

**ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL**

**Facultad de Ingeniería en Mecánica y Ciencias de la  
Producción**

"Diseño de un Reactor de Pirólisis  
Experimental para pruebas de biomasa agroforestal"

**TRABAJO FINAL DE GRADUACIÓN**

Materia Integradora

Previo la obtención del Título de:

**INGENIERO MECÁNICO**

Presentado por:

Christopher Gabriel Guevara García

Manuel Alejandro Pablo Espinosa

GUAYAQUIL - ECUADOR

Año: 2016

## **AGRADECIMIENTOS**

Agradezco a Dios por darme vida, a mis padres, hermanos, profesores y amigos por apoyarme siempre y motivarme en todo momento a lo largo de mi carrera. Agradezco a mis tutores y a todas las personas que dispusieron de su tiempo y compartieron sus conocimientos para el desarrollo del proyecto.

Christopher Guevara

Le doy gracias a Dios por darme vida y salud, agradezco a mis padres por guiarme siempre por el buen camino y su apoyo incondicional, a mis hermanos, familiares y amigos por acompañarme a lo largo de la carrera. Agradezco a mis tutores, profesores, y a todas las personas que brindaron su tiempo enriqueciendo este proyecto con sus conocimientos. Gracias Espol-Fimcp.

Manuel Pablo

## DECLARACIÓN EXPRESA

“La responsabilidad del contenido desarrollado en la presente propuesta de la materia integradora corresponde exclusivamente al equipo conformado por:

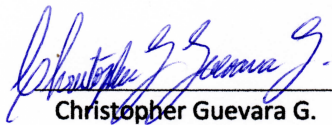
Christopher Gabriel Guevara García

Manuel Alejandro Pablo Espinosa

Emérita Alexandra Delgado Plaza, Ph.D.

Juan Manuel Peralta Jaramillo, Ph.D.

y el patrimonio intelectual del mismo a la Facultad de Ingeniería Mecánica y Ciencias de la Producción (FIMCP) de la ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL”.



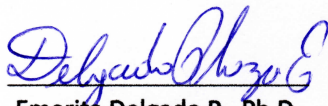
Christopher Guevara G.

AUTOR



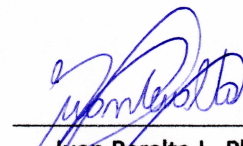
Manuel Pablo E.

AUTOR



Emerita Delgado P., Ph.D.

DIRECTORA



Juan Peralta J., Ph.D.

DIRECTOR

## RESUMEN

En estos días el desarrollo tecnológico opta por la investigación de nuevas fuentes de energía, las estadísticas demuestran que el mayor porcentaje del uso de energía se da mediante fuentes renovables.

La industria agrícola puede generar energía limpia mediante el uso de sus residuos, pero lastimosamente no son aprovechados, y a su vez estos son eliminados mediante la quema, creando peligros de incendios forestales, plagas y la reducción de producción forestal y agrícola. Una alternativa viable es el diseño de un reactor de pirolisis, con el propósito de transformar esta biomasa y así obtener varios beneficios tales como: carbón vegetal, carbón activado, y biocombustibles.

Para ejecutar este proyecto se utilizaron materiales existentes en el mercado nacional, se realizó el diseño del tanque aplicando la normativa ASME Sección VII División 1. La estructura del reactor fue diseñada bajo el reglamento de diseño, fabricación y montaje de estructuras avalando la estabilidad y resistencia del diseño. Mediante la transferencia de calor se seleccionó el tipo de aislante utilizado para mantener la temperatura dentro de la cámara de combustión del reactor de pirolisis, se seleccionaron equipos de medición para el control del proceso y adicionalmente se realizó un análisis de costos de materiales y mano de obra.

Finalmente, se diseñó el reactor de pirolisis para 10 kg de biomasa, este llegará a una temperatura máxima de 500 °C, el tiempo del proceso será aproximadamente de 4 horas.

El reactor será utilizado por el CDTS, con el fin de realizar pruebas experimentales para analizar el carbón vegetal.

Palabras Clave: Reactor de pirolisis, biomasa agroforestal, carbón vegetal

## ABSTRACT

Currently, technological development opts for research into new sources of renewable energy, statistics show that the highest percentage of renewable energies is given by biomass.

The agricultural industry can generate clean energy by using waste, but unfortunately are not exploited, and in turn these are removed by burning, creating dangers of forest fires, pests and reduction of forest and agricultural production. A viable alternative is to design a pyrolysis reactor, in order to transform this biomass and obtain various benefits such as charcoal, activated carbon, and biofuels.

For running this project, existing materials were used on the national market, tank design was done by applying the ASME Section VII Division I. The structure of the reactor was designed under the rules of design, manufacture and assembly of structures guaranteeing stability and design strength. By heat transfer, the type of insulation used to maintain the temperature within the combustion chamber of the reactor was selected. measuring equipment were selected for further process control and cost analysis of materials and labor was performed.

Finally, the pyrolysis reactor is designed to storage of 10 kg of biomass, this will reach a maximum temperature of 500 ° C, the processing time will be approximately 4 hours. The reactor will be used by CDTS, so as to analyze experimental trials charcoal.

*Keywords: Pyrolysis reactor, agroforestry biomass, charcoal*

# ÍNDICE GENERAL

RESUMEN.....	I
ABSTRACT .....	II
ÍNDICE GENERAL .....	III
ABREVIATURAS.....	VI
SIMBOLOGÍA .....	VII
ÍNDICE DE FIGURAS .....	IX
ÍNDICE DE TABLAS.....	X
ÍNDICE DE PLANOS.....	XII
CAPÍTULO 1.....	1
1. Introducción .....	1
1.1 Descripción del problema .....	2
1.2 Objetivos .....	2
1.2.1 Objetivo General .....	2
1.2.2 Objetivos Específicos.....	2
1.3 Marco teórico.....	3
1.3.1 Biomasa como recurso energético.....	3
1.3.2 Procesos de conversión energética de la biomasa.....	6
1.3.3 Proceso de Pirolisis .....	8
1.3.4 Productos primarios de la pirolisis .....	10
1.3.5 Impacto medioambiental.....	13
CAPÍTULO 2.....	15
2. Metodología del Diseño .....	15
2.1 Alternativas de diseño .....	17
2.2 Esquema de la metodología.....	20
2.2.1 Propiedades y características fisicoquímicas de la cascarilla de arroz.....	20

2.2.2	Diseño de Forma .....	21
2.2.3	Diseño del tanque de almacenamiento de biomasa. ....	22
2.2.4	Velocidad de corrosión .....	22
2.2.5	Selección del material.....	22
2.2.6	Diseño del cascaron cilíndrico ASME VII DIV 1 .....	23
2.2.7	Diseño de los domos toriesféricos ASME VII DIV 1.....	24
2.2.8	Volumen total del tanque .....	24
2.2.9	Diseño de pernos.....	25
2.2.10	Diseño de la estructura.....	34
2.2.11	Energía necesaria para realizar la carbonización.....	34
2.2.12	Combustión y control de contaminantes.....	38
2.2.13	Transferencia de calor .....	39
2.3	Accesorios y aislantes .....	41
2.3.1	Válvula de bola .....	41
2.3.2	Empaquetadura .....	42
2.3.3	Instrumentos de medición.....	42
2.3.4	Aislantes térmicos.....	42
CAPÍTULO 3.....		43
3.	Resultados .....	43
3.1	Resultados del diseño .....	43
3.1.1	Resultados del diseño del tanque de almacenamiento de biomasa. ....	43
3.1.2	Resultados de la energía necesaria para el proceso termoquímicos.....	46
3.1.3	Resultados de transferencia de calor del sistema.....	49
3.1.4	Selección de aislantes térmicos.....	50
3.1.5	Selección de accesorios .....	51
3.2	Resultados de simulaciones.....	52

3.2.1	Esfuerzos mecánicos en la estructura del reactor (Ansys) .....	52
3.2.2	Pruebas de presión (Ansys).....	53
3.2.3	Simulación de flujo (SolidWorks) .....	56
3.3	Análisis de costos.....	56
CAPÍTULO 4.....		59
4.	Discusión y Conclusiones .....	59
BIBLIOGRAFÍA.....		62
APÉNDICE.....		65



## ABREVIATURAS

ANSYS	Swanson Analysis Systems, Inc
ASME	American Society of Mechanical Engineers
ASTM	American Society for Testing and Materials
BTU	British Thermal Unit
CDTS	Centro de Desarrollo Tecnológico Sustentable
CIEMAT	Centro de Investigaciones Energéticas, Medioambientales y Tecnológicas
Cal/kg	Caloría sobre kilogramos
ERECOS	Empresa de Refractarios Ecuatoriano
ESPOL	Escuela Superior Politécnica del Litoral
GLP	Gas Licuado de Petróleo
INSHT	Instituto Nacional de Seguridad e Higiene en el Trabajo
ISO	International Organization for Standardization
INEN	Instituto Ecuatoriano de Normalización
KJ/Kg-K	Kilogramo sobre kilojoule por kelvin
KW	Kilowatts
MJ/Kg	Mega Joule sobre kilogramo
MPa	Mega Pascales
NTE	Norma Técnica Ecuatoriana
RTE	Reglamentos Técnicos Ecuatorianos
PCI	Poder Calorífico Inferior
PSI	Pound per Square Inch
SDS	Safety Data Sheet
SMAW	Shield Metal Arc Welding

## SIMBOLOGÍA

$A_g$	Área de empaquetadura
$c$	Cáscara de arroz comprimido
$C$	Factor de rigidez de la junta
$CO_2$	Dióxido de Carbono
$C_p$	Calor específico de los cuerpos
$d$	Diámetro exterior
$\Delta P$	Caída de presión
$\Delta T$	Diferencia de temperatura del medio ambiente y la temperatura de trabajo
$\Delta W$	Peso de la cáscara de arroz
$D_{ext}$	Diámetro exterior
$D_{int}$	Diámetro interior
$E$	Eficiencia de la junta
$E_1$	Energía requerida para calentar un cuerpo
$E_b$	Módulo de Young del material del perno
$E_g$	Módulo de Young del material de la empaquetadura
$F_b$	Fuerza de tensión sobre el perno
$F_i$	Fuerza inicial
$F_m$	Fuerza de tensión sobre el material
$GE$	Gravedad específica
$H_2O$	Agua
$h_{humos}$	Coefficiente de convección de los humos
$K$	Constante de la tubería
$K_{acero}$	Conductividad térmica del acero
$K_{arroz}$	Conductividad térmica del arroz
$k_b$	Rigidez del perno
$k_m$	Factor de rigidez de la empaquetadura
$L$	Radio interior del casquete
$l_{cuerda}$	Longitud de la cuerda
$L_e$	Calor latente
$l_s$	Longitud del vástago
$l_t$	Longitud de la cuerda en la zona de sujeción
$L_t$	Longitud de la tubería
$m$	Masa total de la biomasa
$M_s$	Masa seca
$\eta$	Eficiencia de combustión
$N_2$	Nitrógeno
$nc$	Cáscara de arroz no comprimido
$N_{pernos}$	Número de pernos
$N_y$	Factor de seguridad de la tensión máxima

$p$	Paso
$P$	Fuerza aplicada
$PC_{glp}$	Poder calorífico del GLP
$PC_{piro}$	Poder calorífico de los gases de pirólisis
$P_{glp}$	Potencia del GLP
$\phi$	Diámetro de la tubería
$P_{max}$	Presión máxima de trabajo
$P_{piro}$	Potencia de los gases de pirólisis
$\dot{Q}_{aporte}$	Calor de aporte
$\dot{Q}_{perdido}$	Calor perdido por las superficies
$R$	Radio interior
$r$	Radio interior de las curvaturas
$R_{tot}$	Resistencia total
$S$	Esfuerzo permisible del material
$SO_2$	Dióxido de azufre
$t_{cilindro}$	Espesor del cilindro
$V_1$	Volumen de tronco
$V_2$	Volumen del segmento esférico
$V_3$	Volumen del sólido de revolución
$V_{cilindro}$	Volumen del cilindro
$V_{domo}$	Volumen del domo toriesférico
$W_f$	Peso del recipiente vacío
$W_i$	Peso del recipiente más cascara de arroz

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1 Energía total consumida en el mundo .....	3
Figura 1.2 Energía renovable total consumida en el mundo.....	4
Figura 1.3 Ciclo de la biomasa. ....	4
Figura 1.4 Proceso de conversión de energía de la biomasa.....	5
Figura 1.5 Esquema del proceso de la descomposición térmica de la biomasa.....	7
Figura 1.6 Proceso de la biomasa y sus aplicaciones .....	8
Figura 1.7 Esquema del proceso de Pirolisis.....	10
Figura 1.8 Transformación termoquímica de la biomasa de celulosa.....	11
Figura 2.1 Diseño de forma del reactor de pirolisis. ....	21
Figura 2.2 Domo toriesférico .....	25
Figura 2.3 a) Fuerza de precarga y deflexiones iniciales. b) Deflexión por la carga y fuerzas resultantes. ....	28
Figura 2.4 Conjunto roscado con empaquetadura.....	29
Figura 2.5 Sistema de sujeción con múltiples juntas. ....	30
Figura 3.1 Estructura del reactor de pirolisis .....	45
Figura 3.2 Uniones soldadas .....	45
Figura 3.3 Deformación total .....	54
Figura 3.4 Esfuerzos Equivalente Von – mises .....	54
Figura 3.5 Factor de seguridad estático .....	55
Figura 3.6 Factor de seguridad dinámico .....	55
Figura 3.7 Simulación de flujo de los gases de calentamiento de biomasa.....	56

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1.1. Grupos de biomasa y sus subclasificaciones. ....	5
Tabla 1.2 Propiedades de algunos residuos agroforestales y del carbón vegetal .....	6
Tabla 1.3 Principales procesos termoquímicos de la biomasa. ....	7
Tabla 1.4 Características de los procesos de pirolisis más conocidos. ....	9
Tabla 1.5 Composición química y poder calorífico de los productos de pirolisis .....	12
Tabla 1.6 Aplicaciones y usos del carbón vegetal .....	13
Tabla 2.1 Calificaciones para las matrices de decisiones .....	17
Tabla 2.2 Ponderación y descripción de los aspectos de biomasa a evaluar en la matriz de decisiones.....	17
Tabla 2.3 Resultados de la matriz de decisión de biomasa.....	18
Tabla 2.4 Ponderación y descripción de los aspectos del proceso termoquímico a evaluar en la matriz de decisiones. ....	18
Tabla 2.5 Resultados de la matriz de decisión del proceso termoquímico. ....	19
Tabla 2.6 Ponderación y descripción de aspectos de los tipos de hornos a evaluar en la matriz de decisiones.....	19
Tabla 2.7 Resultados de la matriz de decisión del proceso termoquímico. ....	19
Tabla 2.8 Pruebas para densidad del tamo de arroz.....	20
Tabla 2.9 Esfuerzo permitido en el material (S) según la temperatura de diseño. ....	22
Tabla 2.10 Fórmulas para el cálculo del espesor y presión de un cascarón cilíndrico ..	23
Tabla 2.11 Fórmulas para el cálculo del espesor y presión del un domo toriesférico....	24
Tabla 2.12 Valores del factor M para el cálculo del espesor de un domo toriesférico ...	24
Tabla 2.13 Dimensiones de roscas métricas ISO, series de pasos bastos y finos.....	26
Tabla 2.14 Especificaciones para pernos métricos de acero. ....	26
Tabla 2.15 Características de trabajo del horno de pirolisis .....	35
Tabla 2.16 Poder calorífico del GLP másico y volumétrico .....	36
Tabla 3.1 Volumen que ocupara el tamo de arroz.....	43
Tabla 3.2 Espesor del cascaron cilíndrico .....	44
Tabla 3.3 Espesor del domo toriesférico .....	44
Tabla 3.4 Energía necesaria para llevar la cascarilla de arroz de 30 a 167 °C .....	46
Tabla 3.5 Parámetros del reactor con alimentación de GLP .....	46
Tabla 3.6 Energía necesaria para llevar la cascarilla de arroz de 167 a 500 °C. ....	47

Tabla 3.7 Parámetros del reactor con la retroalimentación .....	47
Tabla 3.8 Balance de materia de la combustión de GLP.....	47
Tabla 3.9 Composición del gas de salida de la combustión de GLP .....	48
Tabla 3.10 Relación masa aire combustible de la combustión de GLP.....	48
Tabla 3.11 Balance de materia de la combustión de los gases de pirólisis.....	49
Tabla 3.12 Composición del gas de salida de la combustión de los gases de pirólisis.	49
Tabla 3.13 Relación masa aire combustible de la combustión de los gases de pirólisis. .....	49
Tabla 3.14 Resultados del análisis de esfuerzos realizados en Ansys.....	53
Tabla 3.15 Resultados de los análisis realizados en Ansys .....	53
Tabla 3.16 Precios de los materiales del proyecto .....	57
Tabla 3.17 Precio de actividades para el ensamblado del proyecto.....	58
Tabla 3.18. Inversión total del proyecto.....	58

## **ÍNDICE DE PLANOS**

- PLANO 1 Reactor de pirólisis
- PLANO 2 Aislantes térmicos
- PLANO 3 Tanque de almacenamiento de la biomasa
- PLANO 4 Tapa del tanque
- PLANO 5 Estructura del reactor
- PLANO 6 Desarrollo del tanque y del domo toriesférico

# CAPÍTULO 1

## 1. INTRODUCCIÓN

En la práctica el diseño de un reactor de pirolisis es una alternativa viable, económica y sostenible para lograr la disposición final de los desechos agroforestales, disminuir las emisiones de gases de efecto invernadero y producir carbón vegetal como producto de valor agregado, estos beneficios se obtendrán debido a que el reactor reutilizará los residuos, recirculará los gases para eliminar el oxígeno en la combustión y se obtendrá un producto con capacidad de comercialización sustituto del carbón mineral.

Este prototipo se sustentará en los principios de la transferencia de calor y en el diseño mecánico idóneo de acuerdo a los códigos y normas establecidas para este tipo de proyecto.

En el primer capítulo se detallarán las definiciones clave que influyen en el proceso de conversión energética de residuos agroforestales a energía térmica. Así mismo se describirán los tipos de biomasa y los procesos termoquímicos que existen para obtener esta energía y así aprovecharla.

A su vez, se discutirá cuáles son los residuos agroforestales en países agrícolas como el Ecuador. Este proyecto también analizará el impacto ambiental positivo que tendrían los sectores rurales agricultores al aplicar esta alternativa. Por otro lado, se enfatizará en las ventajas que tiene el carbón vegetal con respecto a su aplicación en la industria, ya que el impacto ambiental negativo es menor que el impacto negativo del carbón mineral.

Complementariamente se examinarán las clases de reactores que existen, y se analizará el diseño mecánico y térmico.



## **1.1 Descripción del problema**

En la actualidad los residuos agroforestales no son aprovechados correctamente por la industria agrícola y pequeños productores, estos residuos generan problemas e incrementan los riesgos de: peligro de incendios forestales, plagas, reduce la capacidad de producción forestal y agrícola e inclusive afecta a la fauna silvestre que es indispensable para el ciclo natural de cosecha.

Además, otro aspecto clave es dar una solución al problema de la quema de residuos a la intemperie sin control alguno, que provocan la liberación de gases NOx que contaminan el ecosistema.

## **1.2 Objetivos**

### **1.2.1 Objetivo General**

Diseñar un reactor con capacidad de 10 Kg que implique un proceso de pirólisis, con el propósito de reciclar desechos agroforestales para obtención de carbón de origen vegetal.

### **1.2.2 Objetivos Específicos**

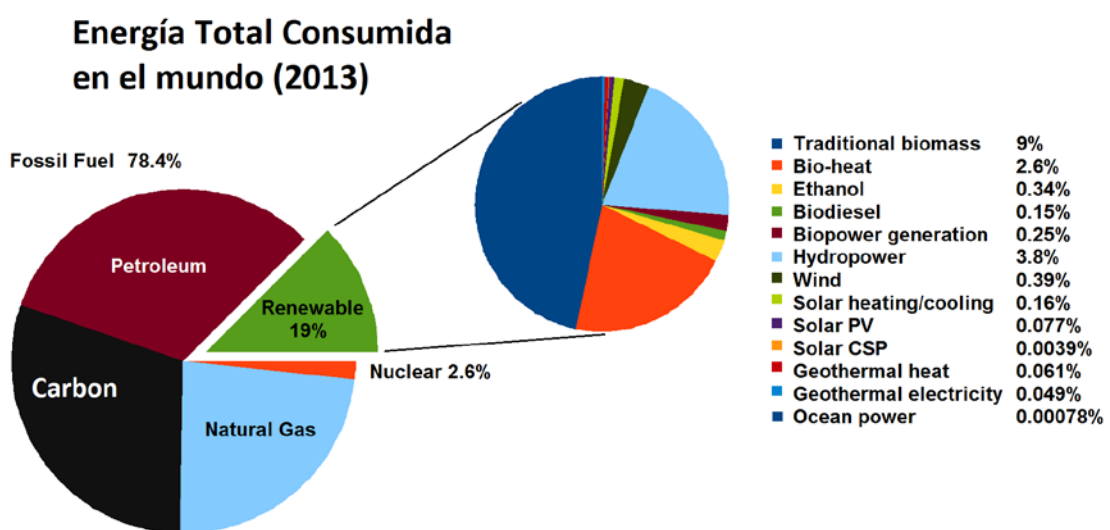
- Seleccionar materiales, normativas y códigos de construcción garantizando la idoneidad del diseño mecánico del reactor.
- Establecer el diseño térmico del sistema por medio del análisis de transferencia de calor definiendo los parámetros del proceso termoquímico.

- Analizar los beneficios ambientales y el costo del proyecto para sustentar su viabilidad.

### 1.3 Marco teórico

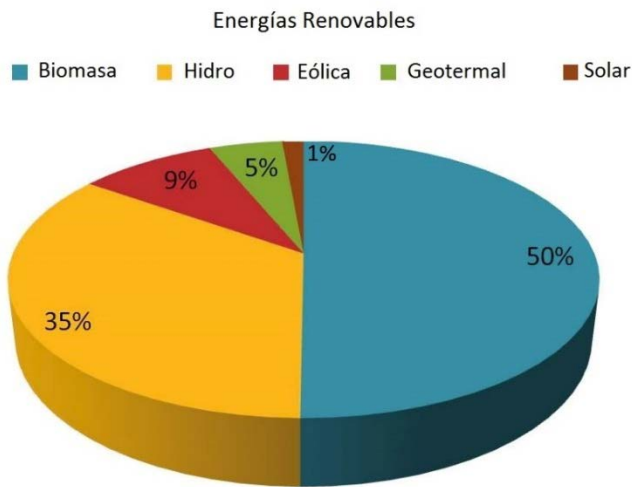
#### 1.3.1 Biomasa como recurso energético

La biomasa se define como toda materia orgánica no fosilizada. Esta fuente de energía renovable es proveniente del sol, y forma parte del ciclo de la fotosíntesis. La materia almacena energía durante muchos años sin que nadie la utilice hasta que en algún momento se descomponga por completo y pierda las propiedades que la hacen valiosa. Este recurso se lo puede recuperar mediante la combustión que le brinda la energía suficiente para formar el biocombustible tan anhelado. La biomasa es la energía renovable con mayor uso a nivel mundial, según la Agencia Internacional de la Energía actualmente se estima que entre el 10-14 % es energía proveniente de la biomasa (Figura 1), encontrando este biocombustible en estado sólido, líquido o gaseoso. (CIEMAT, Biocarburantes, 2012)



**Figura 1.1 Energía total consumida en el mundo**

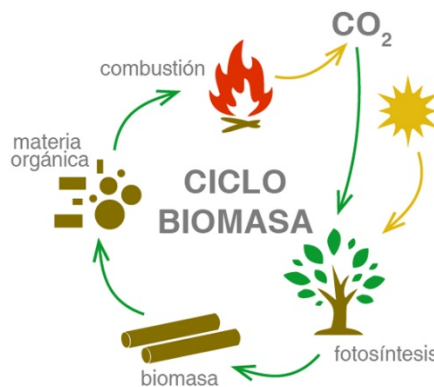
Fuente: Network, 2012



**Figura 1.2 Energía renovable total consumida en el mundo.**

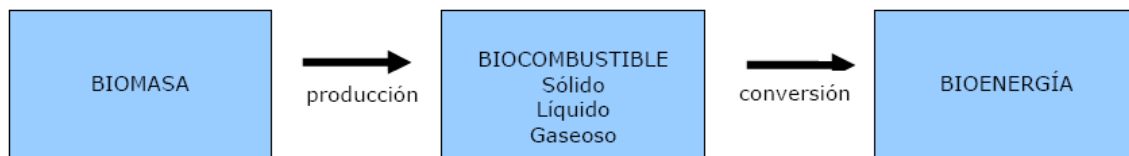
Fuente: Network,2012

Los residuos agroforestales como la madera, cascara de coco, cascara de arroz, entre otros pueden ser considerados ejemplos de biomasa lignocelulósica. Por otra parte, los residuos madereros poseen grandes aplicaciones en la industria de las energías renovables, sin embargo, su poder calorífico puede ser aprovechado de mejor manera.



**Figura 1.3 Ciclo de la biomasa.**

Fuente: Los biocombustibles sólidos y el biogás. Carrasco, Arroyo. 2012



**Figura 1.4 Proceso de conversión de energía de la biomasa**

Fuente: Ballesteros, 2012

### 1.3.1.1 Tipos y clasificación de la biomasa

La biomasa viene de una gran variedad de fuentes como se muestra en la tabla 1, se pueda observar los distintos tipos de biomasa como son: terrestre, acuática y residuos generados en el sector municipal, agrícola, forestal e industrial. Es decir, la biomasa primaria o virgen viene directamente de las plantas o animales.

**Tabla 1.1. Grupos de biomasa y sus subclasificaciones.**

<b>Virgen</b>	Biomasa Terrestre	Biomasa Forestal Pasto Cultivos Energéticos Cultivos
	Biomasa Acuática	Algas Plantas de Agua
<b>Residuos</b>	Residuos Municipales	Residuos sólidos municipales Biosólidos, aguas residuales. Gases de vertedero
	Residuos Sólidos Agrícolas	Ganado y estiércol Residuos de cultivos agrícolas
	Residuos Forestales	Corteza, hojas y residuos de plantas
	Residuos Industriales	Madera de demolición, aserrín Aceites o grasas utilizadas

Fuente: Basu, 2010

A continuación, en la tabla 2 se muestra el poder calorífico que tiene cada biomasa especificada con el fin de estimar valores referenciales y comparativos.

**Tabla 1.2 Propiedades de algunos residuos agroforestales y del carbón vegetal**

<b>Biomasa</b>	<b>Poder Calorífico [MJ/Kg]</b>	<b>Humedad [ wt %]</b>	<b>Cenizas [ wt%]</b>	<b>Sulfuro [ % dry]</b>	<b>Cloro [% dry]</b>
Carbón vegetal	25-32	1-10	0,5-6	-	-
Madera	10-20	10-60	0,25-1,7	0,01	0,01
Cáscara de coco	18-19	8-10	1-4	-	-
Cáscara de café	16	10	0,6	-	-
Aceite de palma	15	15	-	-	-
Cáscara de arroz	13-14	9-15	15-20	-	-

Fuente: Higman, 2008

### **1.3.2 Procesos de conversión energética de la biomasa**

#### **1.3.2.1 Procesos termoquímicos**

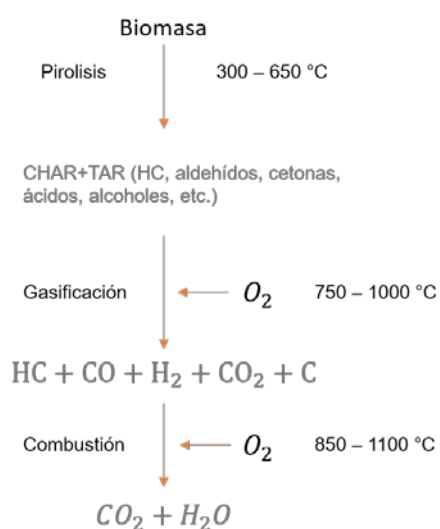
Los procesos termoquímicos involucran el uso de calor como mecanismo principal para la conversión de la biomasa. En la tabla 3, se presentan los procesos termoquímicos como la combustión, pirolisis, y gasificación son las tecnologías básicas de conversión térmica empleadas en la actualidad. (Williams, n.d.)

**Tabla 1.3 Principales procesos termoquímicos de la biomasa.**

<b>Procesos Termoquímicos</b>	
<b>Pirolisis</b>	Consiste en la descomposición térmica de la biomasa en ausencia de oxígeno que tiene como producto principal el carbón vegetal, cuando se lo realiza a temperaturas aproximadas de 500 °C durante periodos extensos que puede durar varios días.
<b>Gasificación</b>	Se realiza a temperaturas entre 700°C y 1200°C, al contrario de la pirolisis este proceso se realiza con presencia de oxígeno. Obteniendo como producto final gas natural.
<b>Combustión</b>	Este proceso es el más utilizado, donde la energía química almacenada en la biomasa es transformada en calor, esta energía es utilizada para la alimentación de hornos, calderas, turbinas de vapor, entre otras.

Fuente: Elaboración propia

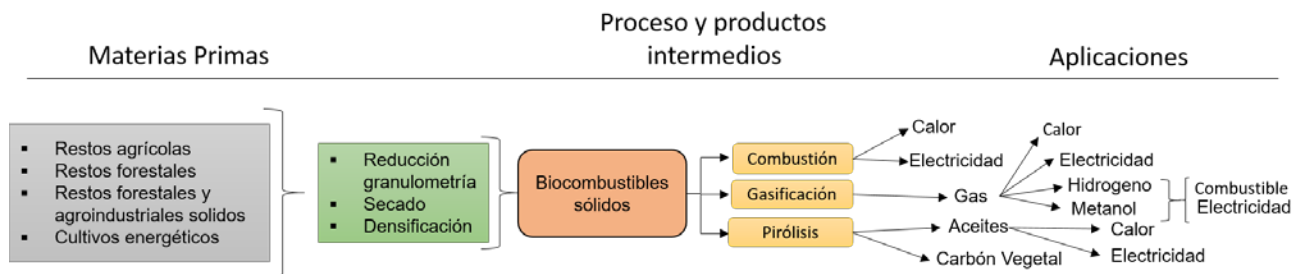
A continuación, se muestra un esquema donde se resume los procesos termoquímicos, reactivos, productos y temperaturas de trabajo.



**Figura 1.5 Esquema del proceso de la descomposición térmica de la biomasa**

Fuente: Elaboración propia

Finalmente, dentro de las etapas de transformación energética de la biomasa se emplean los procesos termoquímicos se muestra en el siguiente esquema.



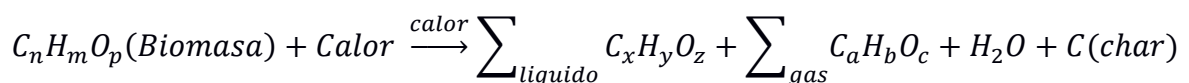
**Figura 1.6 Proceso de la biomasa y sus aplicaciones**

Fuente: Elaboración propia.

### 1.3.3 Proceso de Pirolisis

La pirolisis es un proceso termoquímico donde se produce la descomposición química de material orgánico y todo tipo de materiales donde se produce una combustión incompleta de estos en ausencia de oxígeno, en el caso de la biomasa la combustión llega a unos 500 grados centígrados del cual se obtiene como producto final carbón vegetal. El principal objetivo de la pirolisis de la biomasa es obtener productos sólidos (carbón), líquidos (bio-oil) y gaseosos (biogás). (Probstein & Hicks, 2006)

El proceso de pirolisis puede ser representado por una reacción general presentada a continuación:



Fuente: Basu, 2010

### 1.3.3.1 Tipos de pirolisis

Tomando en cuenta la velocidad de calentamiento, la pirolisis puede ser clasificada como lenta o rápida. Es considerado lenta si el tiempo requerido para calentar el combustible a la temperatura de la pirolisis es mucho mayor al tiempo de reacción característico de la pirolisis, y es considerada rápida de forma contraria. Esto es:

- Pirolisis lenta:  $t_{heating} \gg t_r$
- Pirolisis rápida:  $t_{heating} \ll t_r$

Este criterio puede ser expresado en términos de velocidad de calentamiento, asumiendo una velocidad de calentamiento lineal ( $T_{pyr}/t_{heating}$ , K/s). El tiempo característico de reacción,  $t_r$  para una sola reacción se toma como el recíproco de la constante de velocidad,  $k$  evaluada en la temperatura de la pirolisis. (Probstein & Hicks, 2006)

En la tabla 4 se muestran los tipos de pirolisis y sus características distintivas de operación.

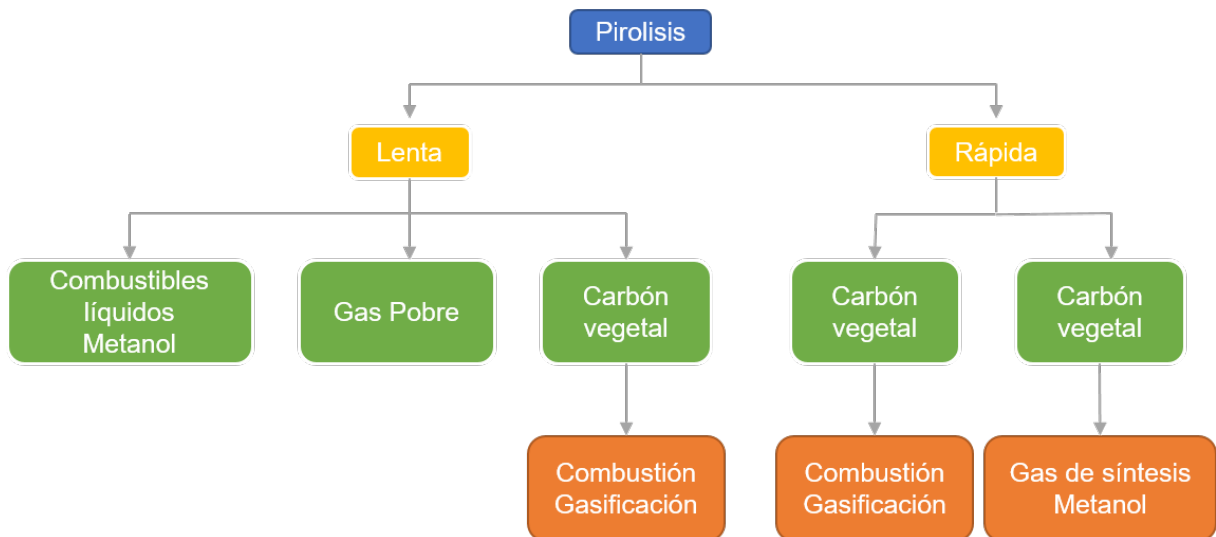
**Tabla 1.4 Características de los procesos de pirolisis más conocidos.**

Proceso de Pirolisis	Tiempo de residencia	Velocidad de calentamiento	Temperatura Final (°C)	Producto Final	Poder calórico (MJ/Kg)
Carbonización	Días	Muy Baja	400	Carbón vegetal	30
Convencional	5 – 30 min	Baja	600	Char, bio-oil, gas	20
Fast	< 2 s	Muy Alta	Aprox. 500	Bio-oil	20
Flash	< 1 s	Alta	< 650	Bio-oil, químicos, gas	15
Ultra-rápida	< 0.5 s	Muy Alta	Aprox. 1000	Químicos, gas	30
Vacío	2- 30 s	Medio	400	Bio-oil	15-20
Hidropirólisis	< 10 s	Alta	< 500	Bio-oil	15-20
Metanopirólisis	< 10 s	Alta	700	Químicos	15-20

Fuente: Basu, 2010



La siguiente figura muestra un esquema del proceso de la pirolisis con sus resultados finales.

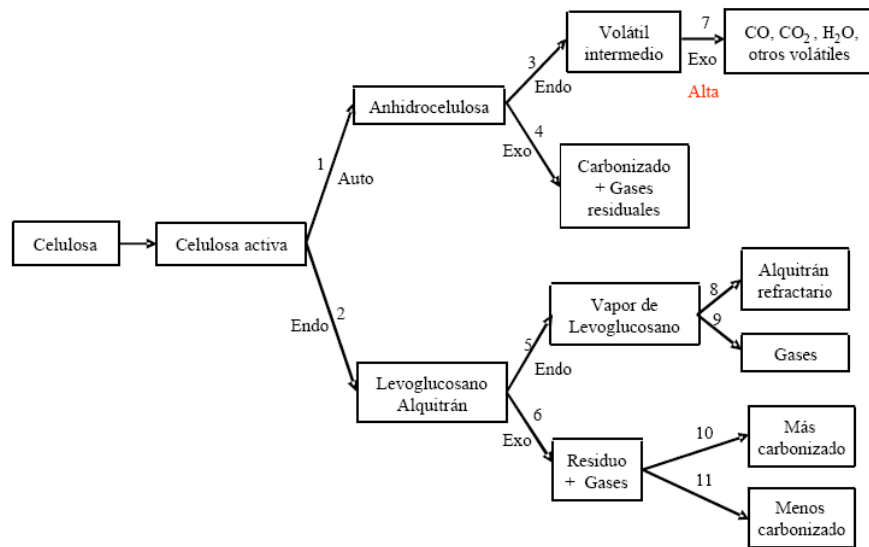


**Figura 1.7 Esquema del proceso de Pirolisis**

Fuente: Elaboración propia

### 1.3.4 Productos primarios de la pirolisis

La biomasa se empieza a fraccionarse cuando la temperatura de operación alcanza los 280°C en el proceso de pirolisis, y se genera carbón y vapor de agua y otros compuestos químicos en forma de alquitranes y gases no condensables, que consisten principalmente en metano, hidrogeno, monóxido y dióxido de carbono.



**Figura 1.8 Transformación termoquímica de la biomasa de celulosa**

Fuente: "Pirolisis de Biomasa" Alexander Gómez, 2012

Los productos volátiles provenientes de biomasa lignocelulósica sufren reacciones de craqueo, descomposición secundaria y polimerización, dependiendo del tiempo de residencia y de la temperatura de operación.

Los productos que obtienen dependen de la temperatura de operación del proceso, como se detalla a continuación (Gómez , Wolfgang, & Ricón , 2008):

- A temperaturas bajas y tiempos de residencia altos se obtienen mayores rendimientos en líquidos y sólidos.
- A temperaturas intermedias la producción de líquidos se maximiza.
- A temperaturas elevadas, se favorece la producción de gases, a costa de productos volátiles condensables.

La siguiente tabla indica la composición de los productos de la pirolisis:

**Tabla 1.5 Composición química y poder calorífico de los productos de pirolisis**

<b>Productos de la Pirolisis</b>	<b>Composición Química</b>	<b>Poder Calorífico</b>
Gaseosos	Hidrógeno (H <sub>2</sub> ). Metano (CH <sub>4</sub> ). Dióxido de Carbono (CO <sub>2</sub> ). Monóxido de Carbono (CO) Otros gases.	8 – 15 MJ/m <sup>3</sup>
Condensables (Líquido a temperatura ambiente)	Mezcla de alquitranes Aceites con contenido de: Ácido acético Ácido fórmico Acetona Metano Hidrocarburos aromáticos	25 MJ/Kg
Sólidos	Carbón vegetal o coque de pirolisis, con bajo contenido de azufre	Aproximadamente el doble del PCI de la biomasa lignocelulósica

Fuente: Trabajo de postgrado “Evaluación de tecnologías para producción de electricidad a partir de biomasa forestal en El Salvador” Autor: Raúl Menéndez, 2012

#### **1.3.4.1 Producto sólido.**

El producto sólido de la pirolisis consiste en un carbón llamado char (carbón vegetal). A partir del 100% de la biomasa inicial, se puede obtener entre un 40% y 80% de producto final. A diferencia de los combustibles fósiles, la biomasa cuenta con muy poca ceniza inorgánica. Su bajo poder calorífico es 32 MJ/Kg (Diebold & Bridgewater, 1997), el cual es sustancialmente alto comparando con la biomasa original o sus productos líquidos.

El CHAR es utilizado a nivel doméstico, industrial, farmacológica, entre otros, principalmente por su alta capacidad de absorción por ser considerado como carbón activado.

A continuación, se mostrará una tabla indicando todas las aplicaciones y ventajas que tiene el carbón vegetal.

**Tabla 1.6 Aplicaciones y usos del carbón vegetal**

<b>Aplicación</b>	<b>Usos</b>
Combustible	Utilizado en la industria como fuente de energía renovable con un poder calorífico de 8000 Kcal/Kg.
Cocción	Utilizado como fuente de calor para cocinar alimentos, ya sea en hornos o en parrillas.
Calefacción	Quemando el carbón vegetal en chimeneas para proporcionar calor a hogares en zonas frías.
Filtro natural (Carbón Activado)	Utilizado para purificar líquidos y gases, filtrando contaminantes orgánicos como por ejemplo compuestos que causan mal sabor al agua.
Adsorción	Debido a su alto contenido de Carbono y a su estructura granulada, este carbón posee una capacidad de adsorción elevada, capaz de adsorber contaminantes en su superficie.
Fertilizante y descontaminante de suelos	También es utilizado para purificar los suelos que hayan sido contaminados, o darle fertilidad a una tierra que no haya producido cultivo alguno
Fabricación de pólvora	La pólvora se compone de 75% de Nitrato de potasio, 12% Azufre y 13% de carbón vegetal.
Medicinal	Para el uso externo, el carbón vegetal es utilizado para sanar picaduras de insectos y serpientes, también se lo usa para tratar infecciones de ojos y oídos.
	Para el uso interno, es comúnmente ingerido en dosis pequeñas disuelto en agua en caso de envenenamiento, náuseas, vómitos y diarreas.

Fuente: Elaboración propia.

### 1.3.5 Impacto medioambiental.

Biochar es un carbón ecológico, sólido, estable para corregir y potenciar suelos ácidos y de poca fertilidad aumentando significativamente el rendimiento de la cosecha.

Se producirá  $CO_2$  mediante una fuente de energía renovable y no por medio de algún combustible fósil evitando 3 kilogramos de emisiones de  $CO_2$  procedentes de fuentes fósiles por cada kilogramo de biochar que utilicemos, esto contribuirá a la reducción de emisiones gases de invernadero

La biomasa procede de residuos los cuales son necesarios eliminar, y el uso de ellos conlleva a convertir un residuo en un recurso, donde se evitan incendios, plagas, enfermedades vegetales.

Conforme la Directiva EEC 67/548, este producto no es peligroso, en condiciones de uso normal y en su forma original, el producto no tiene efecto negativo para la salud y el medio ambiente. (LAINCO, 2014)

La SDS del carbón vegetal se podrá revisar en la sección de anexos.

# CAPÍTULO 2

## 2. METODOLOGÍA DEL DISEÑO

En este capítulo se definirán las variables involucradas para el diseño del reactor, se utilizará normativas de procesos y de diseños de acuerdo a la aplicación de interés. Estas definiciones se darán mediante los resultados de 3 matrices de decisión, las cuales evaluaron: Selección de la biomasa a utilizar, el proceso termoquímico, y por último el tipo de horno. Una vez definidos los parámetros se procederá a diseñar y seleccionar los elementos que componen el reactor.

Para una estimación del dimensionamiento del reactor experimental, se necesitará conocer la densidad del producto, para estimar el volumen de la cámara de calentamiento, sabiendo que se realizaran las pruebas con 10 kg de biomasa. Luego de aquello se diseñará el recipiente modelado como un tanque a presión utilizando la norma ASME SECCION VIII DIV I “Diseño construcción e inspección de tanques y recipientes de presión”.

Una vez estimado el peso del recipiente se diseñará la estructura que soportará el recipiente con el producto. Finalmente se seleccionarán ciertos accesorios que son considerados en el diseño, los cuales se los mencionará.

### **Factores importantes para el diseño:**

#### ***Estructura estable***

El reactor debe contar con una estructura estable que brinde soporte y estabilidad en lo largo de su vida útil, debido a esto la estructura se diseñara con acero estructural que cumpla con los requisitos de diseño.

### ***Sistema cerrado***

La hermeticidad del recipiente de calentamiento debe ser indispensable, esta hermeticidad garantiza el incremento de la presión durante el proceso de pirolisis, garantizando un producto final de buena calidad.

### ***Fuente de calor externa***

Se debe diseñar una hornilla adecuada para asegurar una correcta distribución de temperatura en la parte inferior del recipiente, este factor es fundamental para el proceso ya que entregará la energía inicial requerida utilizando como combustible GLP.

### ***Manejo de Residuos y autonomía del sistema***

El diseño de redistribución de los gases de calentamiento del recipiente deberá dirigirse hacia el hogar mediante una tubería de acero, permitiendo que estos gases se quemen reemplazando al GLP, asegurando que estos gases no contaminaran el medio ambiente.

Con respecto a los alquitranes que se generaran, se diseñara un sistema de recolección y almacenamiento para prevenir posibles derrames y no contaminar los suelos.

### ***Control de procesos***

El reactor contara con un termómetro y un manómetro instalados en la parte superior del recipiente, estos indicaran si es necesario que el operador aumente o disminuya la velocidad del proceso, se utilizara válvulas de bola (alivio) para controlar el flujo de los gases.

### ***Mantenimiento***

El reactor se lo diseñará con una vida útil de 30 años con respecto al recipiente de almacenamiento de la biomasa, para el respectivo mantenimiento se proyectó el reemplazo de piezas con tendencias a corroerse tales como: tuberías, válvulas, codos, bridas, pernos etc

## 2.1 Alternativas de diseño

Con las matrices de decisiones se seleccionarán los mejores aspectos que se acoplen a este proyecto, cada aspecto será definido y ponderado con cierto porcentaje de importancia.

En las siguientes tablas se muestran la ponderación que se utilizara para calificar los aspectos del proyecto.

**Tabla 2.1 Calificaciones para las matrices de decisiones**

Calificación					
0 = No Aplica	1 = Suficiente	2 = Regular	3 = Adecuado	4 = Bueno	5 = Muy bueno

Fuente: Elaboración propia.

En las tablas 2.2, 2.4 y 2.6 se muestran las ponderaciones y las descripciones de los aspectos evaluados en cada matriz de decisión, de igual manera en las tablas 2.3, 2.5, 2.7 se muestran los resultados y selección de la mejor alternativa del diseño.

**Tabla 2.2 Ponderación y descripción de los aspectos de biomasa a evaluar en la matriz de decisiones**

Aspectos de la biomasa	Descripción	Ponderación
<b>Producción Nacional</b>	La producción nacional es un aspecto considerable, entre más producción exista, más rentable será este proyecto.	40%
<b>Poder Calorífico</b>	El poder calorífico del carbón vegetal deberá ser el mayor posible para un mejor rendimiento.	30%
<b>Baja Humedad</b>	El proceso será más eficiente, si la biomasa es de baja humedad.	30%
		100%

Fuente: Elaboración propia.



A continuación, se muestra la tabla con los resultados de la aceptación de los aspectos con respecto a la biomasa que se utilizará.

**Tabla 2.3 Resultados de la matriz de decisión de biomasa**

<b>Biomasa</b>	<b>Ponderación</b>	<b>Cascara de coco</b>	<b>Cascara de Arroz</b>	<b>Madera</b>
<b>Producción Nacional</b>	40%	3	5	4
<b>Alto Poder Calorífico</b>	30%	5	4	3
<b>Baja Humedad</b>	30%	5	4	3
<b>Total</b>	100%	4,2	4,4	3,4

Fuente: Elaboración propia.

En la tabla 2.4 se presentan los aspectos descritos que serán evaluados con su ponderación respectiva con respecto al proceso termoquímico.

**Tabla 2.4 Ponderación y descripción de los aspectos del proceso termoquímico a evaluar en la matriz de decisiones.**

<b>Aspectos del proceso químico</b>	<b>Descripción</b>	<b>Ponderación</b>
<b>Control de Temperatura</b>	El rendimiento del carbón vegetal dependerá del control de las temperaturas en el proceso	35%
<b>Innovación</b>	Un proceso fuera de lo usual dentro de los procesos termoquímicos	20%
<b>Menor costo de diseño</b>	Se busca diseñar un reactor económico y de un rendimiento aceptable	20%
<b>Producto final</b>	Como principal producto se requiere carbón vegetal	25%
		100%

Fuente: Elaboración propia.

**Tabla 2.5 Resultados de la matriz de decisión del proceso termoquímico.**

Proceso Termoquímico	Ponderación	Pirolisis	Gasificación	Combustión
Temperatura de control	35%	5	4	3
Innovación	20%	4	3	1
Menor costo de diseño	20%	4	3	5
Producto final	25%	5	3	2
<b>Total</b>	100%	4,7	3,4	2,1

Fuente: Elaboración propia.

**Tabla 2.6 Ponderación y descripción de aspectos de los tipos de hornos a evaluar en la matriz de decisiones.**

Aspectos de los tipos de hornos	Descripción	Ponderación
<b>Rendimiento</b>	Un mejor rendimiento del horno hará eficiente el proceso general	40%
<b>Diseño óptimo</b>	El tipo de horno que se acople de una forma óptima al proceso de pirolisis	30%
<b>Innovador</b>	Un aspecto diferente a lo convencional con respecto a los procesos de los hornos clásicos	30%
		100%

Fuente: Elaboración propia.

**Tabla 2.7 Resultados de la matriz de decisión del proceso termoquímico.**

Tipos de Hornos	Ponderación	Tipo retorta	De ladrillo	Cilindro metálico
<b>Rendimiento</b>	40%	4	3	4
<b>Sencillez de diseño</b>	30%	5	4	4
<b>Innovador</b>	30%	5	2	3
<b>Total</b>	100%	4,6	3	3,7

## 2.2 Esquema de la metodología

### 2.2.1 Propiedades y características fisicoquímicas de la cascarilla de arroz

#### 2.2.1.1 Densidad del Tamo de arroz (Cascara de arroz)

Para el diseño de forma del reactor, es necesario estimar la densidad del residuo agroforestal seleccionado, para estimar un volumen de la cámara de calentamiento de la biomasa (cascara de arroz). La capacidad del reactor experimental será diseñada para 10kg de biomasa.

A partir de las pruebas realizadas por Nick Quiñonez y Vicente Adum en noviembre del 2005 se determinó la variación de la densidad de la cascara de arroz (conocido como tamo de arroz). Durante la experimentación se realizó pruebas experimentales, donde se comprime la cascar y además se analiza en condiciones normales (no se comprime la biomasa). En la tabla 5 se muestra los resultados obtenidos en el estudio. Cabe indicar que dichas pruebas fueron realizadas en un recipiente de geometría simple y con un volumen constante de  $0.0229 m^3$ .

**Tabla 2.8 Pruebas para densidad del tamo de arroz**

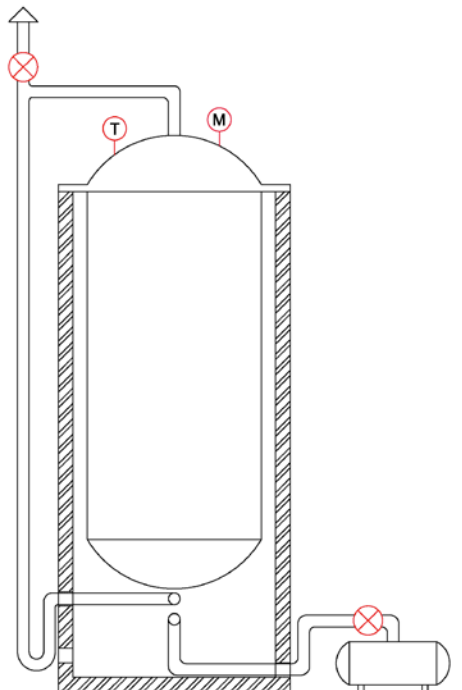
N° prueba	Wi (lb)	Wf (nc) (lb)	Wf C (lb)	$\Delta w$ (nc) (lb)	$\Delta w$ (c) (lb)	$\rho$ (nc) (kg/m <sup>3</sup> )	$\rho$ (c) (kg/m <sup>3</sup> )
1	2	6.8	8.1	4.8	6.1	94.90	120.60
2	1.85	6.75	8	4.9	6.15	96.88	121.59
3	2	6.9	8.15	4.9	6.15	96.88	121.59
4	2	6.85	8.25	4.85	6.25	95.89	123.57
<b>Prom.</b>	19.625	6.825	8.125	48.625	61.625	<b>96.13</b>	<b>121.84</b>

Fuente: Nick L. Quiñónez C.; Vicente J. Adum, 2005.

### 2.2.2 Diseño de Forma

En el diseño de forma, se muestra un bosquejo de lo que estará conformado el horno de pirolisis (Figura 2.1). Dicho horno está compuesto por un tanque que alojará la biomasa durante todo el proceso de pirolisis, su forma es cilíndrica con domos toriesféricos en sus extremos, uno de los domos toriesféricos será utilizado como tapa de este tanque. Esta tapa superior tendrá una tubería por donde se desplazarán los gases condensables y no condensables que libere la biomasa al ser calentada, direccionando así los gases hacia la hornilla para su autogeneración.

La tubería tendrá una salida de los gases al ambiente mediante una válvula de alivio, por el otro lado tendremos una trampa de condensados para que se depositen posibles condensaciones por el paso de los gases por la tubería.



**Figura 2.1 Diseño de forma del reactor de pirolisis.**

Fuente: Elaboración propia.

### 2.2.3 Diseño del tanque de almacenamiento de biomasa.

Para el diseño del tanque donde se alojará la biomasa, se considerará que estará sometido a presiones entre 0.1 y 0.5 MPa (15 y 72.5 PSI) y temperaturas no mayores a 550 °C por lo cual será diseñado siguiendo el Código ASME Capitulo VIII división 1, el cual consiste en reglas básicas y específicas para el diseño construcción e inspección de tanques y recipientes de presión.

### 2.2.4 Velocidad de corrosión

Se diseñará el reactor con una vida útil aproximada de 30 años.

$$V_{corrosion} = De 13 a 19 \frac{\mu m}{año}$$

### 2.2.5 Selección del material

Esta selección se la realizará con las recomendaciones del código ASME de tipos de aceros según su fluencia a la temperatura de diseño, estos tipos de aceros los podemos encontrar en la tabla UCS-23 Aceros al Carbono y de baja aleación de los códigos ASME. Se realizó una síntesis de esta tabla con los aceros existentes en el mercado y su esfuerzo permitido a diferentes temperaturas el cual se muestra en la tabla 2.9.

**Tabla 2.9 Esfuerzo permitido en el material (S) según la temperatura de diseño.**

Material	Temperatura (°C)				Tensión máxima admisible (MPa)
	-30 a 40	300	400	500	
ASTM-A36	114	114	-	-	
ASTM-A283 C	108	107	-	-	
ASTM-A285 C	108	107	89,1	31,6	
ASTM-A516 Gr. 70	138	136	101	33,6	

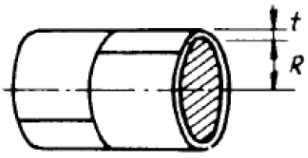
Fuente: Código ASME Capitulo VIII división 1. Tabla UCS-23.

En la tabla 2.9 se encontrará las tensiones máximas admisibles para cada tipo de acero en función de su temperatura, del cual se escogerá el más adecuado para el diseño.

### 2.2.6 Diseño del cascaron cilíndrico ASME VII DIV 1.

Con las propiedades del acero seleccionado se calculará el espesor del cascaron cilíndrico, el cual se lo construirá con planchas de acero por lo que se calculará adicionalmente el desarrollo de esta sección. En la tabla 2.10 se muestran las fórmulas para el cálculo del espesor y presión según los datos de entrada.

**Tabla 2.10 Fórmulas para el cálculo del espesor y presión de un cascarón cilíndrico**

	<b>Casco Cilíndrico (Costura Longitudinal)</b>	
	$t = \frac{PR}{SE - 0.6P}$	$P = \frac{SE t}{R + 0.6t}$

Fuente: Código ASME VII

Donde:

t: espesor de pared, metros

R: radio interior, metros

S: valor de esfuerzo del material, Mpa

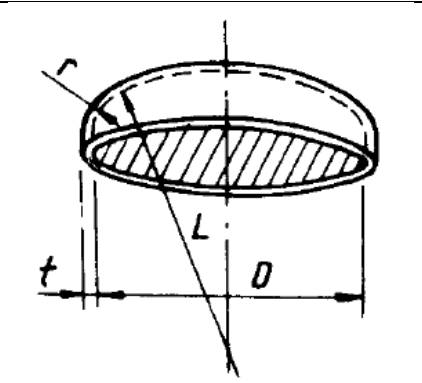
E: eficiencia de la junta

P: Presión máxima de trabajo permitido, Mpa

### 2.2.7 Diseño de los domos toriesféricos ASME VII DIV 1

Las tapas del cascaron cilíndrico tendrán forma de domos toriesféricos, de igual manera esta sección se la construirá con una plancha de acero por lo que se calculará el desarrollo del domo. Las ecuaciones para el cálculo del espesor del domo toriesférico se muestran en la tabla 2.11.

**Tabla 2.11 Fórmulas para el calculo del espesor y presion del un domo toriesférico.**

	<b>Cabeza ASME Bridada y Alabeada (Cabeza Toriesférica)</b>	
	Cuando $L/r = 16 \frac{2}{3}$	
	$t = \frac{0.885PL}{SE - 0.1P}$	$P = \frac{SEt}{0.855L + 0.1t}$
	Cuando $L/r$ menor $16 \frac{2}{3}$	
	$t = \frac{PLM}{2SE - 0.2P}$	$P = \frac{2SEt}{LM + 0.2t}$

Fuente: Código ASME VII

Condición de diseño:

$$L \leq D$$

**Tabla 2.12 Valores del factor M para el cálculo del espesor de un domo toriesférico**

Valores del Factor "M"																	
$L/r$	1.00	1.25	1.50	1.75	2.00	2.25	2.50	2.75	3.00	3.25	3.50	4.00	4.50	5.00	5.50	6.00	6.50
$M$	1.00	1.03	1.06	1.08	1.10	1.13	1.15	1.17	1.18	1.20	1.22	1.25	1.28	1.31	1.34	1.36	1.39
$L/r$	7.00	7.50	8.00	8.50	9.00	9.50	10.0	10.5	11.0	11.5	12.0	13.0	14.0	15.0	16.0	16.75	
$M$	1.41	1.44	1.46	1.48	1.50	1.52	1.54	1.56	1.58	1.60	1.62	1.65	1.69	1.72	1.75	1.77	

La máximo razón permitida es:  $L = D + 2t$

Fuente: Código ASME VII

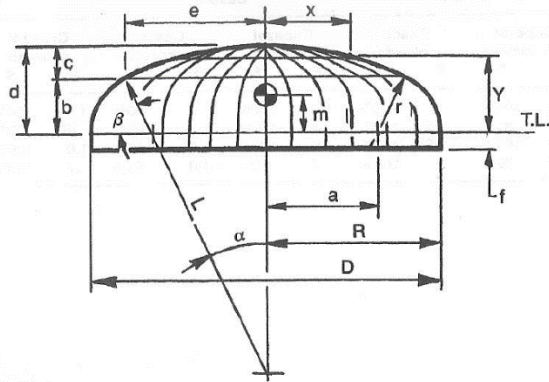
### 2.2.8 Volumen total del tanque

Descrito anteriormente el tanque está formado por un cilindro y dos domos toriesféricos, el volumen total del tanque será la suma del volumen dichas figuras.

Para el cálculo del volumen del cilindro se utilizará la ecuación 2.1.

$$V_{cilindro} = \pi R^2 H \quad (\text{Ecuación 2.1})$$

El volumen de la sección toriesférica se lo dividirá en tres secciones, el tronco, el segmento esférico y el sólido de revolución. Las ecuaciones 2.2, 2.3 y 2.4 comprenden el cálculo de estos los tres volúmenes que conforman el domo.



**Figura 2.2 Domo toriesférico**

Fuente: Código ASME VII

$$V_1 = (\text{Tronco}) = 0.333b\pi(e^2 + ea + a^2) \quad (\text{Ecuación 2.2})$$

$$V_2 = (\text{Segmento esférico}) = \pi c^2 \left( l - \frac{c}{3} \right) \quad (\text{Ecuación 2.3})$$

$$V_3 = (\text{Sólido de revolución}) = \frac{120 r^3 \text{sen}\phi \text{cos}\phi + a\phi\pi^2 r^2}{90} \quad (\text{Ecuación 2.4})$$

$$\text{Volumen total} = V_1 + V_2 + V_3 \quad (\text{Ecuación 2.5})$$

### 2.2.9 Diseño de pernos

Un perno tiene como función principal unir dos piezas, en este caso unirá la tapa toriesférica con el tanque a presión. En esta parte se analizarán las deformaciones, cargas y ecuaciones que rigen el diseño de pernos de sujeción.



Inicialmente para este diseño se debe realizar varias suposiciones ya que existen muchas variables desconocidas para poder resolver las ecuaciones. A partir de estos supuestos se debe recurrir al proceso de iteración para así llegar a una buena solución.

En este caso el diseño consistirá en escoger un diámetro (tabla 2.13), una serie de cuerda y una clase de perno (tabla 2.14) para definir la resistencia de prueba.

**Tabla 2.13 Dimensiones de roscas métricas ISO, series de pasos bastos y finos.**

Diámetro mayor (nominal) $d$ (mm)	ROSCA BASTA			ROSCA FINA		
	Paso $p$ (mm)	Diámetro o menor $d_r$ (mm)	Área de esfuerzo a tracción $A_t$ (mm <sup>2</sup> )	Paso $p$ (mm)	Diámetro menor $d_r$ (mm)	Área de esfuerzo a tracción $A_t$ (mm <sup>2</sup> )
3.0	0.50	2.39	5.03			
3.5	0.60	2.76	6.78			
4.0	0.70	3.14	8.78			
5.0	0.80	4.02	14.18			
6.0	1.00	4.77	20.12			
7.0	1.00	5.77	28.86			
8.0	1.25	6.47	36.61	1.00	6.77	39.17
10.0	1.50	8.16	57.99	1.25	8.47	61.20
12.0	1.75	9.85	84.27	1.25	10.47	92.07
14.0	2.00	11.55	115.4	1.50	12.16	124.55
16.0	2.00	13.55	156.7	1.50	14.16	167.25
18.0	2.50	14.93	192.5	1.50	16.16	216.23
20.0	2.50	16.93	244.8	1.50	18.16	271.50
22.0	2.50	18.93	303.4	1.50	20.16	333.50
24.0	3.00	20.32	352.5	2.00	21.55	384.42
27.0	3.00	23.32	459.4	2.00	24.55	495.74
30.0	3.50	25.71	560.6	2.00	27.55	621.20
33.0	3.50	28.71	693.6	2.00	30.55	760.80
36.0	4.00	31.09	816.7	3.00	32.32	864.94
39.0	4.00	34.09	975.8	3.00	35.32	1028.4

Fuente: Norton, 4ta Edición.

**Tabla 2.14 Especificaciones para pernos métricos de acero.**

Clase	Intervalo de tamaños (inclusive) (mm)	Resistencia límite mínima a la tracción $S_p$ (MPa)	Resistencia de fluencia mínima a la tracción $S_y$ (MPa)	Resistencia última mínima a la tracción $S_u$ (MPa)	Características del acero
4.6	M5-M36	225	240	400	Medio o bajo carbono
4.8	M1.6-M16	310	340	420	Medio o bajo carbono
5.8	M5-M24	380	420	520	Medio o bajo carbono

8.8	M16-M36	600	660	830	Medio o bajo carbono, templado y revenido
9.8	M1.6-M16	650	720	900	Medio o bajo carbono, templado y revenido
10.9	M5-M36	830	940	1040	Martensítico de bajo carbono, templado y revenido
12.9	M1.6-M36	970	1100	1220	De aleación, templado y revenido

Fuente: Norton, 4ta Edición.

### 2.2.9.1 Área de esfuerzo a la tensión

Si un perno está sometido a cargas de tensión pura como se muestra en la figura 2.3, la resistencia estará limitada por el promedio de los diámetros menor  $d_r$  y de paso  $d_p$ . Entonces el área de esfuerzo por tensión está definida como:

$$A_t = \frac{\pi}{4} \left( \frac{d_p + d_r}{2} \right)^2 \quad (\text{Ecuación 2.6})$$

Donde:

$$d_p = d - 0.649519 p \quad (\text{Ecuación 2.7})$$

$$d_r = d - 1.226869 p \quad (\text{Ecuación 2.8})$$

Con  $d$ = diámetro exterior y  $p$ = paso en mm. El esfuerzo en el perno debido a una fuerza  $F$  de torsión axial pura es:

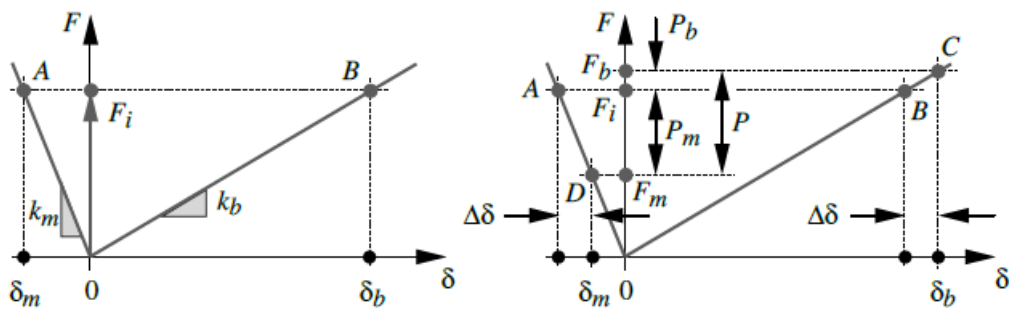
$$\sigma_t = \frac{F}{A_t} \quad (\text{Ecuación 2.9})$$

### 2.2.9.2 Cálculo de la precarga

Para evitar la separación de las uniones, los pernos deben tener un apriete adecuado, la fuerza aplicada para dicho apriete es denominada

precarga del perno. Cuando se somete a esta fuerza, su tracción y deformación aumenta.

La fuerza sobre el perno al terminar el apriete se denomina fuerza inicial  $F_i$ . La deflexión  $\delta_b$  del perno y  $\delta_m$  del material están controladas por sus respectivas constantes de resorte y alcanzan los puntos A y B en sus respectivas curvas de carga-deflexión, como se muestra en la figura 2.3a. Considerando los supuestos de las magnitudes relativas  $k_b$  y  $k_m$ , el perno se estira más de lo que se comprime el material.



**Figura 2.3 Fuerza de precarga y deflexiones iniciales.**

Fuente: Norton, 4ta Edición.

Comúnmente los pernos tienen una gran precarga, el esfuerzo de tracción es muy cercano a la resistencia límite del material  $S_p$ . Se espera que efectuar una gran precarga del perno, la fuerza externa no aumente mucho el esfuerzo del perno, Norton recomienda para pernos con cargas estáticas:

$$S_i = 0.90S_p \quad (\text{Ecuación 2.10})$$

Entonces se calculará la fuerza de la precarga del perno con la ecuación 2.11.

$$F_i = 0.9 S_p A_t \quad (\text{Ecuación 2.11})$$

### 2.2.9.3 Longitud de cuerda

La longitud de la cuerda  $l_{cuerda}$ , esta estandarizada en el sistema ISO como se muestra en la ecuación 2.12 y la longitud del vástago  $l_s$ :

$$l_{cuerda} = 2d + 6 \quad (\text{Ecuación 2.12})$$

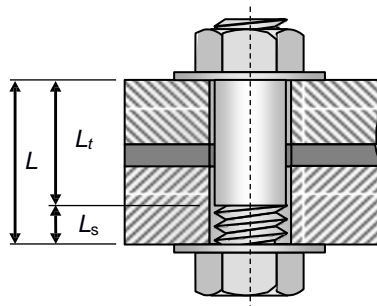
$$l_s = l_{perno} - l_{cuerda} \quad (\text{Ecuación 2.13})$$

Con las cuales se obtiene la longitud de la cuerda  $l_t$  en la zona de sujeción en función de la longitud entre las juntas:

$$l_t = l - l_s \quad (\text{Ecuación 2.14})$$

### 2.2.9.4 Rigidez en el perno

Para el cálculo de la constante de elasticidad del perno, se tomará en consideración que el perno será parcialmente roscado como se muestra en la figura 2.4.



**Figura 2.4 Conjunto roscado con empaquetadura**

Fuente: Norton, 4ta Edición.

Tomando en cuenta los efectos de deflexión de la cabeza del perno, el cual podría ser mucho mayor que la rigidez teórica que está dado por:

$$\frac{1}{k_b} = \frac{l_t}{A_t E} + \frac{l_s}{A_b E} \quad (\text{Ecuación 2.15})$$

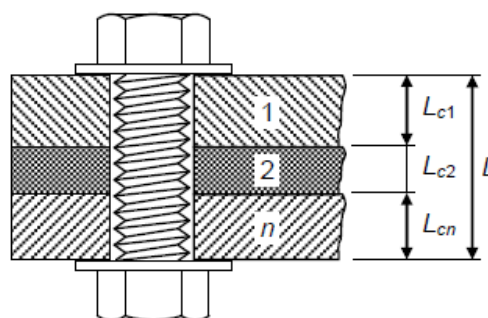
Por consiguiente, la constante elástica del perno se calculará de la siguiente manera:

$$k'_b = \left(1 + \frac{d}{l}\right) \frac{A_t E A_b}{A_b l_t + A_t l_s} \quad (\text{Ecuación 2.16})$$

Donde  $A_b$  es el área total de la sección transversal y  $E$  es el módulo de elasticidad del material del perno.

### 2.2.9.5 Cálculo de la rigidez de la junta $K_c$

La constante elástica de la junta se la calculará con la ecuación 2.17.



**Figura 2.5 Sistema de sujeción con múltiples juntas.**

Fuente: Norton, 4ta Edición.

Sin embargo, en una junta compuesta por  $n$  partes a unir o de materiales diferentes como se muestra en la figura 2.5, se debe calcular una  $k_m$

equivalente al cálculo de la constante elástica de resortes en serie, y efectivamente las partes de la junta actúan en serie como se muestra en la ecuación 2.17.

$$\frac{1}{k_m} = \frac{1}{k_{c1}} + \frac{1}{k_{c2}} + \dots + \frac{1}{k_{cn}} \quad (\text{Ecuación 2.17})$$

También se tiene:

$$k_{ci} = \frac{A_c E_{ci}}{L_{ci}} \quad (\text{Ecuación 2.18})$$

Donde  $E_{ci}$  y  $L_{ci}$  son el módulo de elasticidad y la longitud respectivamente, ambos de la junta número  $i$ . La ecuación 2.18 es adecuada cuando el área de las partes a unir es lo suficientemente pequeña. En caso de unir áreas relativamente grandes se deberá utilizar la ecuación 2.16.

$$\frac{1}{k_m} = \frac{1}{k_{m1}} + \frac{1}{k_{m2}} + \dots + \frac{1}{k_{mn}} \quad (\text{Ecuación 2.19})$$

Usualmente se utilizan empaquetaduras para sistemas de unión por bridas, existen dos tipos confinadas y sin confinar. Si cuenta con empaquetadura sin confinar la ecuación estará dada por:

$$k_g = \frac{A_g E_g}{t} \quad (\text{Ecuación 2.20})$$

Donde  $A_g$  es el areal real de la empaquetadura,  $E_g$  es el módulo de elasticidad de la empaquetadura y  $t$  es su espesor.

$$A_g = \frac{\pi}{4} \left[ \frac{D_f^2 - D_p^2}{N_{pernos}} - d^2 \right] \quad (\text{Ecuación 2.21})$$

Para empaques confinados que tienen un anillo dentro de una ranura circular en la junta, no se tendrá en cuenta la presencia del mismo para determinar las constantes elásticas de las partes a unir.

#### 2.2.9.6 Factor de rigidez de la junta

La constante de rigidez de la junta está dada por la ecuación 2.22, este factor debe ser menor a 1. Si  $k_b$  es pequeño comparado con  $k_m$ , el factor será una fracción pequeña, y se utilizará la ecuación 2.22.

$$C = \frac{k_b}{k_m + k_b} \quad (\text{Ecuación 2.22})$$

#### 2.2.9.7 Carga compresión en el material y tensión en el perno.

La carga aplicada  $P$  está dividida en dos componentes, una  $P_m$  tomada por el material y otra  $P_b$  tomada por el perno.

$$P = P_m + P_b \quad (\text{Ecuación 2.23})$$

La figura 2.3 nos muestra que la carga de compresión en el material después de aplicar una carga externa es:

$$F_m = F_i + P_m \quad (\text{Ecuación 2.24})$$

De la misma forma se obtiene la carga de tensión sobre el perno.

$$F_b = F_i + P_b \quad (\text{Ecuación 2.25})$$

Entonces para hallar la fuerza total sobre el perno y la junta, en la figura 2.3 se obtiene el cambio común en la deflexión  $\Delta\delta$  debido a la carga aplicada  $P$ :

$$P_b = k_b \Delta\delta \quad (\text{Ecuación 2.26})$$

$$P_m = k_m \Delta\delta \quad (\text{Ecuación 2.27})$$

$$P_b = \frac{k_b}{k_m} P_m \quad (\text{Ecuación 2.28})$$

Esta expresión se la sustituye en la ecuación 2.23 para obtener:

$$P_b = \frac{k_b}{k_m + k_b} P \quad (\text{Ecuación 2.29})$$

Reemplazando en la ecuación 2.22 se la puede simplificar a:

$$P_b = CP \quad (\text{Ecuación 2.30})$$

De la misma manera se lo realiza para la junta obteniendo:

$$P_m = \frac{k_m}{k_b + k_m} P = (1 - C)P \quad (\text{Ecuación 2.31})$$

Reemplazando la ecuación 2.31 en 2.25 la carga de compresión en el material y tensión en el perno ahora es:

$$F_b = F_i + CP \quad (\text{Ecuación 2.32})$$

$$F_m = F_i + (1 - C)P \quad (\text{Ecuación 2.33})$$



Finalmente se calculará el esfuerzo de tensión máximo. Con este esfuerzo se procederá a calcular el factor de seguridad.

$$N_y = S_y / \sigma_b \quad (\text{Ecuación 2.34})$$

### 2.2.10 Diseño de la estructura

La estructura se diseñará con tubo estructural cuadrado, con dimensiones de acuerdo al diámetro del recipiente y al material aislante. Dicha estructura será analizada en ANSYS para verificar su estabilidad y conocer el factor de seguridad del diseño.

### 2.2.11 Energía necesaria para realizar la carbonización

La energía que se requiere para realizar el proceso termoquímico se lo determinara mediante una sumatoria de calores mediante la siguiente ecuación:

$$Q = m \times c_p \times \Delta T \quad (\text{Ecuación 2.35})$$

El proceso termoquímico trabajara con dos fuentes de calor, la inicial contara con la combustión de GLP hasta una temperatura de 167 °C, la segunda fuente trabajara con los gases de pirolisis desde 167 °C hasta 500°C aproximadamente.

En la siguiente tabla se pueden observar los valores con los que se trabajará para conocer la energía necesaria para calentar los cuerpos.

**Tabla 2.15 Características de trabajo del horno de pirolisis**

	Masa [Kg]	Calor Especifico [KJ/Kg-K]
Cascara de arroz	10	66.52
Aire	0.019	1.004
Acero	16.55	0.46

Fuente: Elaboración propia.

### 2.2.11.1 Cálculos para determinar la energía necesaria con GLP (desde 30°C hasta 167 °C)

En esta primera etapa ocurre el proceso de deshidratación de la biomasa, la temperatura para realizar este proceso es de 167 °C.

$$M_s = \frac{M}{1+humedad} \quad (\text{Ecuación 2.36})$$

Donde:

M: Es la masa total de la biomasa (seca y húmeda) [Kg]

$M_s$ : Masa seca [Kg]

$$E_{humedad} = E_{agua} + E_{Le} \quad (\text{Ecuación 2.37})$$

$$E_{agua} = (M - M_s) \times Cp_{agua} \times \Delta T_1 \quad (\text{Ecuación 2.38})$$

$$E_{Le} = (M - M_s) \times L_e \quad (\text{Ecuación 2.39})$$

$$E_{cascara1} = E_{biomasa} + E_{humedad} \quad (\text{Ecuación 2.40})$$

$$E_{biomasa} = M_s \times Cp_{biomasa} \times \Delta T_1 \quad (\text{Ecuación 2.41})$$

$$E_{aire1} = M_{aire} \times Cp_{aire} \times \Delta T_1 \quad (\text{Ecuación 2.42})$$

$$E_{acero1} = M_{acero} \times Cp_{acero} \times \Delta T_1 \quad (\text{Ecuación 2.43})$$

La energía necesaria para realizar el proceso de deshidratación de la biomasa se define con la siguiente ecuación.

$$E_{T1} = E_{cascara1} + E_{aire1} + E_{acero1} \quad (\text{Ecuación 2.44})$$

Para determinar la potencia calórica, es necesario determinar el flujo volumétrico de los gases de GLP.

$$P_{GLP} = PC_{GLP} \times Q_{GLP} \times \eta \quad (\text{Ecuación 2.45})$$

$P_{GLP}$ : Potencia calórica [KW]

$PC_{GLP}$ : Poder calorífico inferior volumétrico del GLP [KJ/m<sup>3</sup>]

$Q_{GLP}$ : Flujo volumétrico [m<sup>3</sup>/seg]

$\eta$ : Eficiencia de combustión [%]

Para determinar el poder calorífico del GLP se utilizó normativa INEN 2260 (Instalaciones de gases combustibles para uso residencial comercial e industrial) la cual indica el % propano butano del GLP en Ecuador y su poder calorífico inferior

**Tabla 2.16 Poder calorífico del GLP másico y volumétrico**

Poder calorífico GLP	
Másico [KJ/Kg]	Volumétrico [KJ/m <sup>3</sup> ]
47500	85813

Fuente: Norma INEN

Para determinar el flujo volumétrico del GLP, se utilizará la siguiente expresión

$$Q = k \times \sqrt{\frac{\phi^5 \times \Delta P}{GE \times L}} \quad (\text{Ecuación 2.46})$$

### 2.2.11.2 Cálculos para determinar la energía necesaria con gases de pirolisis (desde 167°C hasta 500 °C)

De la misma manera se procede a calcular la energía que se necesita para calentar los cuerpos desde 167 °C a 500 °C.

$$E_{T2} = E_{cascara2} + E_{aire2} + E_{acero2} \quad (\text{Ecuación 2.47})$$

$$E_{cascara2} = M_s \times Cp_{biomasa} \times \Delta T_2 \quad (\text{Ecuación 2.48})$$

$$E_{aire2} = M_{aire} \times Cp_{aire} \times \Delta T_2 \quad (\text{Ecuación 2.49})$$

$$E_{acero2} = M_{acero} \times Cp_{acero} \times \Delta T_2 \quad (\text{Ecuación 2.50})$$

El reactor de pirolisis será diseñado para que utilice sus gases de pirolisis en su beneficio, usándolos como la fuente de calor necesaria que reemplazara al GLP una vez terminado el proceso de deshidratación.

Para estimar la potencia necesaria, se deberá estimar un tiempo de residencia y una velocidad de gases de pirolisis, para así lograr diseñar el diámetro de la tubería donde los gases de combustión se combustionarán para alimentar al sistema.

### Potencia calórica de los gases de pirolisis.

$$P_{piro} = \frac{E_{T2}}{t_2} \quad (\text{Ecuación 2.51})$$

De las siguientes ecuaciones se determinará la potencia requerida y el tiempo que tomará el proceso en calentar la biomasa a la temperatura de interés.

$$P_{piro} = PC_{piro} \times Q_{piro} \times \eta \quad (\text{Ecuación 2.52})$$

$$Q_{piro} = V_{gpiro} \times \frac{\pi \times \phi^2}{4} \quad (\text{Ecuación 2.53})$$

Sabemos que todos los fluidos se desplazan siempre y cuando exista un diferencial de presión entre dos puntos, para el diseño de la tubería se estimara una diferencia de presión (15 psi) desde la parte superior del reactor (boca de salida de gases)

### 2.2.12 Combustión y control de contaminantes

La combustión es la relación de oxidación de un producto químico oxidable, liberando calor y emisiones lumínicas, la reacción se concentra en la zona de llama donde se produce la mayor parte de las reacciones del proceso. El oxígeno generalmente se suministra como aire ambiental.

La reacción de combustión se basa en la reacción química exotérmica de una sustancia denominada combustible, con el oxígeno, esta mezcla de sustancia que contiene oxígeno se denomina comburente.

Para realizar los cálculos se asumió combustión completa es decir que el combustible se quema al máximo grado posible de oxidación, esto significa que no habrá CO en los humos, en los productos de la combustión se puede encontrar solo  $N_2$ ,  $CO_2$ ,  $H_2O$  y  $SO_2$ .

#### **2.2.12.1 Análisis químico del combustible**

La composición de un combustible es fundamental para poder determinar los parámetros estequiométricos característicos de la relación de combustión.

Para este proyecto se realizará un análisis de combustión para el GLP (Mezcla propano-butano) y para los gases de pirolisis (Metano y otros gases).

#### **2.2.13 Transferencia de calor**

Se realizará un análisis de transferencia de calor en estado estable a la temperatura de pirólisis para analizar el comportamiento de los gases de combustión, tanto el aporte de calor al tanque, como las pérdidas calor por las paredes hacia el ambiente.

Según Prabir Basu, durante la pirolisis, el calor es transportado a la superficie externa de las partículas por radiación y convección. Esta es transferida al interior de la partícula por conducción y convección de los poros que se expanden a medida que la biomasa se va degradando. Para este caso dentro del reactor durante el proceso de pirolisis, la transferencia de calor se por los siguientes métodos:

- Conducción dentro de la partícula
- Convección dentro de los poros de las partículas
- Convección y radiación entre la superficie del reactor y el hogar

➤ Temperatura constante en la superficie del reactor

Se asumió que la transferencia de calor dentro de la biomasa se da únicamente por conducción, suponiendo a la biomasa como una gran masa sólida, despreciando los efectos de la porosidad. La temperatura aumentará con respecto al tiempo, en el caso de realizar cambios en las condiciones de calentamiento, se altera la tasa de reacción y afectará la distribución de los productos.

En la práctica la transferencia de calor por convección dado por los gases de combustión, aportara una considerable energía calórica hacia el tanque de biomasa, con el cual se puede reducir el tiempo de residencia y aumentar la eficiencia del sistema.

$$\dot{Q}_{aporte} = \frac{T_{humos} - T_{biomasa}}{R_{tot1}} \quad (\text{Ecuación 2.54})$$

$$R_{tot1} = \frac{1}{h_{humos} \times A_{cil}} + \frac{1}{2\pi K_{acero} L_{cil} \times \ln\left(\frac{D_{ext}}{D_{in}}\right)_{acero}} + \frac{1}{2\pi K_{arroz} L_{cil} \times \ln\left(\frac{D_{ext}}{D_{in}}\right)_{Biomasa}} \quad (\text{Ecuación 2.55})$$

Este resultado será el flujo de calor que se le aportará a la biomasa a una temperatura estable de 500 °C.

**Pérdidas de calor hacia las superficies.**

Se calculará la pérdida de calor de los humos de la cámara de combustión hacia la superficie exterior. Las ecuaciones 2.56, 2.57 se utilizarán para calcular dicha pérdida de calor y su resistencia respectivamente.

$$\dot{Q}_{perdido} = \frac{T_{humos} - T_{\infty,amb}}{R_{tot2}} \quad (\text{Ecuación 2.56})$$

$$R_{tot2} = \frac{1}{h_{humos} \times A} + \frac{L_{ladrillo}}{K_{ladrillo} \times A} + \frac{L_{acero}}{K_{acero} \times A} + \frac{1}{h_{\infty,amb} \times A} \quad (\text{Ecuación 2.57})$$

### Temperatura de la pared del horno

Con la pérdida de calor calculada se procederá a calcular la temperatura de la pared exterior del reactor. Esta pared debe estar en un rango de temperatura entre 40 y 55 °C de acuerdo al reglamento de permiso de trabajo INSHT para que no existan posibles quemaduras de los operadores.

$$\dot{Q}_{perdido} = \frac{T_{humos} - T_{pared}}{R_{tot3}} \quad (\text{Ecuación 2.58})$$

$$R_{tot3} = \frac{1}{h_{humos} \times A} + \frac{L_{ladrillo}}{K_{ladrillo} \times A} + \frac{L_{acero}}{K_{acero} \times A} \quad (\text{Ecuación 2.59})$$

## 2.3 Accesorios y aislantes

### 2.3.1 Válvula de bola

Las válvulas serán utilizadas como mecanismos de llave de paso para regular la salida de los gases en varios puntos del ciclo de retroalimentación el proceso de pirolisis. Estas serán seleccionadas dependiendo de sus características técnicas las cuales deben ajustarse a los requerimientos como el diámetro de la tubería, el tipo de fluido que controlara, entre otros. Entre sus características es que son de paso completo esto quiere decir que su apertura es del mismo tamaño que el



diámetro interior, además, debido a que la válvula se abre o se cierra en 90°, tiene una disminución del riesgo de fuga de la glándula de sello.

### **2.3.2 Empaquetadura**

Este accesorio ayudará a evitar la pérdida de gases en el sistema por medio del sellado de la unión de la tapa con el tanque de almacenamiento de biomasa. Su selección dependerá de la temperatura, la presión, y el medio de trabajo, según esto se seleccionará el material, espesor y tipo de empaquetadura para el trabajo requerido.

### **2.3.3 Instrumentos de medición**

Estos equipos serán utilizados para llevar un control de presión y temperatura sobre el proceso de pirólisis. Se ubicarán en el tanque de almacenamiento de la biomasa y a la salida de los gases de combustión.

### **2.3.4 Aislantes térmicos**

Los aislantes son un parámetro importante en el diseño del reactor, ya que se requiere perder la menor cantidad de energía posible dentro de la cámara de combustión. Para su selección se tomará en cuenta la resistencia a altas y bajas temperaturas, la resistencia a la penetración de las cenizas, capacidad de mantener temperatura, una baja conductividad térmica, entre otros.

# CAPÍTULO 3

## 3. RESULTADOS

En este capítulo se mostrarán los resultados obtenidos mediante cálculos y simulaciones. Con respecto a accesorios como válvulas e instrumentos de medición se consultó con catálogos locales y se seleccionó el accesorio más adecuado para el diseño.

Además, se realizó un análisis de costo para estimar cuanto se invertirá en este proyecto. Los cálculos, catálogos, y demás resultados se encuentran en la sección de anexos.

### 3.1 Resultados del diseño

El reactor estará conformado por un tanque de almacenamiento de biomasa, su respectiva tapa soldada a una tubería, un sistema de recirculación de gases de pirólisis, una cámara de combustión conformada por la estructura y materiales aislantes. A continuación, se muestran los resultados que comprende el diseño de este reactor.

#### 3.1.1 Resultados del diseño del tanque de almacenamiento de biomasa.

##### 3.1.1.1 Resultados del volumen del tanque

Como condición inicial debemos obtener el volumen total de la cascarilla de arroz que va a ser pirolizada. Utilizando los datos de la tabla 2.8 se obtuvo los siguientes resultados.

**Tabla 3.1 Volumen que ocupara el tamo de arroz**

Densidad del tamo (kg/m <sup>3</sup> )	masa (kg)	volumen (m <sup>3</sup> )
96	10	0,1042

Fuente: Elaboración propia.

El acero seleccionado será el ASTM A516 Gr 70, con sus características descritas en la tabla 2.9. Se eligió este acero ya que a la temperatura de 500 °C mantiene un esfuerzo de tensión permisible aceptable para el diseño.

### 3.1.1.2 Resultados del diseño del cascaron cilíndrico

Obtenido a partir de la formula descrita en la tabla 2.10 se obtuvieron los siguientes resultados:

**Tabla 3.2 Espesor del cascaron cilíndrico**

H [m]	D [m]	t del cilindro [m]	Volumen del cilindro [m <sup>3</sup> ]
0.8	0.4	0.00300	0.10053

Fuente: Elaboración propia

### 3.1.1.3 Resultados del diseño de los domos toriesféricos

A partir de la fórmula del espesor t de la tabla 2.11 se obtuvo los siguientes resultados.

**Tabla 3.3 Espesor del domo toriesférico**

t del domo [mm]	Volumen del domo toriesférico [m <sup>3</sup> ]
2.6	0.00776

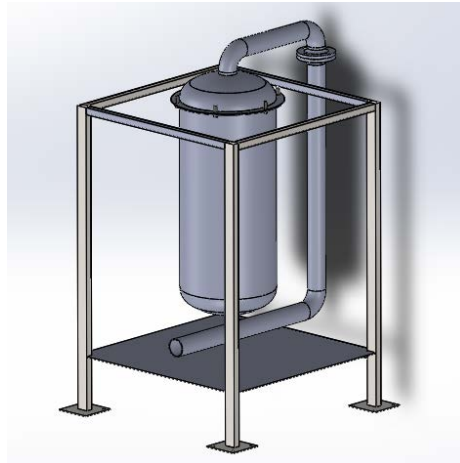
Fuente: Elaboración propia

El volumen total del tanque de almacenamiento de la biomasa considerando los dos domos toriesféricos y el cilindro será de 0.116 m<sup>3</sup>.

### 3.1.1.4 Resultado del diseño de la estructura del reactor

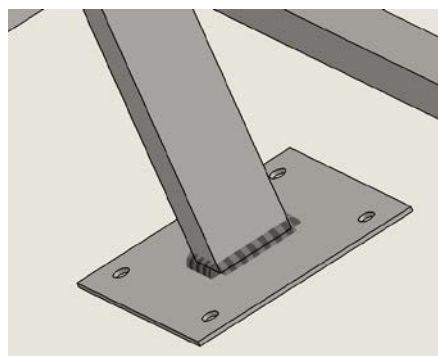
Para el diseño del chasis se utilizó tubo estructural cuadrado y tubo estructural rectangular, previo a esto se realizaron simulaciones

estructurales variando la configuración de este diseño, finalmente se decidió por el diseño que tenga un factor de seguridad razonable y menor grado de complejidad, a continuación, se podrá observar la estructura de soporte del reactor.



**Figura 3.1** Estructura del reactor de pirolisis

En la figura 3.1 se puede observar al reactor con su estructura y al tanque de calentamiento de biomasa con el sistema de recirculación de gases de pirolisis.



**Figura 3.2** Uniones soldadas

Para todas las uniones soldadas del diseño se decidió trabajar con soldadura SMAW con electrodo revestido E7018 y E6013.

### 3.1.1.5 Resultados de pernos de sujeción

Los pernos de sujeción diseñados para el conjunto bridado del tanque de almacenamiento de la biomasa serán 6 pernos M12 clase 10.9 circunferencialmente simétrica a lo largo de la brida.

### 3.1.2 Resultados de la energía necesaria para el proceso termoquímicos

#### 3.1.2.1 Resultado de energía necesaria (desde 30°C a 167°C)

Utilizando la fórmula 2.40 se obtuvieron los resultados de la energía necesaria para que la biomasa llegue a la temperatura de 167 °C. En la tabla 3.4 se muestran estos resultados.

**Tabla 3.4 Energía para calentar la cascarilla de arroz de 30 a 167 °C**

$E_{cascara1}$ [KJ]	$E_{aire1}$ [KJ]	$E_{acero1}$ [KJ]	$E_{T1}$ [KJ]
84205	2,613	1043	85251

Fuente: Elaboración propia

Se obtuvo los resultados a partir de la ecuación 2.45 y la ecuación 2.46 se halló el flujo volumétrico necesario para llevar la biomasa a 167 °C y el tiempo en que se llevará a cabo esta parte del proceso.

**Tabla 3.5 Parámetros del reactor con alimentación de GLP**

Flujo volumétrico Gases Pirólisis [m <sup>3</sup> /h]	Tiempo[minutos]	Potencia calorífica [BTU/hr]
4.75	14.8	328184

Fuente: Elaboración propia

### 3.1.2.2 Resultado de energía necesaria (desde 167°C hasta 500 °C)

Utilizando la fórmula 2.48 se obtuvieron los resultados de la energía necesaria para que la biomasa llegue desde 167 °C hasta la temperatura de 500 °C. En la tabla 3.6 se muestran estos resultados.

**Tabla 3.6 Energía necesaria para llevar la cascarilla de arroz de 167 a 500 °C.**

$E_{cascara2}$ [KJ]	$E_{aire2}$ [KJ]	$E_{acero2}$ [KJ]	$E_{T2}$ [KJ]
198132	2,613	2535	200670

Fuente: Elaboración propia

Se obtuvo los resultados a partir de la ecuación 2.52 y la ecuación 2.53 se halló el flujo volumétrico necesario para llegar desde 167 °C hasta la temperatura de 500 °C.

**Tabla 3.7 Parámetros del reactor con la retroalimentación**

Flujo volumétrico Gases Pirólisis [m <sup>3</sup> /h]	Tiempo de residencia [horas]	Potencia calorífica [BTU/hr]
11.4	3.57	53237

Fuente: Elaboración propia

### 3.1.2.3 Productos de combustión del GLP

Se realizó los cálculos con una cantidad de 0.84 Kg de mezcla propano – butano y con una densidad de 0.013 m<sup>3</sup>, los productos de combustión fueron determinados mediante combustión con exceso de aire del 20%. En las tablas 3.8, 3.9 y 3.10 se muestran los resultados.

**Tabla 3.8 Balance de materia de la combustión de GLP**

Entra (kmoles)				Sale (kmoles)			
Propano	Butano	Oxígeno	Nitrógeno	Dióxido de Carbono	Agua	Oxígeno	Nitrógeno
0,0114	0,0057	0,112	0,42	0,057	0,074	0,021	0,478

Fuente: Elaboración propia

**Tabla 3.9 Composición del gas de salida de la combustión de GLP**

Productos	Base Seca (%)	Base Húmeda (%)
CO <sub>2</sub>	9,68	8,60
N <sub>2</sub>	71,31	63,35
O <sub>2</sub>	19,02	16,89
H <sub>2</sub> O	0,00	11,16
Total	100,00	100,00

Fuente: Elaboración propia

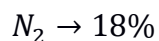
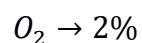
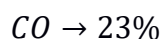
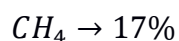
**Tabla 3.10 Relación masa aire combustible de la combustión de GLP**

Relación masa A/F	Masa Aire / Masa GLP	Resultado
Masa Aire (kg)	15,37	18,30
Masa GLP (kg)	0,84	

Fuente: Elaboración propia

#### **3.1.2.4 *Productos de combustión de los gases de pirólisis***

Mediante pruebas se determinó que la composición química de los gases de pirólisis son:



De estos compuestos se combustiónarán el metano y el monóxido de carbono.

De los 10 kg de biomasa el 65% se convierte en gases y el 35% en sólido, la masa de los gases a combustionarse será de 6.5 kg, para la combustión de dichos gases se consideró un exceso de aire del 20%. (Belonio, Belonio, & Larano, 2010)

En las tablas 3.11, 3.12 y 3.13 se muestran los resultados de este análisis.

**Tabla 3.11 Balance de materia de la combustión de los gases de pirólisis.**

Entra (kmoles)				Sale (kmoles)			
Metano	Monóxido	Oxígeno	Nitrógeno	Dióxido de Carbono	Agua	Oxígeno	Nitrógeno
0.069	0.053	0.1645	0.42	0.122	0.138	0.138	0.478

Fuente: Elaboración propia

**Tabla 3.12 Composición del gas de salida de la combustión de los gases de pirólisis.**

Productos	Base Seca (%)	Base Húmeda (%)
CO <sub>2</sub>	17.27	14.45
N <sub>2</sub>	59.45	49.73
O <sub>2</sub>	23.28	19.48
H <sub>2</sub> O	0.00	16.34
Total	100.00	100.00

Fuente: Elaboración propia

**Tabla 3.13 Relación masa aire combustible de la combustión de los gases de pirólisis.**

Relación masa A/F	Masa Aire / Masa GLP	Resultado
Masa Aire (kg)	27,26	4,19
Masa GLP (kg)	6,5	

Fuente: Elaboración propia

### 3.1.3 Resultados de transferencia de calor del sistema.

Se obtuvo de la ecuación 2.54 el calor de aportación al tanque de almacenamiento de la biomasa.



$$Q_{aporte} = 511.5 W$$

De igual manera con la ecuación 2.56 de transferencia de calor se obtuvo el calor perdido por las paredes de la cámara de combustión.

$$Q_{perdido} = 1873 W$$

Es importante saber la temperatura de la pared exterior de la cámara, esta se la calculo con la ecuación 2.58.

$$T_{pared} = 51.3 ^\circ C$$

### **3.1.4 Selección de aislantes térmicos**

Para la selección de los aislantes térmicos se debe tener en cuenta el espesor del mismo ya que de este dependerá la temperatura de la pared exterior de la cámara de combustión.

#### **3.1.4.1 Ladrillo refractario**

Se seleccionaron los ladrillos refractarios aislante de la empresa ERECOS (Empresa de Refractarios Colombianos), serie 9" × 4 1/2" × 2 1/2 " de la clasificación UA-23 ya que resiste altas temperaturas, y tiene una baja conductividad térmica. Las características principales de este ladrillo se encuentran en el Apéndice B.

#### **3.1.4.2 Cemento refractario**

El cemento refractario seleccionado es el Concrax 1500 (Concreto Refractario Sílice-Aluminoso denso) de la empresa ERECOS, cuya aplicación es general en zonas donde la temperatura no exceda de 1540 °C, con un máximo tamaño de grano de 3 mm. Su presentación es en sacos de 25 Kg.

### **3.1.4.3 Lana de roca**

Se seleccionó lana de roca marca ProRox SL 980, ya que este trabaja a una temperatura máxima de 700 °C, tiene una baja conductividad térmica, su presentación es en paneles de 1.2 x 0.6 metros y un espesor de 8 mm el cual cumple con los requerimientos como aislante térmico en la cámara de combustión. Sus propiedades se encuentran en el Apéndice B.

## **3.1.5 Selección de accesorios**

### **3.1.5.1 Válvula de bola**

Para el horno de pirolisis se necesitan 4 válvulas de bola para los gases de retroalimentación y para regular la salida de los gases de combustión por la chimenea. Las válvulas serán de 2.5 pulgadas, las características técnicas se encuentran en el Apéndice B.

### **3.1.5.2 Equipos de medición Manómetro y termómetro.**

Los equipos de medición son seleccionados según los rangos de temperatura y presión que alcanzara el horno de pirolisis e irán ubicados en puntos estratégicos y de fácil acceso, por lo que serán analógicos, de caratula, con lentes removibles, además que tendrán una conexión roscada tipo macho para facilitar la instalación. Las características técnicas del manómetro y del termómetro se encuentran en el Apéndice B.

### **3.1.5.3 Empaquetadura**

Se seleccionó una empaquetadura de 1.5 mm de espesor hecha de grafito, marca CPS 1100. Esta empaquetadura fue escogida por su

resistencia a altas presiones y temperaturas. Los datos técnicos de este material se encuentran en el Apéndice B.

#### **3.1.5.4 Válvula reguladora de presión para GLP (50 mbar)**

Mediante cálculos se estimó que la instalación de GLP para proporcionar la energía inicial del sistema se debe colocar una válvula reguladora de presión de 50 milibares para así lograr el flujo necesario. Se seleccionó una válvula de marca ROTAREX donde sus características se encuentran en el Apéndice B.

#### **3.1.5.5 TEES**

Se seleccionaron tees para los cambios de sección ya que se necesitará conectar válvulas en estas tanto para la salida de los gases como para los posibles condensados que existan durante el proceso de pirolisis. Las características y medidas de este accesorio se encuentran en el Apéndice B.

### **3.2 Resultados de simulaciones**

#### **3.2.1 Esfuerzos mecánicos en la estructura del reactor (Ansys)**

Para esta estructura se probaron 3 análisis diferentes:

1. Utilizando tubos rigidizadores debajo de la plancha superior de 4 mm de espesor.
2. Plancha superior de 4 mm de espesor.
3. Plancha superior de 3 mm de espesor.

Al realizar los respectivos análisis utilizando el software Ansys se pudo notar que no era necesario tubos rigidizadores ni que la plancha sea de 4

mm de espesor para poder soportar la carga de flexión a la que se encontrará sometida por acción del tanque y la biomasa (cascara de arroz). Teniendo como resultado final una estructura más económica y con las especificaciones técnicas necesarias para soportar las cargas de trabajo.

**Tabla 3.14 Resultados del análisis de esfuerzos realizados en Ansys.**

<b>TABLA DE RESULTADOS</b>			
<b>Análisis</b>	<b>Min</b>	<b>Max</b>	<b>UNIDADES</b>
<b>Deformación total</b>	0	1,13	mm
<b>Esfuerzo Von Mises</b>	1,038 e 5	1,414 e 8	Pa
<b>Factor de Seguridad Estática</b>	1,767	15	

Fuente: Elaboración propia

### 3.2.2 Pruebas de presión (Ansys)

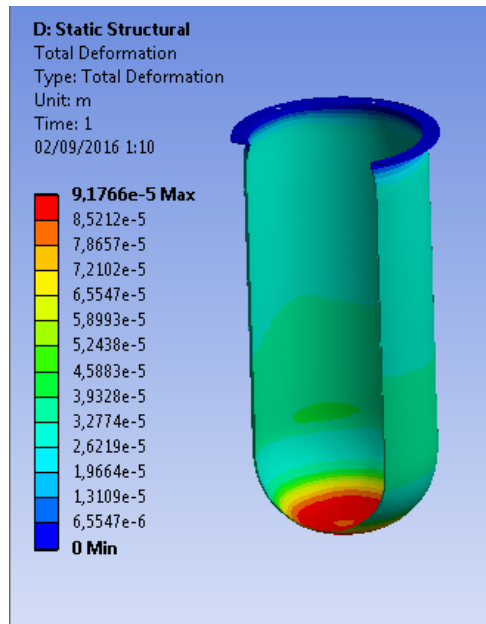
Se realizaron tres análisis para el tanque de almacenamiento de la biomasa Los cuales son:

- Deformación total
- Esfuerzos Von mises
- Factor de seguridad estático

**Tabla 3.15 Resultados de los análisis realizados en Ansys**

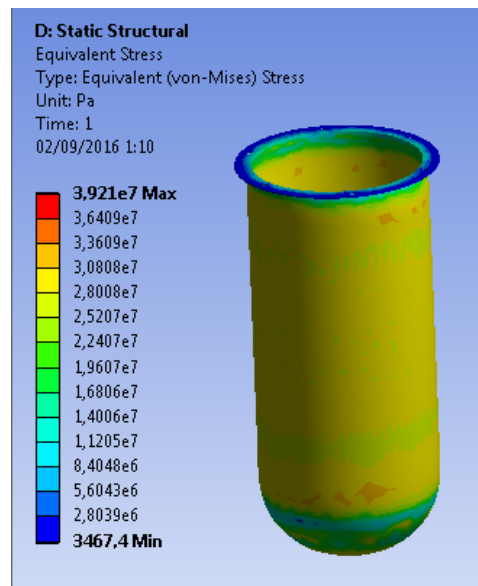
<b>TABLA DE RESULTADOS</b>			
<b>Análisis</b>	<b>Min</b>	<b>Max</b>	<b>UNIDADES</b>
Deformación total	0	0,092	mm
Esfuerzo Von Mises	3467,4	3,921 e 7	Pa
Factor de Seguridad Estática	6,376	15	
Factor de Seguridad Fatiga	2,198	15	

Fuente: Elaboración propia



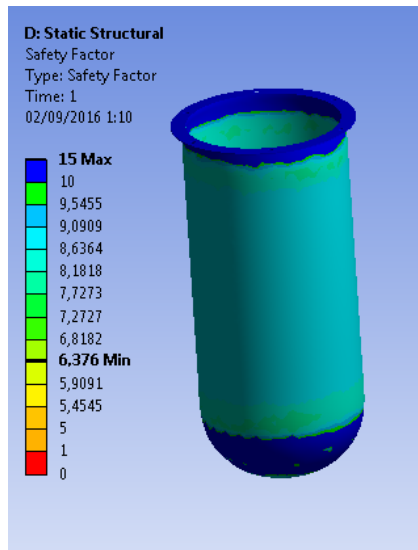
**Figura 3.3 Deformación total**

Fuente: Elaboración propia



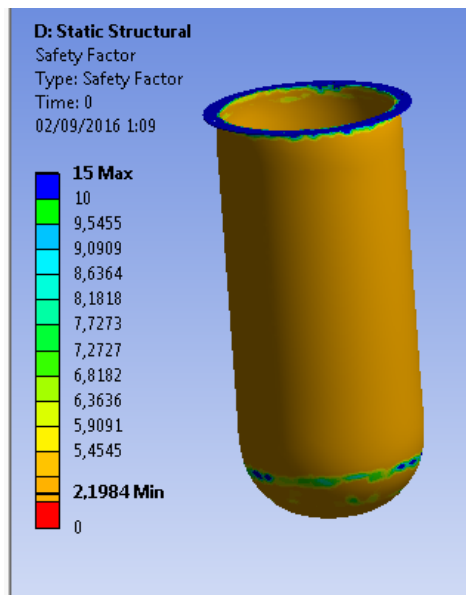
**Figura 3.4 Esfuerzos Equivalente Von – mises**

Fuente: Elaboración propia



**Figura 3.5 Factor de seguridad estático**

Fuente: Elaboración propia



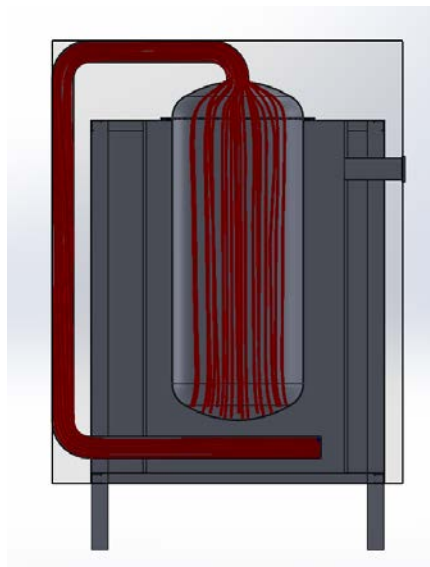
**Figura 3.6 Factor de seguridad dinámico**

Fuente: Elaboración propia

### 3.2.3 Simulación de flujo (SolidWorks)

Para verificar que la trayectoria de los gases de calentamiento es homogénea desde el tanque de calentamiento hasta la salida de los gases a combustionarse, se simuló la trayectoria del flujo gaseoso por medio de la herramienta Flow Simulation de SolidWorks.

De acuerdo con la figura 3.7 se puede observar que el diseño de la recirculación de gases no presenta interrupciones, y además que los codos son gentiles al cambio de dirección, sin presentar acumulaciones de gases.



**Figura 3.7** Simulación de flujo de los gases de calentamiento de biomasa

Fuente: Elaboración propia

### 3.3 Análisis de costos

A continuación, se presentan en detalle los costos de materiales y costos hora hombre para la realización del proyecto.

**Tabla 3.16 Precios de los materiales del proyecto**

<b>Materiales</b>	<b>Precio unitario</b>	<b>Cantidad</b>	<b>Precio</b>
Ladrillo Refractario	\$ 1.50	238	357
Acero A516 Gr 70 3 mm 12mx2,40m	\$ 839.23	1	829.23
Brida DN 65	\$ 35.00	2	70
Concrax 1500	\$ 9.00	2	18
Termometro	\$ 95.00	2	190
Manómetro	\$ 55.00	1	55
Empaquetadura	\$ 24.00	1	24
Lana de roca	\$ 185.00	1	185
Tubería 3/4"	\$ 5.20	1	5.2
Tubería 2 1/2"	\$ 7.80	2	15.6
Tubo cuadrado 30 mm	\$ 6.50	2	13
Tubo rectangular 30 x 50 mm	\$ 8.28	1	8.28
Manguera domestica	\$ 1.00	1	1
Ataque rapido SRG Tubo	\$ 9.69	1	9.69
Válvula reguladora de presion ROTAREX 0-50 mbar	\$ 13.87	1	13.87
Pernos y tornillos	\$ 0.65	26	16.9
Cilindro GLP 15Kg	\$ 49.36	1	49.36
Pintura epoxica	\$ 65.29	1	65.29
Tees 2 1/2"	\$ 14.00	2	28
Válvula de bola	\$ 13.00	4	52
Total			1649.42

Fuente: Elaboración propia

Ahora se detallarán los valores considerados a la construcción y ensamblado del equipo por lo que se necesitara de mano de obra calificada para la realización de estos trabajos. Entre estos valores se encontrarán los costos de ingeniería, impuestos y utilidades.



**Tabla 3.17** Precio de actividades para el ensamblado del proyecto

Actividades	Costo hora hombre						Total
	Armado	Costo	Soldadura	Costo	Pintura	Costo	
Rebordeado del domo	4	45	-	-	-	-	45
Rolado de plancha	2	50					50
Cortes de tubos y planchas	2	35					35
Armado de estructura	6	57.13	3	326.4			383.53
Instalar couplin para termómetro	1	15					15
Granallado					8	52.23	52.23
Pintura					6	65.29	65.29
Ensamble	10	95.21					95.21
Total							741.26

Fuente: Elaboración propia

Los costos de utilidades y de ingeniería se calcularon con respecto a la suma de los costos de materiales y mano de obra, considerando un 20% para cada uno de estos. El IVA actual es del 14%.

**Tabla 3.18. Inversión total del proyecto**

Subtotal		741.26
Indirectos	20%	148.25
Utilidad	20%	148.25
Presupuesto goblal		1037.76
IVA	14%	145.28
Total de construcción		1183.04
Gasto total del proyecto		2832.46

Fuente: Elaboración propia

# CAPÍTULO 4

## 4. DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

En este capítulo se analizan los resultados obtenidos mediante cálculos, matrices de decisión y requerimientos para el diseño del reactor experimental de pirolisis. Asimismo, se discutirán los resultados de las diferentes fases de diseño tanto mecánicas como térmicas y también de selección de accesorios de acuerdo a normativas.

Se diseñó el reactor de pirolisis para 10 kg de biomasa agroforestal, por medio de una matriz de decisión, considerando el tipo de biomasa, tipo de horno y el proceso termoquímico. Es importante acotar, que para la realización de pruebas se seleccionó la cascarilla de arroz, por ser un residuo de alto valor en la costa ecuatoriana.

El diseño del reactor tendrá dos etapas de operación, la primera es la deshidratación de la cáscara de arroz mediante la combustión de GLP, este proceso deberá llegar hasta una temperatura de 167 °C, con un tiempo teórico 15 minutos y con una potencia calórica estimada de 30000 Btu/h después de este proceso el sistema de alimentación se cierra para empezar la otra etapa.

En la segunda etapa la operación dependerá de la energía para continuar con el calentamiento que requiere el proceso. En esta etapa el reactor se volverá independiente ya que los gases de calentamiento de pirólisis que se generan dentro del tanque almacenador de biomasa reemplazaran el combustible de GLP por biocombustible gaseoso. De modo que el tiempo teórico en esta etapa será 3.6 horas, con una potencia calórica teórica estimada de 52000 Btu/h. Es importante señalar, que el poder calorífico de los gases de pirólisis son 10 veces inferiores que el de los gases de GLP. Además, el proceso de pirólisis debe ser lento, por ende, para alcanzar la

temperatura máxima de carbonización de 500°C, se determina un tiempo teórico de 3.5 horas. Finalmente, el tiempo total de operación es de 4.30 horas aproximadamente.

El tanque de almacenamiento de biomasa fue diseñado a partir de las normativas de construcción ASME SECCION VII Div I. El reactor está compuesto por un cascaron cilíndrico y dos domos toriesféricos, se lo diseño con chapa de acero de 3 mm ASTM A516 GR 70, el cual cumple con los requerimientos de temperaturas del diseño.

Las simulaciones de resistencia mecánica desarrolladas en Ansys, demostraron que el reactor de pirolisis tiene un factor de seguridad aceptable (). Por otro lado, las deformaciones del acero generadas por las cargas, estas pueden ser consideradas despreciables, por lo que no representan riesgo de falla estructural. La simulación de flujo de gases desarrollada en Solidwork, permitió visualizar que la configuración del sistema de recirculación es idónea para el proceso de combustión de los gases de calentamiento de pirolisis.

El diseño de retroalimentación de los gases consta de válvulas tipo bola que permiten que los gases de calentamiento fluyan desde la parte superior del reactor hacia la parte inferior, a través de la tubería de recirculación de gases, en tal cual se logra mantener la temperatura del proceso. Para la condensación que se produce en la tubería de recirculación, se seleccionó una trampa de condensados. En la práctica la fracción condensable está conformada por compuestos químicos tales como ácido acético, acetona y metanol. Estos agentes pueden ser utilizados como biocombustibles una vez destilados.

Se recomienda utilizar un sistema de elevación con tecele para movilizar el tanque de calentamiento una vez culminado con el proceso de carbonización, para así poder retirar el producto final y darle mantenimiento al reactor.

Este proyecto de graduación contribuye al desarrollo de nuevos sistemas tecnológicos, energéticos y sostenibles, en pro del beneficio de la sociedad y del medio ambiente. Esta tecnología va de la mano de la ingeniería mecánica y su campo de acción

multidisciplinario. El reactor experimental de pirolisis puede ser considerado como una herramienta experimental en el desarrollo de aplicaciones en el campo de la Bioenergía. Producto a la versatilidad en el diseño para la prueba con diferentes clases de biomasa, y adaptabilidad a diferentes aplicaciones. Adicionalmente, este proyecto contribuye al fomento de sistemas sostenibles de energía, a partir de materiales y tecnología local impulsando el desarrollo de la sociedad.

# BIBLIOGRAFÍA

- Ball, B. E., & Carter, W. J. (2002). *Guidebook to ASME Section VII Div. 1 - Pressure Vessels*. Canada: CASTI.
- Ballesteros, B. (2012). *Estrategias para el desarrollo de bioenergía*. Galicia.
- Basu, P. (2010). *Biomass Gasification and Pyrolysis*. Oxford: Elsevier.
- Belonio, A. T., Belonio, D. A., & Larano, L. (2010). *A continuous flow rice husk gasifier for thermal applications*.
- CIEMAT. (2012). *Biocarburantes*.
- Diebold, J. P., & Bridgewater, A. V. (1997). En J. P. Diebold, & A. V. Bridgewater, *Overview of fast pyrolysis of biomass for the production of liquids fuels*.
- Gómez, A., Wolfgang, K., & Ricón, S. (2008). *Pirólisis de Biomasa*. Bogotá.
- Higman, v. d. (2008). *Gasification*. Oxford: ELSEVIER.
- Incropera, F. P., & De Witt, D. P. (1999). *Fundamentos de Transferencia de Calor*. México: PRENTICE HALL.
- LAINCO, s. (2014). *FICHA DE DATOS DE SEGURIDAD*.
- Mendez. (2012). *Energía de la biomasa y residuos sólidos*. El Salvador.
- Network, R. E. (2012). *Global Status Report*.
- Probstein, R. F., & Hicks, R. E. (2006). En R. F. Probstein, & R. E. Hicks, *Synthetic Fuels* (pág. 23). Dover Publications.
- Quiñónez, N. L., & Adum, V. J. (2005). *Prueba de densidad del Tamo de arroz*. Durán.
- vasica, G. y. (207). *Hoja de datos de seguridad para sustancias q*.
- Williams, C. (n.d.). *Wisconsin Grassland Bioenergy Network*. Retrieved from <http://www.wgbn.wisc.edu/conversion/bioenergy-conversion-technologies>

# Apéndices

Apéndice A: Cálculos de diseño del reactor de pirólisis.

Apéndice B: Catálogos de materiales y accesorios

Apéndice C: Guía para el control de la práctica experimental de carbonización.

# Apéndice A:

## Cálculos de diseño del reactor de pirólisis.

## A1 Cálculo del espesor del tanque de almacenamiento de la biomasa

### Espesor del cilindro

Datos:

$$P = 0.5 \text{ MPa}$$

$$S = 33.6 \text{ MPa}$$

$$E = 1$$

$$\rho = 7850 \text{ kg/m}^3$$

$$H = 0.8 \text{ m}$$

$$D = 0.4 \text{ m}$$

$$H/D = 2$$

$$R = 0.2 \text{ m}$$

$$t_{cilindro} = \frac{PR}{SE - 0.6P}$$
$$t_{cilindro} = \frac{500000 \times 0.2}{33600000(1) - 0.6(500000)}$$
$$t_{cilindro} = 0.003 \text{ m}$$
$$t_{cilindro} = 3 \text{ mm}$$

### Volumen del cilindro

$$V_{cilindro} = \frac{\pi}{4} R^2 H$$
$$V_{cilindro} = \frac{\pi}{4} (0.2)^2 0.8$$
$$V_{cilindro} = 0.100053 \text{ m}^3$$



## Espesor del domo toriesférico

De la tabla 2.12 se halla el valor de M.

$$M = 1.25$$

$$L/r = 4$$

$$L = 0.3$$

$$r = 0.075$$

$$t_{domo} = \frac{PLM}{2SE - 0.2P}$$

$$t_{domo} = \frac{500000 \times 0.3 \times 1.25}{2 \times 33600000(1) - 0.2(500000)}$$

$$t_{domo} = 0.00279 \text{ m}$$

## Volumen Total del domo toriesférico

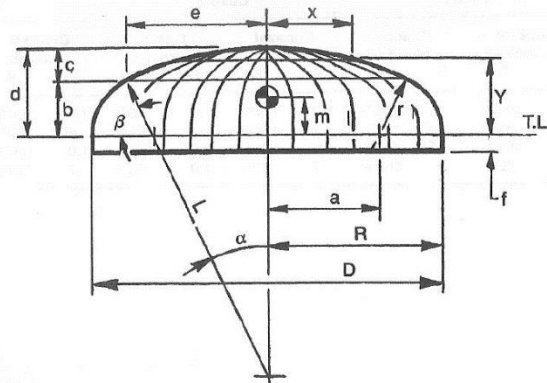


Figura A1. Domo Toriesférico

Inicialmente se calculan parámetros para poder calcular después el volumen total del domo toriesférico.

$$a = \frac{D - 2r}{2}$$

$$a = \frac{0.4 - 2 \times 0.075}{2}$$

$$a = 0.125$$

$$\alpha = \frac{a}{L - r}$$

$$\alpha = \frac{0.125}{0.3 - 0.075}$$

$$\alpha = 33.75^\circ$$

$$\beta = 90 - \alpha$$

$$\beta = 90 - 33.75^\circ$$

$$\beta = 56.25^\circ$$

$$b = r \times \cos(\alpha)$$

$$b = 0.075 \times \cos(33.75)$$

$$b = 0.0624$$

$$c = L - L \times \cos(\alpha)$$

$$c = 0.3 - 0.3 \times \cos(33.75)$$

$$c = 0.0506$$

$$e = L \times \sin(\alpha)$$

$$e = 0.3 \times \sin(33.75)$$

$$e = 0.1667$$

$$\phi = \frac{\beta}{2}$$

$$\phi = \frac{56.25}{2}$$

$$\phi = 28.13^\circ$$

$$V_1 = (\text{Tronco}) = 0.333b\pi(e^2 + ea + a^2)$$

$$V_1 = (\text{Tronco}) = 0.333(0.0624)\pi(0.1667^2 + 0.1667 \times 0.125 + 0.125^2)$$

$$V_1 = 0.00419 \text{ m}^3$$

$$V_2 = (\text{Segmento esférico}) = \pi c^2 \left( L - \frac{c}{3} \right)$$

$$V_2 = (\text{Segmento esférico}) = \pi 0.0506^2 \left(0.3 - \frac{0.0506}{3}\right)$$

$$V_2 = 0.000667 \text{ m}^3$$

$$V_3 = (\text{Sólido de revolución}) = \frac{120 r^3 \text{sen}\phi \text{cos}\phi + a\phi\pi^2 r^2}{90}$$

$$V_3 = \frac{120 \times 0.075^3 \text{sen}(28.13)\text{cos}(28.13) + 0.125 (28.13)\pi^2 0.075^2}{90}$$

$$V_3 = c \text{ m}^3$$

$$V_{\text{domo}} = V_1 + V_2 + V_3$$

$$V_{\text{domo}} = 0.00419 + 0.000667 + 0.000667$$

$$V_{\text{domo}} = 0.007762 \text{ m}^3$$

### Cálculo del desarrollo

$$D.L. = 2 \left(\frac{\beta}{180}\right) \pi r + 2 \left(\frac{\alpha}{180}\right) \pi L$$

$$D.L. = 2 \left(\frac{56.25}{180}\right) \pi r + 2 \left(\frac{33.75}{180}\right) \pi \times 0.3$$

$$D.L. = 0.5 \text{ m}$$

### Volumen total del tanque

$$V_T = V_{\text{cilindro}} + 2 \times V_{\text{domo}}$$

$$V_T = 0.100053 + 2 \times 0.007762$$

$$V_T = 0.116054 \text{ m}^3$$

### Peso del tanque de almacenamiento de biomasa

$$W_{\text{Tanque}} = 2\pi \times D.L.^2 \times t + \pi D \times H \times t$$

$$W_{\text{Tanque}} = 2\pi \times 0.5^2 \times 0.003 + \pi 0.4 \times 0.8 \times 0.003$$

$$W_{\text{Tanque}} = 33 \text{ kg}$$

## A2 Diseño de pernos

### Cálculo de la carga aplicada P

$$p_{max} = 0.5 \text{ MPa}$$

$$P_{total} = pA$$

$$P_{total} = p \times \frac{\pi D^2}{4}$$

$$P_{total} = 500 \text{ KPa} \times \frac{\pi 0.4^2}{4}$$

$$P_{total} = 62.83 \text{ KN}$$

$$P = \frac{P_{total}}{N_{pernos}}$$

$$P = \frac{62.83}{6}$$

$$P = 10.47 \text{ KN}$$

Se asumen 6 pernos M12 clase 10.9 el cual cuenta con las siguientes características:

$$d = 12 \text{ mm}$$

$$A_t = 84.27 \text{ mm}^2$$

$$l_{perno} = 10 \text{ mm}$$

$$p = 1.75$$

$$d_r = 9.85$$

$$S_p = 830 \text{ MPa}$$

### Calculo de la precarga del perno

$$F_i = 0.9 S_p A_t$$

$$F_i = 0.9(830 \text{ MPa})(0.08.27 \text{ m}^2)$$

$$F_i = 62.95 \text{ KN}$$

### Cálculo de la rigidez de la junta

$$k_{m_1} = \frac{\pi(D^2 - d^2) E_m}{4 l}$$
$$k_{m_1} = \frac{\pi(0.44^2 - 0.4^2)}{4} \times \frac{20 \times 10^{10}}{7.5 \text{ mm}} \times \frac{1000 \text{ mm}}{1 \text{ m}}$$
$$k_{m_1} = 703716 \text{ MPa}$$

### Cálculo de la rigidez del empaque

$$A_g = \frac{\pi}{4} \left( \frac{D_f^2 - D_p^2}{N_{\text{pernos}}} \right)$$
$$A_g = \frac{\pi}{4} \left( \frac{0.44^2 - 0.4^2}{6} \right)$$
$$A_g = 0.008247 \text{ m}^2$$
$$k_{m_2} = K_g = \frac{0.008247 \text{ m}^2}{0.00318} \times 140 \text{ MPa}$$
$$k_{m_2} = K_g = 363 \frac{\text{MN}}{\text{m}}$$

### Longitud de la cuerda, del vástago y de la cuerda en la zona de sujeción

$$l_{\text{cuerda}} = 2 \times 12 + 6 \text{ mm}$$
$$l_{\text{cuerda}} = 30 \text{ mm}$$
$$l_s = 50 - 30$$
$$l_s = 20 \text{ mm}$$
$$l_t = l - l_s$$
$$l_t = 45 - 20$$
$$l_t = 25 \text{ mm}$$

### Cálculo de la rigidez del perno

$$A_b = \frac{\pi d^2}{4}$$

$$A_b = \frac{\pi 12^2}{4}$$

$$A_b = 113 \text{ mm}^2$$

$$k'_b = \left(1 + \frac{d}{l}\right)^{-1} \frac{A_t A_b}{A_b l_t + A_t l_s} E_b$$

$$k'_b = \left(1 + \frac{12}{45}\right)^{-1} \frac{84.27 \text{ mm}^2 \cdot 113 \text{ mm}^2}{113 \times 25 + 84.27 \times 20} \times \frac{1 \text{ m}}{1000 \text{ mm}} 20 \times 10^{10}$$

$$k'_b = 333.35 \text{ MPa}$$

$$\frac{1}{k_m} = \frac{1}{k_{m_1}} + \frac{1}{k_{m_2}}$$

$$\frac{1}{k_m} = \frac{1}{703716} + \frac{1}{363}$$

$$k_m = 363 \text{ MPa}$$

### Factor de rigidez de la junta

$$C = \frac{k'_b}{k_m + k'_b}$$

$$C = \frac{333.35}{363 + 333.35}$$

$$C = 0.4787$$

### Carga aplicada en el perno

$$P_b = CP$$

$$P_b = 0.4787 \times 10.47$$

$$P_b = 5.01 \text{ KN}$$

### Carga aplicada en el material

$$P_m = (1 - C)P$$

$$P_m = (1 - 0.4787) \times 10.47$$

$$P_m = 5.45 \text{ KN}$$

### Fuerza de tensión sobre el perno

$$F_b = F_i + P_b$$
$$F_b = 62.95 + 5.01$$
$$F_b = 67.96 \text{ KN}$$

### Fuerza de tensión sobre el material

$$F_m = F_i - P_m$$
$$F_m = 62.95 - 5.45$$
$$F_m = 57.5 \text{ KN}$$

### Esfuerzo ejercido sobre el perno

$$\sigma_b = \frac{F_b}{A_t} = \frac{67.96 \text{ KN}}{84.27 \text{ mm}^2} \times \frac{10^6 \text{ mm}^2}{1 \text{ m}^2}$$
$$\sigma_b = 806.45 \text{ MPa}$$

### Factor de seguridad contra la fluencia

$$N_y = \frac{S_y}{\sigma_b}$$
$$N_y = \frac{940 \text{ MPa}}{806.45 \text{ MPa}}$$
$$N_y = 1.17$$

### Carga requerida para separar las juntas

$$P_0 = \frac{F_i}{1 - C}$$
$$P_0 = \frac{62.83 \text{ KN}}{1 - 0.4787}$$
$$P_0 = 120.5 \text{ KN}$$

### Factor de seguridad de separación

$$N_{separacion} = \frac{P_0}{P} = \frac{120.5 \text{ KN}}{10.47 \text{ KN}}$$
$$N_{separacion} = 11.5$$

El factor de seguridad calculado contra la separación de las placas es aceptable, con respecto al factor de seguridad contra la fluencia es bajo, ya que el perno se lo precarga a una carga cercana a la resistencia de fluencia.

### A3 Energía necesaria para realizar la carbonización

$$Q = m \times c_p \times \Delta T$$

Donde:

*Q*: Es la energía que se requiere para calentar un cuerpo hasta una dicha temperatura [KJ]

*m*: Es la masa de los cuerpos que se someterán al calentamiento [kg]

*c<sub>p</sub>*: Es el calor específico de los cuerpos [KJ/Kg-K]

*ΔT*: Es la diferencia de temperatura del medio ambiente y la temperatura de trabajo [K]

### Energía necesaria con GLP (desde 30°C hasta 167 °C)

$$M_s = \frac{M}{1 + \text{humedad}}$$

Donde:

*M*: Es la masa total de la biomasa (seca y húmeda) [Kg]

*M<sub>s</sub>*: Masa seca [Kg]



$$E_{humedad} = E_{agua} + E_{Le}$$

$$E_{agua} = (M - M_s) \times Cp_{agua} \times \Delta T_1$$

$$E_{Le} = (M - M_s) \times L_e$$

Donde:

$L_e$ : Calor latente del agua [KJ/Kg]

$$E_{cascara1} = E_{biomasa} + E_{humedad}$$

$$E_{biomasa} = M_s \times Cp_{biomasa} \times \Delta T_1$$

$$E_{aire1} = M_{aire} \times Cp_{aire} \times \Delta T_1$$

$$E_{acero1} = M_{acero} \times Cp_{acero} \times \Delta T_1$$

La energía necesaria para realizar el proceso de deshidratación de la biomasa se define con la siguiente ecuación.

$$E_{T1} = E_{cascara1} + E_{aire1} + E_{acero1}$$

**Tabla A1.** Resultados de la energía necesaria para el proceso de deshidratación de la biomasa.

$E_{cascara1}$ [KJ]	$E_{aire1}$ [KJ]	$E_{acero1}$ [KJ]	$E_{T1}$ [KJ]
84205	2,613	1043	85251

Para determinar la potencia calórica, es necesario determinar el flujo volumétrico de los gases de GLP.

$$P = PC \times Q \times \eta$$

$P_{GLP}$ : Potencia calórica [KW]

$PC_{GLP}$ : Poder calorífico inferior volumétrico del GLP [KJ/m<sup>3</sup>]

$Q_{GLP}$ : Flujo volumétrico [m<sup>3</sup>/seg]

$\eta$ : Eficiencia de combustión [%]

## Flujo volumétrico del GLP

$$Q = k \times \sqrt{\frac{\phi^5 \times \Delta P}{GE \times L}}$$

Donde

K: Es la constante de la tubería

$\phi$ : Diámetro de la tubería [pulgadas]

$\Delta P$ : Caída de presión [pulgadas de agua]

GE: Gravedad específica del GLP vapor

L: Longitud de la tubería [yardas]

Datos

**Tabla A2.** Datos iniciales

k	$\Delta P$	GE	L	$\phi$ [Plg]
168.8	20	2,2	2,18	5/8

## Resultados

**Tabla A3.** Potencia y flujo volumétrico del GLP

P Glp [KW]	Q [m <sup>3</sup> /h]	P Glp [Btu/h]
60,97	3	208048

**Cálculos para determinar la energía necesaria con gases de pirolisis (desde 167°C hasta 500 °C)**

$$E_{T2} = E_{cascara2} + E_{aire2} + E_{acero2}$$

$$E_{cascara2} = M_s \times Cp_{biomasa} \times \Delta T_2$$

$$E_{aire2} = M_{aire} \times Cp_{aire} \times \Delta T_2$$

$$E_{acero2} = M_{acero} \times Cp_{acero} \times \Delta T_2$$

**Tabla A4.** Energía necesaria para llevar desde 167 a 500°C

$E_{cascara2}$ [KJ]	$E_{aire2}$ [KJ]	$E_{acero2}$ [KJ]	$E_{T2}$ [KJ]
198132	2,613	2535	200670

**Poder calorífico de los gases de pirólisis**

**Tabla A5.** Diámetro de la tubería y velocidad de los gases

Diámetro de la tubería [plg]	Velocidad gases [m/s]
2,5	1

El poder calorífico volumétrico de los gases de pirolisis es  $5796 \frac{KJ}{m^3}$

**Potencia calórica de los gases de pirolisis.**

$$P = \frac{E}{t}$$

$$P_{piro} = PC_{piro} \times Q_{piro} \times \eta$$

$$Q_{piro} = V_{gpiro} \times \frac{\pi \times \varphi^2}{4}$$

**Tabla A6.** Flujo volumétrico de los gases de pirólisis, potencia y tiempo del proceso.

Flujo volumétrico Gases Pirólisis [m <sup>3</sup> /h]	Tiempo [horas]	Potencia calorífica [Kw]
11,4	3.57	15.7

## A4 COMBUSTIÓN Y CONTROL DE CONTAMINANTES

### Análisis químico del combustible

Datos:

Cantidad a combustionar: 0,013 m<sup>3</sup>

Densidad comercial del GLP: 0,56 kg/L.

Composición másica del gas:

60% Propano C<sub>3</sub>H<sub>8</sub>

40% Butano C<sub>4</sub>H<sub>10</sub>

### Conversión a masa del GLP

$$\text{Volumen del GLP} = 1 \text{ m}^3 \text{ GLP}$$

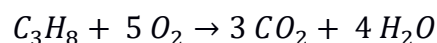
Utilizando la ecuación general de los gases, procederemos a calcular la masa del GLP a quemar.

$$P V = M R T$$
$$M = \frac{100 \text{ Kpa} \times 1 \text{ m}^3}{523 \text{ K} \times 0.2275 \frac{\text{KJ}}{\text{Kg} \cdot \text{K}}}$$

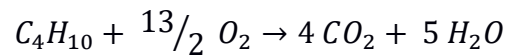
$$M = 0,84 \text{ Kg}$$

### Ecuaciones de combustión

Propano



Butano



### Cálculo de los Productos del Propano

$$0,84 \text{ kg GLP} \times \frac{60 \text{ kg } C_3H_8}{100 \text{ kg GLP}} = 0,5 \text{ kg } C_3H_8 ; \text{ Moles de } C_3H_8 = 0,0114 \text{ kmoles}$$

### Agua (H<sub>2</sub>O)

$$\text{Kmoles de Agua} = 0,5 \times \frac{1 \text{ kmol } C_3H_8}{44 \text{ kg } C_3H_8} \times \frac{4 \text{ kmol } H_2O}{1 \text{ kmol } C_3H_8} ;$$

$$\text{Kmoles de Agua} = 0,045 \text{ kmol } H_2O$$

### Dióxido de Carbono (CO<sub>2</sub>)

$$\text{Kmoles de Dióxido de Carbono} = 0,5 \times \frac{1 \text{ kmol } C_3H_8}{44 \text{ kg } C_3H_8} \times \frac{3 \text{ kmol } H_2O}{1 \text{ kmol } C_3H_8} ;$$

$$\text{Kmoles de Dióxido de Carbono} = 0,034 \text{ kmol } H_2O$$

### Oxígeno teórico o estequiométrico (O<sub>2</sub>)

$$\text{Kmoles de Oxígeno} = 0,5 \times \frac{1 \text{ kmol } C_3H_8}{44 \text{ kg } C_3H_8} \times \frac{5 \text{ kmol } O_2}{1 \text{ kmol } C_3H_8}$$

$$\text{Kmoles de Oxígeno} = 0,056 \text{ kmol } O_2$$

### Cálculo de los Productos del Butano

$$0.84 \text{ kg GLP} \times \frac{40 \text{ kg C}_4\text{H}_{10}}{100 \text{ kg GLP}} = 0.34 \text{ kg C}_4\text{H}_{10} ; \text{ Moles de C}_4\text{H}_{10} = 0,0057 \text{ kmoles}$$

### Agua (H<sub>2</sub>O)

$$\text{Kmol de Agua} = 0.34 \times \frac{1 \text{ kmol C}_4\text{H}_{10}}{58 \text{ kg C}_3\text{H}_8} \times \frac{5 \text{ kmol H}_2\text{O}}{1 \text{ kmol C}_4\text{H}_{10}} ;$$

$$\text{Kmoles de Agua} = 0,029 \text{ kmol H}_2\text{O}$$

### Dióxido de Carbono (CO<sub>2</sub>)

$$\text{Kmoles de Dióxido de Carbono} = 0.34 \times \frac{1 \text{ kmol C}_4\text{H}_{10}}{58 \text{ kg C}_4\text{H}_{10}} \times \frac{4 \text{ kmol H}_2\text{O}}{1 \text{ kmol C}_4\text{H}_{10}} ;$$

$$\text{Kmoles de Dióxido de Carbono} = 0,023 \text{ kmol H}_2\text{O}$$

### Oxígeno teórico ó estequiométrico (O<sub>2</sub>)

$$\text{Kmoles de Oxígeno} = 0.34 \times \frac{1 \text{ kmol C}_3\text{H}_8}{58 \text{ kg C}_3\text{H}_8} \times \frac{13/2 \text{ kmol}}{1 \text{ kmol C}_4\text{H}_{10}} ;$$

$$\text{Kmoles de Oxígeno} = 0,038 \text{ kmol O}_2$$

### **Cálculo de las kmoles teóricas de la combustión del GLP**

Kmoles totales teóricas en la combustión del GLP= Moles Teórica Combustión Propano + Moles Teórica Combustión Butano

Kmoles totales teóricas en la combustión del GLP= 0,056 kmol O<sub>2</sub> + 0,038 kmol O<sub>2</sub>

Kmoles totales teóricas en la combustión del GLP= 0,094 kmol O<sub>2</sub>

### **Cálculo del Aire que entra al proceso de combustión del GLP.**

Ecuación del porcentaje de aire en exceso:

$$\text{Porcentaje de Aire en exceso (\%)} = \frac{\text{kmol } O_2 \text{ENTRA} - \text{kmol } O_2 \text{TEORICO}}{\text{kmol } O_2 \text{TEORICO}} \times 100$$

Incógnita  $\rightarrow$   $\text{Kmol } O_2 \text{ENTRA}$

Dato conocido: 20% Aire en exceso

Desarrollo:

$$20\% = \frac{\text{Kmol } O_2 \text{ENTRA} - 0,094 \text{ kmol } O_2}{0,094 \text{ kmol } O_2} \times 100$$

$$\text{Kmol } O_2 \text{ENTRA} = 0,112 \text{ kmol } O_2 \text{ entran}$$

Aire

$$\text{Kmoles de Aire} = 0,112 \text{ kmol } O_2 \text{ entran} \times \frac{100 \text{ kmol aire}}{21 \text{ kmol } O_2};$$

$$\text{Kmoles de Aire} = 0.53 \text{ kmol Aire}$$

$$\text{Masa de aire} = 15.37 \text{ kg Aire}$$

### **Cálculo del Nitrógeno que entra al proceso de combustión del GLP.**

$$\text{Kmoles de Nitrógeno (N}_2\text{)} = 0.53 \text{ kmol aire entran} \times \frac{79 \text{ kmol N}_2}{100 \text{ kmol aire}};$$

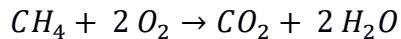
$$\text{Kmoles de Nitrógeno (N}_2\text{)} = 0.42 \text{ kmol N}_2$$

## **Análisis químico del metano**

### **Masa del Metano**

$$6,5 \text{ kg GLP} \times \frac{17 \text{ kg C}_3\text{H}_8}{100 \text{ kg GLP}} = 1,1 \text{ kg CH}_4$$

Ecuación de combustión



### **Calculo de moles de CH<sub>4</sub>**

$$1.105 \text{ kg CH}_4 \times \frac{1 \text{ mol CH}_4}{16 \text{ kg CH}_4} = 0.069 \text{ kmol CH}_4$$

### **Calculo de moles de H<sub>2</sub>O**

$$0.069 \text{ kmol CH}_4 \times \frac{2 \text{ kmol H}_2\text{O}}{1 \text{ kmol CH}_4} = 0.138 \text{ kmol H}_2\text{O}$$

### **Calculo de moles de CO<sub>2</sub>**

$$0.069 \text{ kmol CH}_4 \times \frac{1 \text{ kmol CO}_2}{1 \text{ kmol CH}_4} = 0.069 \text{ kmol CO}_2$$

### **Calculo del oxígeno estequiométrico (teórico)**

$$0.069 \text{ kmol CH}_4 \times \frac{2 \text{ kmol O}_2}{1 \text{ kmol CH}_4} = 0.138 \text{ kmol O}_2$$

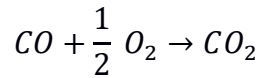
## **Cálculos de productos del monóxido de carbono**

### **Masa del monóxido de carbono**

$$6,5 \text{ kg gas} \times \frac{23 \text{ kg CO}}{100 \text{ kg gas}} = 1,495 \text{ kg CO}$$

Ecuación de combustión





Calculo de moles de CO

$$1.495 \text{ kgCO} \times \frac{1 \text{ mol CO}}{28 \text{ kg CO}} = 0.053 \text{ kmol CO}$$

Calculo de moles de O<sub>2</sub>

$$0.053 \text{ kmol CO} \times \frac{\frac{1}{2} \text{ kmol O}_2}{1 \text{ kmol CO}} = 0.0265 \text{ kmol O}_2$$

**Cálculo del Aire que entra al proceso de combustión de los gases de pirolisis**

Oxigeno que debe consumir para quemar CH<sub>4</sub> y CO

$$0.0265 \text{ kmol O}_2 + 0.138 \text{ kmol O}_2$$

$$\text{Total} = 0.1645 \text{ kmol O}_2$$

Ecuación del porcentaje de aire en exceso:

$$\text{Porcentaje de Aire en exceso (\%)} = \frac{\text{kmol O}_2\text{ENTRA} - \text{kmol O}_2\text{TEORICO}}{\text{kmol O}_2\text{TEORICO}} \times 100$$

Incógnita → *Kmol O<sub>2</sub>ENTRA*

Dato conocido: 20% Aire en exceso

Desarrollo:

$$20\% = \frac{\text{Kmol O}_2\text{ENTRA} - 0,1645\text{kmol O}_2}{0,1645 \text{ kmol O}_2} \times 100$$

$$\text{Kmol O}_2\text{ENTRA} = 0,1974\text{kmol O}_2 \text{ entran}$$

Aire

$$\text{Kmoles de Aire} = 0,1974 \text{ kmol } O_2 \text{ entran } \times \frac{100 \text{ kmol aire}}{21 \text{ kmol } O_2};$$

$$\text{Kmoles de Aire} = 0.94 \text{ kmol Aire}$$

$$\text{Masa de aire} = 27.26 \text{ kg Aire}$$

## A5 TRANSFERENCIA DE CALOR

### Calor de aporte

$$\dot{Q}_{\text{aporte}} = \frac{T_{\text{humos}} - T_{\text{biomasa}}}{R_{\text{tot1}}}$$

$$R_{\text{tot1}} = \frac{1}{h_{\text{humos}} \times A_{\text{cil}}} + \frac{1}{2\pi K_{\text{acero}} L_{\text{cil}} \times \ln\left(\frac{D_{\text{ext}}}{D_{\text{in}}}\right)_{\text{acero}}} + \frac{1}{2\pi K_{\text{arroz}} L_{\text{cil}} \times \ln\left(\frac{D_{\text{ext}}}{D_{\text{in}}}\right)_{\text{Biomasa}}}$$

$$R_{\text{tot1}} = \frac{1}{15} + \frac{1}{2\pi(69.5)0.8 \times \ln\left(\frac{0.46}{0.4}\right)} + \frac{1}{2\pi(4.55)(0.8) \times \ln\left(\frac{0.46}{0.4}\right)}$$

$$R_{\text{tot1}} = 0.391 \text{ W/K}$$

$$\dot{Q}_{\text{aporte}} = \frac{700 - 500}{0.391}$$

$$\dot{Q}_{\text{aporte}} = 511.5 \text{ KW}$$

## Calor de perdido

$$\dot{Q}_{perdido} = \frac{T_{humos} - T_{\infty,amb}}{R_{tot2}}$$

$$R_{tot2} = \frac{1}{h_{humos} \times A} + \frac{L_{ladrillo}}{K_{ladrillo} \times A} + \frac{L_{acero}}{K_{acero} \times A} + \frac{1}{h_{\infty,amb} \times A}$$

$$R_{tot2} = \frac{1}{15 \times 4.8} + \frac{0.1}{0.3184 \times 4.8} + \frac{0.003}{69.5 \times 4.8} + \frac{1}{20 \times 4.8}$$

$$R_{tot2} = 1.259 \text{ K/W}$$

$$\dot{Q}_{perdido} = \frac{700 - 30}{1.259}$$

$$\dot{Q}_{perdido} = 1.873 \text{ KW}$$

## Temperatura de la pared del horno

$$\dot{Q}_{perdido} = \frac{T_{humos} - T_{pared}}{R_{tot3}}$$

$$R_{tot3} = \frac{1}{h_{humos} \times A} + \frac{L_{ladrillo}}{K_{ladrillo} \times A} + \frac{L_{acero}}{K_{acero} \times A}$$

$$R_{tot3} = \frac{1}{15 \times 4.8} + \frac{0.1}{0.3184 \times 4.8} + \frac{0.003}{69.5 \times 4.8}$$

$$R_{tot3} = 1.219 \text{ K/W}$$

$$T_{pared} = 51 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

## A6 SIMULACIÓN DE ESFUERZOS MECÁNICOS EN LA ESTRUCTURA DEL REACTOR

### Datos:

$$m_{\text{cascara de arroz}} = 20 \text{ kg}$$

$$m_{\text{ladrillo}} = 5 \text{ lb}$$

$$m_{\text{tanque}} = 20 \text{ kg}$$

### Fuerza sobre la plancha superior

$$F_1 = (m_{\text{tanque}} + m_{\text{cascara de arroz}}) * g$$

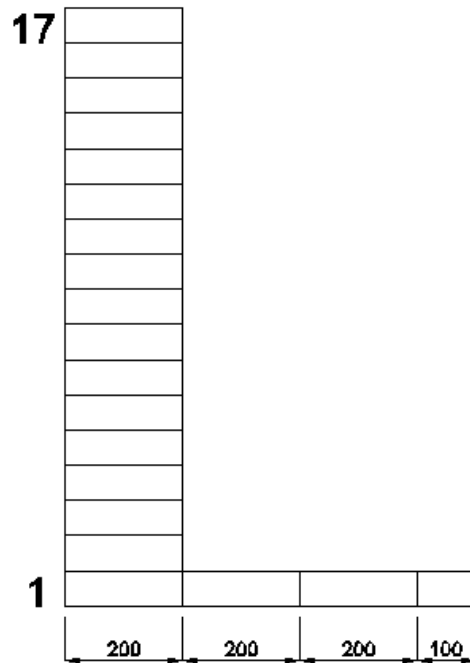
$$F_1 = (20 + 20) * 9.81$$

$$F_1 = 400 \text{ N}$$

### Fuerza debido a los ladrillos refractarios

Para esto debemos calcular la cantidad de ladrillos que irán en cada lado

Siendo la configuración de ladrillos tal como se muestra en la imagen a continuación:



**Figura A2.** Esquema de una pared de ladrillos

Teniendo un total de ladrillos

$$N_{ladrillos,lado} = (3 * 17) + \left(\frac{100}{200}\right) \times 17 = 59.5 \text{ ladrillos por lado}$$

$$N_{ladrillos,total} = N_{ladrillos,lado} \times 4 = 59.5 \times 4 = 238 \text{ Ladrillos}$$

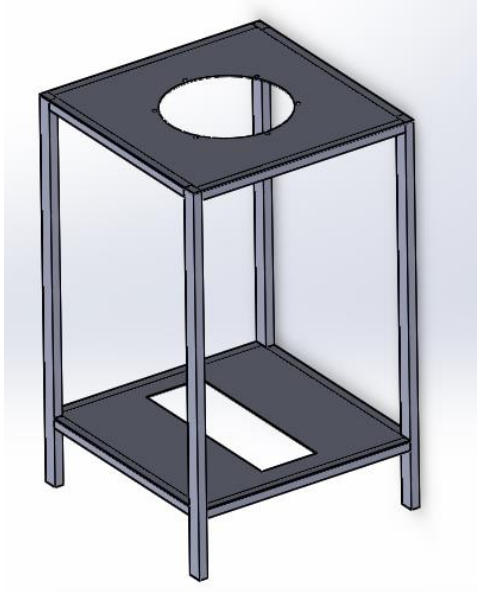
El cálculo de la fuerza total debido a la pared de ladrillos por cada lado, se la calcula de la siguiente manera:

$$m_{ladrillos,lado} = N_{ladrillos,total} * 9.81 = 238 * \frac{(5 \text{ lb})(1 \text{ kg})}{2.2 \text{ lb}} = 541 \text{ kg}$$

$$F_{ladrillos} = (m_{ladrillos,lado}) * g$$

$$F_{ladrillos} = (541) * 9.81$$

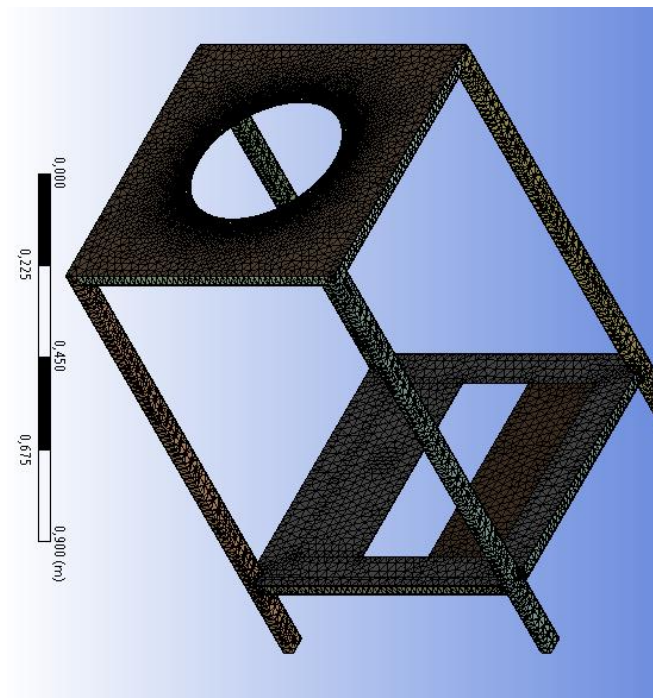
$$F_{ladrillos} = \mathbf{5310 \text{ N}}$$



**Figura A3.** Estructura del horno de pirólisis

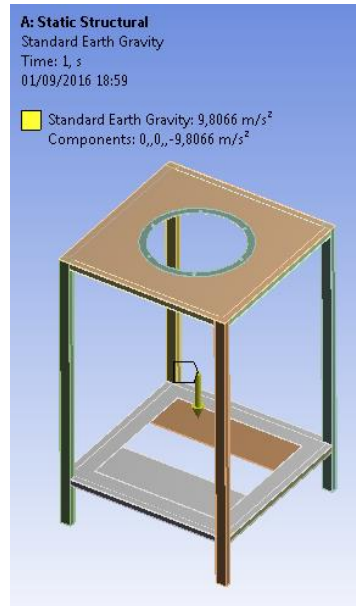
### **Análisis en ANSYS**

Estructura con plancha del piso de 3 mm y sin cartuchos en la plancha superior



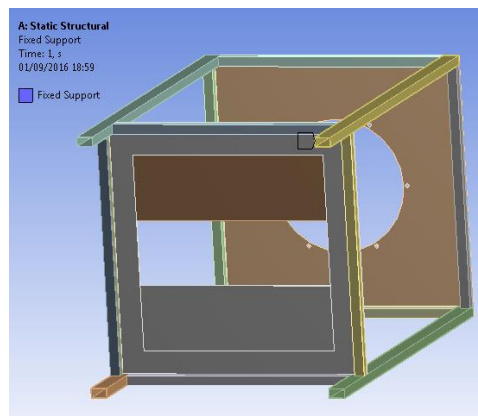
**Figura A4.** Mallado total de la estructura

Para el análisis estructural de la estructura, debemos recordar que esta está sometida a dos tipos de cargas diferentes.



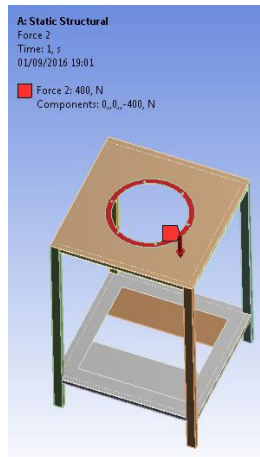
**Figura A5.** Carga con respecto a la fuerza de gravedad.

Es importante señalar los puntos fijos de la estructura, en este caso son la parte inferior de las patas.



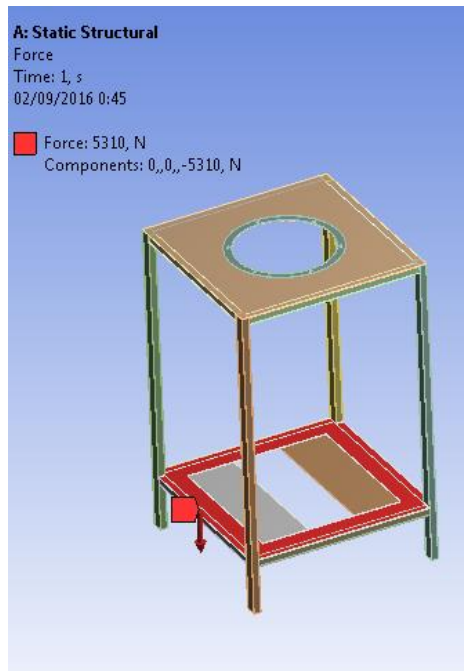
**Figura A6.** Establecimiento de los puntos fijos

Carga debido al peso del tanque y la biomasa, esta suma total está sometida sobre la plancha superior de la estructura.



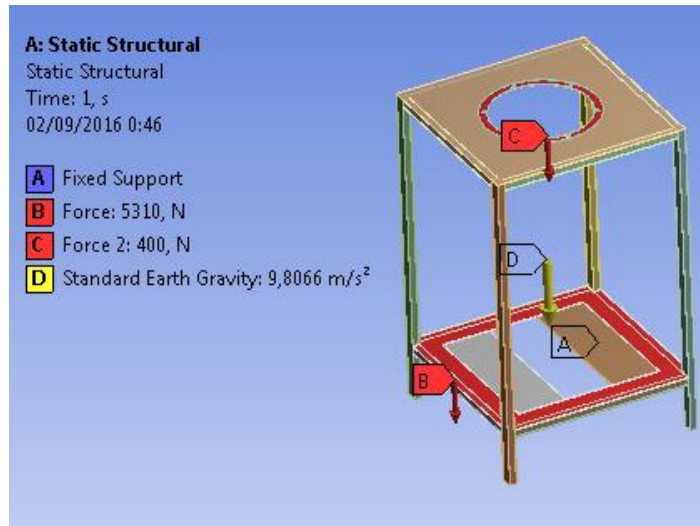
**Figura A7.** Carga ejercida por el tanque a la estructura

Carga debido al peso de los ladrillos que van en la plancha inferior recubriendo el tanque con la biomasa



**Figura A8.** Carga ejercida por los ladrillos sobre la estructura





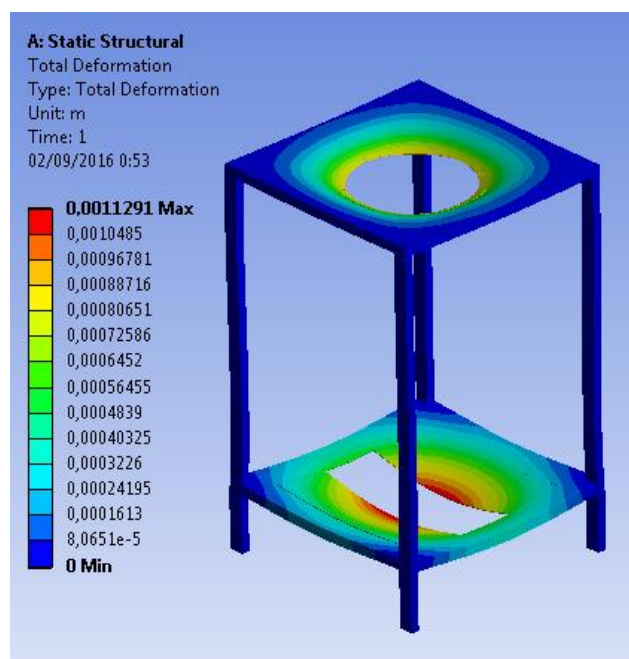
**Figura A9.** Cargas sobre la estructura

Con toda esta información, se envió a solucionar y obtenemos los siguientes resultados:

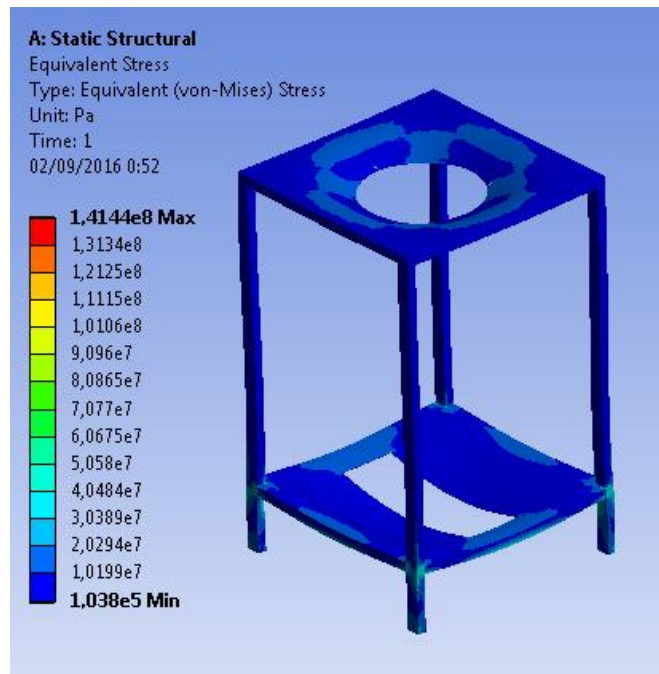
Deformación total Figura A.10

Esfuerzos Von mises Figura A.111

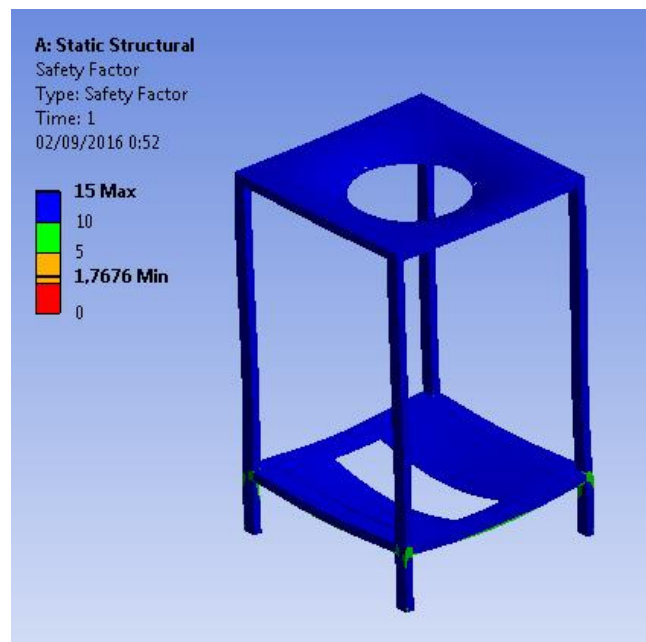
Factor de seguridad estático Figura A.12



**Figura A10.** Deformación total

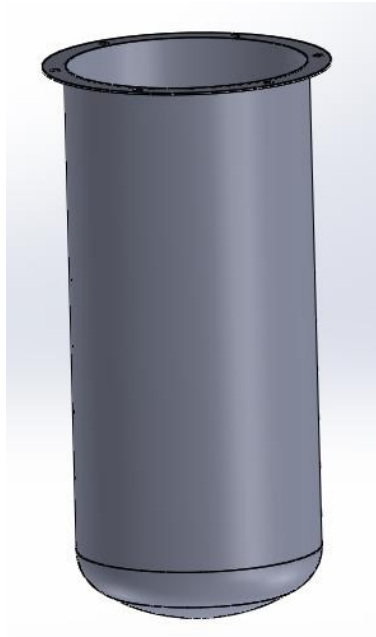


**Figura A11.** Esfuerzos Equivalente Von - mises



**Figura A12.** Factor de seguridad estático

## A7 ANÁLISIS DEL TANQUE



**Figura 1.** Tanque de almacenamiento de biomasa.

Los datos utilizados en el análisis de la capacidad de carga estructural que el tanque pueda soportar, se utiliza la presión a la cual se encontrará sometido debido a la quema de la biomasa que se encontrará en su interior una vez empezado el proceso, es decir, una carga de 500 KPa, además se considera la carga que ejerce la masa de biomasa sobre la tapa inferior del tanque.

### **DATOS**

$$P = 500 \text{ KPa}$$

$$m_{\text{cascara de arroz}} = 20 \text{ kg}$$

$$F_{\text{cascara de arroz}} = m_{\text{cascara de arroz}} * g = 20 * 9.81 = 196.2 \text{ N}$$

## Estructura de tanque

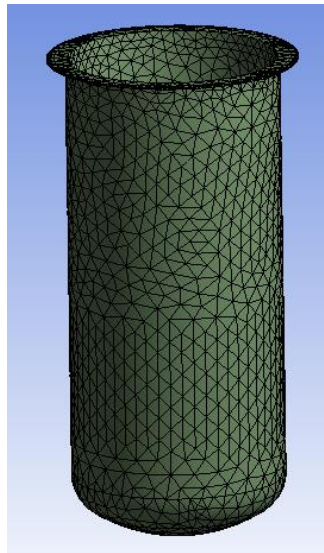


Figura A13. Mallado total del tanque

## Cargas sobre el tanque

Primero se realizó la carga de la gravedad.



Figura 2. Ubicación de un punto fijo del tanque

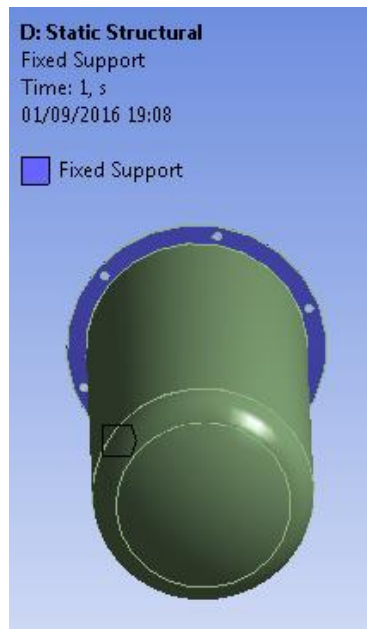


Figura A14. Se coloca la carga de presión sobre las paredes del tanque

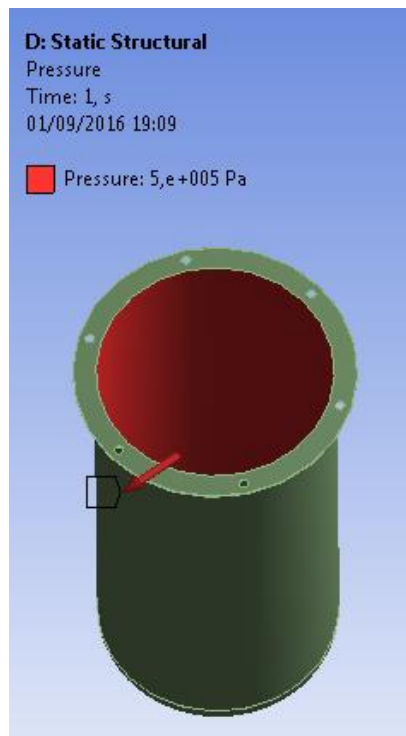
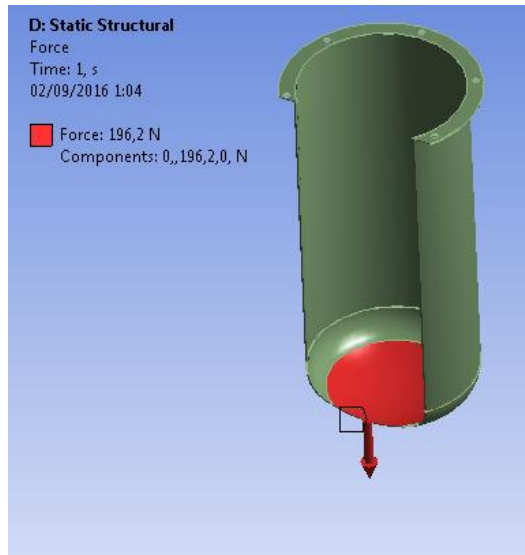
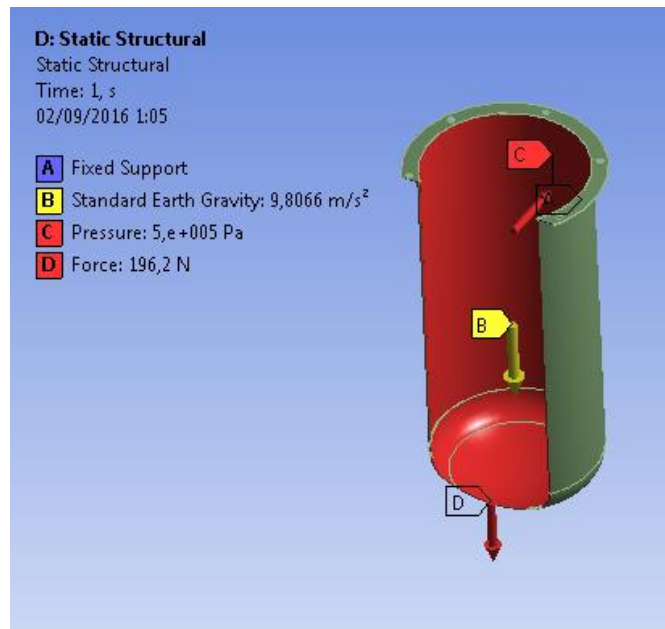


Figura A15. Se coloca la carga debido a la masa de la biomasa en su interior



**Figura A 16.** Vista en corte de la carga en el interior del tanque



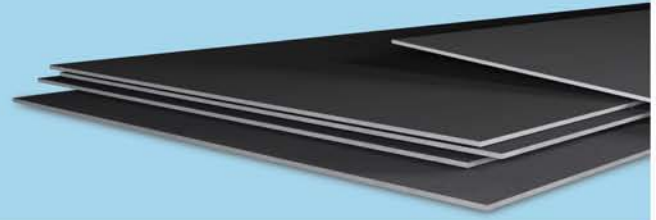
**Figura A17.** Cargas sobre el tanque

# Apéndice B:

## Catálogos de materiales y accesorios

# Planchas

- Laminada en caliente
- Laminada en frío



## Plancha laminada en caliente

Recubrimiento:  
Negro  
Norma de Fabricación:  
NTE INEN 115, ASTM A 6  
Norma de Calidad:  
ASTM A 570 Gr 36 / ASTM A 36 / ASTM A 283 Gr C /  
ASTM A 588 Gr A / ASTM A 131 Gr A / ASTM A 516  
Gr 70  
Observaciones:  
Dimensiones y largos especiales, previa consulta

Ancho	Largo	Espesor	Peso Aprox.
mm	mm	mm	kg.
1220	2440	1,50	35,05
1220	2440	2,00	46,74
1220	2440	3,00	70,10
1220	2440	4,00	93,47
1220	2440	5,00	116,84
1220	2440	6,00	140,21
1220	2440	8,00	186,94
1220	2440	9,00	210,31
1220	2440	10,00	233,68
1220	2440	12,00	280,41

### › Aplicaciones

- Conformación de estructuras en general con elementos de alma llena (flejes).
- Fabricación de tanques.
- Estructuras de puentes.
- Estructuras de barcos.
- Camisas de pilotes.
- Encofrados.
- Placas.
- Contención de tierra.
- Plataformas.
- Calderos.
- Tubería de grandes diámetros.

## Plancha laminada en frío

Recubrimiento:  
Negro  
Norma de Fabricación:  
NTE INEN 115  
Norma de Calidad:  
ASTM A 36 / JIS G 3141 SPCC - SD /  
SAE 1010  
Observaciones:  
Dimensiones y largos especiales, previa consulta

Ancho	Largo	Espesor	Peso Aprox.	Calidad
mm	mm	mm	kg.	
1000	2000	0,70	10,99	Embutición
1000	2000	0,90	14,13	
1000	2000	1,10	17,27	
1000	2000	1,40	21,98	
1220	2440	0,40	9,35	Comercial
1220	2440	0,45	10,52	
1220	2440	0,50	11,68	
1220	2440	0,60	14,02	
1220	2440	0,70	16,36	
1220	2440	0,75	17,52	
1220	2440	0,90	21,03	
1220	2440	1,10	25,70	
1220	2440	1,40	32,72	
1220	2440	2,00	46,74	

### › Aplicaciones

- Muebles metálicos en general.
- Puertas metálicas.
- Carpintería metálica.
- Tanque para almacenamiento de aceite.
- Tanques de exportación de frutas.
- Baldes para camionetas.
- Partes y piezas metálicas (abrazaderas, de línea blanca, etc).
- Rótulos.
- Señalización de tránsito.
- Cajas fúnebres.
- Autopartes.



## CONCRETOS REFRACTARIOS SILICO - ALUMINOSOS

### CONCRAX 1500-3

Clasificación	Clase D	
NTC - 814 , ASTM C – 401		
Análisis Químico %		
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	49.5	
SiO <sub>2</sub>	39.0	
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1.3	
TiO <sub>2</sub>	2.0	
CaO	7.5	
MgO	0.3	
Álcalis	0.4	
Cono Pirométrico Equivalente (PCE)	32	
Temperatura equivalente °C	1717	
NTC – 706 , ASTM C-24		
Máxima temperatura de servicio recomendada °C	1540	
Máximo tamaño de grano mm	25	
Material seco requerido por metro cúbico kg	2000 – 2100	
Agua de preparación cm <sup>3</sup> de agua/kg de material seco	115 - 130	
NTC - 988 , ASTM C - 860		
Densidad volumétrica °C - g/cm <sup>3</sup>	110	2.00 – 2.10
ASTM C – 134	1000	1.80 - 1.85
	1260	1.85 - 1.90
	1370	1.85 - 1.90
	1480	1.95 - 2.00
Módulo de ruptura en frío	110	5.0 - 8.0 ( 50 - 80 )
°C - Mpa ( kg/cm <sup>2</sup> )	1000	1.5 - 2.5 ( 15 - 25 )
NTC - 988 , ASTM C-133	1260	4.0 - 6.0 ( 40 - 60 )
	1370	12.0 - 14.0 ( 120 - 140 )
	1480	14.0 - 15.0 ( 140 - 150 )

**CONCRETOS REFRACTARIOS  
SILICO - ALUMINOSOS****CONCRAX 1500**

Resistencia a la compresión	110	25.0 - 40.0	( 250 - 400 )
en frío °C - Mpa ( kg/cm <sup>2</sup> )	1000	9.0 - 11.0	( 90 - 110 )
NTC - 682 , ASTM C - 133	1260	13.0 - 15.0	( 130 - 150 )
	1370	29.0 - 31.0	( 290 - 310 )
	1480	50.0 - 54.0	( 500 - 540 )

Cambio lineal permanente °C - %	1000	0.0 - 0.3C
NTC - 988 , ASTM C - 401 y ASTM C - 865	1260	0.2C - 0.5C
	1370	0.3C - 0.6C
	1480	1.0C - 1.5C

Presentación Sacos de 25 kg

Los datos anteriores están basados en los resultados promedios de las pruebas de control realizadas sobre lotes de producción industrial, utilizando los procedimientos descritos en las Normas Técnicas Colombianas (NTC) y ASTM donde ellas sean aplicables, y no deben emplearse para efectos de especificaciones garantizadas.

C = Contracción

21-09-2009



## LADRILLOS REFRACTARIOS AISLANTES

### UA - 23

Clasificación  
NTC -815, ASTM C-155

Aislante Grupo 23

Análisis Químico %

Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	36.0
SiO <sub>2</sub>	59.0
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1.0
TiO <sub>2</sub>	1.0
CaO	0.3
MgO	0.4
Álcalis	1.8

Cono Pirométrico Equivalente  
(PCE)

32

Temperatura Equivalente (°C)  
NTC -706, ASTM C-24

1717

Porosidad Aparente (%)  
ASTM C-20

70.0 - 74.0

Densidad volumétrica (g/cm<sup>3</sup>)  
ASTM C-134

0.63 - 0.73

Resistencia a la compresión en frío. Mpa  
(kg/cm<sup>2</sup>)  
NTC -682, ASTM C-133

1.0 - 3.0 (10 - 30)

Módulo de ruptura en frío. Mpa (kg/cm<sup>2</sup>)  
NTC -682, ASTM C-133

0.6 - 1.5 (6 - 15)

Cambio lineal permanente (°C - %)  
1230 0.0 - 0.2C

1230 0.0 - 0.2C

1400 0.8C - 1.5C

Conductividad térmica, a temperatura  
media, (°C- kcal/m hr K)  
ASTM C-201

545 0.274

824 0.315

973 0.345

Los datos anteriores se basan en los resultados promedios de las pruebas de control sobre lotes de producción industrial de ladrillos normales prensados de 9" utilizando los procedimientos descritos en las Normas Técnicas Colombianas y ASTM donde ellas sean aplicables y no deben emplearse para efectos de especificaciones garantizadas. Pueden presentarse variaciones de los resultados dependiendo del tamaño o forma.

C = Contracción

2003-04-02

**ProRox SL 980<sup>ES</sup>**

**Panel de lana de roca**



Espesor mm	Longitud mm	Ancho mm	Nº paneles por paquete	Nº paquetes por palet	Nº m <sup>2</sup> por palet	Nº m <sup>2</sup> por camión (22 palets)
30	1200	600	8	20	115,20	2534,40
40	1200	600	6	20	86,40	1900,80
50	1200	600	5	20	72,00	1584,00
60	1200	600	4	20	57,60	1267,20
80	1200	600	3	20	43,20	950,40

**Descripción**

Panel rígido de lana de roca. Este producto está indicado para el aislamiento térmico y acústico de equipamientos industriales.

**Guía de instalación**

Fijar el panel mediante clavija o pin metálico soldado a la chapa. Acabar con arandela antiretorno. Para aislamiento de equipos más fríos que la temperatura ambiente la solución deberá incluir un paravapor para evitar condensaciones.

**Ventajas**

- Apto para aplicaciones muy exigentes, con exposición a altas temperaturas y a elevadas cargas mecánicas
- No se deforma
- Amplia gama de espesores

**Características técnicas**



	Resultados											Normativa	
	T (°C)	50	100	150	200	250	300	350	400	500	600		700
<b>Conductividad térmica</b>	T (°C)												EN 12667
	λ (W/mK)	0,044	0,050	0,056	0,064	0,073	0,083	0,094	0,107	0,137	0,170	0,210	
<b>Temperatura máxima de trabajo</b>	700 °C											EN 14706	
<b>Reacción al fuego</b>	Euroclase A1											EN 13501-1	
<b>Densidad nominal</b>	145 kg/m <sup>3</sup>											EN 1602	
<b>Absorción de agua</b>	< 1 kg/m <sup>2</sup>											EN 1609	
<b>Resistencia al paso del vapor de agua</b>	μ = 1											EN 14303	
<b>Resistencia al paso del aire</b>	> 110 kPa.s/m <sup>2</sup>											EN 29053	
<b>Código de designación</b>	MW EN 14303-T4-ST[+J]700-WS1											EN 14303	

# 80-100 SERIES

## Bronze LP-Gas Ball Valve

Female NPT Thread, 600 CWP (psig), Cold Non-Shock. 250 psig LP-Gas.  
150 psig Saturated Steam.  
Vacuum Service to 29 inches Hg.  
MSS SP-110 compliant.



### FEATURES

- UL Listed for LP-Gas, natural gas, flammable liquid and heated oil
- Large ports to reduce pressure drop
- Reinforced seats
- Blow-out-proof stem design
- Adjustable packing gland
- Two piece bronze body

### UL LISTINGS

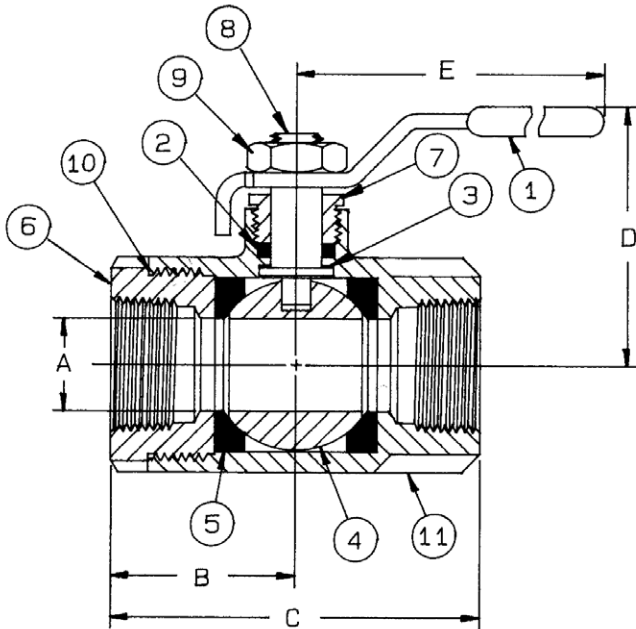
- Guide YSDT: LP-Gas shut-off valve.
- Guide YRPV: Gas shut-off valve for use with natural and manufactured gases.
- Guide YRBX: Flammable liquid shutoff valve.
- Guide MHKZ: No. 6 oil at 250°F.

### OPTIONS AVAILABLE: (More information in Section J)

(SUFFIX)	OPTION	SIZES
-01	Standard Configuration	All
-07-	Tee Handle, Steel	1/4" to 3"
-27-	SS Latch-Lock Lever & Nut	1/4" to 3"

### STANDARD MATERIAL LIST

	PART	MATERIAL
1	Lever and grip	Steel, zinc plated w/vinyl
2	Stem packing	RPTFE
3	Stem bearing	RPTFE
4	Ball	B16, chrome plated
5	Seat (2)	RPTFE
6	Retainer	B16 or B584-C84400
7	Gland nut	B16
8	Stem	B16
9	Lever nut	Steel, zinc plated
10	Seal	PTFE (1.25" to 3")
11	Body	B584-C84400



Note: 250 psig Max. UL Listing.

PRODUCT NUMBER	SIZE	A	B	C	D	E	WT.
80-101-01	1/4"	0.37	1.03	2.06	1.75	3.87	0.60
80-102-01	3/8"	0.37	1.03	2.06	1.75	3.87	0.56
80-103-01	1/2"	0.50	1.12	2.25	1.81	3.87	0.63
80-104-01	3/4"	0.68	1.50	3.00	2.12	4.87	1.39
80-105-01	1"	0.87	1.68	3.37	2.25	4.87	1.72
80-106-01	1.25"	1.00	2.00	4.00	2.62	5.50	3.26
80-107-01	1.5"	1.25	2.18	4.37	2.87	5.50	4.57
80-108-01	2"	1.50	2.34	4.68	3.06	5.50	5.56
80-109-01	2.5"	2.50	3.25	6.50	4.12	8.00	17.25
80-100-01	3"	2.50	3.37	6.75	4.12	8.00	18.60

FOR PRESSURE/TEMPERATURE RATINGS, REFER TO PAGE M-10, GRAPH NO. 4



# FLOW DATA

## For Apollo® Ball Valves

The listed Cv "factors" are derived from actual flow testing, in the Apollo® Ball Valve Division, Conbraco Industries, Inc., Pageland, South Carolina. These tests were completed using standard "off the shelf" valves with no special preparation and utilizing standard schedule 40 pipe. It should be understood that these factors are for the valve only and also include the connection configuration. The flow testing is done utilizing water as a fluid media and is a direct statement of the gallons of water flowed per minute with a 1 psig pressure differential across the valve/connection unit. Line pressure is not a factor. Because the Cv is a factor, the formula can be used to estimate flow of most media for valve sizing.

### FLOW OF LIQUID

$$Q = C_v \sqrt{\frac{\Delta P}{SpGr}}$$

$$\text{or } \Delta P = \frac{(Q)^2 (SpGr)}{(C_v)^2}$$

**Where:**

Q = flow in US gpm  
 ΔP = pressure drop (psig)  
 SpGr = specific gravity at flowing temperature  
 Cv = valve constant

### FLOW OF GAS

$$Q = 1360 C_v \sqrt{\frac{(\Delta P) (P_2)}{(SpGr) (T)}}$$

$$\text{or } \Delta P = \frac{5.4 \times 10^{-7} (SpGr) (T) (Q)^2}{(C_v)^2 (P_2)}$$

**Where:**

Q = flow in SCFH  
 ΔP = pressure drop (psig)  
 SpGr = specific gravity (based on air = 1.0)  
 P<sub>2</sub> = outlet pressure-psia (psig + 14.7)  
 T = (temp. °F + 460)  
 Cv = valve constant

### Cv FACTORS FOR APOLLO VALVES

SIZE (IN.)	1/4	3/8	1/2	3/4	1	1.25	1.5	2	2.5	3	4	6	8	10	12
<b>VALVE</b>															
32-100/200 Series	5.1	6.6	8	24	30	45	55	95	--	--	--	--	--	--	--
64-100/200 Series	6	7	19	34	50	104	268	309	629	1018	1622	--	--	--	--
64W Series	--	--	--	--	--	--	--	--	629	1018	1622	--	--	--	--
70B-140 Series	8.4	7.2	15	30	43	48	84	108	190	370	670	--	--	--	--
70-100/200 Series	8.4	7.2	15	30	43	48	84	108	190	370	670	--	--	--	--
70-300/400 Series	--	--	15	30	43	48	84	108	--	--	--	--	--	--	--
70-600 Series	2.3	4.5	5.4	12	14	21	34	47	--	--	--	--	--	--	--
70-800 Series	8.4	7.2	15	30	43	48	84	--	--	--	--	--	--	--	--
71AR Series	--	--	--	30	43	48	84	108	190	370	--	--	--	--	--
71-100/200 Series	--	--	--	30	43	48	84	108	190	370	--	--	--	--	--
72-100/900 Series	--	--	26	48	65	125	170	216	--	--	--	--	--	--	--
73A-100 Series	8.4	7.2	15	30	43	48	84	108	--	--	--	--	--	--	--
73-300/400 Series	--	--	26	48	65	125	170	216	--	--	--	--	--	--	--
74-100 Series	8.4	7.2	15	30	43	48	84	108	190	370	670	--	--	--	--
75-100 Series	8.4	7.2	15	30	43	48	84	108	190	370	670	--	--	--	--
76AR Series	8.4	7.2	15	30	43	48	84	108	190	370	670	--	--	--	--
76F-100 Series	8.1	15	15	51	68	125	177	389	--	--	--	--	--	--	--
76-100 Series	8.4	7.2	15	30	43	48	84	108	190	370	--	--	--	--	--
76-300/400 Series	--	--	26	48	65	125	170	216	--	--	--	--	--	--	--
76-600 Series	2.3	4.5	5.4	12	14	21	34	47	--	--	--	--	--	--	--
7K-100 Series	--	--	15	51	68	125	177	389	503	--	--	--	--	--	--
77AR Series	8.1	15	15	51	68	125	177	389	--	--	--	--	--	--	--
77C-100/200 Series	4.5	7.2	16	36	68	125	177	389	503	--	--	--	--	--	--
77D-140 Series	4.5	7.2	16	36	68	125	177	389	--	--	--	--	--	--	--
77D-640 Series	--	--	--	11	24	35	--	--	--	--	--	--	--	--	--
77G-UL Series	4.5	7.2	16	36	68	125	177	389	503	--	--	--	--	--	--
77W Series	--	--	16	36	68	125	177	389	--	--	--	--	--	--	--
77X Series	--	--	16	36	68	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--
77-100/200 Series	8.1	15	15	51	68	125	177	389	503	--	--	--	--	--	--
79 Series	8.5	8.5	9.8	32	44	66	148	218	440	390	--	--	--	--	--

continued on next page



# FLOW DATA

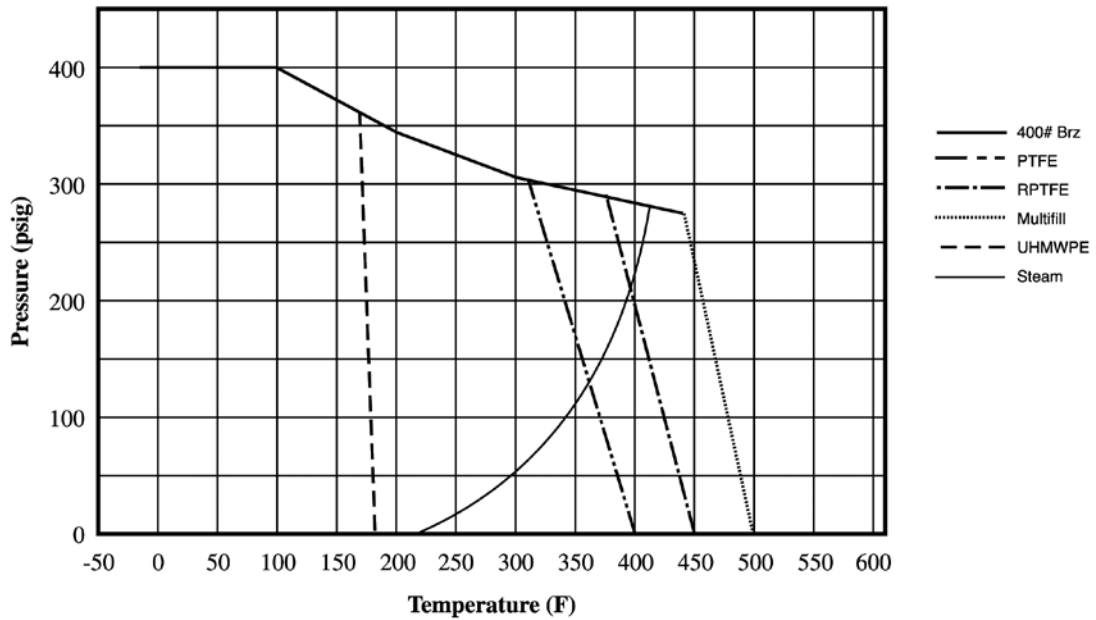
## For Apollo® Ball Valves

### Cv FACTORS FOR APOLLO VALVES (continued from page M-3)

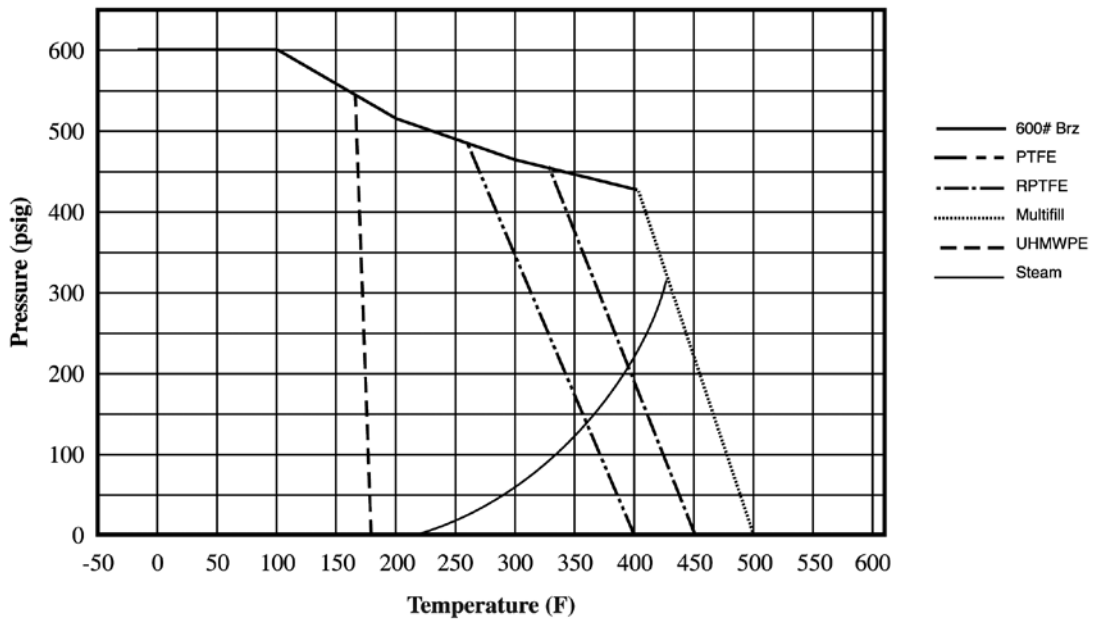
SIZE (IN.)	1/4	3/8	1/2	3/4	1	1.25	1.5	2	2.5	3	4	6	8	10	12
<b>VALVE</b>															
80/81 Series	8.4	7.2	15	30	43	48	84	108	190	370	--	--	--	--	--
82-100/200 Series	8.1	14	26	51	68	120	170	376	510	996	1893	--	--	--	--
83A/83B Series	8.1	14	26	51	68	120	170	376	--	--	--	--	--	--	--
83R-100/200 Series	--	--	--	--	--	--	170	376	--	996	1893	--	--	--	--
86A/86B Series	8.1	14	26	51	68	120	170	376	--	--	--	--	--	--	--
86R-100/200 Series	--	--	--	--	--	--	170	376	--	996	1893	--	--	--	--
87A-100 Series	--	--	--	--	--	--	86	104	234	375	673	1099	1902	3890	--
87A-200 Series	--	--	15	19	75	--	195	410	545	1021	2016	4837	9250	15170	22390
87A-700 Series	--	--	--	--	--	--	86	104	234	375	673	1099	1902	3890	--
87A-900 Series	--	--	15	19	75	--	195	410	545	1021	2016	4837	9250	15170	22390
87B-100 Series	--	--	--	--	--	--	--	--	--	375	673	1099	1902	3890	--
88A-100 Series	--	--	--	--	--	--	86	104	234	375	673	1099	1902	3890	--
88A-200 Series	--	--	15	19	75	--	195	410	545	1021	2016	4837	9250	15170	22390
88A-700 Series	--	--	--	--	--	--	86	104	234	375	673	1099	1902	3890	--
88A-900 Series	--	--	15	19	75	--	195	410	545	1021	2016	4837	9250	15170	22390
88B-100 Series	--	--	--	--	--	--	--	--	--	375	673	1099	1902	3890	--
89-100 Series	8.4	7.2	15	30	43	48	84	108	190	370	--	--	--	--	--
9A-100 Series	8.3	6.7	5.7	10	16	25	40	62	--	--	--	--	--	--	--
91-100 Series	8.3	6.7	5.7	10	16	25	40	62	--	--	--	--	--	--	--
92-100 Series	8.3	6.7	5.7	10	16	25	40	62	--	--	--	--	--	--	--
93-100 Series	8.3	6.7	5.7	10	16	25	40	62	--	--	--	--	--	--	--
94A-100/200 Series	6	7	19	34	50	104	268	309	629	1018	1622	--	--	--	--
95-100/200 Series	--	--	15	51	68	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--
95A-300/400 Series	--	--	19	34	50	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--
96-100 Series	8.3	6.7	5.7	10	16	25	40	62	--	--	--	--	--	--	--
399-100 Series	8.4	7.2	15	30	43	48	84	108	190	370	--	--	--	--	--
489-100 Series	8.4	7.2	15	30	43	48	84	108	190	370	--	--	--	--	--

# PRESSURE TEMPERATURE RATINGS

## 400# Bronze (GRAPH 3)



## 600# Bronze (GRAPH 4)

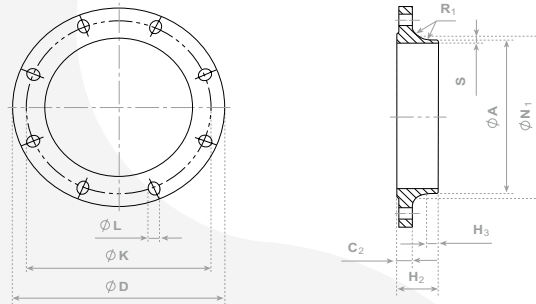




## Accesorio acero al carbono EN (DIN)

### Bridas EN 1092-1 Tipo 11 PN 6 (DIN 2631). Dimensiones y masas

#### EN 1092-1. Dimensiones de las bridas Tipo 11 PN6 (DIN 2631)



El número de orificios real consta en la columna del número de tornillos

Tipo 11

DN	Diámetro Exterior	Diámetro del círculo de tornillos	Diámetro de los orificios de los tornillos	Tornillos		Diámetro exterior del cuello	Espesor de la brida		Longitud		Diámetros del cuello	Radio de acoplamiento	Espesor de la pared	Masa
	D	K	L	Número	Tamaño	A	C <sub>2</sub>	H <sub>2</sub>	H <sub>3</sub>	N <sub>1</sub>	R <sub>1</sub>	S	Kg	
10	75	50	11	4	M10	17,2	12	28	6	26	4	2	0,353	
15	80	55	11	4	M10	21,3	12	30	6	30	4	2	0,408	
20	90	65	11	4	M10	26,9	14	32	6	38	4	2,3	0,621	
25	100	75	11	4	M10	33,7	14	35	6	42	4	2,6	0,762	
32	120	90	14	4	M12	42,4	14	35	6	55	6	2,6	1,11	
40	130	100	14	4	M12	48,3	14	38	7	62	6	2,6	1,26	
50	140	110	14	4	M12	60,3	14	38	8	74	6	2,9	1,43	
<b>65</b>	<b>160</b>	<b>130</b>	<b>14</b>	<b>4</b>	<b>M12</b>	<b>76,1</b>	<b>14</b>	<b>38</b>	<b>9</b>	<b>88</b>	<b>6</b>	<b>2,9</b>	<b>1,77</b>	
80	190	150	18	4	M16	88,9	16	42	10	102	8	3,2	2,88	
100	210	170	18	4	M16	114,3	16	45	10	130	8	3,6	3,41	
125	240	200	18	8	M16	139,7	18	48	10	155	8	4	4,65	
150	265	225	18	8	M16	168,3	18	48	12	184	10	4,5	5,5	
200	320	280	18	8	M16	219,1	20	55	15	236	10	6,3	8,6	
250	375	335	18	12	M16	273	22	60	15	290	12	6,3	11,7	
300	440	395	22	12	M20	323,9	22	62	15	342	12	7,1	15,3	
350	490	445	22	12	M20	355,6	22	62	15	385	12	7,1	20,3	
400	540	495	22	16	M20	406,4	22	65	15	438	12	7,1	23,1	
450	595	550	22	16	M20	457,0	22	65	15	492	12	7,1	27,0	
500	645	600	22	20	M20	508,0	24	68	15	538	12	7,1	30,8	
600	755	705	26	20	M24	610,0	30	70	16	640	12	7,1	44,0	
700	860	810	26	24	M24	711,0	30	76	16	740	12	8	53,7	
800	975	920	30	24	M27	813,0	30	76	16	842	12	8	64,4	
900	1075	1020	30	24	M27	914,0	34	78	16	942	12	8	79,2	
1000	1175	1120	30	28	M27	1016,0	38	82	16	1045	16	8	98,6	
1200	1405	1340	33	32	M30	1219,0	42	104	20	1248	16	8,8	152,0	
1400	1630	1560	36	36	M33	1422,0	56	114	20	1452	16	8,8	246	
1600	1830	1760	36	40	M33	1626,0	63	119	20	1655	16	10	309	
1800	2045	1970	39	44	M36	1829,0	69	133	20	1855	16	11	400	
2000	2265	2180	42	48	M39	2032,0	74	146	25	2058	16	12,5	516	
2200	2475	2390	42	52	M39	2235,0	81	154	25	2260	18	14	645	
2400	2685	2600	42	56	M39	2438,0	87	168	25	2462	18	15	786	
2600	2905	2810	48	60	M45	2620,0	91	175	25	2665	18	16	1021	
2800	3115	3020	48	64	M45	2820,0	101	188	30	2865	18	17	1256	
3000	3315	3220	48	68	M45	3020,0	102	192	30	3068	18	20	1404	
3200	5525	3430	48	72	M45	3220,0	106	202	30	3272	20	20	1617	
3400	3735	3640	48	76	M45	3420,0	110	214	35	3475	20	22	1877	
3600	3970	3860	56	80	M52	3620,0	124	229	35	3678	20	22	2366	

<sup>b</sup> A especificar por el cliente.

# termómetros bimetálicos serie "todo inox" DN 100-125-150

# TB8



Instrumentos realizados para la industria química, petroquímica, centrales convencionales, diseñados para resistir las condiciones de trabajo más desfavorables, determinadas por la agresividad del fluido de proceso y del ambiente. Una soldadura TIG entre caja e inmersor refuerza la caja y ofrece una mayor estanqueidad en caso de llenado con líquido amortizante para la instalación en presencia de vibraciones.

## 6.TB8 - Modelo Standard

**Normativa de referencia:** EN 13190.

**Campo nominal:** de -50 °C a +600°C.

**Campo de medición:** de -40 °C a +500°C; mediciones en continuo de -40°C hasta 500°C.

**Clase de precisión:** 1 según EN 13190, del campo de medida.

**Sobretemperatura:** 30% del valor fondo escala para temperaturas ≤ 400 °C; sobretemperatura límite, 500 °C.

**Sobretemperatura especial (opción F02):** 100% del valor de fondo para temperaturas ≤ 150 °C; 50% del valor de fondo escala para temperaturas entre 150 °C y 300 °C.

**Temperatura ambiente:** -25...+65 °C.

**Presión máxima de trabajo:** 15 bar (sin vaina).

**Grado de protección:** IP 55 según EN 60529/IEC 529.

**Conexión al proceso:** en AISI 316.

**Inmersor :** ø 6 mm (cod. 6), ø 6,4 mm (cod. 7), ø 8 mm (cod. 8), ø 9,6 mm (cod. 9), en AISI 316.

### Longitud del inmersor:

para inmersores ø 6-6,4 mm entre 150 y 700 mm;

para inmersores ø 8-9,6 mm y escalas ≤ 300°C, entre 100 y 900 mm;

para inmersores ø 8-9,6 mm y escalas > 300°C, entre 150 y 900 mm;

(otras longitudes disponibles bajo demanda).

**Elemento de medida:** en espiral con bimetál.

**Caja:** en acero inox.

**Aro de cierre:** a bayoneta, en acero inox.

**Visor:** en cristal templado

Esfera: en aluminio con fondo blanco, graduaciones y numeraciones en negro.

**Aguja indicadora:** en aluminio, de color negro.

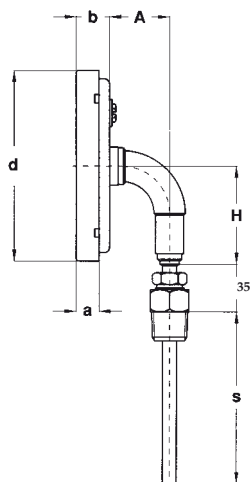
**Ajuste:** externo, en la caja.

## OPCIONES

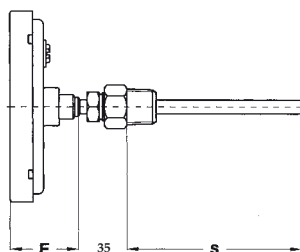
DESCRIPCIÓN	DN100	DN125	DN150
<b>2E3</b> - Ejecución ATEX II 2GD c	<i>Para detalles constructivos ver la hoja del catálogo relativo a la ejecución ATEX.</i>		
<b>2K3</b> - Ejecución ATEX II 2GD ck			
<b>3D3</b> - Ejecución ATEX II 3GD c			
<b>C40</b> - Caja y aro de cierre en AISI 316	♦	♦	♦
<b>F02</b> - Sobretemperatura especial	♦	♦	♦
<b>R10</b> - Lleno de glicerina (máx +160 °C)	♦	♦	♦
<b>R11</b> - Lleno de silicona (máx +250 °C)	♦	♦	♦
<b>T01</b> - Tropicalización	♦	♦	♦
<b>T32</b> - Visor de seguridad en crista doble estratificado	♦	♦	♦



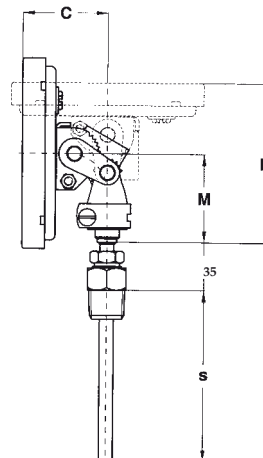
Para la utilización en atmósferas potencialmente explosivas estos instrumentos deben estar contruidos conforme a la normativa ATEX/94/9/CE. Dicha versión del instrumento está reflejada en la páginas del catálogo correspondiente disponible bajo demanda.



1 - Montaje Radial

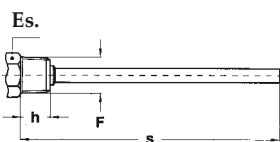


4 - Montaje Posterior

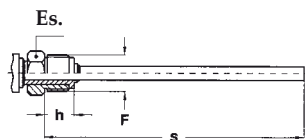


9 - Montaje Articulado

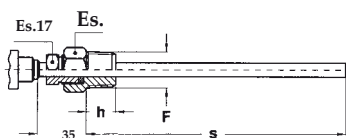
DN	A	a	b	C	d	E	H	M	N
<b>E</b> 100	34,5	13	19	49	110,6	39	57	51,5	92,5
<b>F</b> 125	34,5	14,5	19,5	49,5	130	39,5	65	51,5	93
<b>G</b> 150	34,5	15	20	50	161	40	82	51,5	93,5



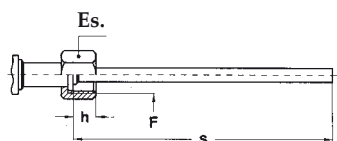
3 - Conexión macho, fijo



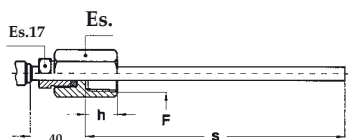
5 - Conexión macho, giratorio



9 - Conexión macho, giratorio y deslizante



8 - Conexión hembra, giratoria



7 - Conexión hembra, giratoria y deslizante

(dimensiones: mm)

F	Es.	h
<b>41M</b> - G 1/2 A	22 *	17
<b>43M</b> - 1/2-14 NPT	22 *	14

\* ø 24 para tipo articulado

F	Es.	h
<b>41M</b> - G 1/2 A	22	14
<b>51M</b> - G 3/4 A	27	14

F	Es.	h
<b>41M</b> - G 1/2 A	22	14
<b>43M</b> - 1/2-14 NPT	22	17
<b>51M</b> - G 3/4 A	27	16
<b>53M</b> - 3/4-14 NPT	27	17

F	Es.	h
<b>41F</b> - G 1/2 A	24	16
<b>51F</b> - G 3/4 A	30	16

F	Es.	h
<b>43F</b> - 1/2-14 NPT	24	18
<b>53F</b> - 3/4-14 NPT	32	18

**SECUENCIA PARA ENCARGAR**

Sección/	Modelo/	Montaje /	Tipo de Conexión /	Diámetro /	Escala /	Conexión al Proceso /	Tipo y longitud del inmersor /	Opciones
<b>6</b>	<b>TB8</b>	<b>1</b>	<b>3</b>	<b>E</b>		<b>41M</b>	<b>6</b>	<b>2E3...T32</b>
		<b>4</b>	<b>5</b>	<b>F</b>		<b>43M</b>	<b>7</b>	
		<b>9</b>	<b>7</b>	<b>G</b>		<b>51M</b>	<b>8</b>	
			<b>8</b>			<b>53M</b>	<b>9</b>	
			<b>9</b>			<b>43F</b>		
						<b>53F</b>		



Cert. No. LRQ 0963008

ISO 9001

# spirax sarco

TI-P027-01  
ST Issue 13

## BSP Pressure Gauge with Syphon and Cock

### Description

Pressure gauge with 100 mm diameter dial with units marked in bar, psi and inches hg for vacuum as appropriate and having a BSP connection. The gauge is supplied with either:

Ring type syphon tube and cock or a 'U' type syphon tube and cock.

Bourdon tube gauge, constructed in accordance with DIN 16005.

For the following options, consult Spirax Sarco:

Pressure gauges with NPT connections.

A dial with MPa units is available where indicated (\*) in the 'Available pressure range' table below.

### Available pressure range

	Range	0 to 1.6 bar	0 to 23 psi
Steel	Range *	0 to 4.0 bar	0 to 53 psi
	Range *	0 to 6.0 bar	0 to 86 psi
	Range *	0 to 10.0 bar	0 to 145 psi
	Range *	0 to 16.0 bar	0 to 230 psi
Note: Where indicated (*) a dial with MPa units is available.	Range *	0 to 25.0 bar	0 to 360 psi
	Range	0 to 40.0 bar	0 to 580 psi
	Range	-1 to 1.5 bar	30" Hg to 20 psi
	Range	-1 to 3.0 bar	30" Hg to 40 psi
	Range	-1 to 5.0 bar	30" Hg to 70 psi
	Stainless steel	Range	0 to 4.0 bar
Range		0 to 10.0 bar	0 to 145 psi
Range		0 to 16.0 bar	0 to 230 psi
Range		0 to 25.0 bar	0 to 360 psi

### Standards

The product fully complies with the requirements of the Pressure Equipment Directive 97/23/EC.

### Certification

A certificate of conformity is available as standard for this product. A calibration certificate is available by special order at extra cost.

### Sizes and pipe connections

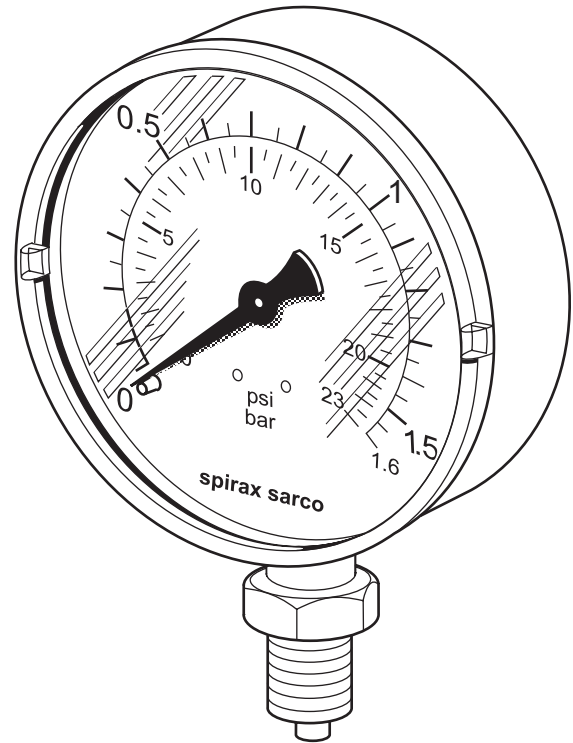
Pressure gauge		3/8" BSP male	(BS 2779)
Gauge cock	Gauge end	3/8" BSP female	(BS 2779)
	Syphon end	3/8" BSP female parallel	(BS 21)
Ring/'U' syphon	Cock end	3/8" BSP male taper	(BS 21)
	Process end	3/8" male parallel	(BS 21)

### Materials - Steel

Part	Material	
Gauge	Case	Pressed steel
	Glass	Snap fit perspex
	Bourdon tube	CuSh 8 (92% Cu 8% Zn)
Ring and 'U' syphon	Mild steel tube BS 1387 heavy grade	
Gauge cock	Body	Brass
	Handle	Phenolic

### Materials - Stainless steel

Gauge	Case	Stainless steel
	Glass	Snap-fit perspex
	Bourdon tube	Stainless steel 316TI
'U' syphon		Stainless steel
Gauge cock	Use a Spirax Sarco 3/8" M10S4	Stainless steel



### Pressure/temperature limits

Maximum design conditions	Full scale reading
PMA Maximum allowable pressure	Full scale reading
TMA Maximum allowable temperature of gauge	217°C
<b>Note:</b> Either a 'U' or a ring syphon must be fitted to achieve this.	
Minimum allowable temperature	-40°C

PMA	Range †	1.5 bar	20 psi
	Range	1.6 bar	23 psi
PMO	Range †	3 bar	40 psi
	Range	4 bar	53 psi
Please note:	Range †	5 bar	70 psi
	Range	6 bar	86 psi
	Range	10 bar	145 psi
	Range	16 bar	230 psi
	Range	25 bar	360 psi
	Range	40 bar	580 psi
Maximum ambient temperature			60°C

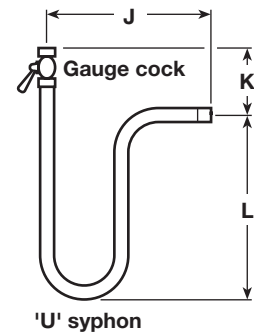
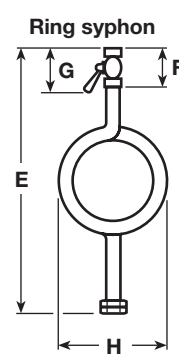
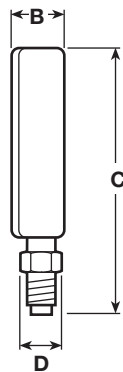
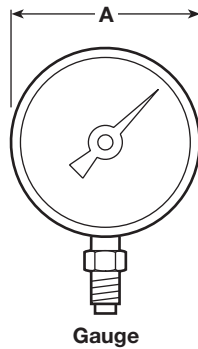
#### Please note:

1. Where indicated (†) these units are available as compound gauges down to full vacuum.

2. For compressed air and steam services the maximum operating pressure for this product is 21 bar g.

## Dimensions/weights (approximate) in mm and kg

Gauge					Ring syphon					U' syphon					
A	B	C	D	Weight	E	F	G	H	Weight Syphon	Weight Cock	J	K	L	Weight Syphon	Weight Cock
100	29	137	22 A/F	0.43	321	35	80	116	0.94	0.21	167.5	61.5	136.5	0.59	0.21



## Safety information, installation and maintenance

For full details see the Installation and Maintenance Instructions (IM-P027-02) supplied with the product.

### Installation note:

As with all instrumentation, the Spirax Sarco pressure gauge is a delicate measuring device and care has to be taken in its installation and use if it is to remain reliable.

It is recommended that all gauges are fitted with a gauge cock to assist when calibration or maintenance is necessary. When used on steam or other hot gases, gauges **must** be protected from heat by the use of a 'U' syphon or ring syphon tube and gauge cock. The syphon pipe should be primed with water prior to fitting the gauge. Care should be taken if the installation is exposed to frost as gauges can burst.

### Disposal:

The product is recyclable. No ecological hazard is anticipated with the disposal of this product providing due care is taken.

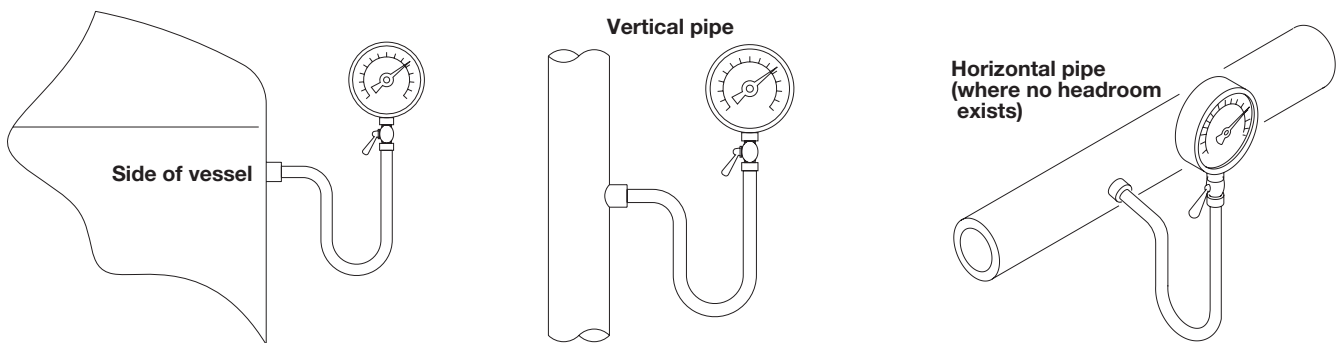
## How to order

**Example:** 1 off Spirax Sarco 3/8" pressure gauge with a pressure range of 0 - 10 bar and having screwed BSP connections.

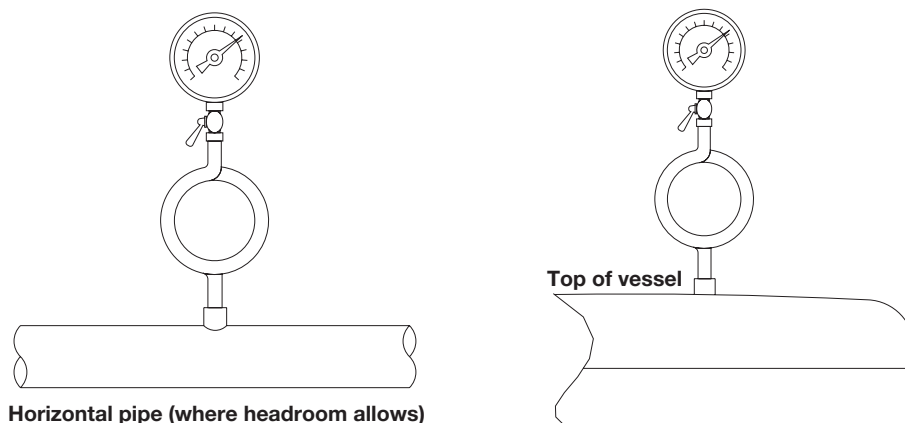
## Spare parts

There are no spare parts available for Spirax Sarco pressure gauges.

## Typical uses of a 'U' syphon and gauge



## Typical uses of a ring syphon and gauge





## TUBERIA PARA VAPOR TUBERIA SIN COSTURA Y ACCESORIOS CEDULA 80

### Especificaciones Generales

<b>Norma</b>	ASTM - A 53 Gr B para conducción de fluidos
<b>Recubrimiento</b>	Negro o galvanizado
<b>Largo normal</b>	6,00 m
<b>Otros largos</b>	Previa Consulta



NOMINAL	DIAMETRO		ESPESOR		PRESION/PRUEBA		PESO
	EXTERIOR		e	pulg	kg/cm2	lb/pulg2	kg/m
	mm	pulg	mm				
1/4"	13.70	0.54	3.02	0.11	60	850	0.80
3/8"	17.10	0.37	3.20	0.12	60	850	1.10
1/2"	21.30	0.84	3.73	0.14	60	850	1.62
<b>3/4"</b>	<b>26.70</b>	<b>1.05</b>	<b>3.91</b>	<b>0.15</b>	<b>60</b>	<b>850</b>	<b>2.19</b>
1"	33.40	1.31	4.55	0.17	60	850	3.23
1 1/4"	42.20	1.66	4.85	0.19	134	1900	4.47
1 1/2"	48.30	1.90	5.08	0.20	134	1900	5.41
2"	60.30	2.37	5.54	0.21	176	2500	7.48
<b>2 1/2"</b>	<b>73.00</b>	<b>2.87</b>	<b>7.01</b>	<b>0.27</b>	<b>176</b>	<b>2500</b>	<b>11.41</b>
3"	88.90	3.50	7.62	0.30	176	2500	15.27
4"	114.30	4.50	8.56	0.33	197	2800	22.31
6"	168.30	6.62	10.97	0.43	193	2740	42.56

#### Composición Química Máximo porcentaje

Carbón	0.3
Manganeso	1.2
Fósforo	0.05
Azufre	0.06



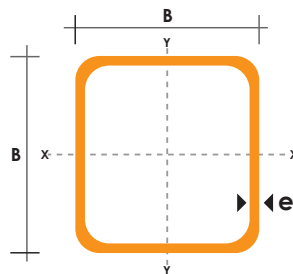
## TUBO ESTRUCTURAL CUADRADO

### Especificaciones Generales

<b>Norma</b>	ASTM A-500
<b>Recubrimiento</b>	Negro o galvanizado
<b>Largo normal</b>	6 mts.
<b>Otros largos</b>	Previa Consulta
<b>Dimensiones</b>	Desde 20mm a 100mm
<b>Espesor</b>	Desde 2,0mm a 3,0mm



DIMENSIONES		AREA		EJES X-Xe Y-Y		
A mm	ESPESOR mm	PESO Kg/m	AREA cm2	I cm4	W cm3	i cm
20	1,2	0,72	0,90	0,53	0,53	0,77
20	1,5	0,88	1,05	0,58	0,58	0,74
20	2,0	1,15	1,34	0,69	0,69	0,72
25	1,2	0,90	1,14	1,08	0,87	0,97
25	1,5	1,12	1,35	1,21	0,97	0,95
25	2,0	1,47	1,74	1,48	1,18	0,92
30	1,2	1,09	1,38	1,91	1,28	1,18
<b>30</b>	<b>1,5</b>	<b>1,35</b>	<b>1,65</b>	<b>2,19</b>	<b>1,46</b>	<b>1,15</b>
30	2,0	1,78	2,14	2,71	1,81	1,13
40	1,2	1,47	1,80	4,38	2,19	1,25
40	1,5	1,82	2,25	5,48	2,74	1,56
40	2,0	2,41	2,94	6,93	3,46	1,54
40	3,0	3,54	4,44	10,20	5,10	1,52
50	1,5	2,29	2,85	11,06	4,42	1,97
50	2,0	3,03	3,74	14,13	5,65	1,94
50	3,0	4,48	5,61	21,20	8,48	1,91
60	2,0	3,66	3,74	21,26	7,09	2,39
60	3,0	5,42	6,61	35,06	11,69	2,34
75	2,0	4,52	5,74	50,47	13,46	2,97
75	3,0	6,71	8,41	71,54	19,08	2,92
75	4,0	8,59	10,95	89,98	24,00	2,87
100	2,0	6,17	7,74	122,99	24,60	3,99
100	3,0	9,17	11,41	176,95	35,39	3,94
100	4,0	12,13	14,95	226,09	45,22	3,89
100	5,0	14,40	18,36	270,57	54,11	3,84







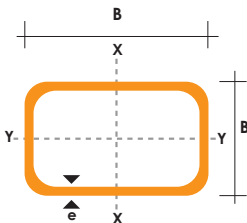
## TUBO ESTRUCTURAL RECTANGULAR

### Especificaciones Generales

<b>Norma</b>	ASTM A-500
<b>Recubrimiento</b>	Negro o galvanizado
<b>Largo normal</b>	6 mts.
<b>Otros largos</b>	Previa Consulta
<b>Dimensiones</b>	Desde 12mm x 25mm a 40mm x 80mm
<b>Espesor</b>	Desde 2,0mm a 3,0mm



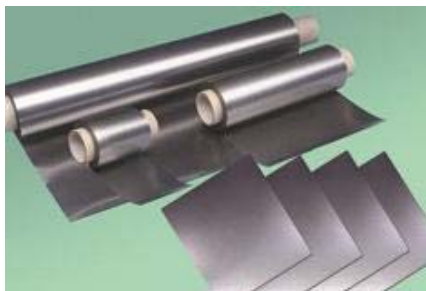
DIMENSIONES				AREA	EJES X-X			EJES Y-Y		
A mm	B mm	ESPESOR mm	PESO Kg/m	AREA cm2	I cm4	W cm3	i cm	I cm4	W cm3	i cm
20	40	1,2	1,09	1,32	2,61	1,30	1,12	0,88	0,88	0,83
20	40	1,5	1,35	1,65	3,26	1,63	1,40	1,09	1,09	0,81
20	40	2,0	1,78	2,14	4,04	2,02	1,37	1,33	1,33	0,79
25	50	1,5	1,71	2,10	6,39	2,56	1,74	2,19	1,75	1,02
25	50	2,0	2,25	2,74	8,37	3,35	1,75	2,80	2,24	1,01
25	50	3,0	3,30	4,14	12,56	5,02	1,74	3,99	3,19	0,99
<b>30</b>	<b>50</b>	<b>1,5</b>	<b>1,88</b>	<b>2,25</b>	<b>7,27</b>	<b>2,91</b>	<b>1,80</b>	<b>3,32</b>	<b>2,21</b>	<b>1,21</b>
30	50	2,0	2,41	2,94	9,52	3,81	1,80	4,28	2,85	1,21
30	50	3,0	3,30	4,21	12,78	5,11	1,74	5,66	3,77	1,16
30	70	2,0	3,03	3,74	22,20	6,34	2,44	5,85	3,90	1,25
30	70	3,0	4,48	5,41	30,50	8,71	2,37	7,84	5,23	1,20
40	60	1,5	2,29	2,91	14,90	4,97	2,26	7,94	3,97	1,65
40	60	2,0	3,03	3,74	18,08	6,13	2,22	9,81	4,90	1,62
40	60	3,0	4,48	5,41	25,31	8,44	2,16	13,37	6,69	1,57
30	70	1,5	2,34	2,91	18,08	5,17	2,49	4,76	3,17	1,28
30	70	2,0	2,93	3,74	22,20	6,34	2,44	5,85	3,90	1,25
30	70	3,0	4,25	5,41	30,50	8,71	2,37	7,84	5,23	1,20
40	80	1,5	2,76	3,74	31,75	7,94	2,91	10,77	5,39	1,70
40	80	2,0	3,66	4,54	37,32	9,33	2,87	12,70	6,35	1,67
40	80	3,0	5,42	6,61	52,16	13,04	2,81	17,49	8,75	1,63
50	100	2,0	4,52	5,74	74,94	14,99	3,61	25,65	10,26	2,11
50	100	3,0	6,71	8,41	106,34	21,27	3,56	35,97	14,39	2,07
50	150	2,0	6,17	7,74	207,45	27,66	5,18	37,17	14,87	2,19
50	150	3,0	9,17	11,41	298,35	39,78	5,11	52,54	21,02	2,15





## PURE EXPANDED FLEXIBLE GRAPHITE FOIL ROLLING

## CPS1100



CPS Flexible Graphite Foil is a homogeneous material that contains no adhesives or binders. Even after long service periods, CPS Flexible Graphite Foil displays no notable changes in its properties compared with other sealing materials. Inhibitors can be added to enhance the oxidation and corrosion resistance properties of the flexible graphite.

CPS Flexible Graphite Foil is also available with self-adhesive backing. For applications in stuffing box packings. CPS Flexible Graphite Foil offers maximum protection against oxidation and thus ensures greater reliability and longer service lives.

CPS Flexible Graphite Foil is available in various dimensions and densities, and with a purity level of 99% up to 99.9%. CPS Flexible Graphite Foil is supplied as standard in both roll and tape form.

### The different CPS Flexible Graphite Foil grades are as follows:

CPS 1100	Graphite Foil of industrial and automotive quality
CPS 1100CI	Graphite Foil with conventional oxidation inhibitor
CPS 1102	Graphite Foil of nuclear quality
CPS 1102PAS	Graphite Foil of industrial / nuclear quality with self-adhesive backing
CPS 1102CI	Graphite Foil of nuclear quality with oxidation inhibitor

### Properties

- Flexible, soft
- High temperature resistant
- Asbestos-free, presents no health hazard
- Long-term stability of compressibility and recovery over a wide temperature range
- Properties highly anisotropic, particularly in respect of electrical and thermal conductivity
- Resistant to radiation
- Excellent residual stress
- Can be bonded using commercial adhesives
- Impermeable to gases and liquids
- Resistant to most media
- No ageing or embrittlement because of absence of binders and fillers
- No measurable cold or warm flow up maximum permissible gasket stress
- Low coefficient of friction
- Very good resistance to thermal shock
- Easily machined by cutting or punching

**Material data**




Foil grade		CPS 1100	CPS 1100CI	CPS1102
Standard bulk density	g/cm <sup>3</sup>	0.7 - 1.2		
Ash content	%	≤1	≤1.0	≤0.5
Chloride content	ppm	≤50	≤20	≤20
Foil thickness	mm	0.15 – 1.0		
Roll width	mm	500/1000/1500/2000		
Tape width	mm	≥ 4mm		
Roll length	m	25/50/75/100/300/500		

**Technical data of CPS 1100 Graphite Foil with bulk densities of 1.0 g/cc**

Purity	99 %
Sulphur Content max. ASTM C-816	1000 ppm
Bulk Density	1.0 g/cc ASTM C-559
Ash Content ASTM C561	Less than 1% ASTM C561
Leachable Chloride	50 ppm max. ASTM D-512
Fluorides	50 ppm max. ASTM D-512
Temperature Range	-200°C to +3300°C Non-Oxid -200°C to + 500°C Oxidizing -200°C to + 650°C Steam
Tensile Strength	998 Psi
Stress Relaxation	DIN 52913-48 N/mm <sup>2</sup>
Shore Hardness (D)	30
Creep Relaxation	At 100°C ASTM F-38 <5%
Sealability ml/h fuel A	<0.2 to 0.5 ASTM F-37B
Electrical Resistance	900 x 10 <sup>-6</sup> ohm cm parallel to surface 250,000 x 10 <sup>-6</sup> ohm cm perpendicular to surface
Thermal Conductivity	120 Kcal/m Hr.°C parallel to surface 4 Kcal/m Hr.°C perpendicular to surface
Coefficient of Thermal Expansion	5 x 10 <sup>-6</sup> /°C parallel to surface 2 x 10 <sup>-6</sup> /°C perpendicular to surface
Ignition Loss	Less than 1% (450° /1Hr) Less than 20%(650° /1Hr)
Operating Pressure	140 bar (2058 p.s.i)
Resilient Rate	More than 30%
Compressibility	40 to 45 % ASTM F36A-66
Recovery	20 to 40 % ASTM F36A-66
ASTM "m" factor	2
ASTM "y" stress	1500 Psi
Sliding-Frictional Coefficient	0.149
Permeability Coefficient for air	Less than 10 <sup>-5</sup> cm <sup>2</sup> /sec perpendicular to surface
PH Range	0 to 14

**EXPANDED FLEXIBLE GRAPHITE GASKET SHEETS**

**CPS 1200/  
3002A/3001A**

 <p>CPS 1200</p>	<p>CPS 1200 is made of expanded graphite foil without insertion. This compressed sheets are also used in manufacturing of exaded flexible graphite materials with stainless steel reinforcement.</p> <p>CPS 1200 is used as a gasket material for low pressures and high temperature; also as a layering material for cam profile gaskets and as an insert material for PTFE-envelope gaskets.</p>
 <p>CPS 3002A</p>	<p>CPS 3002A is an expanded graphite foil laminate with one or more thin, flat stainless steel 316 insertion. It is used for high pressure and high temperature conditions. This material finds many applications in both chemical and petrochemical industries.</p>
 <p>CPS 3001A</p>	<p>CPS 3001A is expanded graphite foil reinforced with a single or more insertions of tanged 0.10mm thick 316 stainless steel. No adhesive is used to bond the graphite layers. This sheet is used frequently in flange connections for piping and machinery. It is extremely suitable for steam systems, in chemical and petrochemical industries, processing industry, etc.</p>

Standard Sheet Size . 1000\*1000mm, 1500\*1500mm, 2000\*2000mm. Other size upon request.

## Technical Properties

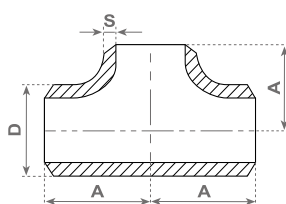
		CPS 1200	CPS 3002A	CPS 3001A
Thickness	mm	1.0 1.5 2.0 3.0	0.75 1.0 1.5 2.0 3.0	1.0 1.5 2.0 3.0
Max temperature	°C	-200°C to +500°C oxid -200°C to +650°C steam	-200°C to +500°C oxid -200°C to +650°C steam	-200°C to +500°C oxid -200°C to +650°C steam
Max pressure	bar	40	140	140
Density	g/cm <sup>3</sup>	1.1	1.1	1.1
Ash content	% DIN 51 903	≤1.0	≤1.0	≤1.0
Leachable chloride content	ppm	≤50	≤50	≤50
Material of insertion	DIN/ASTM	-	1.4401/SS316(flat)	1.4401/SS316(tanged)
Thickness of insertion	mm	-	0.05	0.1
No. of inserts		-	1 1 1 1 2	1 1 1 1
Gas permeability	cm <sup>2</sup> /min	<0.30<0.60<0.80<0.80	≤0.60	,0.60<0.60<0.80<1.0
Spec. leak pate	mg/s/m	<0.05<0.08<0.1<0.1		
Stress relaxation DIN 52 913,16h/300°C	N/mm <sup>2</sup>	>47	≥45	>48 >48 >48 >45
Compressibility % ASTM F 36A-66		40-50	40-50	30-35 30-40
Recovery % ASTM F 36A-66		10-15	10-15	15-20
Min. gasket assembly stress	N/mm <sup>2</sup>	20	10	20
M	DIN factor	1.3	1.3	1.3
Max. permissible gasket stress	N/mm <sup>2</sup>	160 140 120 120	100	180 160 140 120
Max. permissible gasket stress under service conditions	N/mm <sup>2</sup>	140 120 100 100	60	160 140 120 100
M	ASTM factor	2	2	3 3 2.5 2.5
Y	psi ASTM factor	1500	900	9000 9000 4000 4000

CPS STYLE	PRODUCTS
1200/1200A	Pure flexible graphite sheet/gasket
3001A/3101A	Tanged SS316 reinforced flexible graphite composite sheet/gasket
3001B/3101B	Tanged SS304 reinforced flexible graphite composite sheet/gasket
3002A/3102A	Flat SS316 reinforced flexible graphite composite sheet/gasket
3002B/3102B	Flat SS304 reinforced flexible graphite composite sheet/gasket
3002C/3102C	Flat nickel foil reinforced flexible graphite composite sheet/gasket
3002D/3102D	Flat aluminum foil reinforced flexible graphite composite sheet/gasket
3003A/3103A	SS316 mesh-reinforced flexible graphite composite sheet/gasket
3003B/3103B	SS304 mesh-reinforced flexible graphite composite sheet/gasket
3003C/3103C	Aluminum mesh-reinforced flexible graphite composite sheet/gasket
3003D/3103D	Fiberglass mesh-reinforced flexible graphite composite sheet/gasket
3004/3104	Tanged tinplate-reinforced flexible graphite composite sheet/gasket
3005/3105	Polyester reinforced flexible graphite composite sheet/gasket
3006A/3106A	External-laminated SS316 reinforced flexible graphite composite sheet/gasket
3006B/3106B	External-laminated SS304 reinforced flexible graphite composite sheet/gasket
3006D/3106D	External-laminated aluminum foil reinforced flexible graphite composite sheet/gasket
3006F/3106F	External-laminated PTFE film reinforced flexible graphite composite sheet/gasket

## Accesorio acero al carbono ASTM

### Te ASTM según ASME/ANSI B16.9

Dimensiones según ASME/ANSI B16.9  
Material según ASTM A-234 WPB



Diámetro nominal [pulg.]	DN [mm]	Diámetro ext. en bisel D	A	Espesor STD	Peso aprox. STD (kg.)	Espesor XS	Peso aprox. XS (kg.)
½	15	21,3	25	2,77	0,113	3,73	0,205
¾	20	26,7	29	2,87	0,168	3,91	0,27
1	25	33,4	38	3,38	0,345	4,55	0,0815
1 ¼	32	42,2	48	3,56	0,608	4,85	0,86
1 ½	40	48,3	57	3,68	0,916	5,08	1,22
2	50	60,3	64	3,91	1,34	5,54	1,86
<b>2 ½</b>	<b>65</b>	<b>73</b>	<b>76</b>	<b>5,16</b>	<b>2,36</b>	<b>7,01</b>	<b>3,07</b>
3	80	88,9	86	5,49	3,37	7,62	4,295
3 ½	90	101,6	95	5,74	4,47	8,08	6,15
4	100	114,3	105	6,02	5,72	8,56	7,24
5	125	141,3	124	6,55	8,98	9,53	12,95
6	150	168,3	143	7,11	13,3	10,97	19,25
8	200	219,1	178	8,18	24,4	12,7	34,42
10	250	273	216	9,27	41,4	12,7	58,4
12	300	323,8	254	9,53	59,9	12,7	79,3
14	350	355,6	279	9,53	72,1	12,7	117,78
16	400	406,4	305	9,53	99,3	12,7	142,69
18	450	457	343	9,53	127,9	12,7	170
20	500	508	381	9,53	160,6	12,7	270
22	550	559	419	9,53	198,2	12,7	350
24	600	610	432	9,53	223,6	12,7	430
26	650	660	495	9,53	287,6	12,7	509
28	700	711	521	9,53	-	12,7	-
30	750	762	559	9,53	387,8	12,7	626
32	800	813	597	9,53	-	12,7	-
34	850	864	635	9,53	515,3	12,7	740
36	900	914	673	9,53	586,9	12,7	830

\* Consultar disponibilidad en otros materiales.

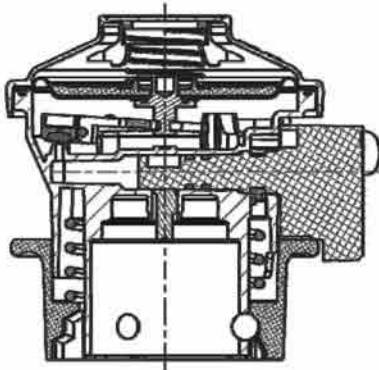
\* Disponible gama espesores (SCH.) según ASME B36.10.

\* Dimensiones en milímetros (mm.)





### SRG LPG Low Pressure Jumbo Regulator Type 592 Single Stage



## Jumbo

Inlet Connection	Outlet Connections
<ul style="list-style-type: none"> <li>◆ 35 mm to EN 12864, fig. G.56</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>◆ Nozzle 8, for hose with 8 mm inner dia., to EN 12864, fig. H.50</li> <li>◆ Nozzle 10, for hose with 10 mm inner dia., to EN 12864, fig. H.51</li> <li>◆ G1/4A-LH, to DIN 8542</li> <li>◆ other outlet connections available on request</li> </ul>
Outlet Pressure	Color
<ul style="list-style-type: none"> <li>◆ 28 mbar</li> <li>◆ 30 mbar ◆ 50 mbar</li> <li>◆ other settings available on request</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>◆ blue grey</li> <li>◆ black</li> <li>◆ other colors available on request</li> </ul>

**Product Description:** The SRG Jumbo Regulator in connection with the SRG cylinder valve reduces the high gas pressure in the cylinder to the low service pressure.

The regulator can be equipped with a flow limiter which cuts off the gas flow automatically at approx. 1500 l air/hr. (under normal cylinder pressure) in case of a ruptured gas tubing or the gas tubing is pulled off. After cut-off the gas escape is limited to maximum 35 l air/hr.

The regulator can be equipped with a pressure relief valve in the low pressure stage, opening at a nominal pressure of 150 mbar.

**Materials and Standards:** The SRG Jumbo Regulator is made of a zinc die casting (body and cover) and other corrosion-resistant and LPG-proof materials such as brass, stainless steel and acetal resin.

The rubber materials used are developed and produced according to the requirements of EN 549 as well as in accordance with SRG's own stringent specifications.

**Quality standards:** SRG's quality-control system carries an ISO 9001 certificate and is continually assessed by the Notified Body.

**Capacity:** Rated for inlet pressure of between 0,3 and 7,5 bar (BUTANE) the regulator has a capacity of 1,6 kg gas/hr.

**Operation:** The regulator is fixed to the cylinder valve by means of stainless steel balls which are held in the ball-groove of the cylinder valve under the pressure of a spring loaded locking ring. The snap-in action of the coupling ensures a tight connection between the regulator and the cylinder valve.

Connection lever and on/off tap interlocked to ensure easy and safe handling:

- Connection is simple, by just pressing down
- Cannot be unintentionally disconnected.
- Switching on is possible only when the regulator is connected properly with the cylinder valve

**Packaging:** The SRG Jumbo Regulator comes packed separately in a folding box. The folding boxes are packed in cardboard boxes.

# Apéndice C:

## Guía para el control de la práctica experimental de carbonización.

REACTOR DE PIROLISIS EXPERIMENTAL CDTS			
Control de temperatura y presión de la prueba			
Nombre del operador:		Control No.	
_____		_____	
Biomasa:		Fecha:	
_____		_____	
Cantidad de biomasa a carbonizar:		_____Kg.	_____Lb.
Carbón obtenido:		_____Kg.	_____Lb.
Tiempo de la prueba:		Hora inicio:	Hora fin:
		_____	_____
No.	Tiempo [min]	Cámara de calentamiento de biomasa	
		Temperatura [°C]	Presión [Psi]
1			
2			
3			
4			
5			
6			
7			
8			
9			
10			
11			
12			
13			
14			
15			
16			
17			
18			
19			
20			
Observaciones: _____			
_____			
_____			