM A516 G70 esp. 6.35mm	1
12	01-08-13	DAMPER	1

MATERIAL: INDICADO		CONTIENE: CALDERA PIROTUBULAR	
CHIMENEA			
ITEM	FECHA	ESCALA	DIMENSIONES
INDICADO	01-08	A3	mm
DISEÑO	KAROL ECCORCHA	FECHA DE IMPRESIÓN	Plano:
APROBADO	JUAN GONZALEZ	ARCHIVO:	49
REVISADO	ING. CHARR GONZALEZ		




CENIVAM  
 CENTRO NACIONAL DE INVESTIGACIONES Y DESARROLLO TECNOLÓGICO  
 INSTITUTO TECNOLÓGICO DE INVESTIGACIONES Y DESARROLLO TECNOLÓGICO  
 AV. BOGOTÁ 100 - 100 - BOGOTÁ, COLOMBIA  
 TEL: (57) 1 454 1000 - FAX: (57) 1 454 1001  
 WWW.CENIVAM.ORG.CO

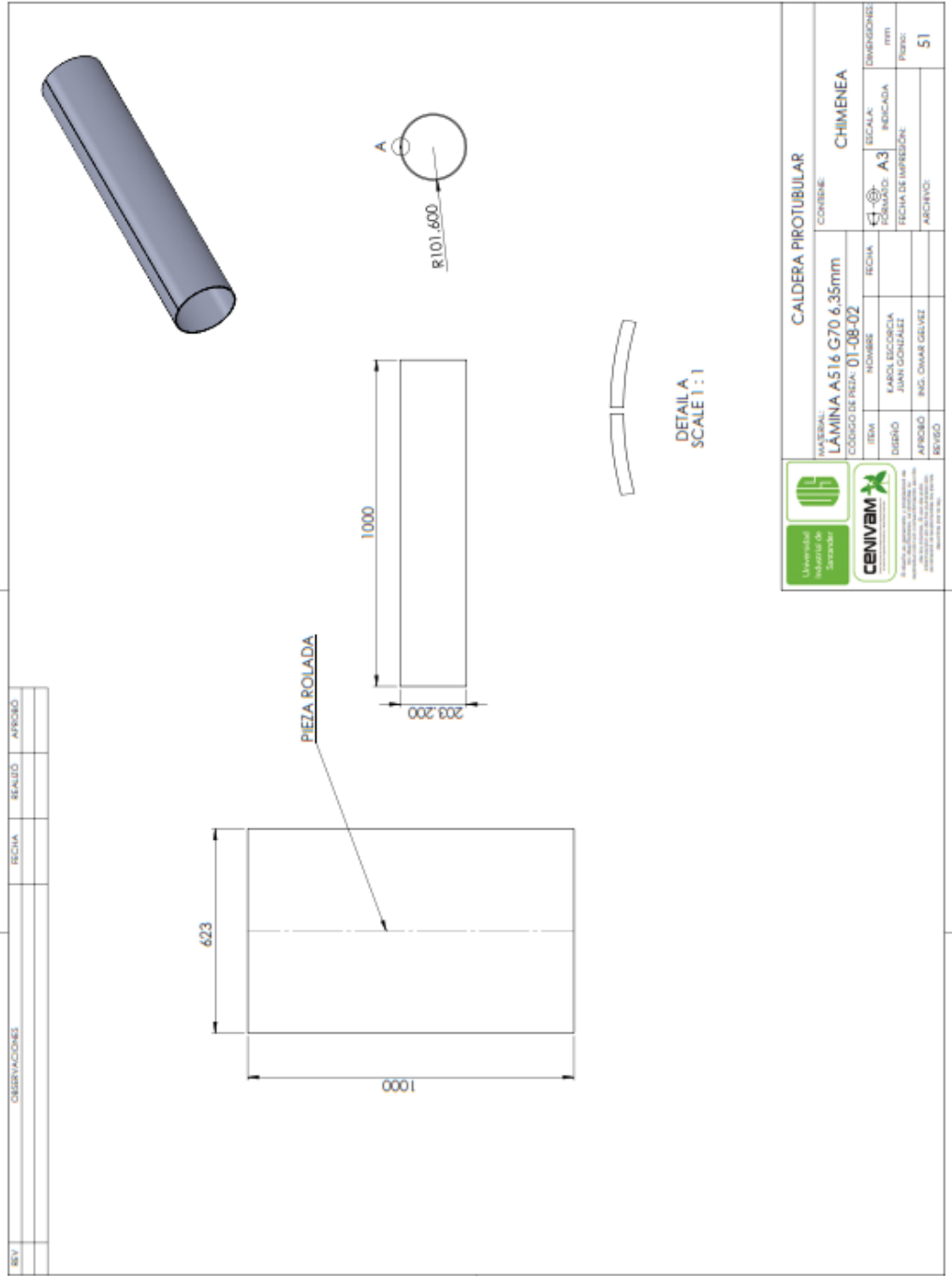




REV	DESBARRACIONES	FECHA	REALIZADO	APROBADO

 		<b>CALDERA PIROTUBULAR</b> CONTENIDO: <b>CHIMENEA</b>	
MATERIAL: <b>LÁMINA A516 G70 6.35mm</b> CÓDIGO DE PIEZA: <b>01-08-03</b>		ESCALA: <b>A3</b> INDICADA: <b> </b> DIMENSIONES: <b> </b> (mm) <b> </b>	DIMENSIONES: <b> </b> (mm) <b> </b>
ÍTEM: <b> </b> NOMBRE: <b> </b> FECHA: <b> </b>	NOMBRE: <b> </b> FECHA: <b> </b>	FECHA DE IMPRESIÓN: <b> </b> ARCHIVO: <b> </b>	ARCHIVO: <b> </b> PÁGINA: <b>52</b>
DIBUJO: <b> </b> AUTOR: <b> </b> APROBADO: <b> </b> REVISADO: <b> </b>	DIBUJO: <b> </b> AUTOR: <b> </b> APROBADO: <b> </b> REVISADO: <b> </b>	DIBUJO: <b> </b> AUTOR: <b> </b> APROBADO: <b> </b> REVISADO: <b> </b>	DIBUJO: <b> </b> AUTOR: <b> </b> APROBADO: <b> </b> REVISADO: <b> </b>

DETAIL A  
SCALE 1:1

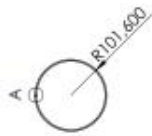
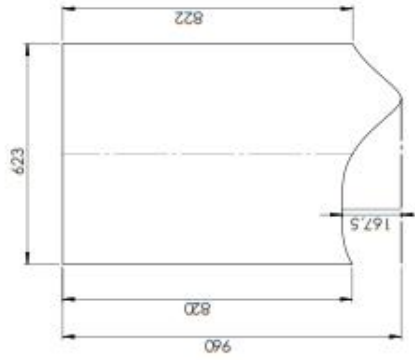
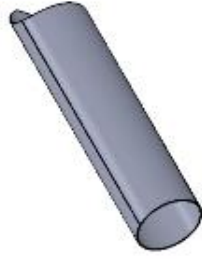


CALDERA PIROTUBULAR			
CONSIDERE:			
MATERIAL:	LÁMINA A516 G70 6.35mm	SECCION:	CHIMENEA
CODIGO DE PIEZA:	01-08-02	FECHA:	
ITEM:		NOMBRE:	
DISEÑO:	KAROL ESCOBEDA	FORNADOR:	A3
APROBADO:	JUAN GONZALEZ	FECHA DE IMPRESION:	
REVISOR:	ING. OMAR BELVEZ	ARCHIVO:	
DIMENSIONES:			mm
Plano:			51



**CENIVAM**  
 Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Científico y Tecnológico  
 Calle 13 de Septiembre, No. 1000, Esq. 10 y 11  
 Miraflores, Lima 18, Perú  
 Teléfono: (51) 1 476 1000  
 Fax: (51) 1 476 1001  
 E-mail: cenivam@cenivam.gob.pe

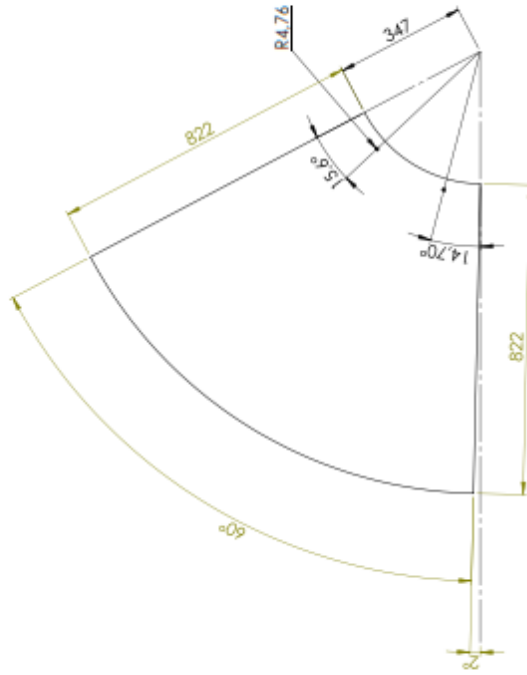
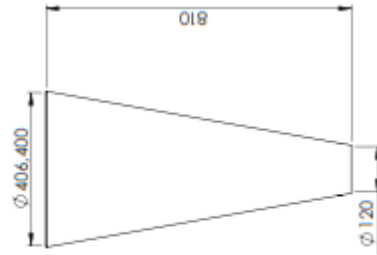
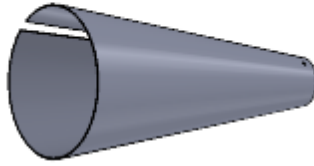
REV	COMENTARIOS	FECHA	REALIZADO	APROBADO



DETALL A  
SCALE 1:1

		<b>CALDERA PIROTUBULAR</b>			
MATERIAL: LAMINA ASTM A516 G70 6.35mm CODIGO DE PIEZA: 01-08-04		CONTEXTO: CHIMENEA			
ITEM:	NOMBRE:	FECHA:	ESCALA:	DIVISION:	ITEM:
DESBIO:	ELABORACION:	FECHA DE IMPRESION:	INDICADA:	ITEM:	ITEM:
APPROBADO:	ING. OMAR DELVEZ	ARCHIVO:			53

REV	OBSERVACIONES	FECHA	REALIZO	APROBADO



**CALDERA PIROTUBULAR**

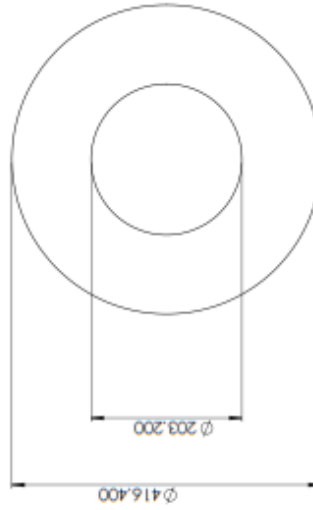
CONTIENE: **CHIMENEA**


MATERIAL: LAMINA ASTM A516 G70 6,35mm

CODIGO DE REA: 01-08-07

ITEM	NOMBRES	FECHA	ESCALA:	DIMENSIONES:
DISENO	ENRIQUE ESCOBAR		A3	mm
APROBADO	ING. OMAR GELVEZ		FECHA DE IMPRESION:	Pagina:
REVISADO			ARCHIVO:	54

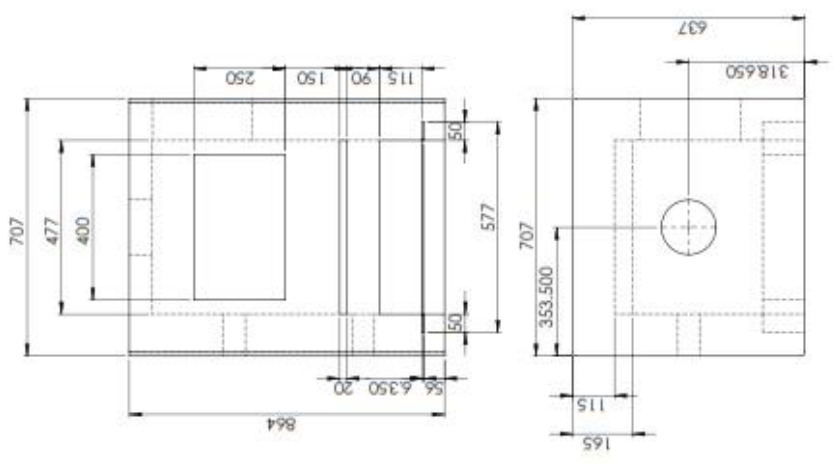
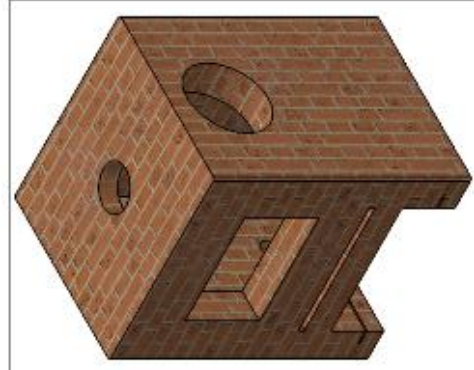
REV	OBSERVACIONES	FECHA	REALIZADO	APROBADO



 		<b>CALDERA PIROTUBULAR</b> CONTEXTO: <b>CHIMENEA</b>	
MATERIAL: <b>LAMINA ASTM A516 G70 6.35mm</b>		ESCALA: <b>A3</b>	
CODIGO DE REA: <b>01-08-06</b>		INDICADA: <b>A3</b>	
ITEM	NOMBRE	FECHA	FECHA DE IMPRESION
0001	KAROL BICORCIA JOAN GONZALEZ		
0002	APROBADO ING. ONAIR GELVEZ		
0003	REVISADO		
DIMENSIONES mm		PÁGINA: <b>55</b>	



REV	COMENTARIOS	FECHA	REALIZO	APROBO

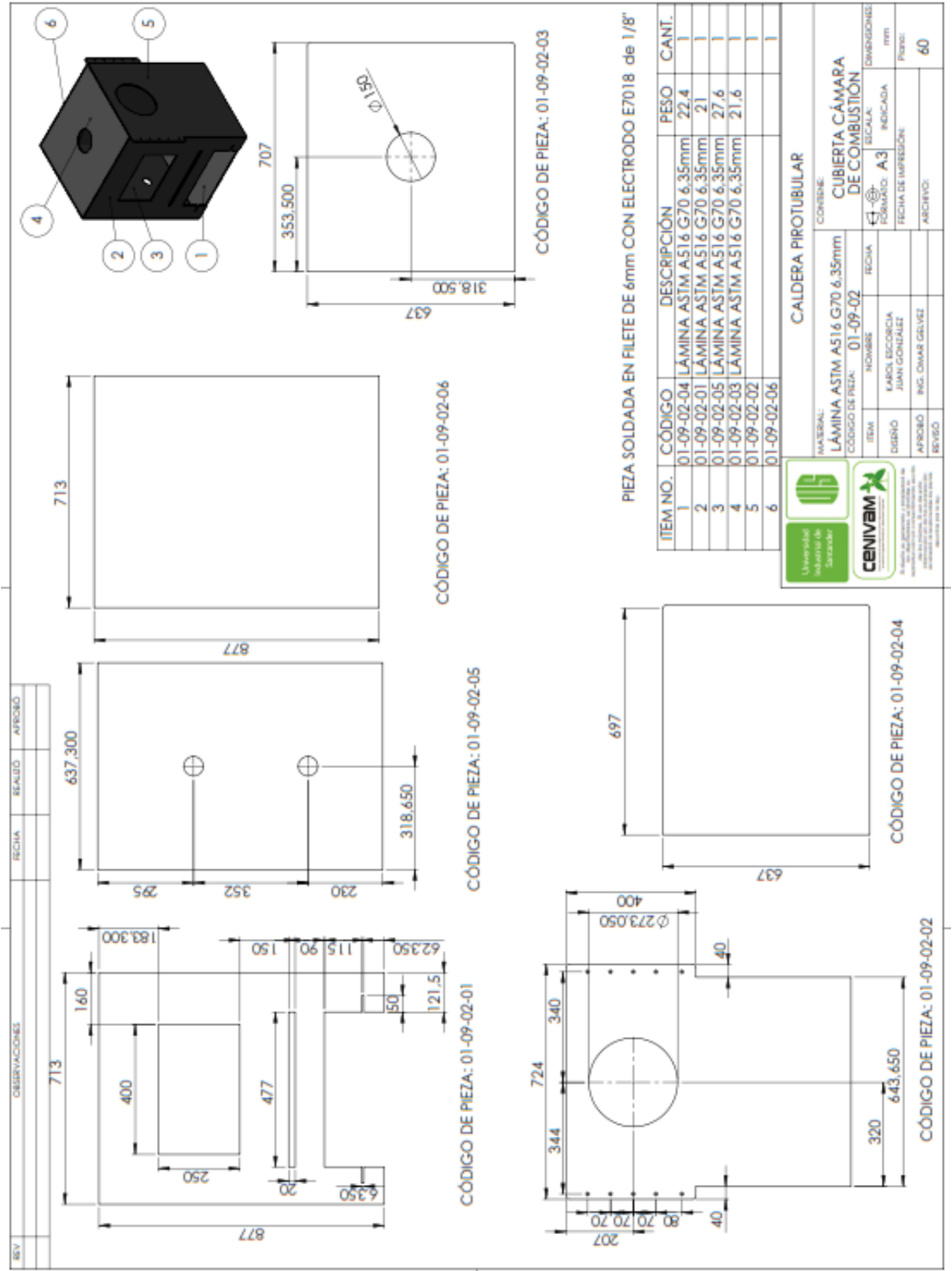


**CENIVAM**  
CENTRO NACIONAL DE INVESTIGACIONES Y DESARROLLO TECNOLÓGICO

**CALDERA PIROTUBULAR**

CONTIENE: REFRACTARIO

MATERIAL: LADRILLO REFRACTARIO U-33	FECHA:	ESCALA: DIMENSIONES: mm
CODIGO DE PROY: 01-09-01	REVISION:	INDICADA: A-3
ITEM: NOMBRE: FÁBRICA: ESCORCIA	FECHA DE IMPRESIÓN:	PROYECTO: 59
DESENHO: JAVIER GONZALEZ	ARCHIVO:	
APROBADO: ING. OMAR DELVEZ		
REVISADO:		



REV	FECHA	REALIZÓ	APROBÓ

OBSERVACIONES

ITEM NO.	CÓDIGO	DESCRIPCIÓN	PESO	CANT.
1	01-09-02-04	LAMINA ASTM A516 G70 6.35mm	22.4	1
2	01-09-02-01	LAMINA ASTM A516 G70 6.35mm	21	1
3	01-09-02-05	LAMINA ASTM A516 G70 6.35mm	27.6	1
4	01-09-02-03	LAMINA ASTM A516 G70 6.35mm	21.6	1
5	01-09-02-02			
6	01-09-02-06			

MATERIAL:		DESCRIPCIÓN		PESO		CANT.	
LAMINA ASTM A516 G70 6.35mm		CUBIERTA CÁMARA DE COMBUSTIÓN		22.4		1	
CÓDIGO DE PIEZA: 01-09-02		FECHA					
ITEM		NOMBRE					
BASIS TECNICA		INDICADA					
DISEÑO		FECHA DE IMPRESIÓN					
APROBÓ		ARCHIVO					
REVISÓ							

**CENIVAM**
  
 Centro Nacional de Investigación y Desarrollo en Ingeniería y Tecnología

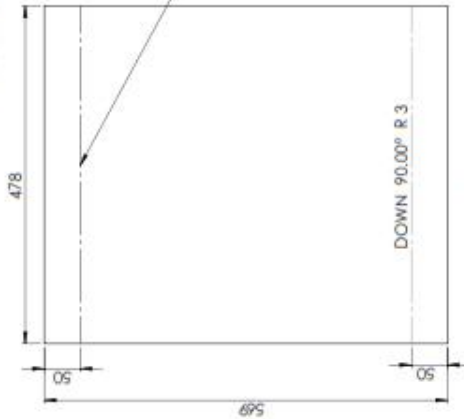
REV.	COMENTARIOS	FECHA	SEALDO	APELLIDO



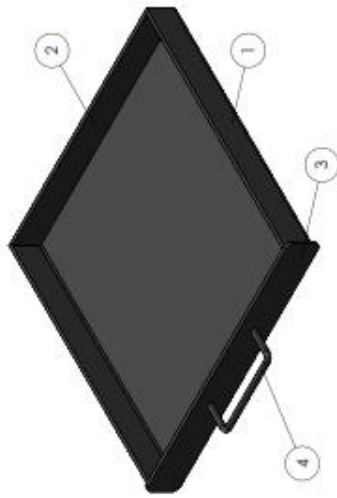
CÓDIGO DE PIEZA:01-09-04-02



CÓDIGO DE PIEZA:01-09-04-03



CÓDIGO DE PIEZA:01-09-04-01



CÓDIGO DE PIEZA:01-09-04-04

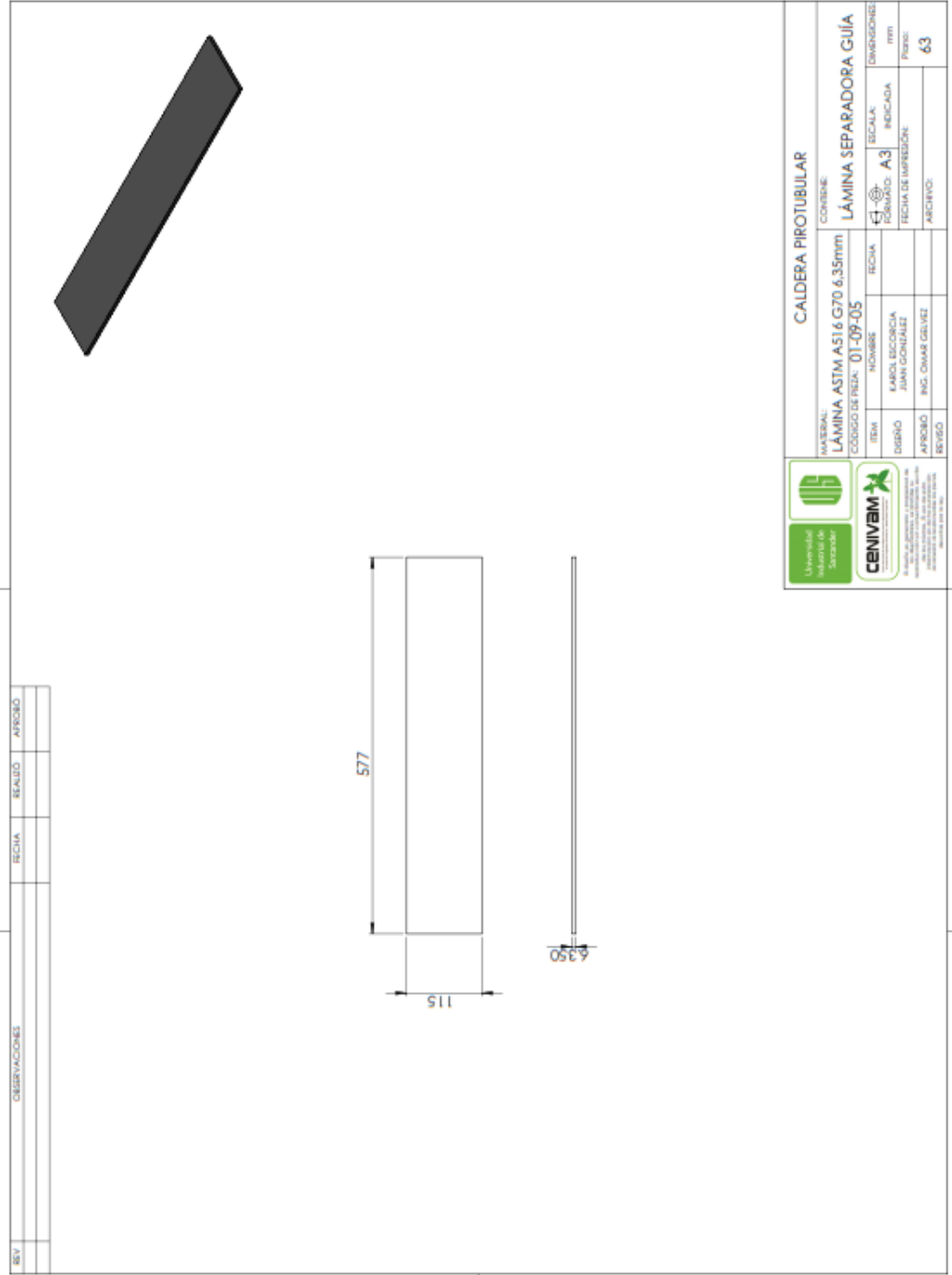
ITEM NO.	CÓDIGO	DESCRIPCIÓN	PESO	CANT.
1	01-09-04-01	LAMINA ASTM A516 G70 6.35mm	13.6	1
2	01-09-04-02	LAMINA ASTM A516 G70 6.35mm	1.1	1
3	01-09-04-03	LAMINA ASTM A516 G70 6.35mm	1.4	1
4	01-09-04-04	VARILLA 3/8"	0.1	1

**INDICADO**  
 CÓDIGO DE PIEZA: 01-09-04

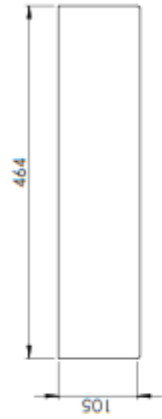
ITEM:	NOMBRE:	FECHA:	ESCALA:	DIMENSIONES:
01-09-04-01	KAROL ESCOBAR		A3	
01-09-04-02	JUAN GONZALEZ			
01-09-04-03	ING. OMAR GONZALEZ			
01-09-04-04				

MATERIAL: CALDERA PIROTUBULAR  
 CONTENEDOR: BANDEJA DE CENIZAS

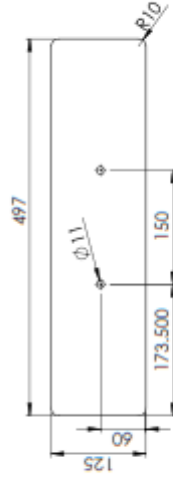
ARCHIVO: 62



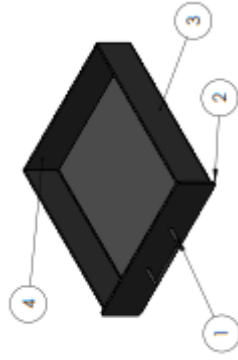
REV	RESERVACIONES	FECHA	REALIZADO	APROBADO



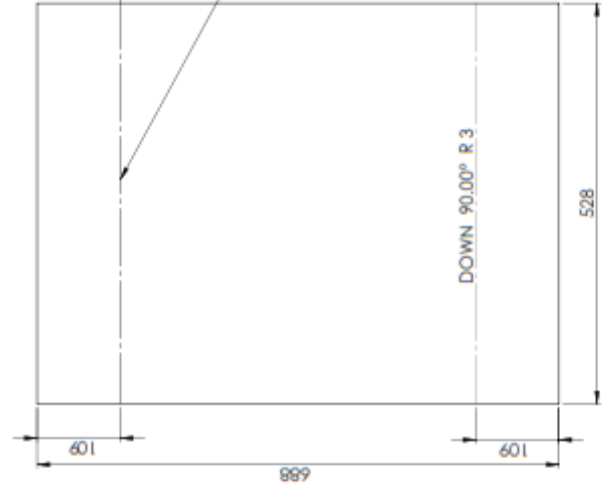
CÓDIGO DE PIEZA:01-09-03-02



CÓDIGO DE PIEZA:01-09-03-03



CÓDIGO DE PIEZA:01-09-03-04



CÓDIGO DE PIEZA:01-09-03-01

ITEM NO.	CÓDIGO	DESCRIPCIÓN	PESO	CANT.
1	01-09-03-04	VARILLA 3/8"	0.1	1
2	01-09-03-03	LAMINA ASTM A516 G70 6.35mm	3.1	1
3	01-09-03-01	LAMINA ASTM A516 G70 6.35mm	18.1	1
4	01-09-03-02	LAMINA ASTM A516 G70 6.35mm	2.5	1

MATERIAL		INDICADO		CONTIENE	
		CÓDIGO DE PIEZA: 01-09-03		CAJÓN DE CENIZAS	
ITEM	NOMBRE	FECHA	ESCALA	INDICADA	DIMENSIONE: mm
DISÑO	KAROL ESCOBAR		FORMAÑO: A3		
APROBADO	JUAN GONZALEZ		FECHA DE IMPRESIÓN:		Página: 61
REVISADO	ING. OMAR GELVEZ		ARCHIVO:		

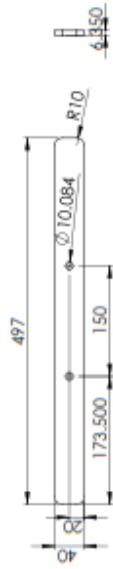
REV	DESCRIPCIONES	FECHA	REALIZO	APROBADO



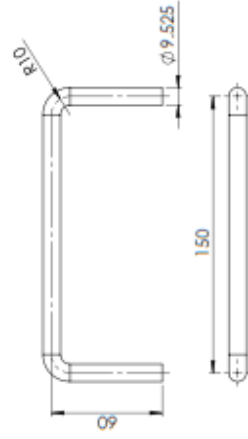
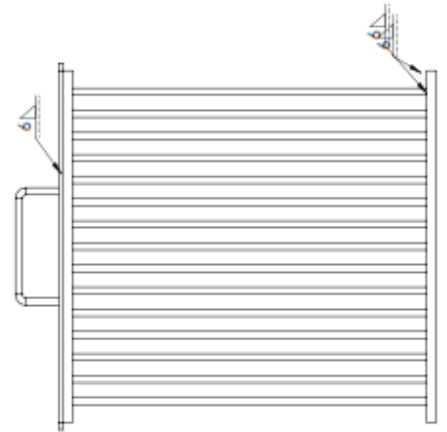
CÓDIGO DE PIEZA:01-09-06-01



CÓDIGO DE PIEZA:01-09-06-02



CÓDIGO DE PIEZA:01-09-06-03



CÓDIGO DE PIEZA:01-09-06-04

ITEM NO.	CÓDIGO	DESCRIPCIÓN	PESO	CANT.
1	01-09-06-02	VARILLA 3/8"	0.3	15
2	01-09-06-01	LAMINA ASTM A516 G70 6.35mm	1	2
3	01-09-06-03	LAMINA ASTM A516 G70 6.35mm	1	1
4	01-09-06-04	VARILLA 3/8"	0.1	1

**MATERIAL:** INDICADO

**CÓDIGO DE PIEZA:** 01-09-06

**ITEM:** NOMBRE

**FECHA:** EMBOL. ESCORCHIN

**DESEN:** JUAN GONZALEZ

**AFRIBO:** ING. OMAR DELVEZ

**REVISO:**

**CONTENE:** PARRILLA

**ESCALA:** INDICADA

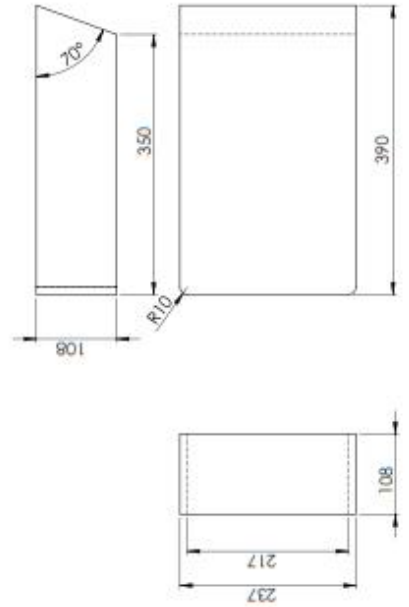
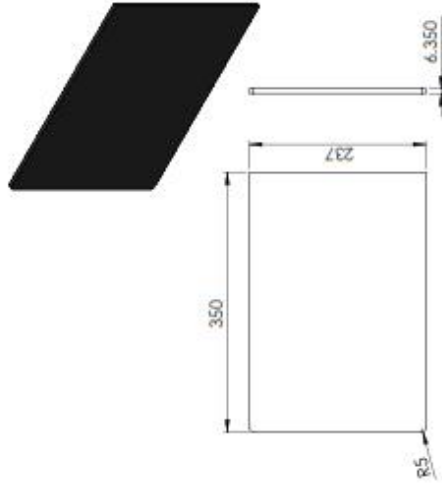
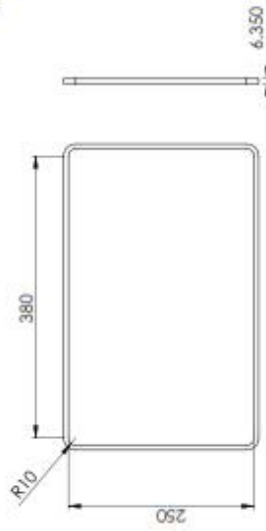
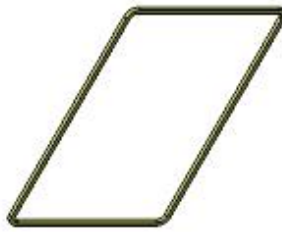
**FORMATO:** A3

**FECHA DE IMPRESIÓN:**

**ARCHIVO:**

**DIMENSIONES:** 64

REV	DESCRIPCIONES	FECHA	REALIZADO	APROBADO



MATERIAL:		CONTIENE:		DIMENSIONES:	
INDICADO		PUERTA CÁMARA DE COMBUSTIÓN		mm	
CÓDIGO DE PIEZA:	01-09-07	RECHA:	RECHA:	ESCALA:	ESCALA:
IBRA:	NOVIEMBRE	RECHA:	RECHA:	FORMADO:	A3
PROBADO:	RAMÓN ESCOBARCA JUAN GONZÁLEZ	RECHA:	RECHA:	FECHA DE INSPECCIÓN:	
APROBADO:	ING. OMAR GELVEZ	RECHA:	RECHA:	ARCHIVO:	
REVISADO:		RECHA:	RECHA:		67

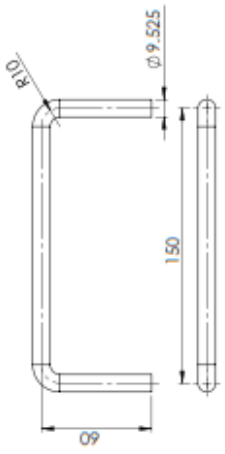


REV	REVISIÓN	FECHA	REALIZADO	APROBADO

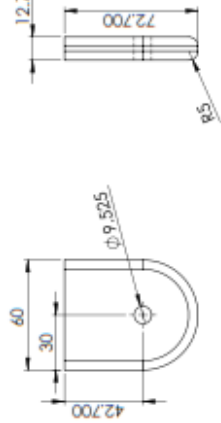
REVISIÓN	FECHA	REALIZADO	APROBADO



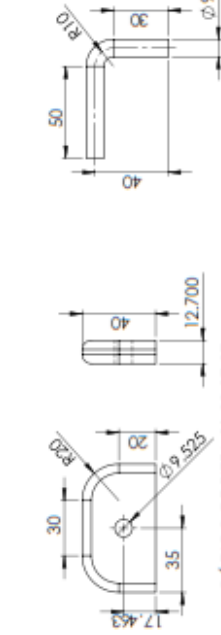
CÓDIGO DE PIEZA:01-09-07-01



CÓDIGO DE PIEZA:01-09-07-03

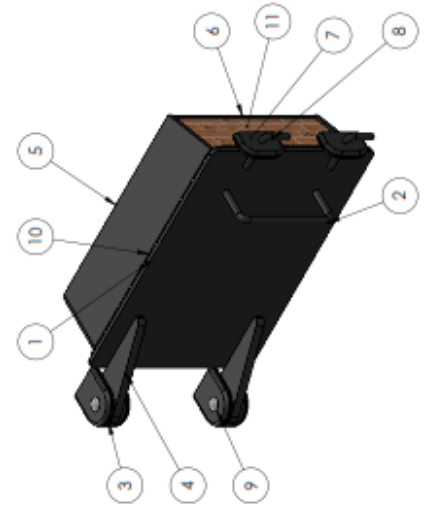


CÓDIGO DE PIEZA:01-09-07-02



CÓDIGO DE PIEZA:01-09-07-07

CÓDIGO DE PIEZA:01-09-07-08



ITEM NO.	CÓDIGO	DESCRIPCIÓN	PESO	CANTI.
1	01-09-07-04	ASTM A516 G70 6.35mm	5,6	1
2	01-09-07-03	VARILLA DE 3/8"	0,1	1
3	01-09-07-02	ASTM A516 G70 12,7mm	0,4	4
4	01-09-07-01	ASTM A516 G70 12,7mm	0,6	2
5	01-09-07-05	ASTM A516 G70 6,35mm	5,7	1
6	01-09-07-06	ASTM A516 G70 6,35mm	4,1	1
7	01-09-07-07	ASTM A516 G70 12,7mm	0,2	2
8	01-09-07-08	VARILLA DE 3/8"	0,1	2
9	01-9-07-11	TORNILLOHEXGB 3/8"x21/2		2
10	01-09-07-09	CORDÓN SEALCO 1/4"MT-5010		1
11	01-09-07-10	LADRILLO REFRACTARIOU-33		1

**INDICADO**  
CÓDIGO DE PIEZA: 01-09-07

**MATERIAL:** CALDERA PIROTUBULAR

**CONTEXTO:** PUERTA CÁMARA DE COMBUSTIÓN

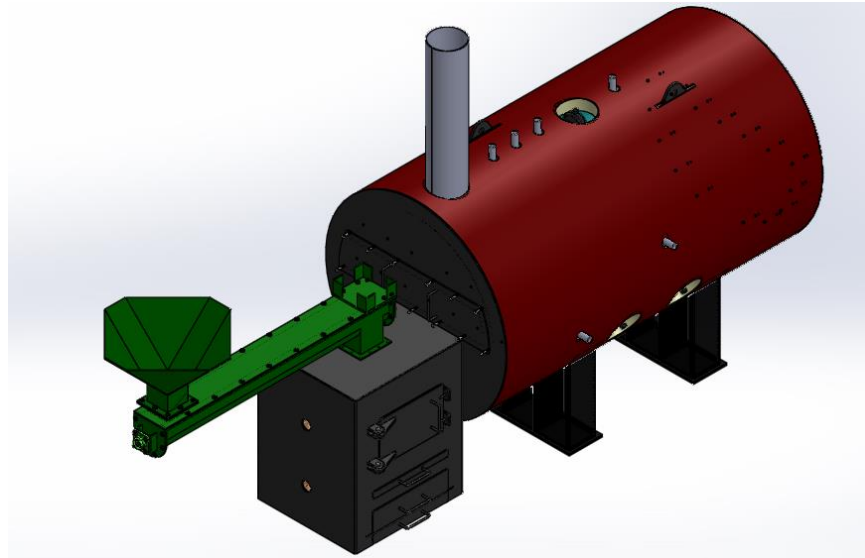
ITEM	NOMBRE	FECHA	ESCALA	DIMENSIONES
1	KAROL ESCOBICA		A3	mm
2	JUAN GONZALEZ		A3	mm
FECHA DE IMPRESIÓN:				Plano:
APROBADO: ING. OMAR GELVEZ				65
REVISADO:				ARQUIVO:

Logo: Universidad Industrial de Santander (UIS) and CENIVIM.

Anexo I. Manual de funcionamiento y Mantenimiento de la caldera

Fuente: Los Autores

# MANUAL DE FUNCIONAMIENTO Y MANTENIMIENTO DE LA CALDERA DE BIOMASA



## Contenido

1	DESCRIPCIÓN DE LA CALDERA .....	229
1.1	FICHA TÉCNICA.....	229
1.2	PARTES DE LA CALDERA DE BIOMASA .....	230
1.2.1	Sistemas de la caldera.....	230
1.2.2	Controles instalados .....	234
1.2.3	Instrumentación .....	235
2	MODO DE OPERACIÓN DE LA CALDERA .....	236
2.1	CICLO DE ENCENDIDO Y APAGADO.....	236
3	MANTENIMIENTO.....	238
3.1	LIMPIEZA .....	238
3.2	INSPECCIÓN.....	242
3.3	MEDIDAS DE PROTECCIÓN Y SEGURIDAD .....	245

## 1 DESCRIPCIÓN DE LA CALDERA

### 1.1 FICHA TÉCNICA

ESPECIFICACIONES DE LA CALDERA DE BIOMASA	
Tipo	Horizontal
Capacidad	4,5 BHP
Kilogramos de vapor generado	60 kg/h
Presión de diseño	150 psi
Combustible	Bagazo de zunglía, Palmarosa, Lipia alba y caña
Presión máxima para el McDonell	150 psi
Presión de alivio válvula de seguridad	150 psi
Peso Vacía	1683,2 kg
Volumen de agua en la caldera llena	1 m <sup>3</sup>
Peso llena	2683,2 Kg

La caldera cuenta con una cámara de combustión vertical de forma de paralelepípedo, y un dosificador que suministra el combustible (residuos de la destilación de herbáceas como zunglía, palmarosa y lipia alba) a través de una hélice que comunica la tolva de almacenamiento y el interior de la cámara de combustión; esta hélice esta acoplada de forma directa a un moto-reductor.

Las partículas de combustible caen por gravedad a la parrilla ubicada en la parte inferior de la cámara de combustión, de forma lateral ingresa el aire necesario para la combustión, esta alimentación de aire se hace posible a través ventiladores, con el objetivo ideal de que la partícula se queme dentro de la cámara antes de que llegue a la parilla, sin embargo para el encendido de la cámara de combustión se recomienda una precarga que garantice una llama incineradora, y esta a su vez es

arrastrada por la corriente ascendente de aire que provoca el tiro natural de la chimenea a través del haz de tubos de la caldera.

De aquí se obtiene la energía necesaria para cambiar de estado el agua de líquido a vapor, por medio de la transferencia de calor de las paredes hacia el interior de la camisa de agua.

Una vez quemadas las partículas pasan al ciclón donde se recolectan las cenizas, es decir, las partículas más grandes con el fin de disminuir el impacto ambiental que genera la combustión. Finalmente los gases libres de cierto tipo de material particulado son liberados a la atmósfera a través de la chimenea.

El agua entra al tanque central de la caldera a través de una bomba desde un tanque de almacenamiento exterior; la operación de esta bomba se hace por medio de un dispositivo llamado McDonell que controla el encendido y el apagado respondiendo a una señal de entrada, que es el nivel mínimo y máximo de agua dentro de la caldera.

Una vez que el agua entra a la caldera intercambia calor con la pared de la cámara de combustión, el vapor generado es almacenado en la parte superior del tanque central de agua donde finalmente es regulado con una válvula reguladora para su uso final.

## **1.2 PARTES DE LA CALDERA DE BIOMASA**

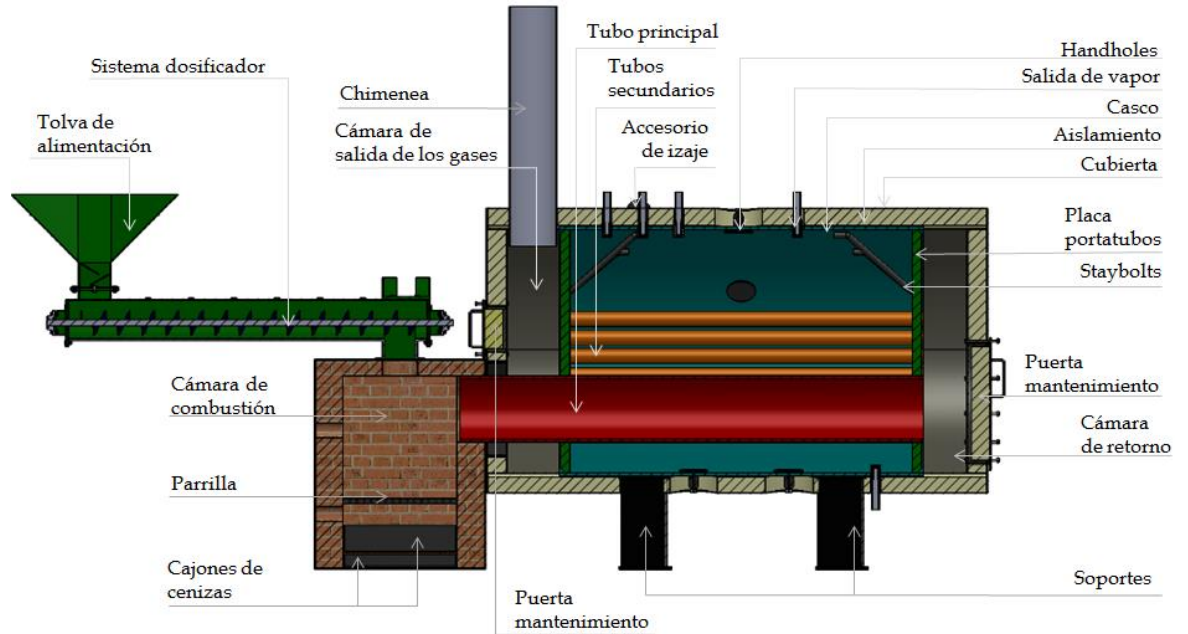
### **1.2.1 Sistemas de la caldera**

La caldera de biomasa tiene tres grandes sistemas:

- La cámara de combustión.
- El cuerpo central de la caldera.

- El sistema de salida y limpieza de gases (chimenea).

A continuación se presentan los componentes de la caldera:



**El casco:** Es el cuerpo de la caldera en cuyo interior estará contenido el haz de tubos de humo. Como recipiente consta básicamente de 2 partes principales: la cámara de agua, es el espacio que ocupa el agua y que según la norma ASME no debe ser inferior a  $2/3$  del diámetro interno del casco; la cámara de vapor, es el espacio comprendido arriba del nivel del agua y donde una vez realizado el intercambio de calor será el contenedor del vapor. Además consta de accesorios de izaje que facilita su transporte y aberturas para su mantenimiento (*handholes*). Para su diseño se implementó acero ASTM A516 grado 70.

**Haz de tubos:** Son tubos que se encuentran soportados y unidos en los extremos a la placa portatubos, van expandidos, biselados y pestañeados; o soldados según los criterios de construcción. Es allí donde circulan los gases productos de la

combustión y por los cuales se dará el intercambio de calor con el agua. Los pasos en la caldera de biomasa son dos, el primero llamado tubo principal, es un tubo de 10[in] de diámetro y que recibe directamente de la cámara de combustión los gases calientes de dicho proceso, y el segundo llamado tubos secundarios, que son 44 tubos de 2[in] de diámetro por donde retornan los gases hasta su salida por la chimenea. Adicional cuenta con *staybolts* soldados a la placa portatubos, que son tirantes que ayudan a soportar la presión de trabajo de la caldera. En el diseño se implementó ASTM A516 grado 70 para la placa portatubos, un tubo ASTM A106 para el tubo principal, y tubos ASTM A192 como tubos secundarios.

**Cámara de combustión:** También conocido como hogar, constituye la parte de la caldera donde se realiza la combustión, por medio de la mezcla del aire (comburente) suministrado por un ventilador y el elemento que arde en este caso biomasa (combustible) que llega a la cámara por medio de un dosificador. El hogar lleva ladrillos refractarios pegados entre sí por cemento refractario y está cubierto por una lámina ASTM A516 grado 70 con  $\frac{1}{4}$  [in] de espesor. Esta cámara consta de 3 partes fundamentales: parrilla, que es un arreglo de varillas en forma de rejilla encima de la cual se quema la biomasa; los cajones de ceniza, que son los receptores y almacenes de la ceniza residuo de la combustión; y la salida de los gases, que es la unión entre el hogar y el tubo principal de la caldera.

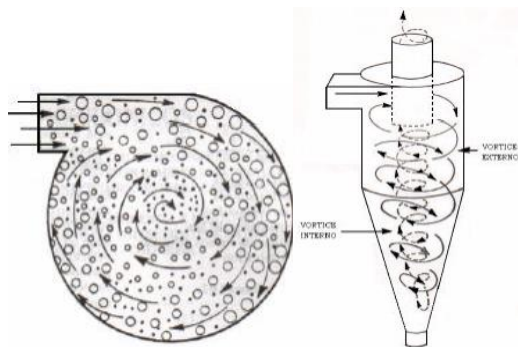
**Sistema dosificador:** Es un dispositivo para transportar la biomasa por medio de un tornillo sin fin desde una tolva de entrada que alberga el combustible hasta la cámara de combustión, accionado mediante un moto-reductor acoplado directamente a su eje. El sistema de dosificación fue un trabajo de grado previo al diseño de la caldera.

**Cámaras de humo:** Tiene como objetivo captar los gases calientes del tubo principal y reencausarlos hacia el segundo paso del haz de tubos de humo por

medio de la cámara de retorno, para posteriormente conducirlos a la chimenea por medio de la cámara de salida de los gases y expulsarlos al ambiente. El diseño implementó acero ASTM A516 grado 70 para las cámaras de humo.

**Chimenea:** Es el ducto que conduce por medio de tiro natural los gases producto de la combustión hacia el ambiente después de que estos atraviesan la caldera. En este proyecto se implementó un ciclón en medio de la chimenea para que remueva el material particulado de la corriente gaseosa, básicamente es una cámara de sedimentación en la que la aceleración gravitacional se sustituye con aceleración centrífuga. En un ciclón los gases entran tangencialmente a la cámara superior y descienden hasta la sección cónica, luego ascienden y salen por un ducto vertical centrado.

Comportamiento de los gases en un ciclón.



Fuente: ECHEVERRI, Carlos. Diseño óptimo de ciclones.

**Cubiertas:** Son láminas esmaltadas lisas de acero inoxidable S304 2B que cubren el cuerpo de la caldera, previo a su montaje el casco es dotado de un aislamiento térmico de fibra de vidrio.

**Puertas:** Para el acceso a los tubos se dispone de dos puertas localizadas frente a los mismos y ubicadas convencionalmente en las cámaras de humo, estos accesos servirán para la limpieza y mantenimiento de la caldera. En la cámara de

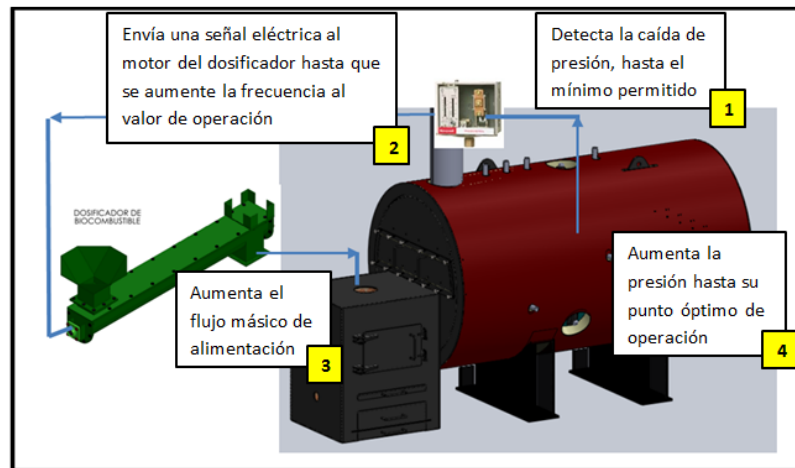
combustion se cuenta con una puerta de alimentacion para cuando el combustible a utilizar sea de proporciones mayores que las permitidas por el disificador (residuos de caña, leña y carbón). Todas las puertas son de acero ASTM A516 grado 70.

**Soportes:** Conocidos también como silletas. Independientemente de las cimentaciones para la caldera, el cuerpo o casco debe montarse en una base de acero estructural, que a su vez descansa sobre el piso. El diseño implementó acero ASTM A283 grado C para los soportes.

### 1.2.2 Controles instalados

La caldera cuenta con los siguientes controles:

- **Válvula de seguridad:** es una válvula que sirve para aliviar la sobrepresión del equipo y evitar que el equipo falle catastróficamente por no poder resistir una presión mayor a la cual fue diseñado. Esta válvula esta calibrada a una presión de 150 psi (marca Tecval).
- **McDonell:** Este dispositivo es un control de nivel de agua que sirve para mantener en un nivel seguro el agua dentro de la caldera, este control prende y apaga la bomba para mantener un rango de nivel de agua dado por el ASME que es de 2/3 de la altura del tanque.
- **Variador de velocidad:** este dispositivo permite prender y apagar el motor-reductor del sistema de alimentación de combustible, además de variar su velocidad en ocho posibles opciones. Esto permite regular y controlar la cantidad de cascarilla que cae a la cámara de combustión así como la generación de vapor.



### 1.2.3 Instrumentación

En cuestiones de instrumentación, la caldera cuenta con los siguientes instrumentos:

- **Manómetro:** Registra la presión dentro de la caldera con el fin de establecer la presión de operación, y controlar todo el sistema para que esta se mantenga constante si el consumo de vapor es constante y la alimentación de combustible es constante. El rango del manómetro es de 0-300 psi como lo estipulado en la norma ASME.
- **Columna de nivel de agua:** Este instrumento está construido por una columna de vidrio el cual permite ver al operador de la caldera el nivel de agua dentro de la cámara.
- **Válvulas:** las válvulas y demás accesorios, permiten regular la operación de la caldera tanto de entrada de agua como de salida de vapor entre otras.

## 2 MODO DE OPERACIÓN DE LA CALDERA

### 2.1 CICLO DE ENCENDIDO Y APAGADO

Antes de prender la caldera se deben tener en cuenta las siguientes instrucciones:

- Verificar que el tanque de suministro de agua de la caldera tenga la cantidad de agua necesaria para la operación de la caldera según la norma no debe ser menor a  $2/3$  de la altura del tanque.
- Llenar completamente la tolva de alimentación con la biomasa disponible evitando que caiga objetos extraños o materiales duros que puedan dañar el tornillo de alimentación.
- Limpiar el ciclón de las posibles cenizas producto de anteriores procesos.
- Chequear que la válvula drenaje de la caldera, la salida de vapor y la válvula de drenaje del McDonell este cerrada. Esto con el fin de que el sistema alcance la presión de operación rápidamente.
- Verificar que las siguientes válvulas estén abiertas:
  - a) Las válvulas del nivel de agua.
  - b) Todas las válvulas de la línea de alimentación de agua a la caldera.
- Verificar que la parrilla y los cajones de ceniza estén limpios.

## Procedimiento de encendido

1. Accione el interruptor que suministra energía eléctrica a la bomba, si el nivel se encuentra bajo la bomba se prende; en caso contrario, asegúrese que el nivel este dentro del rango del funcionamiento chequeando la columna de agua del medidor de nivel.
2. Espere a que la bomba se apague, esto habrá indicado que la caldera tiene el agua suficiente para trabajar. Si la bomba no se encendió, tenga en cuenta que más adelante, cuando se empiece a consumir vapor, esta deba encenderse.
3. Introduzca una cierta cantidad de papel periódico por la puerta de inspección y encienda con un fósforo.
4. Coloque el variador de velocidad al mínimo
5. Encienda en motor de alimentación de combustible.
6. Aumente gradualmente la alimentación girando el variador mientras todo el sistema se calienta.
7. Si al cabo de un tiempo no se observa una llama apreciable dentro de la cámara de combustión, reduzca la alimentación y verifique que la parrilla no este tapada por el combustible que no se ha quemado. Retome de nuevo desde el paso 3..
8. El variador de velocidad posee diferentes posiciones desde un mínimo hasta un máximo.

## Cuidados de la caldera de biomasa

- En operación: la eficiencia y la capacidad total de una caldera dependen del estado de las superficies de transferencia, por lo tanto la superficie externa de los tubos debe permanecer razonablemente limpia de depósitos, en la caldera de biomasa se implementaron *handholes* que permiten la buena

inspección interna. Además el hollín provocado por el combustible suele dejar rastros de material particulado antes de llegar al ciclón y puede en el peor de los casos provocar taponamientos por eso se recomienda revisar el interior de la caldera cada mes.

- Durante la apagada: cuando la caldera deba permanecer apagada por un tiempo considerable, se debe llenar totalmente de agua y desairada si la caldera esta fuera de servicio un par de semanas, o se desocupa y drena totalmente si esta apagada durante un tiempo muy largo.

Si se saca la caldera de servicio se deben remover los depósitos acumulados que puedan causar corrosión.

### 3 MANTENIMIENTO

#### 3.1 LIMPIEZA

La Cámara de combustión: El procedimiento recomendado para limpiar a diario la cámara es el siguiente:

- El equipo debe estar a baja temperatura preferiblemente a temperatura ambiente, para ello debe estar apagado unas 5 horas anticipadamente.
- retirar los cajones de ceniza y la parilla.
- Abrir la compuerta de inspección o de encendido.
- Con un cepillo o una escoba limpiar toda suciedad y rastro de biomasa.

Nota: La importancia de limpiar la cámara de combustión radica en que, el cumulo de cenizas se vuelve por así decirlo en un parasito que impide la buena combustión de la biomasa entrante, haciendo que la eficiencia del equipo baje y con ello el consumo de combustible aumente.

Purga del McDonell: Este dispositivo acumula residuos que deben ser removidos abriendo la válvula de drenaje.

Tanque central: Semanalmente descargue todo el tanque central abriendo la válvula que se encuentra en la parte inferior de la caldera, esto permitirá remover las impurezas presentes en el agua que se está utilizando. Haga un enjuague de este cargándolo nuevamente con agua. Este procedimiento se hace con el fin de evitar que se formen capas de residuos dentro de la camisa de agua aislando el sistema y aumentando el riesgo de que la caldera se recaliente porque se aísla la transferencia de calor de las paredes al agua. La caldera de biomasa cuenta alrededor de su cuerpo con 8 *handholes* de inspección y lavado, éstos deben abrirse una vez cada tres meses con el fin de introducir una manguera con agua a presión y poder lavar la caldera en su interior, si se observa acumulación de residuos en las paredes, es importante añadir un disolvente al agua para eliminar los residuos. La evacuación de esta agua de lavado se hace abriendo la válvula de drenaje.

Cámaras de gases: gracias a que se cuenta con puertas de mantenimiento delanteras y traseras con total acceso a todos y cada uno de los tubos de humos, la caldera tiene la posibilidad de limpiarse en su totalidad, como se trata de material particulado lo ideal es que dichas puertas se abran cada semana y se revise el estado del haz de tubos y así evitar taponamientos.

Ciclón: puesto que es el sistema encargado de que el hollín no salga al ambiente, se debe vaciar las cenizas lo mas regularmente posible, preferiblemente a diario.

## PROGRAMA DE MANTENIMIENTO DIARIO

1) Purgue la caldera con regularidad de acuerdo con los requisitos, el número y frecuencia de las purgas depende de la cantidad de agua de alimentación y debe ser determinado por un especialista en el tratamiento de aguas.

2) El procedimiento correcto de la purga es el siguiente:

- a. Subir el nivel de agua en el visor de cristal hasta la mitad, esta operación se realiza colocando el interruptor de la bomba en "manual", desconecte para conseguir el nivel.
- b. Habrá la válvula de purga de fondo, primero poco a poco y después por completo, por el tiempo establecido por el análisis del agua, y luego cierre rápidamente.

**Importante:** Cuando este purgando nunca deje que desaparezca el agua del nivel visible.

- c. Purgue la columna de agua del McDonnell dos (2) veces al día o cuando menos una vez por turno de trabajo por el tiempo aproximado de 4 segundos, esto mantendrá las conexiones de la columna de agua libre de los sedimentos ocasionan fallas gravísimas en este control y consecuentemente en la caldera.

**Importante:** Siempre señale o recuerde el nivel de agua antes de las purgas y después de efectuadas las mismas, si el nivel queda más arriba, baje poco a poco con la purga de la columna; el mantener un sobrenivel de agua en esta cámara de evaporación en la caldera.

3) Cuando arranque la caldera verifique siempre el buen funcionamiento de todos los elementos y siempre lleve registros de presión y temperatura de los gases, esto dará un buen indicio para proceder a la limpieza de los tubos de fuego.

## **PROGRAMA DEMANTENIMIENTO MENSUAL**

- 1) Desconecte la energía del breaker principal y limpie con cuidado el polvo de los controles eléctricos, además revise los contactos de los arrancadores, mantenga siempre cerrada la puerta del gabinete de controles.
- 2) Limpie los filtros de agua de alimentación del tanque de condensado.
- 3) Limpie el quemador, como se indicó.
- 4) Revise el hogar y el estado del refractario.
- 5) Revise los anclajes de los motores y bombas.
- 6) Compruebe el alineamiento de la bomba de alimentación de agua consumotor, si no es así, esto causará un fuerte vibración y gastará muy pronto los cauchos del acople.
- 7) Verifique el estado de la trampa de vapor en el sistema de retorno de condensado, trampas defectuosas no solo malgastan el vapor, sino que también causan bloqueo por vapor debido a la alta temperatura de los condensados.
- 8) Limpie los ventiladores.

## **PROGRAMA DEMANTENIMIENTO SEMESTRAL**

- 1) Revise el lado de agua de la caldera, deje que la caldera se enfríe por completo y descargue toda el agua por la purga de fondo, y la tapa de mano (handhole) lave bien el interior de la caldera utilizando una manguera con agua a presión, aplique el chorro por los handholes, para hacer un barrido de los lodos a través de la válvula de purga, empiece a lavar tan pronto se hayan quitado las placas y tapas, en este momento las incrustaciones suaves están fáciles de expulsar, si se dejan secarse endurecen y son difíciles de limpiar.
- 2) Realice una inspección y limpieza en la boca de ingreso de agua a la caldera.
- 3) Retire el tapón de la cruzeta de la columna de agua McDonnell para hacer una

limpiezasimilaralaentradadeaguaalcaldera.

- 4) Despuésdelavarlalcaldera,examineconcuidadolassuperficiesdeevaporación paraversihay indiciosdecorrosión,picaduraoincrustación,cualquierindiciode estascondiciones denotalanecesidaddedarunmejortratamientoalaguadela caldera,comunicandoalacompañíaquímicaencargada.
- 5) Al volver a colocar las tapas de inspección de mano y de hombre coloque empaques nuevos,antesdecolocarloslimpielosresiduosdelosempaques viejos enlastapasyagujeros.
- 6) Mientraslcalderaestaparada,revisetodaslas válvulas;si puederectificarlos asientosyempacarnuevamentelosvástagosdondeseanecesario.
- 7) Realicelalimpiezadelhogarconuncepillodealambre;verifique elbuenestado delrefractariodelacompuertaydelacámaraposterior.
- 8) Limpiezadeltanquedecondensadoconaguaapresión,sacandolabridadel flotadoryeltapóndefondo.  
**Importante:**Cerrarlallave de esferaque comunicacon elfiltro ybomba,después purgarlosposibleslodosporelfiltroenYdelabombaylimpiarelfiltro.
- 9) Realicelalimpiezadelostubosdefuego conelcepillocirculary singolpearlos refractarios.

## 3.2 INSPECCIÓN

### Válvula de seguridad Tecval

- Nunca aplicar gran fuerza para operar la palanca, un ligero toque provoca el disparo cuando la válvula esta a la presión de cierre inscrita en la placa.
- No rompa los sellos de seguridad, esto invalida la garantía del fabricante.
- Nunca acepte placas remarcadas.
- Instale la válvula sujetándola del hexágono y no use llaves para tubos.
- No cuelgue el tubo de desfogue de la válvula, sopórtelo independientemente.
- No tape el desfogue.
- Para limpiar los asientos, dispare la válvula subiendo la presión del equipo a la presión de cierre, es decir a 150 psi y toque levemente la palanca. Dependiendo de la limpieza del fluido que ingrese a la caldera y del estado de las válvulas, puede variar entre mensual o anualmente.
- Se recomienda hacer este procedimiento como mínimo cada 6 meses durante los 3 primeros años, en los siguientes 6 años cada tres meses y luego mensualmente.

### **Controles de nivel**

Los controles de nivel de McDonnell & Miller se diseñan especialmente para proteger los calentadores de agua contra peligros de una condición de bajo nivel de agua. Cuando están en operación, interrumpirán la corriente eléctrica que llega al quemador si el agua en el sistema cae por debajo del nivel seguro mínimo que establece el fabricante.

### **Regulaciones ASME para calderas y recipientes bajo presión - Sección VI, párrafo 7.07 G**

Mantenimiento de controles de bajo nivel de agua y alimentadores de agua.

Ambos se deben desmantelar anualmente por personal calificado, en el grado necesario para asegurar que estén libres de obstrucciones y que todas las piezas

funcionen apropiadamente. Se debe inspeccionar las tuberías de conexión a la caldera en busca de acumulación de lodo, incrustaciones, etc. Examine todos los cables que van a la caldera en busca de asilamiento quebradizo o gastado y asegúrese que los contactos están limpios y funcionando apropiadamente.

Dé atención preferencial a las soldaduras en los fuelles y flotadores cuando se utilice este tipo de control. Compruebe la hermeticidad del flotador y que el mercurio en el bulbo (cuando sea aplicable) no esté separado o decolorado. No intente reparar ningún mecanismo en el campo.

Reemplace los mecanismos completos, incluyendo las juntas necesarias, según las instrucciones de instalación disponibles por el fabricante.

### **Reparaciones potenciales**

Es probable que durante la vida útil de la máquina se presenten las siguientes fallas, por lo tanto es importante conocer cuál es su modo de reparación:

- Rotura de la columna de vidrio: este dispositivo, aunque cuenta con dos varillas de protección, es susceptible a rotura. En caso de que esto suceda, cierre la válvula superior e inferior de esta columna, con lo cual quedará aislada esta parte y se podrá hacer el cambio respectivo por la nueva columna.
- Daño o descalibración del manómetro: cuando este tipo de falla ocurra, se debe apagar la caldera, de manera que el sistema no tenga presión, para así poder retirar el manómetro dañado y poderlo cambiar por uno nuevo.
- En caso que se detecte fugas del tanque central de la caldera o que tal vez después de mucho tiempo se abra por alguna soldadura o algo

parecido, es importante ponerse en contacto con la empresa para su reparación o su cambio, ya que la caldera de biomasa cuenta con un forro exterior que puede ser quitado simplemente aflojando todos los tornillos que lo unen a la caldera , claro que previamente habiendo retirado la alimentación, la válvula de seguridad, el ciclón y el McDonell .

- Cualquier otro instrumento o accesorio que no funcione adecuadamente debe ser cambiado de inmediato.

### **3.3 MEDIDAS DE PROTECCIÓN Y SEGURIDAD**

Antes de iniciar cualquier maniobra de reparación o mantenimiento se deben tener en cuenta las siguientes precauciones:

- Asegúrese que la alimentación de corriente para toda la máquina este suspendida, es decir, baje el interruptor general.
- Asegúrese que el equipo haya sido apagado por lo menos unas 5 horas antes, con el fin de que se encuentre a una temperatura menor, preferiblemente cercana al ambiente evitando así posibles quemaduras del reparador por contacto con zonas calientes.
- Tenga especial cuidado de las partes frágiles del equipo, es decir, manómetros y columna de nivel de agua.
- La caldera armada completamente no debe ser manipulada bruscamente ya que podría caer en un altibajo y darse vuelta debido a su altura.
- La reparaciones deben hacerse con la herramienta precisa, no intente usar otro tipo de herramienta, de lo contrario, dañará los componentes manipulados y será más difícil su posterior reparación.

- Si va a drenar el tanque, una vez haya apagado la caldera, asegúrese primero que el sistema no tenga presión, y segundo, debe abrirse la válvula lentamente con el fin de evitar chorros imprevistos que vaya a quemar a alguien. Se sugiere desocupar la caldera después de que el sistema este aún a menor temperatura.
- Nunca abra los tapones superiores cuando el sistema tenga presión, pues representa un potencial misil que puede hacer daño a alguien.

### **Elementos de protección personal para el operario**

Se recomienda el suministro de una dotación de seguridad para la persona que este a cargo del manejo de la biomasa, de las cenizas y de la operación de la caldera. La imagen muestra los respectivos accesorios de protección.



Fuente: [http://grupos.emagister.com/imagen/elementos\\_de\\_proteccion\\_personal/1373-690126](http://grupos.emagister.com/imagen/elementos_de_proteccion_personal/1373-690126)