

ESCUELA POLITÉCNICA DEL EJÉRCITO

**DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA ENERGÍA Y
MECÁNICA**

CARRERA DE INGENIERÍA MECÁNICA

**DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN SISTEMA DE COMBUSTIÓN
PARA CARACTERIZACIÓN TÉRMICA DE DESECHOS
PLÁSTICOS UTILIZADOS COMO COMBUSTIBLE
ALTERNATIVO**

**PROYECTO PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE
INGENIERO MECÁNICO**

REALIZADO POR:

**JAVIER EDUARDO SALINAS VILLACIS
RONY SANTIAGO VASQUEZ FUEL**

**DIRECTOR: ING. JOSÉ PÉREZ
CODIRECTOR: ING. JOSÉ GUASUMBA**

SANGOLQUÍ – ECUADOR

Enero 11, 2010

CERTIFICACIÓN DE LA ELABORACIÓN DEL PROYECTO

El proyecto “**DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN SISTEMA DE COMBUSTIÓN PARA CARACTERIZACIÓN TÉRMICA DE DESECHOS PLÁSTICOS UTILIZADOS COMO COMBUSTIBLE ALTERNATIVO**” fue realizado en su totalidad por los señores: Javier Eduardo Salinas Villacís y Rony Santiago Vásquez Fuel, como requerimiento parcial para la obtención del título de Ingeniero Mecánico.

Ing. José Pérez

DIRECTOR

Ing. José Guasumba

CODIRECTOR

Sangolquí, 11 de Enero de 2010

LEGALIZACIÓN DEL PROYECTO

**“DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN SISTEMA DE
COMBUSTION PARA CARACTERIZACION TERMICA DE
DESECHOS PLÁSTICOS UTILIZADOS COMO COMBUSTIBLE
ALTERNATIVO”**

ELABORADO POR:

Javier Salinas Villacís

Rony Vásquez Fuel

DEPARTAMENTO DE CIENCIAS EN LA ENERGÍA Y MECÁNICA

DIRECTOR DE LA CARRERA

Ing. Emilio Tumipamba

Sangolquí, 11 de Enero de 2010

DEDICATORIA

A Dios, por darme la oportunidad de enmendar mis errores, por la maravillosa familia que me dio junto con quienes he compartido y compartiré mis penas pero sobre todo mis alegrías y triunfos.

A mí querido padre, Edwin, quien a sido mi ejemplo de vida

A mí querida madre, Jeanett, por su dedicación y esfuerzo

Quienes son mi ejemplo de vida por su lucha constate para darme lo mejor para que nunca me falte nada pero sobre todo por enseñarme que la vida no esta en cuantas veces te caes sino en cuantas te sabes levantar.

A mis hermanos; Pamela por estar en las buenas en las malas pero sobre todo por escucharme cuando lo necesite, Cristian por ser la luz de mis ojos y por toda la confianza que en el he puesto.

A mis primos Lucy, Hernán, Pablo, Gaby, Daya, Isabelita, Alejo, Diego, etc.

A mis tíos Rubén, Elsa, Maria, Guillo, Nelly quienes han sido grandes interventores en este triunfo.

A mis abuelitos Angélica, Evangelina, Ezequiel (+), Vicente (+), por formar tan lindo hogar.

A mis amigos que siempre estuvieron ahí, German, Rola, Pato, José, Byron, Jorge, etc.

Javier Eduardo

DEDICATORIA

A mis sobrinos Lisbeth y Gabriel con los que comparto mi diario vivir, con esas experiencias de vida que me dan esas criaturitas han llegado a ocupar un lugar muy importante en mi corazón, permitiéndome compartir únicas y maravillosas situaciones, las cuales seguramente nunca saldrán de mi mente, siempre serán la razón de mi motivación.

A mis padres Lucia y German, por todo el esfuerzo y sacrificio que realizaron por siempre poder verme como una persona de bien.

A mis hermanos Patricio y Alejandra, porque siempre supieron darme aliento para que pueda cumplir mis metas.

Rony Santiago

AGRADECIMIENTO

A Dios por haberme dado la vida, por haber perdonado mis errores, por todas las oportunidades que me ha dado para ser mejor persona, por la firmeza el temple la destreza de confiar plenamente en uno de sus hijos.

A mis padres, Edwin y Jeanett, por toda su comprensión, confianza, ejemplo durante este tiempo de formación personal y académica, por ver plasmado su esfuerzo apoyo y sacrificio muchas veces sin medida, en un sueño hecho realidad.

A la Escuela Politécnica del Ejercito por haberme formado como un profesional con vastos conocimientos, a través de sus profesores que supieron impartir sus conocimiento en cada una de las aulas que cursamos; de manera muy especial al Ingeniero José Pérez y José Guasumba, quienes me dieron todo su apoyo y capacidad profesional para ser uno de ellos durante el desarrollo de este proyecto.

A mi amigo y compañero de tesis, Rony, por alcanzar tan apreciado logro, esfuerzo de nuestro constante perseverar.

Javier Eduardo

AGRADECIMIENTO

Agradezco a la vida por el camino que me ha trazado, a veces teniendo que surcar momentos difíciles pero también momentos muy felices, pero siempre con la mentalidad de cumplir mis metas las cuales algunas de ellas las he ido alcanzando con el pasar del tiempo, el haberme brindado unos padres tan maravillosos “LUCIA y GERMAN”, con los cuales siempre conté con su apoyo y sabiduría, llegando a ser el pilar mas importante de mi vida.

A la Escuela Politécnica del Ejército, fuente infinita de conocimientos y sabiduría que supo compartir a través de sus docentes, formándome para el futuro como un profesional para servir de la mejor manera a la sociedad.

A mi familia, amigos en especial a mi compañero de tesis Javier por los momentos que la vida nos permitió compartir.

Rony Santiago

ÍNDICE GENERAL

CERTIFICACIÓN DE LA ELABORACIÓN DEL PROYECTO.....	II
LEGALIZACIÓN DEL PROYECTO.....	III
DEDICATORIA.....	IV
AGRADECIMIENTO.....	VI
ÍNDICE GENERAL.....	VIII
ÍNDICE DE TABLAS.....	XII
INDICE DE FIGURAS.....	XV
INDICE DE ANEXOS.....	XVIII
NOMENCLATURA.....	XIX
RESUMEN.....	XXIV
INTRODUCCIÓN.....	XXV
CAPÍTULO 1.....	1
GENERALIDADES.....	1
1.1 Antecedentes.....	1
1.2 Definición del problema.....	2
1.3 Objetivos.....	3
1.4 Justificación e importancia.....	4
1.5 Alcance... ..	5
CAPÍTULO 2.....	7
MARCO DE REFERENCIA.....	7
2.1 Residuos plásticos.....	7
2.2 Combustión.....	15
2.3 Procesos de recuperación de los residuos plásticos con fines energéticos.....	25
2.4 Ecuación de combustión de desechos plásticos.....	51
2.5 Generación de productos en la combustión de polímeros.....	53
CAPÍTULO 3.....	59

ANÁLISIS Y SELECCIÓN DE ALTERNATIVAS.....	59
3.1 Restricciones de diseño.....	60
3.2 Matriz de selección.....	60
3.3 Variables de diseño.....	61
3.4 Criterios de evaluación.....	63
3.5 Matrices.....	65
3.6 Resumen de características de la alternativa seleccionada.....	68
CAPÍTULO 4.....	69
DISEÑO TÉRMICO.....	69
4.1 Parámetros de diseño.....	69
4.2 Análisis del combustible.....	71
4.3 Cálculo de la cantidad de aire en combustión neutra.....	75
4.4 Determinación del coeficiente de exceso de aire ().....	76
4.5 Cálculo de la composición de los productos de combustión.....	79
4.6 Cálculo de la temperatura teórica de combustión (flama adiabática)...	80
4.7 Diseño de la cámara de combustión.....	84
4.8 Análisis del intercambiador de calor.....	104
4.9 Diseño de la chimenea.....	119
4.10 Sistema de combustión.....	124
4.11 Calor perdido total.....	128
4.12 Balance energético.....	131
4.13 Cálculo de masa.....	134
4.14 Balance de masa.....	135
CAPÍTULO 5.....	137
CONSTRUCCIÓN Y MONTAJE.....	137
5.1 Diagramas de proceso.....	137
5.2 Planos de fabricación.....	153
5.3 Equipos y herramientas.	153
5.4 Mano de obra.....	155
5.5 Materiales.....	156

CAPÍTULO 6.....	157
PRUEBAS DE OPERACIÓN DEL SISTEMA.....	157
6.1 Procedimiento.....	157
6.2 Adquisición de datos.....	162
6.3 Determinación del calor neto.....	163
6.4 Pérdidas de calor.....	164
6.5 Determinación de eficiencias térmicas.....	168
6.6 Análisis inmediato de los desechos plásticos.....	169
6.7 Determinación del poder calórico experimental.....	172
6.8 Determinación aproximada de los contenidos de hidrogeno y carbono de los desechos plásticos.....	173
6.9 Obtención del poder calorífico teórico.....	174
6.10 Análisis de resultados.....	175
6.11 Estudio comparativo.....	177
CAPÍTULO 7.....	181
ANALISIS DEL IMPACTO AMBIENTAL.....	181
Determinación del origen de los desechos plásticos que serán utilizados	
7.1 en el estudio.....	181
7.2 Determinación del volumen disponible de desechos.....	183
7.3 Aplicación del método EIAs.	185
7.4 Implementación de un dispositivo para reducir la emisión de gases.....	193
7.5 Análisis de los residuos de la combustión de los desechos plásticos.....	205
7.6 Comparación de la emisión de gases de contaminación de los residuos plásticos con los combustibles convencionales con la disposición que rige en el distrito metropolitano.	207
CAPÍTULO 8.....	217
ANÁLISIS ECONÓMICO Y FINANCIERO.....	217
8.1 Análisis económico.	217
8.2 Análisis financiero.....	221

CAPÍTULO 9.....	223
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	223
9.1 Conclusiones.....	223
9.2 Recomendaciones.....	225
BIBLIOGRAFIA.....	227

ÍNDICE DE TABLAS

ORDEN	CONTENIDO	PAG
CAPÍTULO 2: Análisis y selección de alternativas		
2.1	Clasificación de los desechos	8
2.2	Materiales y Códigos	9
2.3	Caracterización de los residuos sólidos en el distrito metropolitano	11
2.4	Volumen de desechos plásticos generados	11
2.5	Aplicaciones de los distintos polímetros	13
2.6	Poder calórico de los materiales	19
2.7	Contenido energético	31
2.8	Rendimiento de procesos de valorización térmica	41
2.9	Elementos combustibles	51
2.10	Volumen de los gases de combustión	51
CAPÍTULO 3: Análisis y selección de alternativas		
3.1	Matriz de selección de alternativas	64
3.2	Matriz de selección del tipo de sistema de conversión energética	65
3.3	Matriz de selección del tipo de residuo como combustible	65
3.4	Matriz de selección del tipo de aislamiento	66
3.5	Matriz de selección del tipo de hogar o cámara de combustión	66
3.6	Matriz de selección del tipo de ventilación	67
3.7	Matriz de selección del tipo de procesamiento del residuo utilizado	67
3.8	Características de la cámara de combustión	68
CAPÍTULO 4: Diseño térmico		
4.1	Análisis final de componentes combustibles en desechos sólidos municipales	71
4.2	Porcentaje de cada elemento en base húmeda	73
4.3	Coeficientes para determinar los calores específicos	77
4.4	Calor volumétrico de los gases y del aire	77

ORDEN	CONTENIDO	PAG
4.5	Calor específico de polímeros	81
4.6	Entalpías de los componentes de la combustión	83
4.7	Propiedades Termofísicas de los gases para (T=1253 K)	89
4.8	Propiedades Termofísicas de los gases para (T=311,5 K)	99
4.9	Propiedades Termofísicas de los gases para (T= 859.1 K)	109
4.10	Propiedades Termofísicas de los gases para (T = 386,5 K)	115
4.11	Propiedades Termofísicas de los gases para (T=584.1 K)	122
CAPITULO 6: Pruebas de operación del sistema		
6.1	Datos experimentales	162
6.2	Temperaturas promedio	163
6.3	Valores del análisis inmediato del combustible	171
6.4	Composición química aproximada obtenida en forma experimental.	174
6.5	Datos del ácido benzoico	174
6.6	Datos de la muestra	175
6.7	Valores del poder calorífico superior	175
6.8	Poder calorífico de diversos polímeros	176
6.9	Poder calorífico de diversos materiales en (kJ/kg)	177
6.10	Poder calorífico de combustibles convencionales en (kJ/kg)	178
6.11	PCS experimental de biomasa y desechos plásticos en (kJ/kg)	179
CAPÍTULO 7: Análisis del impacto ambiental		
7.1	Desechos Totales	183
7.2	Desechos Plásticos	183
7.3	Desechos Plásticos Útiles	184
7.4	Cantidad de desechos plásticos según sus diferentes tipos	184
7.5	Matriz de evaluación de construcción, montaje y funcionamiento de la cámara	188
7.6	Matriz de calificación a los diferentes medios según las acciones de cada etapa del proceso de la cámara.	189

ORDEN	CONTENIDO	PAG
7.7	Matriz de interacciones de las acciones de la cámara.	191
7.8	Concentraciones de contaminantes comunes que definen los niveles de alerta, de alarma y de emergencia en la calidad del aire	194
7.9	Composición teórica de los desechos plásticos (base seca)	207
7.10	Composición teórica de los desechos plásticos (base húmeda)	207
7.11	Productos de la combustión de los desechos plásticos teórica	208
7.12	Composición teórica del petróleo (base seca)	208
7.13	Composición teórica del petróleo (base húmeda)	208
7.14	Productos de la combustión del petróleo	208
7.15	Composición teórica del carbón (base seca)	209
7.16	Composición teórica del carbón (base húmeda)	209
7.17	Producción de la combustión del carbón	209
7.18	Composición teórica de la leña (base seca)	209
7.19	Composición teórica de la leña (base húmeda)	210
7.20	Producción de la combustión de la leña	210
7.21	Límites máximos permisibles de emisiones al aire para fuentes fijas de combustión. Norma para fuentes en operación	213
7.22	Límites máximos permisibles de emisiones al aire para fuentes fijas de combustión. Norma para fuentes en operación	214
CAPÍTULO 8: Análisis económico y financiero		
8.1	Materiales secundarios	218
8.2	Mano de obra indirecta	218
8.3	Imprevistos	219
8.4	Costos de producción	219
8.5	Depreciación por tasa constante	220
8.6	Comparación de costo de venta de energía	221
8.7	Precio de desechos plásticos en dólares	222

INDICE DE FIGURAS

<u>ORDEN</u>	<u>CONTENIDO</u>	<u>PAG</u>
CAPÍTULO 2: Análisis y selección de alternativas		
2.1	Curva de combustión	16
2.2	Principales tipos de reciclado químico por termólisis	29
2.3	Procesos de valorización de compuestos termoestables	33
CAPÍTULO 4: Diseño térmico		
4.1	Temperatura adiabática	83
4.2	Dimensiones interiores de la cámara de combustión	85
4.3	Dimensiones exteriores de la cámara de combustión	85
4.4	Espesores de los elementos que conforman las paredes de la cámara de combustión	86
4.5	Emisividad de vapor de agua	92
4.6	Emisividad de bióxido de carbono	93
4.7	Factor de corrección asociado con mezclas de vapor de agua y bióxido de carbono	93
4.8	Factor de corrección para emisividad H ₂ O	96
4.9	Factor de corrección para emisividad de CO ₂	96
4.10	Disposición del banco de tubos	105
4.11	Factor de corrección para emisividad H ₂ O	113
4.12	Factor de corrección para emisividad de CO ₂	113
4.13	Esquema de la chimenea	119
4.14	Disposición de los agujeros en el quemador primario	126
4.15	Disposición de los agujeros en el quemador secundario	128
4.16	Esquema del balance energético en kJ/seg.	133
4.17	Esquema del balance de masa en kg.	136

CAPÍTULO 5: Construcción y montaje

5.1	Conjunto de cajas de la cámara de combustión	137
5.2	Base de 3mm de la cámara de combustión	138
5.3	Manta cerámica	139
5.4	Placa refractaria	140
5.5	Canal en C de la cámara de combustión	141
5.6	Quemadores $\frac{3}{4}$ " y $\frac{1}{8}$ "	142
5.7	Colector de cenizas de la cámara de combustión	143
5.8	Marco de la base de la cámara de combustión	144
5.9	Esquema de la base del conjunto	145
5.10	Esquema de la parrilla de la base	146
5.11	Ángulos de las paredes	147
5.12	Funda de 2mm de la cámara de combustión	148
5.13	Esquema de la chimenea	149
5.14	Esquema de la batería del intercambiador de calor	150
5.15	Intercambiador de calor	151
5.16	Cámara de combustión	152

CAPITULO 6: Pruebas de operación del sistema

6.1	Residuos plásticos (Composición)	158
6.2	Pantalla térmica (residuos plásticos)	158
6.3	Ubicación de las bujías para el encendido de los quemadores	159
6.4	Ensamblaje del venterol y los quemadores	160
6.5	Sistema de combustión ensamblado	160
6.6	Poder calorífico de diversos polímeros	176
6.7	Poder calorífico de diversos materiales en (kJ/kg)	177

ORDEN	CONTENIDO	PAG
6.8	Poder calorífico combustibles convencionales en kJ/kg	178
6.9	Poderes caloríficos obtenidos en forma experimental	179
CAPÍTULO 7: Análisis del impacto ambiental		
7.1	Mapa Temático Producción Diaria de Basura en Distrito Metropolitano de Quito	182
7.2	Implementación de un sistema para la reducción de emisiones gaseosas...	196
7.3	Implementación de un sistema para la reducción de emisiones gaseosas duchas	197
7.4	Implementación de un sistema para la reducción de emisiones gaseosas dichas isometría	198
7.5	Equipos para de tratamiento de Emisiones Gaseosas	204
7.6	Rango de temperatura y la producción de residuos	207
7.7	Volumen de los productos de combustión	210
7.8	Volumen de producción de RO ₂	211
7.9	Volumen de producción de O ₂	211
7.10	Volumen de producción de N ₂	212
7.11	Volumen de producción de H ₂ O	212
7.12	Coeficiente de exceso de aire	213
CAPÍTULO 8: Análisis económico y financiero		
8.1	Depreciación del equipo	221

INDICE DE ANEXOS

<i>ORDEN</i>	<i>CONTENIDO</i>	<i>PAG</i>
A	Bomba calorimétrica poder calífico teórico	229
B	Propiedades termofísicas	239
C	Planos de construcción	254
D	Fotos de la construcción	273
E	Normas técnicas para impacto ambiental	276
F	Análisis económico financiero	299
G	Cronograma de actividades	304

NOMENCLATURA

A	Ancho
Á	Área de transferencia de calor
As	Área superficial de transferencia de calor
Ápi	Área de pared interna
Ápo	Área de pared externa
Ást	Área de la sección transversal
A(s)	Porcentaje de ceniza en bases seca
Carga	Carga por unidad de área producida por el GLP
Cc	Capacidad calorífica del fluido frío
Ch	Capacidad calorífica del fluido caliente
Cp	Calor volumétrico a presión constante, en kcal/Nm ³ °C ó kJ/m ³
K.	
Cpgprom	Calor específico promedio de los gases asumiendo una T=300 °K
ch, CH	Chimenea
cam, CAM	Cámara de combustión
cpcomb	Calor específico del combustible, en kJ / kg °C
cp	Calorífico específico
Dh	Diámetro hidráulico
e	Espesor de los elementos
Gr	Número de Grashof
gr	Gravedad
H	Altura
Ic, IC	Intercambiador de calor
h	Coefficiente de transferencia de calor
K	Conductividad térmica
L	Largo
Lrp	Longitud media del radio
M	Masa
Mar	Masa real de aire

Msalida	Masa que sale del sistema
Mentrada	Masa que ingresa al sistema
m	Flujo de masa
Nu	Número de Nusselt
Nag	Número de agujeros
NuL	Número de Nusselt convención natural
NagQm	Número de agujeros para el quemador
n	Rendimiento del sistema
nh	Número de hileras de alto.
np	Número de hileras de profundidad
P	Perímetro de la sección transversal
Pr	Número de Prandtl
Pw	Presión parcial del vapor de agua
PCI	Poder Calorífico Inferior
PCS	Poder Calorífico Superior
Pco2	Presión parcial del bióxido de carbono
PQm	Potencia del quemador
Patm	Presión atmosférica
PCcomb	Poder calorífico del combustible de los quemadores (GLP)
Q	Calor aprovechado por el agua en el IC
Q2	Calor perdido por los gases de escape
Q3	Calor perdido debido a la combustión química incompleta
Q4	Calor perdido debido a la combustión mecánica incompleta
Q5	Calor perdido debido al enfriamiento externo de las paredes
Qp	Calor perdido
Qpar	Calor perdido por caída a través de la parrilla
Qescor	Calor perdido por escorias
Qcoque	Calor perdido por coque volante
Qw	Calor de condensación
Qdis	Calor disponible en la cámara, en kJ/kg.
Qgas	Calor de los gases
Qvapor	Calor contenido en el vapor
Qc	Caudal del fluido frío
Qm1	Quemador primario

Qm2	Quemador secundario
Qmax	Razón máxima de transferencia de calor
q4 incompleta	Pérdida relativa de calor por combustión mecánica incompleta
qc	Calor físico de combustible en kJ/kg
qar	Calor físico del aire kJ/kg
R	Resistencia térmica
Re	Número de Reynolds
Ra	Número de Rayleigh
r	Radio interno de la toma del venterol
Sp	Distancia horizontal entre tubos del IC
Sn	Distancia vertical entre tubos del IC
T	Temperatura, en K
Tadiab	Temperatura de flama adiabática
Tmg	Temperatura media volumétrica para gases
Tasa	Tasa de producción de vapor
t	Temperatura, en °C
tsch	Temperatura a la salida de la chimenea
tc	Temperatura de precalentamiento del combustible
U	Coeficiente global de transferencia de calor
uh	Velocidad de los gases
uc	Velocidad en tubos
umáx	Velocidad máxima
Vart1	Volumen de aire en combustión neutra a 0°C
Vartamb	Volumen de aire en combustión neutra a temperatura ambiente
Vg	Volumen de los gases producidos en combustión neutra
Vaire	Volumen real de aire
Vgases	Volumen total de los productos de combustión
Vgsecos	Volumen gases de combustión secos
Vint	Volumen interior
v _f	Velocidad de flujo del aire que ingresa en la cámara
vaire	Velocidad del aire
W(t)	Porcentaje de masa humedad

x_{mw}	Fracción volumétrica del bióxido de carbono
x_{mCO_2}	Fracción volumétrica del vapor de agua
α	Coeficiente de exceso de aire
α_g	Absortancia de los gases en el IC
β	Coeficiente de expansión volumétrica.
ρ	Densidad
ε_g	Emisividad del gas
ε_a	Emisividad del acero A-36
ε_l	Efectividad del intercambiador de calor
λ	Coeficiente de rozamiento
ϕ	Diámetro
ζ	Coeficiente de resistencia localizada en la salida de la chimenea
σ	Constante de Stefan-Boltzmann
ω_g	Velocidad de los gases a la salida de la chimenea
μ	Viscosidad dinámica
ν	Viscosidad cinemática
$\Delta\varepsilon$	Factor de corrección de emisividad
$\Delta\alpha$	Factor de corrección de absortancia
Δp	Tiro térmico
ΔH	Variación de la entalpía
CE	Eficacia de la combustión
Cfijo	Porcentaje de carbono fijo
DRE	Eficiencia de destrucción térmica
M_0	Masa inicial
M_1	Masa seca
M_2	Masa de coque
M_3	Masa de ceniza
nhogar	rendimiento del hogar
V_g	Porcentaje de compuestos volátiles
α	Poder calorífico superior de los compuestos volátiles

Subíndices

a	Tol de acero
ar	aire
ag	agujero
c	Para condiciones de fluido frío
cv	Condiciones de convección
cd	Condiciones de conducción
ext	Respecto a dimensiones externas
f	Evaluado en condiciones de película
fc	Fibra cerámica
g	gases
h	Para condiciones de fluido caliente
i	Evaluado en condiciones internas
int	Respecto a dimensiones internas
o	Evaluado en condiciones externas
p	Evaluado en condiciones de pared
pr	Placa refractaria
r	Condiciones de radiación
1	Condiciones iniciales o de entrada
2	Condiciones finales o de salida

RESUMEN

El presente estudio comprende el desarrollo de un sistema para la combustión de desechos plásticos, con una capacidad de incineración de 4,5 kg por hora, siendo posible alcanzar una tasa de producción de vapor de 24 kg por hora, estos resultados fueron obtenidos luego de haber cumplido con todas las condiciones de diseño del sistema caracterización térmica de desechos plásticos, siendo posible obtener una eficiencia en la cámara de combustión del 96%, eficiencia de destrucción térmica del 94%, eficiencia de combustión del 99,7%.

Al combustionar muestras de desechos plásticos se pudo determinar un consumo de combustible muy bajo, siendo posible alcanzar un poder calorífico superior (PCS) igual a 37 MJ/kg, llegando a ser posible demostrar en forma teórica que la producción de gases triatómicos (CO_2 y SO_2) generados por la combustión de desechos plásticos es menor al generado por el petróleo en un 27%, carbón 14%, debido a que en la composición química de muchos desechos plásticos no contienen azufre ni nitrógeno.

La temperatura de auto inflamación de los desechos plásticos fue posible determinarlo en función de la temperatura de pared la cual debe encontrarse entre el rango de 350 a 400 C, parámetro muy importante en el proceso de combustión para de esta manera garantizar una combustión continua, permitiendo obtener una temperatura constante dentro de la cámara de combustión por aproximadamente 17 minutos que dura el proceso de combustión de 1,5 kg de desechos plásticos.

Con el desarrollo de este estudio se pudo determinar que esta alternativa de reciclaje de desechos plásticos es muy ventajoso, siendo posible solucionar dos graves problemas la eliminación de los residuos plásticos y la necesidad de encontrar otras fuentes de energía

INTRODUCCIÓN

El presente estudio se desarrolla en nueve capítulos, en los mismos que se exponen la teoría que permite explicar las variables que se utilizan para el diseño y construcción de un sistema de combustión para caracterización térmica utilizando desechos plásticos como combustible alternativo, realizar los cálculos de ingeniería, planos de construcción y determinar los gastos generados durante el desarrollo del presente proyecto.

Se plantea también un análisis económico-financiero del proyecto, que permite establecer los costos de producción de energía utilizando medios alternos como es el caso de los desechos plásticos

Este equipo es un prototipo para el laboratorio de Mecánica de Materiales del Departamento de Ciencias de la Energía y Mecánica (DECEM) de la Escuela Politécnica del Ejército (ESPE), con el propósito de que sea de utilidad para estudiantes e investigadores.

CAPÍTULO 1

GENERALIDADES

1.1 ANTECEDENTES

En la actualidad, donde el cuidado ambiental y de recursos naturales se impone, los residuos plásticos representan una importante fuente de materiales recuperables.

En el Ecuador, se arrojan diariamente una gran cantidad de desechos plásticos sólidos generados por los habitantes de las distintas urbes del país, el sector industrial y agropecuario, de los cuales el porcentaje de recuperación de residuos plásticos actual, es muy bajo, debido seguramente a la falta de información relacionados con la educación ambiental y cultura ciudadana, deficientes canales de comercialización para los desechos sólidos recuperables y escasas alternativas tecnológicas para una potencial reutilización de éste tipo de desechos.

Algunos tipos de plásticos están hechos de petróleo, uno de los recursos naturales no renovables más valiosos de la tierra. Para la fabricación de productos plásticos se parte del petróleo bruto, que al ser refinado se obtienen materiales poliméricos, los que son capaces de deformarse hasta conseguir una

forma deseada por medio de un moldeo. También es posible obtener plástico mediante moléculas de celulosa, cera y caucho.

Es importante mencionar que no existe suficiente información sobre la utilización de residuos plásticos como fuente de energía, por lo que el presente proyecto procura realizar un análisis de dichos desechos en función de variables y constantes físicas tales como temperatura, masa, de forma que podamos obtener parámetros tales como eficiencias térmicas, poder calorífico, productos de la combustión, empleando diferentes polímeros. Con la obtención de estos parámetros se intenta obtener una valoración que nos ayude a comprender mejor las propiedades de este tipo de combustible alternativo.

Los motivos expuestos anteriormente son las principales razones por las que se ha decidido realizar el presente proyecto de grado que consiste en el diseño y construcción de un sistema de combustión para la caracterización térmica de desechos plásticos utilizados como combustible alternativo.

1.2 DEFINICIÓN DEL PROBLEMA

Tras la búsqueda de nuevas fuentes de combustible alternativo y la situación mundial de los desechos sólidos urbanos que no son tratados adecuadamente, surge la posibilidad de utilizar los desechos plásticos como combustible alternativo debido a sus propiedades energéticas, sin embargo la falta de un banco de pruebas para evaluar y realizar estudios comparativos entre los diferentes tipos de combustibles convencionales y alternativos, para poder determinar cuales son las fuentes de energía mas eficientes en términos de economía, energía y medio ambiente.

Razón por la cual nos hemos planteado las siguientes interrogantes: ¿Cómo influye la utilización de desechos plásticos como combustible alternativo?

¿Qué efecto tiene la falta estudio de las propiedades energéticas de los desechos plásticos?

¿Cuál es la incidencia de la elaboración de un banco de pruebas en la caracterización térmica de los desechos plásticos utilizados como combustible alternativo?

¿Cuál es el impacto ambiental que se produce al combustionar los desechos plásticos?

Por estas razones el presente proyecto pretende determinar, cuál es la sucesión del diseño y construcción de un sistema de combustión para caracterización térmica de desechos plásticos utilizados como combustible alternativo, esto como un prototipo para el laboratorio de mecánica de materiales de la Carrera de la Energía y Mecánica.

1.3 OBJETIVOS

1.3.1 GENERAL

Diseñar y construir un Sistema de Combustión que nos permita obtener la mayor eficiencia térmica a masa constante de diferentes tipos de desechos plásticos con el menor impacto ambiental, según parámetros establecidos por la ordenanza municipal del distrito metropolitano de Quito para la emisión de residuos contaminantes.

1.3.2 ESPECÍFICOS

- Analizar y optimizar el proceso de combustión de desechos plásticos desde el punto de vista energético y medioambiental, con el fin de utilizarlo como combustible alternativo.
- Determinar en forma experimental el poder calorífico de los desechos plásticos a ser usados en nuestro estudio, antes de realizar el análisis de la combustión.

- Determinar el poder calorífico y la eficiencia de combustión de muestra de residuos plásticos urbanos, los cuales serán comparados con datos existentes de combustibles convencionales.
- Desarrollar un modelo térmico de combustión que permita el mayor aprovechamiento del calor y las menores emisiones de sustancias contaminantes, tanto sólidas como gaseosas.
- Realizar un análisis de impacto ambiental utilizando el método conocido como Emisiones de Impacto Ambiental Simple (EIAs) conformado por nueve pasos, el cual nos permitirá identificar los reactantes productos de la combustión y las emisiones contaminantes al medio ambiente.
- Realizar un análisis de los componentes de los gases de combustión, los cuales serán comparados con los combustibles convencionales.

1.4 JUSTIFICACIÓN E IMPORTANCIA

Actualmente el Distrito Metropolitano de Quito genera 1800 toneladas de basura al día de las cuales el 8% corresponde a desechos plásticos es decir 144 t al día, de este apenas el 16% se recicla a través de medios químicos, mecánicos y energéticos.

El reciclaje se realiza sobre ciertos tipos especiales de plásticos, aquéllos que les interesan a las empresas que producen plástico; el resto va a parar al botadero. Para este tipo de desechos plásticos que no se los puede reciclar, la recuperación energética es la única alternativa de reutilización.

En vista de que la información sobre el poder calorífico es vital para el análisis del proceso de combustión, emisión de gases y cenizas, se va a medir el poder

calorífico de muestras de desechos plásticos, para lo cual se procederá a realizar el diseño y construcción de una cámara de combustión.

Como se puede ver con el desarrollo del proyecto se podría tener una alternativa de recuperación energética de los residuos sólidos urbanos plásticos a gran escala. Evaluando las propiedades energéticas de dichos residuos, y con esto sugerir nuevas formas de obtención de energía y a la vez representaciones alternativas de reciclaje de desechos plásticos con lo que es único en su clase.

Con el desarrollo de este proyecto se busca determinar la mayor eficiencia térmica con el menor impacto ambiental, para lo cual será necesario realizar un balance de masa y energía, debido a que se va a desarrollar un prototipo a pequeña escala no se tomara en cuenta la eficiencia económica.

1.5 ALCANCE

Diseñar y construir un sistema de combustión para caracterización térmica de desechos plásticos utilizados como combustible alternativo, desarrollando un banco de pruebas y de datos para el Laboratorio de Mecánica de Materiales del DECEM, de la ESCUELA POLITÉCNICA DEL EJÉRCITO.

CAPÍTULO 2

MARCO DE REFERENCIA

2.1 RESIDUOS PLASTICOS

Es el conjunto de operaciones realizadas desde su generación hasta su destino final más adecuado de acuerdo con sus características de volumen procedencia, costes, posibilidades de recuperación, comercialización y directrices administrativas tanto ambientales como sanitarias.

Los principales tipos de residuos son: sólidos, líquidos y gaseosos, los mismos que se tienen varias formas de producción como: domiciliarios, hospitalarios, industriales entre otros.

2.1.1 ORIGEN

El uso de los plásticos ha sufrido un gran incremento en las últimas décadas, y continúa su creciente expansión. En muchas de sus aplicaciones, los plásticos han reemplazado a otros materiales tradicionales (metales, cerámicas, maderas), pero su desarrollo también se centra en aplicaciones nuevas (microelectrónica, biomedicina, comunicaciones). Se estima que en la actualidad aproximadamente un 4% del petróleo es transformado en plásticos.

En un periodo de diez años se calcula que los envases y embalajes de plástico han reducido su peso unitario un 28%, gracias a los avances tecnológicos. Sin los envases y embalajes de plástico, el peso de los embalajes se multiplicaría

por cuatro, los costos de producción y el consumo de energía serían el doble, y el volumen de residuos se incrementaría un 150%.

El incremento en el consumo de plásticos ha supuesto un incremento de los residuos generados que deben ser minimizados y valorizados.

2.1.2 CONCEPTO Y CARACTERÍSTICAS

Los desechos plásticos en la actualidad son generados a nivel mundial ya que la mayoría de objetos o cosas están construidas de plástico y una vez que terminan su función se convierten en desechos, los mismos que son un gran problema ambiental por el volumen que estos ocupan.

Las características de estos desechos plásticos no se pierden por lo que las moléculas lineales y ramificadas son termoplásticos (se ablandan con el calor), mientras que las entrecruzadas son termorígidos (se endurecen con el calor).

2.1.3 CLASIFICACIÓN DE LOS RESIDUOS PLÁSTICOS

Los desechos se clasifican por colores y para nuestro estudio nos centraremos en el color azul a continuación la gama de colores de los diferentes residuos sólidos urbanos.

Tabla 2.11 Clasificación de los desechos

COLOR	RESIDUO
Gris	Papel y Cartón
Azul	Plásticos
Negra	Material orgánico
Roja	Residuos peligrosos
Verde	Material no recuperable

Fuente: EMASEO

Esta clasificación de residuos es aceptada para su codificación avalada por SPI (Society of the Plastics Industry), reflejada en la siguiente tabla.

Esta codificación sólo separa realmente 6 materiales, que se corresponden con los 6 primeros códigos o números, estando el séptimo reservado para el resto de materiales o para mezclas y multicapas.

Tabla 2.2 Materiales y Códigos

MATERIAL	CODIGO	Código SPI
Polietileno tereftalato	PET	1
Polietileno de alta densidad	HDPE (PE-AD)	2
Policloruro de vinilo	PVC	3
Polietileno de baja densidad	LDPE (PE-BD)	4
Polipropileno	PP	5
Poliestireno	PS	6
OTROS		7

Fuente: Plásticos y Medio Ambiente

El PET se emplea en la fabricación de envases para alimentos o bebidas. En su síntesis se emplean sustancias tóxicas y metales pesados como catalizadores, no obstante el PET no daña la salud, ni el ambiente, por ello se recicla, además su incineración genera dióxido de carbono y vapor de agua.

Las poliolefinas: HDPE, LDPE y PP son versátiles y baratas, se emplean para reemplazar el mayor número de aplicaciones del PVC. Se fabrican con etileno y propileno, altamente inflamables y explosivos, pero con un mínimo impacto ambiental.

El PVC es el único plástico que contiene cloro, contaminante ambiental durante su ciclo útil y de disposición final. Su reciclaje es difícil y su incineración produce dioxinas cancerígenas.

La síntesis de PS se realiza con compuestos químicos cancerígenos: benceno, estireno y butadieno, su incineración libera estireno y otros hidrocarburos tóxicos. Técnicamente el PS, se recicla pero el porcentaje de recuperación es bajo.

Otros plásticos como: poliuretano (PU), acrilonitrilo-butadienestireno (ABS) y policarbonato (PC).

El PU se usa como aislante, su síntesis consume 11% de la producción mundial de cloro y libera subproductos tóxicos: fosgeno, isocianatos, tolueno, diaminas y clorofluorocarbonos (CFC's), es altamente tóxico³⁰. Enterrar espumas de PU produce lixiviados.

El ABS es un plástico duro usado en tuberías, defensas de automóviles y juguetes, su síntesis requiere butadieno, estireno y acrilonitrilo, es muy tóxico. Debido a su compleja composición química su reciclaje es difícil.

2.1.4 VOLUMEN DE PRODUCCIÓN

Actualmente el Distrito Metropolitano de Quito genera 1800 t de basura al día de las cuales el 8% corresponde a desechos plásticos es decir 144 t al día, de este apenas el 16% se recicla a través de medios químicos, mecánicos y energéticos.

Los valores obtenidos por el estudio "Caracterización de los Residuos Sólidos en el Distrito Metropolitano", realizado por Termopichincha¹ son:

¹ Termopichincha "Base de datos"

Tabla 2.3 Caracterización de los residuos sólidos en el distrito metropolitano

Lugar	Muestra	Peso de Plásticos (kg)
La Forestal	1	18,4
	2	17,4
	3	18,6
	4	21,6
	5	13,2
	Promedio	17,8
Zambiza	1	19,7
	2	20,6
	3	16,8
	4	22,8
	5	9,2
	6	8,4
	7	19,5
	8	19,8
	9	15
	Promedio	16,9

Fuente: Estudios Termopichincha

Datos de Peso de plásticos para las estaciones de transferencia Zambiza y Forestal.

Dato del volumen de cada componente, teniendo el dato del peso total y el peso de cada componente:

Tabla 2.4 Volumen de desechos plásticos generados

MATERIAL	%	IBARRA (kg/día)	QUITO (kg/día)
PET	0,24	742,10	11685,77
PP	0,12	371,00	5842,89
PEHD (fundas)	0,24	742,10	11685,77
PEHD (Soplados)	0,12	371,00	5842,89
PELD	0,12	371,00	5842,89
PS	0,06	185,50	2921,44
PVC	0,04	123,70	1947,63
Otros	0,06	185,50	2921,44
TOTAL	1,00	3091,9	48690,72

Fuente: Recolección de basura Ibarra

La proyección de los desechos plásticos fue realizada con las poblaciones actuales de cada una de las ciudades (Ibarra 134791 habitante., Quito 2122594 habitantes).

Nota: se estima que la cantidad de desechos plásticos producidos es directamente proporcional al número de habitantes.

2.1.5 TRATAMIENTO DE SEPARACIÓN

Reducción de Tamaño: Proceso unitario utilizado para la reducción de los RSU no seleccionados y de los materiales recuperados. Esto se hace por medio de: Los Trituradores cortantes, Molinos de martillos, aplicaciones típicas incluyen: Cribas trituradoras.

Separación por Tamaño: Proceso unitario por el que se separan los materiales según sus características de forma y tamaño mediante: Cribas de discos, Cribas vibratorias:

Separación por densidad: Procesos unitarios por los clasificadores neumáticos, en donde se separan los materiales según su densidad: Flotación, Separación por inercia.

Separación por campo eléctrico y magnético: Procesos unitarios en que los materiales se separan según su carga electrostática y su separación de plásticos y papel, permeabilidad magnética: materiales ferrosos y no ferrosos.

2.1.6 APROVECHAMIENTO DE LOS RESIDUOS PLASTICOS

Valorización: El aprovechamiento de residuos o de los recursos contenidos en los mismos mediante la recuperación, la regeneración, la reutilización y el reciclado, sin poner en peligro la salud humana y sin utilizar métodos que puedan causar perjuicio al medio ambiente

Recuperación: Todo procedimiento que permita el aprovechamiento de los materiales o sustancias contenidas en los residuos.

Regeneración: Procedimiento al que es sometido un producto usado o desgastado a los efectos de devolverle las cualidades originales que permitan su reutilización.

Reutilización: El empleo de un material regenerado para el mismo fin para el que fue diseñado originalmente.

Reciclado: La transformación de los residuos, dentro de un proceso de producción, para su fin inicial o para otros fines, incluido el compostaje y la biometanización, pero no la incineración con recuperación de energía.

Eliminación: Todo procedimiento dirigido, bien al vertido controlado de los residuos o bien a su destrucción, total o parcial, realizado sin poner en peligro la salud humana y sin utilizar métodos que puedan causar perjuicio al medio ambiente.

Tabla 2.5 Aplicaciones de los distintos polímeros

TERMOPLASTICOS	APLICACIONES	USO DESPUES DEL RECICLADO
Polietileno tereftalato	Botellas, envasado de productos alimenticios, refuerzos de neumáticos	Textiles para bolsas, lonas, velas náuticas, cuerdas, hilos.
Polietileno alta densidad	Botellas para productos alimenticios, juguetes, bolsas, láminas y tuberías.	Bolsas industriales, botellas, contenedores, tubos.
Polietileno de baja densidad	Adhesivo, bolsas, revestimiento de	Bolsas para residuos, e

	cubos, recubrimiento contenedores flexibles, tuberías para riego.	industriales, tubos, contenedores, film uso agrícola, vallado.
--	---	--

Fuente: Reciclaje de los residuos sólidos plásticos

Continuación: **Tabla 2.5** Aplicaciones de los distintos polímeros

TERMOPLASTICOS	APLICACIONES	USO DESPUES DEL RECICLADO
Policloruro de vinilo	Marcos de ventanas, tuberías rígidas, revestimientos para suelos, botellas, cables aislantes, tarjetas de crédito, productos de uso sanitario.	Muebles de jardín, tuberías, vallas, contenedoras
Polipropileno	Envases para productos alimenticios, cajas, tapones, piezas de automóviles, alfombra y componentes electricos	Cajas múltiples para transporte de envases, sillas, textiles
Poliestireno	Botellas, vasos de yogures, recubrimientos	Aislamiento termico, cubos de basura, accesorios de oficina

2.1.7 CONSIDERACIONES AMBIENTALES Y APROVECHAMIENTO DE LOS POLÍMEROS

La producción y consumo masivos de plásticos en la sociedad moderna hace que se generen gran cantidad de residuos plásticos. Éstos no se disuelven en el agua ni se pudren, lo cual supone una ventaja porque no liberan productos nocivos, pero también una desventaja, ya que se acumulan sin desaparecer.

La mayoría de los residuos proceden de los Residuos Sólidos Urbanos (RSU), y de estos, la mayoría son envases y embalajes.

A continuación se dan ejemplos sobre cómo se cumple la regla de las 3R con los plásticos.

- Reducción
- Reutilización
- Reciclaje

REDUCCIÓN

Consiste en utilizar menos cantidad de plástico para dar las mismas prestaciones. He aquí dos formas de actuación según este aspecto:

Reducir hasta un 50% los espesores de los envases y embalajes.

Reducción de pesos: supone transportar más producto con el mismo combustible.

REUTILIZACIÓN

Gracias a alguna de sus propiedades (son lavables, esterilizables, etc.) pueden volver a ser utilizados; por ejemplo: cajas, pallets, bidones. En casa las bolsas del supermercado pueden volver a utilizarse, botellas, etc.

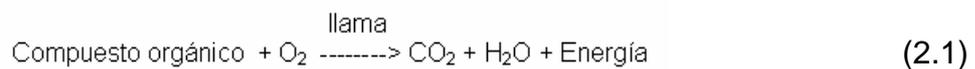
RECICLAJE

Es reciclar todo el material que está considerado como desecho plástico como materia prima para volver a empezar el ciclo.

2.2 COMBUSTIÓN

La combustión es una reacción química en la cual los elementos del combustible se oxidan en presencia de oxígeno, en este caso en los residuos sólidos, son carbono e hidrógeno, también están presentes, en menor grado azufre y nitrógeno.

La combustión es una reacción de oxidación rápida que tiene lugar a altas temperaturas y que convierte a los compuestos orgánicos en bióxido de carbono, agua y energía en forma de calor y luz. El calor que se desprende cuando un mol de un compuesto orgánico se quema a altas temperaturas en presencia de oxígeno, se le llama calor de combustión (el valor del calor de combustión es igual al valor del cambio en entalpía de la reacción exotérmica, pero sin el signo negativo).



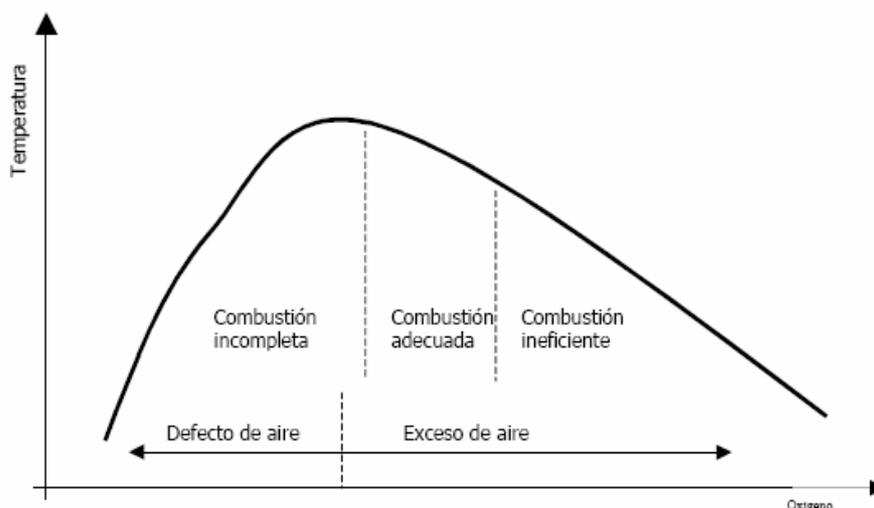
Los desechos plásticos son materiales que contienen como ingrediente esencial una sustancia orgánica de alto peso molecular, normalmente en forma de polímero. Son poco resistentes al calor y frente a él se comportan según este orden:

- Reblandecen
- Deforman
- Descomponen con o sin combustión

El grado de combustibilidad depende de la estructura (C-H o C-H-O) y de sus aditivos.

Durante su combustión:

- Generan gases tóxicos
- Gran volumen de humos densos
- Funden y escurren



Curva de combustión.

Figura 2.1 Curva de combustión

2.2.1 FUNDAMENTOS DE LA COMBUSTIÓN

Las reacciones de la combustión dependen del oxígeno, el tiempo, la temperatura y turbulencia.

Es fundamental señalar que debe haber disponible un exceso de oxígeno para impulsar la reacción hasta completarla en un tiempo corto, con mayor frecuencia el oxígeno se suministra impulsando aire hacia la cámara de combustión, se proporciona más de 100% de exceso de aire para asegurar que haya lo suficiente, debe darse el tiempo necesario para que las reacciones de combustión lleguen a su fin.

Es necesario superar cierta temperatura mínima para iniciar la reacción de combustión, es decir para encender los residuos plásticos, considerando que las temperaturas altas producen mayores cantidades de emisiones de óxido de nitrógeno, por lo que hay un balance entre destruir el residuo sólido y formar contaminantes del aire.

Es de gran importancia mezclar los gases producidos en la combustión con el aire de la misma para que la reacción se complete.

La evolución de la combustión de los residuos sólidos ha conducido a mayores temperaturas, tanto para destruir los compuestos tóxicos como para aumentar la oportunidad de usar los residuos como fuente de energía si se produce vapor.

Escogiendo un exceso de aire apropiado, todos los combustibles pueden ser quemados por completo.

La falta de aire se manifiesta por la presencia del CO.

Con este se presentan también H₂ y, en pequeñas cantidades, CH₄ en los gases desprendidos.

El análisis corriente de los gases desprendidos CO₂ CO y O₂ no es suficiente para la zona de la falta de aire. Cuando esta falta es muy grande se separa C en forma de hollín. (formación de humo).

2.2.2 ZONA DE FLAMA

En esta zona de flama los gases calientes volatilizados se mezclan con oxígeno, esta reacción es muy rápida y se termina en 1 o 2 segundos si hay bastante aire y turbulencia.

2.2.3 CALOR Y TEMPERATURA

CALOR

El calor es posible definirlo como energía transferida entre dos cuerpos o sistemas, se puede asociar al movimiento de los átomos, moléculas y otras partículas que forman la materia. El calor puede ser generado por reacciones químicas como en la combustión, reacciones nucleares como en la fusión nuclear de los átomos de hidrógeno que tienen lugar en el interior del sol, disipación electromagnética como en los hornos de microondas o por disipación mecánica fricción. Su concepto está ligado al Principio Cero de la Termodinámica, según el cual dos cuerpos en contacto intercambian energía hasta que su temperatura se equilibre.

El calor puede ser transferido entre objetos por diferentes mecanismos, entre los que cabe reseñar la radiación, la conducción y la convección, aunque en la mayoría de los procesos reales todos los mecanismos anteriores se encuentran presentes en mayor o menor grado.

TEMPERATURA

Si esta pasa de un valor determinado, temperatura de inflamación, el fenómeno que antes se desarrollaba con lentitud extraordinaria pero sensible, se convierte en otra que se convierte rápidamente, que es la combustión.

Una combustión se inicia por una elevación local de temperatura, inflamación. Para asegurar la propagación es necesario que el calor desarrollado por la mezcla combustible aire sea suficiente para calentar las partes de mezcla inmediatamente hasta la temperatura de inflamación.

En este fenómeno la velocidad de transformación no debe nunca quedar por debajo de un cierto valor para que las cantidades de calor desarrolladas en los tiempos respectivos sean suficientes para cubrir las pérdidas.

Además la composición de la mezcla, combustible-aire (coeficiente de exceso de aire) debe asegurar el desarrollo de las cantidades de calor necesarias en al unidad de volumen (poder calorífico de la muestra) tanto por lo que se refiere a combustible de que se trate como también en la participación del oxígeno en el fenómeno.

Tabla comparativa con los calores específicos de combustión de diversos materiales que pueden ser empleados como combustibles en procesos térmicos, donde sea necesario liberar energía en forma de calor.

Tabla 2.6 Poder calórico de los materiales

Poder Calórico	kJ/Kg	kcal/kg
Poliestireno	46.000	10994,3
Polietileno	46.000	10994,3
Polipropileno	44.000	10516,3
PVC	18.900	4517,2

Gas natural	48.000	11472,3
Fuel-Oil	44.000	10516,3
Carbón	29.000	6931,2
Lignito	20.000	4780,1
Cuero	18.900	4517,2
Papel	16.800	4015,3
Madera	16.000	3824,1
Grasa	7.800	1864,2
Basura domestica	8.000	1912,0

Fuente: Termopichincha

2.2.4 ENERGIA

Si queremos aprovechar toda la energía de un combustible es necesario que la combustión se realice en las mejores condiciones posibles. Hablaremos de la corrección en la realización de la combustión. Incluimos en la combustión la caldera, que es el lugar donde se produce la combustión.

Para aprovechar bien la energía que se desprende en la reacción de oxidación de los elementos combustibles es necesario que se realice en las mejores condiciones posibles. Para ellos deberemos hacer que todo el carbono se transforme en CO₂, que no haya inquemados sólidos o gaseosos, que no haya pérdidas de calor por la formación de inquemados, que el aire sea bien empleado en todo el proceso de combustión. Cumpliendo todo estos requisitos tendríamos la combustión completa. La caldera en este proceso es fundamental para la buena marcha del mismo; en general, todos los equipos empleados en la combustión van a ser importantes para la buena marcha de la misma.

El término energía es la capacidad para obrar, transformar o poner en movimiento. En física, se define como la capacidad para realizar un trabajo.

2.2.5 PROCESOS EN QUE SE DIVIDE LA APARICIÓN Y EXTINCIÓN DEL FUEGO EN UN POLÍMERO.

La inflamabilidad de un polímero es una interacción de la pirolisis, ignición, combustión, propagación de la llama, y los procesos de la extinción. Los procesos son provocados por la exposición de los polímeros al calor.

La pirólisis es un proceso endotérmico en el que el polímero se ablanda, se derrite, se decolore, se agrieta, se descompone, vaporiza, etc. y aparecen los productos de la pirolisis. El límite del proceso de la pirolisis en la superficie del polímero se define como el frente de la pirolisis. El proceso de pirolisis también se define como la gasificación del polímero.

La ignición es un proceso en el cual el polímero gasificado se mezcla con aire, forma una mezcla combustible y la mezcla enciende por sí misma (auto-ignición) o es encendida por una llama, un objeto caliente, una chispa eléctrica, etc.

La combustión es un proceso en el cual la superficie sólida del polímero o del polímero gasificado reacciona con el oxígeno del aire con una llama visible (combustión llameante) o sin una llama visible (combustión sin llama).

La propagación de la llama es un proceso en el cual el frente de la pirolisis acompañado por llama o sin ella, se extiende más allá del punto de origen.

La extinción de la llama es un proceso donde la pirolisis, la ignición, la combustión, y los procesos de la propagación del fuego son interrumpidos aplicando agentes tales como gases del agua, inertes o químicamente activos, líquidos o sólidos, o reducción de la concentración de oxígeno.

En los procesos de pirolisis, ignición, combustión y propagación de llama se genera calor y productos de combustión que puede resultar un peligro para la salud y causar daños materiales. El peligro debido al lanzamiento del calor (temperatura alta y radiación) se define como peligro térmico El peligro debido a la liberación de calor (alta temperatura y radiación), El peligro debido a la liberación de productos de combustión se define como peligro no térmico.

Calor de gasificación y pérdida de radiación de superficie

El caudal de gasificación constante se expresa del siguiente modo:

$$\dot{m}_f'' = \frac{\dot{q}_e'' - \dot{q}_{rr}''}{\Delta H_g} \quad (2.2)$$

Donde:

\dot{m}_f'' Es el caudal de gasificación del polímero o la pérdida de masa en pirolisis (Kg. /m²-s).

\dot{q}_e'' Es el flujo de calor externo (Kw. /m²).

\dot{q}_{rr}'' Es la tasa de pérdida de radiación de superficie (k.o. /m²).

ΔH_g Es el calor de gasificación (MJ/Kg.).

Se realizan los experimentos de pirolisis en un ambiente inerte donde el polímero se calienta y se toman varias medidas. Las técnicas más empleadas habitualmente son:

- (1) Calorimetría de exploración diferenciada (differential scanning calorimetry)
- (2) Técnica de pirolisis en masa (mass pyrolysis technique).

En la calorimetría de exploración diferenciada, las medidas se toman para el calor específico, calor de fusión, de vaporización, de descomposición. Se utiliza la ecuación siguiente para calcular el calor de gasificación, por ejemplo para un polímero que funde.

$$\Delta H_g = \int_{T_a}^{T_m} C_{p,a} dT + \Delta H_m + \int_{T_m}^{T_v} C_{p,l} dT + \Delta H_v \quad (2.3)$$

Donde:

ΔH_m y ΔH_v son los calores de fusión y vaporización respectivamente en (MJ/kg)

T_m y T_v en K. respectivas temperaturas de fusión y vaporización.

$C_{p,a}$ y $C_{p,l}$ son los calores específicos del polímero en los estados sólido y líquido respectivamente en MJ/Kg.

T_a es la temperatura ambiente en K.

Para los polímeros que no funden, sino subliman, se descomponen o carbonizan la ecuación (2.3) se modifica adecuadamente.

En la técnica de pirolisis en masa, la pérdida de masa se mide en función de flujo externo de calor en presencia de un flujo de nitrógeno o aire mezclado con un 10% de oxígeno en volumen, y los datos se introducen en la Ecuación (2.3).

El calor de gasificación se determina a partir de un análisis de la regresión lineal de los datos. El valor externo de flujo de calor para el cual no haya pérdida de masa medible durante 15 minutos de exposición a dicho flujo, recibe el nombre de (pérdida de reradiación de superficie) "surface re-radiation loss".

La interrupción de la pirolisis mediante técnicas de protección contra el fuego pasivas o activas evitaría que los fuegos se propagaran más allá de la zona de ignición reduciendo los riesgos de incendio. Las técnicas pasivas de protección contra el fuego implican modificaciones en el polímero para incrementar el valor de pérdida de reradiación de superficie y del calor de gasificación.

Flujo de calor de llama, calor de gasificación

La relación de estado estacionario que indica la tasa de gasificación o de pérdida de masa es similar a la relación para el caso de la pirolisis (2.2) exceptuando un término adicional correspondiente al flujo de calor de llama:

$$\dot{m}_f'' = \frac{\dot{q}_e'' + \dot{q}_f'' - \dot{q}_{rr}''}{\Delta H_g} \quad (2.4)$$

Donde:

\dot{m}_f'' Es la tasa de pérdida de masa en combustión (kg/m²-s)

\dot{q}_f'' Es el flujo de calor de llama recuperado.

Se utilizan los valores de calor de gasificación y de la pérdida de radiación de la superficie determinados en pirolisis. El flujo de calor de llama se determina a partir de la técnica de escaneado de la radiación de llama (flame radiation scaling technique). Esta técnica utiliza el conocimiento de que en fuegos pequeños, el flujo de calor de radiación de llama aumenta con el incremento de la fracción másica de oxígeno (Y_o) Para Y_o ≥ 0.30 el flujo de calor de radiación de llama un límite asintótico similar al límite de fuegos de grandes dimensiones al aire libre.

Una disminución en el flujo de calor de llama y un incremento en el calor de gasificación y en la pérdida de calor de superficie mediante varias técnicas pasivas de protección contra el fuego podría evitar que un fuego crezca y se propague más allá de la zona de ignición y los riesgos térmicos se verían reducidos o eliminados.

Índice de oxígeno limitante e índice de propagación del fuego

La propagación de llama es un proceso en que el frente de pirolisis se desplaza más allá de la zona de ignición sobre la superficie del polímero acompañado por el proceso sostenido de combustión. La tasa de movimiento del frente de pirolisis, acompañado por el proceso de combustión sostenido, se define como la tasa de propagación de llama. Para un proceso sostenido de propagación de llama, la llama o fuentes de calor externo necesitan transferir flujo de calor delante del frente de pirolisis para satisfacer los valores de flujo térmico crítico (CHF) y de tiempo de respuesta térmico (TRP). El frente de flama puede propagarse hacia arriba, hacia abajo o en direcciones horizontales.

Se han desarrollado métodos de Test. Acompañados de tres aparatos que permiten determinar las propiedades del fuego asociadas con las propagación de llama:

- ASTM D-2863 método de Test. Del índice de oxígeno.
- Método ASTM E 1321-90 ignición lateral y propagación de llama (Lateral ignition and flame spread Tes., LIFT) , método de Tes. Para propagación horizontal y lateral de la llama.
- Índice de propagación del fuego (FIRE Propagation Index, FPI), método de Tes. para propagación vertical de llama.

En los métodos de Tes. LIFT y FPI, se utiliza la siguiente definición de la propagación de la llama para polímeros térmicamente gruesos

$$\mu = \frac{funct(\dot{q}_f)}{[\Delta T_{ig}^2 k \rho c_p]} \quad (2.5)$$

Donde:

μ Es la velocidad de propagación de llama en m/s.

\dot{q}_f Es una función que representa el flujo de calor de llama transferido a la superficie del polímero que se encuentra delante del frente de pirolisis (kW/m²).

ρ Es la densidad del polímero,

Cp Es el calor específico del polímero (MJ/kg-K).

k Es la conductividad térmica del polímero (kW/m-K)

ΔT_{ig} Es la temperatura de ignición por encima de la temperatura ambiente (K).

2.3 PROCESOS DE RECUPERACION DE LOS RESIDUOS PLASTICOS CON FINES ENERGETICOS

Desde el punto de vista técnico, las operaciones de valorización, se pueden agrupar en cinco grandes grupos: reciclado mecánico, reciclado químico, valorización energética, compostaje y biometanización. Aunque si hablamos de plásticos tradicionales y sus residuos, los términos compostaje y biometanización no son de aplicación directa, puesto que lo son para residuos biodegradables.

Reciclado Mecánico

El reciclado mecánico es un proceso físico en el que a través de una serie de operaciones y en presencia de presión y temperatura, el plástico es recuperado para su posterior transformación.

El reciclado mecánico de los residuos plásticos es conocido desde que se transformaron los primeros materiales termoplásticos, bajo la necesidad de utilizar, con el mayor provecho posible, estas materias primas.

A pesar de esta antigüedad, el reciclado mecánico ha ido evolucionando a lo largo del tiempo, existiendo en la actualidad todo un subsector dedicado al mismo, así como un gran número de empresas dedicadas a la fabricación de equipos principales y auxiliares para el mismo.

La validez o no del producto resultante, depende mucho de la separación previa de los distintos materiales plásticos, de la ausencia de impurezas y en resumen de la limpieza de los mismos, por estos motivos es tan importante definir el proceso y los subprocesos adecuados en cada caso.

Cuando se habla de la separación previa de los distintos materiales hay que señalar que en la actualidad existen diferentes procesos de separación en distinto grado de desarrollo, como puede ser: métodos de flotación por diferencia de densidad, extracción con disolventes, procedimientos de humidificación selectiva, métodos espectroscópicos, etc.

Los residuos plásticos que se reciclan mecánicamente tienen principalmente dos orígenes: los propios procesos de fabricación (scrap) y el post-consumo (doméstico o industrial). El post-consumo doméstico normalmente pasa a través de plantas de selección.

EQUIPAMIENTO

Una planta de reciclado mecánico puede presentar el siguiente equipamiento:

- Equipo de triturado, lavado, secado y almacenado.
- Equipos de aglomeración y compactación para materiales de baja densidad o sensibles a la humedad.
- Equipos de extrusión compounding.
- Filtración de polímeros fundidos.
- Equipos de peletización: sistemas de corte.

Reciclado Químico

El reciclado químico, también denominado feedstock o reciclado terciario, desde un punto de vista general, consiste en la transformación de residuos de naturaleza polimérica en productos químicos de interés industrial, que pueden ser los monómeros de partida o mezclas de compuestos con posibles aplicaciones como combustibles o materias primas de la Industria Química.

En general, el reciclado químico da lugar a distintos productos en función de la naturaleza del residuo plástico, es decir, si se trata de un polímero de condensación o un polímero de adición. En el primer caso, se trata de despolimerización química o quimiólisis que convierte el residuo polimérico en los monómeros de partida. En el segundo caso se trata de una termólisis obteniendo materias primas básicas (gas de síntesis, hidrocarburos, etc.) o combustibles.

Se puede decir que el reciclado químico, que persigue rentabilizar el residuo plástico transformándolo en materia prima básica o combustibles, empieza a configurarse una alternativa real debido a la mejora de los procesos de separación y el desarrollo de nuevas tecnologías, encontrándose en la actualidad en una etapa experimental avanzada.

Es de suponer que en los próximos años pueda transformarse en una poderosa y moderna herramienta para tratar los residuos plásticos. El éxito dependerá del entendimiento que pueda establecerse entre todos los participantes de la cadena: petroquímicas, transformadores, grandes usuarios, consumidores y municipios, a los fines de asegurar la unidad de reciclado y que la materia prima llegue a una planta de tratamiento.

Clasificación de los procesos de reciclado químico

Tal como se ha indicado antes los procesos de reciclado químico de residuos poliméricos se pueden clasificar en dos grandes grupos, los basados en una quimiólisis o despolimerización química y los de termólisis.

Dentro de estos dos grandes grupos se engloban distintos procesos, tal como puede verse a continuación.

Quimiólisis o despolimerización química

En estos procesos se provoca la ruptura de las cadenas de los residuos poliméricos mediante la adición de un reactivo químico, dando lugar a los monómeros de partida o a oligómeros que se pueden volver a polimerizar dando lugar al producto polimérico original o a nuevos materiales poliméricos, cerrándose así el ciclo.

Por regla general, la quimiólisis o descomposición química, sólo es aplicable a polímeros de condensación (poliésteres, nylon&), los cuales tienen grupos funcionales unidos por enlaces débiles que son susceptibles de disociación por ataque con determinados agentes químicos, aunque existen excepciones.

Basándose en la quimiólisis encontramos principalmente los procesos de hidrólisis, alcoholisis (metanolisis&), glicólisis y otros menos comunes como la aminólisis.

En el caso de los polímeros de adición (PEAD, PEBD, PP, etc.), no es viable la degradación del residuo plástico a sus monómeros constituyentes con una selectividad aceptable por ninguno de los procesos existentes de reciclado químico (salvo notables excepciones como el craqueo térmico de poliestireno). En este caso, se persigue transformar el residuo plástico en materias primas químicas básicas (gas de síntesis, hidrocarburos, etc.) o combustibles.

Termólisis

En el caso de la termólisis el residuo polimérico es transformado por efecto de la temperatura en productos de alto valor en refinería, tales como naftas, hidrocarburos o gas de síntesis. Los procesos de termólisis se basan en la utilización de altas temperaturas para producir la ruptura del esqueleto carbonado de los residuos poliméricos.

Existen diferentes procesos termolíticos. Cuando el proceso de descomposición o ruptura se produce en ausencia de aire, se denomina pirólisis o craqueo térmico. Si se realiza en una atmósfera de hidrógeno gas se habla de hidrogenación o hidrocraqueo, pero si se lleva a cabo en presencia de una cantidad controlada de oxígeno, se denomina gasificación. En cada uno de los casos se obtienen diferentes productos, tal como se muestra en la Figura 2.2

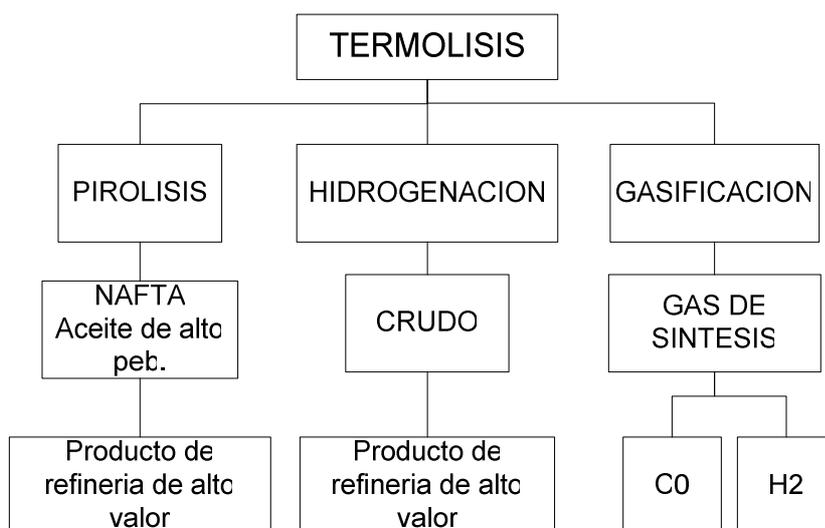


Figura 2.2 Principales tipos de reciclado químico por termólisis

El método de termólisis es necesario para la ruptura de las cadenas de los polímeros de adición como los vinílicos, acrílicos fluoroplásticos y poliolefinas. Algunas opciones de descomposición térmica tienen la ventaja de que ya se dispone parcialmente de infraestructuras adecuadas en las refinerías, con tecnologías contrastadas, por lo que es viable una incorporación directa de los residuos plásticos a las corrientes de dichas refinerías.

Valorización energética

Se denomina valorización energética a la incineración con recuperación de energía. La incineración consiste en la destrucción térmica de las sustancias (en este caso residuos) mediante su oxidación completa, aportándose oxígeno en cantidad mayor a la estequiométrica para la propia combustión.

La incineración con valorización energética es bastante habitual como tratamiento de residuos urbanos. En 1999 en Estados Unidos se generaron 230.000.000 toneladas de residuos sólidos urbanos, teniendo el 15% de éstos como destino la combustión, siendo casi en su totalidad con recuperación energética. En el año 2000 en Europa Occidental se generaron 193.000.000 toneladas de residuos sólidos urbanos, siendo 13.000.000 toneladas plásticos, de los que 4.000.000 toneladas de estos residuos plásticos tuvieron como destino la recuperación energética.

En el año 2000 en Japón se generaron 5.000.000 toneladas de residuos plásticos domiciliarios, de los que unas 2.100.000 toneladas tuvieron como destino final la recuperación energética.

En general en este tipo de procesos se consigue una reducción de peso en torno al 70% y en volumen entre el 80-90%.

La valorización energética o incineración con recuperación de energía se lleva a cabo en incineradoras que actúan como una central térmica. Es decir se quema el combustible, en este caso el plástico, en un horno de características apropiadas recuperando la energía que generará vapor de agua, que luego moverá una turbina y producirá energía eléctrica o bien mediante un intercambiador de calor y una caldera para por ejemplo producir calor para una población.

Normalmente se habla de que técnicamente es posible recuperar energía sólo si el calor, en forma de vapor o electricidad se suministra con regularidad, lo cual exige que el PCI (poder calorífico intrínseco) de los residuos a incinerar supere las 1.000 kcal/kg. Los residuos plásticos pueden ser utilizados como combustible debido a que en general presentan un alto poder calorífico. No todos los materiales, ni siquiera todos los plásticos tienen el mismo contenido energético, si no que éste disminuye cuando se van incluyendo heteroátomos. Este hecho hace que no todos los materiales sean apropiados para una valorización energética.

En la tabla 2.6 se muestra la capacidad energética de materiales típicos, entre los que se incluyen los termoplásticos más habituales.

Tabla 2.7 Contenido energético

MATERIAL	MJ/Kg.
Gas natural	48
Polipropileno	44
Polietileno	46
Crudo petróleo	42
Poliestireno	46
Poliamida	37
PET	23
Carbón	29
PMMA	25
PVC	18

Fuente: CEMAV.

Esta incineración produce por un lado emisiones y por otro lado residuos. Es necesario un control de los gases emitidos y una purificación de los mismos, así como un tratamiento/gestión adecuado de los residuos generados.

EQUIPAMIENTO

Las instalaciones de incineración con recuperación de energía constan, en general, de las siguientes partes:

- Instalaciones para la recepción del residuo y la carga de los hornos.
- Horno.
- Instalaciones de recuperación de calor.
- Instalaciones de tratamiento de los productos resultantes.

- Circuitos auxiliares.

Valorización de residuos termoestables

Debido a las características especiales, los materiales termoestables presentan una tipología especial desde el punto de vista de la valorización, puesto que estos materiales se encuentran entrecruzados y una vez que se han transformado no se pueden volver a fundir. Este hecho hace que los residuos de producción no sean reciclados por la propia empresa productora (como es el muchos casos la situación normal en termoplásticos) por lo que los residuos de termoestables son de forma relativa mayores que los de termoplásticos.

Así, por ejemplo, el residuo (recorte, piezas defectuosas, etc.) producido durante la fabricación de piezas de poliéster reforzado con fibra de vidrio (PRFV) es aproximadamente, aunque varía dependiendo de la tipología de la empresa, del 5 % de la producción. Dado el fuerte crecimiento del mercado de los PRFV, la cantidad, en valor absoluto, de estos residuos irá incrementándose.

De igual forma, los residuos de producción de poliuretanos superan en muchas ocasiones el 15-20 % en peso del total de la producción, principalmente en el caso de la producción de bloques de espuma, los cuales requieren un posterior corte. De igual forma existe una gran cantidad de residuos de poliuretano procedentes del uso final de estos productos.

Muchos de los materiales termoestables forman parte de materiales compuestos o composites, que son de una naturaleza especial porque se trata de una mezcla de diferentes materiales: polímeros, fibras de refuerzo y a menudo cargas.

Los estudios y desarrollos de las técnicas de valorización de materiales compuestos que han ido progresando durante los últimos años, se podrían dividir en dos categorías, tal y como se muestra a continuación:

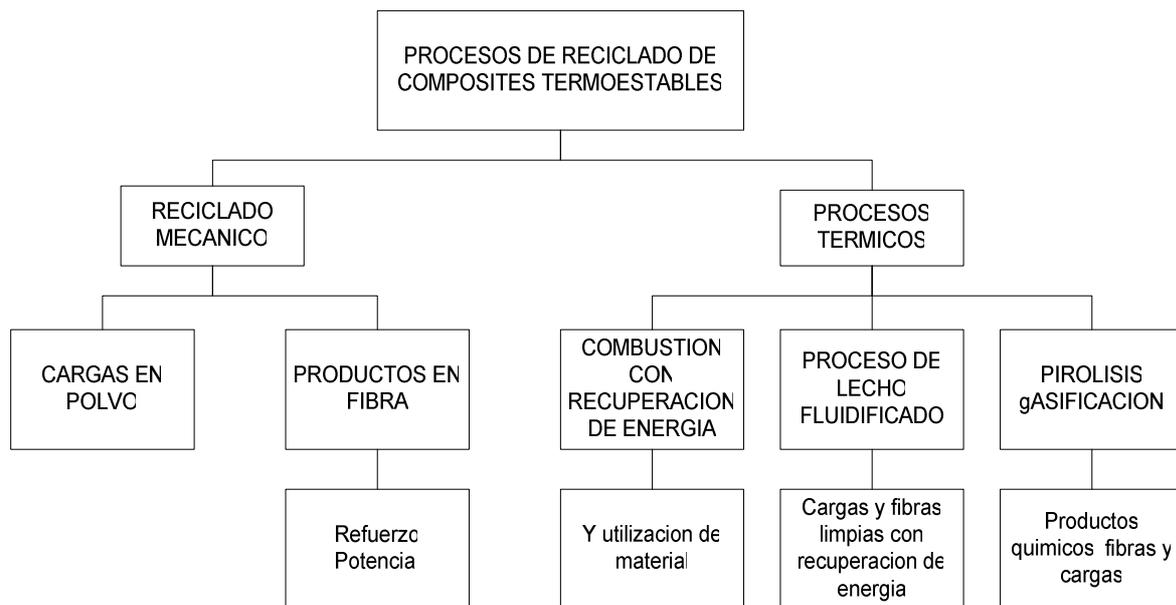


Figura 2.3 Procesos de valorización de compuestos termoestables

En la actualidad, el vertedero y la incineración son las opciones utilizadas por el 98% de las empresas productoras de residuos de plásticos reforzados, mientras que los tratamientos alternativos tales como su reutilización para cemento o asfalto o reciclado mecánico suponen aproximadamente el 2 % de las empresas productoras.

Valorización de residuos de poliuretanos

Como caso especial dentro de la valorización de residuos termoestables hay que destacar el de valorización de poliuretano. La valorización de estos residuos depende de una serie de aspectos que harán que la misma sea o no viable desde el punto de vista técnico y/o económico. Los factores principales que hay que tener en cuenta, son:

- Grado de compactación de los residuos de baja densidad, espumas de poliuretano voluminosas, teniendo en cuenta la energía y coste efectivo del transporte desde el punto de recogida al lugar donde tendrá lugar el reciclado. Suele ser necesaria una compactación previa al proceso de valorización.

- Reducción del tamaño de los artículos de poliuretano (somieres, asientos de coche, paneles de aislamiento, etc.), ajustándolos al tratamiento de valorización posterior.

Existen en la actualidad numerosas técnicas para la valorización de residuos de poliuretano con diferente grado de implantación.

RECICLADO MECANICO

Son las técnicas en general más sencillas. Comercialmente se han desarrollado diferentes procesos:

Pegado por presión de adhesivo. La calidad del producto final depende de varios factores como son:

- La clase y calidad de la espuma empleada.
- El tamaño de partícula y uniformidad de la espuma triturada.
- La densidad requerida del producto final.
- La calidad del ligante.
- La relación ligante/espuma.
- Triturado/pulverizado e incorporación en el proceso productivo.
- Triturado e incorporación en otros procesos.

RECICLADO QUIMICO

A continuación se describen algunos procesos de reciclado químico, implantados en mayor o menor medida:

Hidrólisis. Es un proceso en el que la espuma de poliuretano se hace reaccionar con agua bajo presión y elevada temperatura, provocando una ruptura de enlaces.

La hidrólisis produce los polioles poliéteres junto con las diaminas, (éstas últimas son los productos de hidrólisis de los diisocianatos de partida). Estos componentes son separados y purificados para permitir su reprocesado y uso en un nuevo proceso de polimerización.

Glicólisis. La espuma de poliuretano reacciona con dioles a elevada temperatura (200°C) con ruptura de los enlaces covalentes. Las moléculas de poliuretano de elevado peso molecular y con entrecruzamiento se rompen en otras de menor peso molecular y en estado líquido.

Aminólisis. La espuma de poliuretano se hace reaccionar con aminas como pueden ser dibutilamina, etanolamina, lactama, bajo presión y elevadas temperaturas para producir la ruptura de los enlaces químicos.

Valorización energética

En general la valorización energética en el caso del poliuretano consiste en quemar el residuo de forma controlada y obtener energía, mediante técnicas con alto rendimiento energético y bajo impacto medioambiental. El poliuretano suministra una energía por incineración (sobre los 25 kJ/kg) comparable al carbón pero inferior al fuel oil.

Hay que señalar que la presencia de nitrógeno en el poliuretano no aumenta la emisión de óxidos de nitrógeno si la incineración se realiza bajo condiciones controladas y se realiza una buena depuración de gases.

2.3.1 VENTAJAS E INCOVENIENTES EN LOS DIFERENTES PROCESOS CON FINES ENERGETICOS

En general no se puede hablar de que una técnica de valorización sea mejor que otra, sino que resultan complementarias.

Se puede hablar en líneas generales de las ventajas e inconvenientes que presentan los distintos tipos de valorización, aunque cada caso debe ser estudiado de forma particular.

VENTAJAS E INCONVENIENTES DEL RECICLADO MECÁNICO.

La ventaja del reciclado mecánico es clara: se obtienen productos de plástico utilizables en el mismo sector o en otro, siempre que sus características de calidad y la legislación vigente lo permita, con lo que se recupera una materia prima no renovable, evitando que ese residuo llegue a un vertedero.

Las dificultades con las que se va a encontrar esta técnica son:

Limpieza de los residuos. La presencia de suciedad o de materiales no adecuados puede perjudicar de forma importante la calidad del plástico reciclado e incluso, la maquinaria empleada. Dentro de esta suciedad se puede incluir la tinta, los adhesivos, el papel, otros plásticos, la tierra (muy importante en el caso de plásticos agrícolas), los restos orgánicos (plásticos agrícolas), la presencia de fertilizantes y fitosanitarios, los insertos metálicos, etc.

Mezcla de distintos plásticos. Esta es quizás la mayor dificultad en cuanto a problemas a la hora de reciclar, muchos de los polímeros son incompatibles en cuanto a su procesado conjunto, lo que hace necesaria una separación previa (que encarece notablemente el proceso de reciclado) o una compatibilización de la mezcla mediante la adición de ciertas sustancias (llamadas compatibilizadores o compatibilizantes). Además aún en el caso de la compatibilización, normalmente se obtiene un producto reciclado de menor calidad que los iniciales. En el caso de utilizar mezclas, normalmente el PET se intenta separar previamente, puesto que tiene una temperatura de fusión mucho mayor que el resto de los polímeros y da lugar a inclusiones en el producto final reciclado.

El reprocesado de los materiales, hace que estos puedan perder las características iniciales (sobre todo cuando se reprocesa varias veces), debido a distintos mecanismos:

- Rotura de las cadenas poliméricas, produciendo una reducción del peso molecular, lo que modifica la resistencia al choque y da lugar a una disminución de la viscosidad. Este es el caso del PP y del PS
- Entrecruzamiento de cadenas, produciendo un aumento de peso molecular y por tanto en un aumento de la viscosidad. Este es el caso del PET.
- Reacción de las cadenas laterales y degradación por pérdida de moléculas, formando instauraciones, compuestos cíclicos u otras moléculas. Este es el caso del PVC que presenta problemas de degradación por pérdida de HCl.

Presencia de sustancias peligrosas. El plástico durante su vida puede estar en contacto con sustancias peligrosas; bien porque las ha contenido (envases de productos químicos) o bien porque se ha añadido (fumigación en invernaderos). Esto puede deteriorar las características iniciales del plástico, además se debe hacer tratamientos especiales para disminuir la peligrosidad que puedan presentar; todo esto encarece el proceso. Hay que destacar de forma especial la presencia de aditivos ignífugos tipo halogenado.

Plásticos muy degradados. Hay algunas aplicaciones de los plásticos donde estos van a estar sometidos a los elementos externos (lluvia, cambios de temperatura, radiación solar), lo que va a provocar una degradación paulatina del plástico. Cuando se reprocese, el producto resultante tendrá menor calidad que el original.

Actualmente en España, el plástico reciclado no se puede utilizar en contacto con alimentos (porque está prohibido por ley)¹, lo que cierra alguna de las posibilidades, además de imposibilitar el cierre de ciclo en este sector, lo que es contraproducente, puesto que es lo idóneo desde el punto de vista logístico, ya que si se recicla para el mismo producto, cuanto más producto más residuo y por tanto más reciclado.

Además hay que señalar que en principio se obtendrá mayor calidad de plástico reciclado cuanto más se separe y limpie, lo que encarecerá de forma notable el proceso. Siempre que haya una disminución en las propiedades del plástico se tendrán que estudiar otras aplicaciones del mismo distintas que las originales.

El propio proceso de reciclado mecánico tendrá implicaciones medioambientales como la generación de vertidos de agua (puede ser crítico dependiendo de la procedencia del residuo) y los consumos del propio agua. Así mismo en algunos casos la cantidad de rechazos puede ser alta.

VENTAJAS E INCONVENIENTES DEL RECICLADO QUÍMICO.

Las ventajas principales son:

El reciclado químico no presenta prohibiciones en cuanto a su uso para envases en contacto con alimentos.

En la termólisis no se requiere una separación por tipo de polímero, pudiéndose aplicar a residuos plásticos mixtos, con lo que disminuye los costes de recolección y clasificación.

En la quimiólisis se obtienen productos de alta calidad, puesto que se vuelve a sintetizar los productos.

Es de aplicación tanto a termoplásticos como a termoestables.

Es de aplicación cuando el residuo está muy contaminado.

En termólisis el consumo de energía es baja.

En termólisis se puede utilizar materiales de partida que no pueden ser reciclados eficientemente por otros métodos, por ejemplo, residuos triturados de automoción, desechos electrónicos que contengan retardantes a la llama y

metales. El HCl (ácido clorhídrico) obtenido como subproducto de este proceso puede ser recuperado y utilizado como material de partida.

Los principales inconvenientes son:

Son procesos caros, tanto por la infraestructura como por el alto consumo energético. En la quimiólisis es mayor, puesto que se requiere una separación previa y limpieza de los plásticos.

En algunos casos siguen a nivel de estudio y de experiencias piloto, sobretodo en el caso de la quimiólisis.

Se trata, por regla general, de procesos lentos. Por ello para reducir los tiempos de hidrólisis y conseguir que sean razonables en algunos casos se han de utilizar condiciones más drásticas en lo que se refiere a temperaturas y presiones, que también encarece el proceso.

En la quimiólisis se dan subproductos de escaso valor que hay que eliminar, lo que implica un mayor coste.

Aunque en los procesos de termólisis se puedan usar plásticos mezclados, se debe tener en cuenta la composición, puesto que ciertos plásticos interactúan con otros. Este es el caso del PVC en presencia de PET o PC, donde es necesaria la utilización de la deshalogenación.

Señalar además que los productos obtenidos por termólisis no presentan restricciones en sus aplicaciones mientras que en algunos casos los obtenidos por otros tipos de reciclados químicos necesitan ser integrados con otros procesos como hidrogenaciones o plantas de oxidación.

VENTAJAS E INCONVENIENTES DE LA INCINERACIÓN CON RECUPERACIÓN DE ENERGÍA.

En general se puede hablar de que la valorización energética es posible en el caso de los materiales plásticos porque estos poseen un PCI elevado.

La ventaja principal de esta técnica es la recuperación energética de residuos, sin necesidad, en principio, de una separación de materiales. Sin embargo esto no es del todo cierto, pues la presencia de algunos elementos hace que esta técnica de valorización sea crítica.

Así pues presenta los siguientes inconvenientes:

Los residuos de PVC aportan entre el 38 y el 66% del contenido en cloro en las cadenas de residuos que se incineran. Las otras fuentes principales de cloro son las materias putrescibles (aproximadamente el 17%) y el papel (aproximadamente el 10%).

Puede estimarse que en promedio, en torno al 50% de cloro en las incineradoras se debe a la presencia de PVC.

Al ser incinerado el PVC se genera ácido clorhídrico que debe ser neutralizado (Normalmente mediante inyección de cal, mediante proceso seco, semiseco, semihúmedo-húmedo y húmedo), salvo si se emplea una tecnología de recuperación de HCl (ácido clorhídrico).

Los ignífugos halogenados durante la incineración pueden producir contaminantes tipo dioxinas, que deben ser controladas y minimizadas si es necesario

La presencia de metales pesados tipo plomo, habitual en algunos sectores como el eléctrico-electrónico, presentes en las escorias y cenizas en la incineración. Estos metales son cada vez menos frecuentes debido a las nuevas legislaciones ambientales.

La valorización energética está especialmente indicada para residuos que presentan deterioro o suciedad como es el caso de una gran parte de residuos plásticos procedentes de la agricultura o de residuos sólidos urbanos.

La valorización energética es un tipo de valorización térmica, al igual que la pirólisis y la gasificación (que se incluyen como reciclado químico). Si se comparan estos procesos se pueden encontrar dos niveles:

Nivel a: Sigue el ciclo de Rankin. Se corresponde con la incineración.

Nivel b: Valoriza el gas en un motor de cogeneración, previo lavado. Se corresponde con a pirólisis y la gasificación.

En la tabla 2.8 se compara el rendimiento de los distintos procesos de valorización térmica.

Tabla 2.8 Rendimiento de procesos de valorización térmica

Proceso	Rendimiento total (%)
Incineración	20,0
Gasificación	24,9
Pirólisis	11,8

Fuente: Residuos.

En la tabla anterior se observa que a igualdad de condiciones y propiedades de los residuos, el rendimiento más elevado se obtiene mediante gasificación; sin embargo, señalar, que la gasificación necesita un pretratamiento, que encarece el proceso, siendo las etapas de tratamiento y lavado de gases muy críticas.

2.3.2 POSIBLES APLICACIONES DE LA RECUPERACION DE LOS RESIDUOS PLASTICOS COMO COMBUSTIBLE ALTERNATIVO.

Dentro de las posibilidades que tenemos para usar el potencial energético generado en la cámara de combustión por los desechos plásticos usados como combustible alternativo tenemos:

- Secado de granos
- Generación de vapor
- Calor

- Electricidad
- Gas de síntesis
- Gas de media potencia
- Deshidratación (cemento-construcción)
- Secado de frutas
- Aire acondicionado
- Utilización como co-combustible en hornos industriales

2.3.3 PROPIEDADES FISICAS Y QUIMICAS DE LOS RESIDUOS PLÁSTICO

- Baja conductividad.
- Baja densidad (0,8-2,3).
- Flexibilidad y baja resistencia a la tracción.
- Alta resistencia al desgaste y a la corrosión.
- No suelen resistir más de 100 ° C.
- Los termoplásticos resisten a los ácidos y los termoestables a los disolventes.
- Elevada velocidad de propagación de llama.
- Fusibilidad por debajo de 350°C.

2.3.4 GENERACION DE CALOR EN LOS POLIMEROS

Flujo de calor crítico y parámetro de respuesta térmica

La ignición de un polímero implica la formación de una mezcla de aire-vapor y la iniciación de la combustión por si misma (auto ignición) o asistida por una fuente de calor pequeña (ignición pilotada). El flujo máximo de calor para el cual no se produce ignición se define como el flujo crítico del calor (Critical Heat Flux ,CHF).

La superficie de un polímero expuesta al flujo del calor se encuentra a una temperatura superior a su temperatura interior. Un polímero con un gradiente creciente de temperatura entre su superficie su interior se define como

térmicamente grueso (thermally thick). Si no hay gradiente de temperatura entre la superficie y el interior del polímero, éste se define como térmicamente delgado (thermally thin). Las condiciones para ser térmicamente delgado o grueso dependen del grosor real del polímero, de su tasa de calentamiento, de su estructura química y de los aditivos que lleve.

El tiempo de ignición y el flujo externo del calor satisfacen las relaciones:

$$\frac{1}{t_{ig}} = \frac{\pi}{4} \cdot \frac{q_e''}{K_{thin}} \quad (2.6)$$

Para polímeros térmicamente delgados,

Donde:

K_{thin} Se define como el parámetro de respuesta térmico (Thermal response parameter, TRP) para polímeros térmicamente delgados (KJ/m2).

$K_{thin} = \rho C_p \delta \Delta T_{ig}$, ρ Es la densidad del polímero (Kg/m3),

C_p Es el calor específico del polímero (MJ/ Kg•K)

δ Es el grosor real del polímero (m).

T_{ig} Es la temperatura de ignición por encima de la temperatura ambiente (K); y

$$\sqrt{\frac{1}{t_{ig}}} = \sqrt{\frac{\pi}{4} \cdot \frac{q_e''}{K_{thin}}} \quad (2.7)$$

Para polímeros térmicamente gruesos:

K_{thick} Se define como el parámetro de respuesta térmico (TRP) (KW-s/1/2m2)

$$K_{thick} = t_{ig} \sqrt{k \rho c_p} \quad (2.8)$$

Donde:

k es la conductividad térmica del polímero (KW/m-k).

El tiempo de respuesta térmico (TRP) representa la resistencia de un polímero a generar una mezcla inflamable de vapor-aire. El flujo externo de calor para el cual no hay ignición durante 15 minutos se toma como el CHF. El valor de CHF está generalmente cerca del valor de la pérdida de calor de superficie. Una relación lineal entre el tiempo de ignición o la raíz cuadrada del tiempo de ignición y el flujo de calor externo, que se encuentre lejos del valor de CHF Ecuaciones (2.2) o (2.3), respectivamente, es indicativo del comportamiento térmico delgado o grueso.

Los valores de CHF y de TRP dependen de las características físicas y químicas de los polímeros. Aumentando los valores de CHF y de TRP de los polímeros mediante varias técnicas de protección pasivas se retrasa la iniciación de la combustión y reduce la velocidad de propagación de la llama o se evita la propagación del fuego más allá del punto de ignición.

Generación de calor

La tasa de liberación de calor es directamente proporcional a la tasa de pérdida de masa y la constante de proporcionalidad se define como el calor de combustión:

$$Q_i'' = \Delta H_i \dot{m}_f'' \quad (2.9)$$

Donde:

Q_i'' Es el calor liberado (kW/m²).

ΔH_i Es el calor de combustión (kJ/kg).

\dot{m}_f'' Es la pérdida de masa del polímero (kg/m²-s).

El calor liberado en un proceso de combustión, en la llama se define como calor de liberación químico. Éste calor químico liberado en la llama se elimina

de la llama por una corriente de aire formada por una mezcla aire-productos de combustión y se emite al medio ambiente como radiación. La componente del calor químico eliminado por la corriente de la mezcla aire-productos de combustión se define como el calor de convección liberado. La componente del calor químico liberado emitido al medioambiente se define como el calor liberado por radiación. El calor de combustión contiene al calor químico, convectivo y de radiación.

El calor químico liberado se determina a partir de técnicas calorimétricas. La calorimetría de generación de dióxido de carbono (CDG) y la calorimetría de consumo de oxígeno (OC) En la calorimetría CDG se determina el calor químico liberado a partir de la generación de CO₂ corregida con el CO. En el caso de la calorimetría OC, se determina el calor químico liberado a partir del consumo de O₂ El calor de convección liberado se determina mediante la calorimetría GTR El calor de radiación liberado se calcula a partir de la diferencia entre el calor químico liberado y el calor convectivo liberado.

Calorimetría CDG

El calor químico liberado se calcula a partir de las siguientes relaciones:

$$Q_{ch}'' = \Delta H_{CO_2}^* G_{CO_2}'' + \Delta H_{CO}^* G_{CO}'' \quad (2.10)$$

$$\Delta H_{CO_2}^* = \frac{\Delta H_T}{\psi_{CO_2}} \quad (2.11)$$

$$\Delta H_{CO}^* = \left[\frac{\Delta H_T - \Delta H_{CO} \psi_{CO}}{\psi_{CO}} \right] \quad (2.12)$$

Donde:

Q_{ch}'' Es el calor químico liberado (kW/m²).

$\Delta H_{CO_2}^*$ Es el calor neto de combustión completa por unidad de masa de CO₂ generada (MJ/kg).

ΔH_{CO}^* Es el calor neto de combustión completa por unidad de masa de CO generado (MJ/kg).

ΔH_T Es el calor neto de combustión completa por unidad de masa de combustible consumido (kJ/g).

ψ_{CO} Es el equivalente másico del rendimiento estequiométrico de CO₂ (kg/kg).

G_{CO_2}'' Es la generación de CO₂ (kg/m²-s).

G_{CO}'' Es la generación de CO en (kg/m²-s).

Los valores dependen de la estructura química de los combustibles. Con algunas excepciones, los valores permanecen aproximadamente constantes dentro de cada grupo genérico de combustibles. Para cálculos aproximados pueden tomarse valores medios que son:

$$\Delta H_{CO_2}^* = 13.3 \text{ kJ} / \text{g} \pm 11\%, \Delta H_{CO}^* = 11.1 \text{ kJ} / \text{g} \pm 18\%$$

Para la calorimetría CDG, la corrección de CO es muy pequeña para combustión con buena ventilación, ya que se genera poca cantidad de CO. Las

variaciones de 11% y 18% de los valores de $\Delta H_{CO_2}^*$ y ΔH_{CO}^* respectivamente, se reducen significativamente para hidrocarburos de bajo peso molecular con poco contenido de oxígeno, nitrógeno y halógenos ya que son los hidrocarburos que corresponden al valor medio de las expresiones

aproximadas de $\Delta H_{CO_2}^*$ y ΔH_{CO}^* .

Para la determinación de la tasa de calor químico liberado, las tasas de generación de CO₂ y de CO se calculan a partir de los valores reales de $\Delta H_{CO_2}^*$ y ΔH_{CO}^* y los valores medios para aproximaciones.

Calorimetría OC

La tasa de calor químico liberado se determina a partir de las siguientes expresiones:

$$Q_{ch}'' = \Delta H_o^* \dot{C}_o'' \quad (2.13)$$

$$\Delta H_o^* = \frac{\Delta H_T}{\psi_o} \quad (2.14)$$

Donde:

ΔH_o^* Es el calor neto de combustión completa por unidad de masa de oxígeno consumido (MJ/kg).

\dot{C}_o'' Es el consumo máximo de oxígeno (kg/m²-s).

ψ_o Es el equivalente másico de la relación estequiométrica oxígeno-combustible (kg/kg).

Los valores de ΔH_o^* con algunas excepciones los valores permanecen aproximadamente constantes para cada grupo genérico de combustibles. Las

variaciones de $\pm 7\%$ de los valores de ΔH_o^* , se reducen significativamente para hidrocarburos de bajo peso molecular con poco contenido de oxígeno, nitrógeno y halógenos ya que son los hidrocarburos que corresponden al valor

medio de las expresiones aproximadas de ΔH_o^* .

Para la determinación de la tasa de calor químico liberado, la tasa de consumo de O₂ se calcula a partir de los valores reales de \dot{V}_{O_2} si se quiere hacer un cálculo riguroso o del valor medio para las aproximaciones. El calor químico liberado determinado por CDG o por OC resulta muy similar.

La calorimetría GTR

La tasa de calor de convección liberado se calcula a partir de la siguiente expresión:

$$Q''_{con} = \frac{Wc_p (\dot{T}_g - T_a)}{A} \quad (2.15)$$

Donde:

Q''_{con} Es el calor de convección liberado (kW/m²)

c_p Es el calor específico de la mezcla de combustión producto-aire a la temperatura del gas (MJ/kg-K),

T_g Es la temperatura del gas (K).

T_a Es la temperatura ambiente (K)

W Es el flujo másico total de la mezcla productos-aire del fuego (kg/s).

A Es la superficie total expuesta (m²).

Para la determinación del de calor de convección liberado se miden el flujo másico total de la mezcla productos-aire del fuego y la temperatura. Como valor del calor específico del aire a la temperatura del gas, se utiliza el que indica la literatura, ya que los productos combustión se diluyen con aire fresco aproximadamente con 20 veces su volumen.

Calor de combustión

El calor de combustión medio se determina a partir del ratio de energía, E_i , obtenido de la suma de los calores químico, convectivo y de radiación liberados y de la cantidad total de masa gasificada del polímero, W_f , obtenida de la suma de tasas de pérdida de masa:

$$\Delta H_{i_2} = \frac{E_T}{W_f} \quad (2.16)$$

Donde:

ΔH_{i_2} Es la media de los calores de combustión (MJ/kg) químico, convectivo o de radiación. El calor de combustión de radiación se obtiene a partir de la diferencia de calores de combustión químico y convectivo, ya que las pérdidas de calor son mínimas en el aparato de flamabilidad (flammability apparatus) empleado.

Calor liberado para varios flujos de calor

El calor liberado se puede predecir para varios flujos de calor a partir de la siguiente relación obtenida de las ecuaciones 2.15 y 2.16.

$$\dot{Q}_f'' = \left(\frac{\Delta H_i}{\Delta H_g} \right) \left(\dot{q}_e'' + \dot{q}_f'' - \dot{q}_{rr}'' \right) \quad (2.17)$$

Donde:

$\frac{\Delta H_i}{\Delta H_g}$ Se define como el parámetro de liberación de calor (HRP) (kJ/kJ). Los valores de HRP son independientes del tamaño del fuego pero si dependen de la ventilación. Los valores de calor liberado se p se pueden calcular a partir de los valores de HRP y \dot{q}_{rr}'' para el marco concreto del fuego para valores externos especificados y distintos valores de flujo de calor de llama.

Generación de calor y ventilación

La relación entre el calor liberado, el calor de combustión y su equivalencia se expresa en las siguientes ecuaciones:

$$\dot{Q}_{i,v}'' = \dot{Q}_{i,\infty}'' \left[1 - \frac{\alpha}{\exp \beta \phi^{-\xi}} \right] \quad (2.18)$$

$$\Delta H_{i,v} = \Delta H_{i,\infty} \left[1 - \frac{\alpha}{\exp \beta \phi^{-\xi}} \right] \quad (2.19)$$

$$X_v = X_{i,\infty} \left[1 - \frac{\alpha}{\exp \beta \phi^{-\xi}} \right] \quad (2.20)$$

Donde:

$\dot{Q}_{i,v}''$ Es el calor liberado en combustión con ventilación controlada.

$\Delta H_{i,v}$ Es el calor de combustión en combustión con ventilación controlada y X_v es la eficiencia de la combustión para combustión con ventilación controlada (kW/m²).

$\dot{Q}_{i,\infty}''$, $\Delta H_{i,\infty}$ y $X_{i,\infty}$ son los valores análogos pero para combustión con buena ventilación. α, β, ξ son los coeficientes de correlación de ventilación. La eficiencia de la combustión es el calor químico liberado o el calor químico de combustión respecto del calor total liberado en la combustión completa o respecto del calor neto de combustión completa. Para polímeros no halogenados $\alpha = 0.3, \beta = 2.5, \xi = 1.2$ para el calor químico o para el calor de combustión y $\alpha = 1.0, \beta = 2.5, \xi = 2.8$ para el calor de convección liberado o para el calor de convección de combustión. Para los polímeros halogenados, $\alpha = 0.3, \beta = 0.001, \xi = 1.1$ para el calor químico liberado o para el calor de combustión. Calor químico liberado, calor químico de combustión y eficiencia de la combustión decrecen cuando disminuye la ventilación o se incrementan en el equivalente másico del rendimiento estequiométrico.

2.4 ECUACION DE COMBUSTION DE DESECHOS PLASTICOS

Consideramos como elementos combustibles el C, H₂ y el S. De este modo, el proceso de combustión se puede resumir en el siguiente cuadro:

Tabla 2.9 Elementos combustibles

Composición	Reacción de combustión	Comburente	Gases de combustión
Elemento	Oxidación	Componente	Moles
C	$C + O_2 \rightarrow CO_2$ (1:1: 1)	CO ₂	$n_{CO_2} = n_C$
H ₂	$H_2 + \frac{1}{2}O_2 \rightarrow H_2O$ (1:½ 1)	H ₂ O	$n_{H_2O} = n_{H_2}$
S	$S + O_2 \rightarrow SO_2$ (1: 1: 1)	SO ₂	$n_{SO_2} = n_S$
			$n_{Gc} = \sum n_i$

Fuente: Gases de combustión

El volumen de los gases de combustión lo calcularíamos de la siguiente manera:

Tabla 2.10 Volumen de los gases de combustión

Gas	Volumen de gases de combustión (VGC)
CO ₂	$V_{CO_2} = 22,4 * n_{CO_2}$
H ₂ O	$V_{H_2O} = 22,4 * n_{H_2O}$
SO ₂	$V_{SO_2} = 22,4 * n_{SO_2}$
	$V_{total} = V_{CO_2} + V_{H_2O} + V_{SO_2}$

Fuente: Gases de combustión

Queremos ahora saber los moles mínimos, es decir, la cantidad mínima de oxígeno necesaria para la reacción de combustión. Este aire nos lo va a aportar

el aire. Como sabemos el aire está formado, en volumen, por 79% de N₂ y un 21% de O₂. El aire mínimo, referido al porcentaje de oxígeno, será:

$$Aire = \frac{100}{21} O_{2\min} \quad (2.21)$$

Hay que tener en cuenta que este aire se toma directamente de la atmósfera, y que esto implica que las condiciones en las que está este aire pueden variar: humedad relativa, temperatura, presión vapor, presión real.

Esto implica que para la cantidad de aire necesaria hace falta un aire húmedo en una cantidad superior. El aire húmedo mínimo viene dado por:

$$A_{mh} = F * Am \quad (2.22)$$

El parámetro F (factor de corrección) viene dado por:

$$F = 1 + HR \times \frac{P_s}{P_r - HR \times P_s} \quad (2.23)$$

Donde:

Ps: presión de saturación (a la temperatura del aire)

Pr: Presión atmosférica

De esta manera, A_{mh} está en C/N, pero está claro que el aire que vamos a tomar de la atmósfera no va a estar en esas condiciones de manera general. Si se cumplen las condiciones del gas ideal, entonces podremos poner que:

$$\frac{PoVo}{To} = \frac{PrVr}{Tr} \quad (2.24)$$

$$Ar = \frac{PoTr}{ToP3} Amh \quad (2.25)$$

$$\frac{PoAmh}{To} = \frac{Pr Ar}{Tr} \quad (2.26)$$

El nitrógeno aportado por el aire pasa directamente a los gases de combustión.

Para que pueda realizarse la combustión completa va a ser necesario aportar un exceso de aire. Tendremos entonces cierta cantidad de oxígeno que no reacciona y N₂ adicional, que es la cantidad que difiere de la cantidad teórica.

El exceso de aire se mide por el índice de exceso de aire, que es el cociente entre el aire real y el aire mínimo. El exceso de aire es la diferencia entre n y 1, es decir, n-1.

Índice de exceso de aire = Ar/Am

Exceso de aire = n-1

% de exceso de aire = 100(n-1)

Los combustibles que requieren menos porcentaje de exceso de aire para su combustión son los gaseosos, y los que más, son los sólidos.

En cuanto a los humos que se produce, serán húmedos y secos:

$$H_{TH} = CO_2 + H_2O + SO_2 + (O_{2ex} - O_{2min}) + N_{2ex}$$

$$H_{TS} = H_{TH} - H_2O$$

2.5 GENERACION DE PRODUCTOS EN LA COMBUSTION DE POLIMEROS

La generación de un producto es directamente proporcional a la pérdida de masa del polímero, la constante de proporcionalidad se define como el rendimiento del producto.

$$\dot{G}_j = y_j \dot{m}_f \quad (2.27)$$

Donde:

\dot{G}_j Es la generación de masa del producto j (kg/m²-s)

y_j Es el rendimiento del producto j (kg/kg).

La media del rendimiento de un producto se determina como el ratio del total de masa de producto generado, W_j , obtenido a partir de la suma de las tasas de generación de masa de los productos hasta el total de polímero gasificado, W_f , obtenido mediante la suma de las tasas de pérdida de masa:

$$y_j = \frac{W_j}{W_f} \quad (2.28)$$

2.5.1 GENERACION DE PRODUCTOS PARA DISTINTOS FLUJOS DE CALOR

La generación de productos se puede predecir para varios flujos de calor a partir de la siguiente expresión obtenida de las ecuaciones 2.27 y 2.28.

$$\dot{G}_j = \left(\frac{y_j}{\Delta H_g} \right) \left(\dot{q}_e + \dot{q}_f - \dot{q}_{rr} \right) \quad (2.29)$$

Donde:

$\frac{y_j}{\Delta H_g}$ Se define como el parámetro de generación de producto. (PGP) (kg/kJ).

2.5.2 GENERACION DE PRODUCTOS Y VENTILACION

La concentración de productos generados para distintas condiciones de ventilación se puede predecir mediante la siguiente ecuación:

$$C_{j,v} = \left(\frac{y_{j,\infty}}{S} \right) \left(\frac{\rho_a}{\rho_j} \right) \left[1 + \left\{ \frac{\alpha}{\exp \beta \phi^{-\xi}} \right\} \right] \phi \quad (2.30)$$

Donde:

$C_{j,v}$ Es la concentración para la combustión con ventilación controlada;

$y_{j,\infty}$ Es el rendimiento del producto j por unidad de masa de aire consumido (kg/kg) para combustión con buena ventilación.

$\frac{\rho_a}{\rho_j}$

Son las densidades del aire y del producto j respectivamente (kg/m³)

$\frac{\rho_a}{\rho_j}$

(Los valores de $\frac{\rho_a}{\rho_j}$ para O₂, CO, CO₂, hidrocarburos (metano) y humo (carbono) son: 0.905, 0.654, 1.034, 1.804 y 2.333 respectivamente)

ϕ Es el ratio de equivalencia ratio de cantidad de polímero gasificado (combustible) para la cantidad de aire, normalizado por el coeficiente estequiométrico de la reacción aire combustible; para combustión en condiciones de buena ventilación, $\phi < 1.0$ y para combustión controlada por la ventilación $\phi > 1.0$; α, β, ξ son los coeficientes de correlación de ventilación. Para O₂ y CO₂ los valores de los coeficientes son iguales e independientes de la estructura química tanto para los polímeros halogenados como para los no halogenados (para los no halogenados $\alpha = -1, \beta = 0.001, \xi = 11.0$).

Para polímeros no halogenados, las predicciones de las concentraciones muestran tres regiones:

(1) región de combustión con llama para combustión en condiciones de buena ventilación $\phi < 1.0$, donde una cantidad suficiente de oxígeno esta presente y las concentraciones de productos propios de combustiones incompletas están en bajas concentraciones.

(2) Región de combustión de transición para valores de ϕ comprendidos entre 1.0 y 3.5, donde la concentración de oxígeno se acerca a cero y las

concentraciones de productos propios de combustiones incompletas son elevadas.

(3) Región de combustión sin llama, para $\varphi \geq 3.5$, donde la pirólisis se convierte en el proceso dominante.

Para polímeros halogenados sólo están presentes las regiones de combustión con llama ($\varphi < 1.0$) y sin llama ($\varphi \geq 1.0$).

Las variaciones de la concentración con la variación del ratio de equivalencia dependen de la naturaleza genérica del polímero. El aumento de la concentración de hidrocarburos con el ratio de equivalencia sigue el orden siguiente:

1. Hidrocarburo: nylon > PMMA > PE y PP > madera y PS > PVC.

2. CO₂: la concentración para polímeros con átomos de oxígeno en su estructura (PMMA y Madera) son más altas que las concentraciones para polímeros que sólo contienen átomos de carbono e hidrógeno (PS, PE y gas natural)

3. CO: las concentraciones son altas para polímeros que contienen oxígeno (PMMA, madera y PU) y más bajas para polímeros que no contienen oxígeno (PE, PP, PS). La concentración de CO aumenta con el peso molecular del polímero. Por ejemplo, dentro de los siguientes polímeros, que no contienen oxígeno (PE, PP, PS, hexano y gas natural), la concentración de CO es menor para la sustancia con menor peso molecular, en este caso, para el gas natural (principalmente metano) que para peso moleculares más altos como los del hexano, PP, PE y PS.

4. Humo: La concentración de humo sigue el orden: PS (átomos de carbono e hidrógeno con enlaces aromáticos) > nylon (enlaces alifáticos entre átomos de carbono, hidrógeno, oxígeno y nitrógeno) > PE y PP (enlaces alifáticos de

carbono e hidrógeno) > madera (enlaces alifáticos entre átomos de carbono, hidrógeno y oxígeno) > PMMA (enlaces de carbono, hidrógeno, oxígeno y enlaces alifáticos). Este orden es el opuesto al de formación de CO.

Las predicciones de la concentración de especies se pueden utilizar para definir las condiciones experimentales en pruebas de evaluación de daños de toxicidad, corrosión y humo.

CAPÍTULO 3

ANALISIS Y SELECCIÓN DE ALTERNATIVAS

Bases para el diseño: Es el tema más importante dentro de cualquier proyecto, de los parámetros, de las holguras, en general de los factores aquí analizados va a depender el éxito o el fracaso del mismo.

El diseñar un prototipo no es más que una semilla frente a la gigantesca estructura del montaje industrial, pero es una semilla imprescindible de ahí la importancia que se da al presente estudio.

Al hablar sobre diseño y construcción de un sistema de combustión para caracterización térmica de desechos plásticos utilizados como combustible alternativo hay que hacerlo en función de los materiales existentes en el mercado, tomando en cuenta el factor técnico, económico, cumpliendo con los objetivos propuestos, para lo cual se realizara un análisis de las restricciones de diseño y la elaboración de una matriz de selección.

3.1 RESTRICCIONES DE DISEÑO

El tipo de residuo a ser incinerado serán desechos plásticos los cuales deberán ser procesados para disminuir su tamaño ya que la capacidad de carga en la cámara es pequeña con un máximo de 1500 gr. de desecho plásticos.

- La composición de los desechos plásticos a ser incinerados en % de peso será proporcional a los valores obtenidos en los diferentes botaderos de basura del Distrito Metropolitano de Quito
- Para el precalentamiento de la cámara será necesaria la incorporación de quemadores, los cuales serán alimentados por GLP
- La cámara será construida de tal forma que sea posible dar un correcto mantenimiento de la misma.
- El calor aportado por las cenizas será utilizado para deshidratar los desechos plásticos, para obtener una mejor combustión.
- Las emisiones de gases deberán cumplir con las normas medioambientales que rigen en la ciudad de Quito.
- Aplicación de nuevos materiales aislante para reducir el flujo de calor al exterior y así obtener una mayor eficiencia térmica.

3.2 MATRIZ DE SELECCIÓN

Para la elaboración de todo proyecto existen varias alternativas de construcción, de diseño, pero es importante definir la alternativa mas adecuada en términos de economía, energía y medio ambiente ya que las condiciones de trabajo y medio ambientales no siempre son las mismas, para esto es necesario crear una matriz la cual nos permita tomar la alternativa correcta.

3.3 VARIABLES DE DISEÑO

Es importante conocer las variables mas importante que van ha influir en el proceso del diseño y construcción del sistema de combustión para de esta manera garantizar una buena combustión, para esto detallamos las variables que bajo nuestro criterio son vitales identificarlas:

3.3.1 VARIABLES

1. Tipo de sistema de conversión energética
2. Tipo de residuo como combustible
3. Tipo de aislamiento
4. Tipo de hogar o cámara de combustión
5. Tipo de ventilación
6. Procesamiento del residuo utilizado como combustible

3.3.2 ALTERNATIVAS PROBABLES

Tipo de sistema de conversión energética

Alternativas:

- a) Oxidación
- b) Pirolisis
- c) Gasificación
- d) Hidrólisis
- e) Radiolisis

Tipo de Residuo como combustible

Alternativas:

- a) Residuos alimenticios
- b) Residuos plásticos
- c) Residuos fibrosos
- d) Residuos industriales

Tipo de aislamiento

Alternativas:

- a) Ladrillo refractario
- b) Lana de Vidrio
- c) Cemento refractario
- d) Fibra cerámica
- e) Asbesto térmico

Tipo de hogar o cámara de combustión

Alternativas:

- a) Hogares de carga a mano
- b) Hogares de proyección o de lanzamiento
- c) Hogares de emparrillado inclinado
- d) Hogares de parrilla escalonada

Tipo de ventilación

Alternativas:

- a) Mecánica
- b) Ambiental o atmosférica

Procesamiento del residuo utilizado como combustible

Alternativas:

- a) Compactado
- b) Triturado
- c) Molido

3.4 CRITERIOS DE EVALUACIÓN

En un diseño para seleccionar la alternativa más adecuada, es de vital importancia tomar en cuenta los parámetros involucrados y la prioridad que estos tienen dentro del proyecto.

Para lo cual es preciso definir los puntajes máximos y el factor de peso de cada uno de los factores.

La escala de prioridad variara en un rango de valores desde 1 al 8, siendo el valor de **1 el de mayor prioridad** y el valor de **8 el de menor prioridad**.

Tabla 3.1 Matriz de selección de alternativas

Ord.	Parámetro de diseño	Prioridad	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	Puntaje	%	W.F.	Puntaje Máx.
1	Inversión inicial	1	0	1	1	1	1	1	1	1	1	4	12	17	0,17	167
2	Afectación al ambiente	2		0	1	1	1	1	1	1	1	4	11	15	0,15	153
3	Seguridad	4			0	0,5	1	1	1	1	1	4	9,5	13	0,13	132
4	Facilidad de mantenimiento	4			0,5	0	1	1	1	1	1	4	9,5	13	0,13	132
5	Materiales	5					0	1	1	1	1	4	8	11	0,11	111
6	Eficiencia	6						0	0,5	1	1	4	6,5	9	0,09	90
7	Temp. dentro de la cámara	6						0,5	0	1	1	4	6,5	9	0,09	90
8	Facilidad de operación	7								0	1	4	5	7	0,07	69
9	Estética	8									0	4	4	6	0,06	56
	TOTAL	43											72	100	1,00	1000

Mayor prioridad=1

Menor prioridad=8

3.5 MATRICES

Tabla 3.2 Matriz de selección del tipo de sistema de conversión energética

PARÁMETRO	Alter 1	Alter 2	Alter 3	Alter 4	Alter 5	Puntaje Máx.
Inversión inicial	133	83	100	67	50	167
Afectación al ambiente	61	76	107	107	76	153
Seguridad	106	53	66	40	79	132
Facilidad de mantenimiento	92	26	40	53	66	132
Materiales	78	56	44	33	33	111
Eficiencia	54	54	63	72	63	90
Temp. dentro de la cámara	72	63	36	36	45	90
Facilidad de operación	49	21	21	28	21	69
Estética	17	33	17	22	22	56
Puntaje Total	662	466	494	458	456	1000

Se ha seleccionado entonces el tipo de sistema de conversión energética la **OXIDACIÓN** a alta temperatura ya que es la mas conocida de ellas.

Tabla 3.3 Matriz de selección del tipo de residuo como combustible

PARÁMETRO	Alter 1	Alter 2	Alter 3	Alter 4	Puntaje Máx.
Inversión inicial	83	83	100	67	167
Afectación al ambiente	92	61	92	31	153
Seguridad	79	66	66	40	132
Facilidad de mantenimiento	40	79	40	53	132
Materiales	78	78	44	33	111
Eficiencia	18	72	63	72	90
Temp. dentro de la cámara	45	63	36	72	90
Facilidad de operación	42	56	49	28	69
Estética	17	39	33	22	56
Puntaje Total	493	597	523	417	1000

Se ha seleccionado entonces como tipo de combustible los **DESECHOS PLÁSTICOS** por su alto poder calorífico y por su facilidad de manipulación.

Tabla 3.4 Matriz de selección del tipo de aislamiento

PARÁMETRO	Alter 1	Alter 2	Alter 3	Alter 4	Alter 5	Puntaje Máx.
Inversión inicial	67	133	83	117	83	167
Afectación al ambiente	61	76	107	107	46	153
Seguridad	106	66	66	106	79	132
Facilidad de mantenimiento	66	79	106	79	53	132
Materiales	78	67	56	89	33	111
Eficiencia	63	45	72	72	63	90
Temp. dentro de la cámara	72	36	45	72	54	90
Facilidad de operación	42	49	56	56	28	69
Estética	17	33	28	44	28	56
Puntaje Total	571	585	618	742	467	1000

Se ha seleccionado la **MANTA DE FIBRA CERÁMICA** por su excelente desempeño en el aislamiento térmico, es muy resistente a altas temperaturas incluso llegando a resistir la llama directa.

Tabla 3.5 Matriz de selección del tipo de hogar o cámara de combustión

PARÁMETRO	Alter 1	Alter 2	Alter 3	Alter 4	Puntaje Máx.
Inversión inicial	133	117	100	67	167
Afectación al ambiente	61	76	107	107	153
Seguridad	66	92	66	40	132
Facilidad de mantenimiento	92	92	40	53	132
Materiales	78	89	44	33	111
Eficiencia	45	63	63	72	90
Temp. dentro de la cámara	36	63	36	36	90
Facilidad de operación	49	49	21	28	69
Estética	17	39	17	22	56
Puntaje Total	577	681	494	458	1000

Se ha seleccionado el **HOGAR DE PROYECCIÓN O DE LANZAMIENTO** ya que es posible cargar el combustible de una manera uniforme y con frecuencia, se asegura un buen encendido mejorando la combustión.

Tabla 3.6 Matriz de selección del tipo de ventilación

PARÁMETRO	Alter 1	Alter 2	Puntaje Máx.
Inversión inicial	133	117	167
Afectación al ambiente	61	92	153
Seguridad	106	79	132
Facilidad de mantenimiento	92	26	132
Materiales	78	89	111
Eficiencia	72	27	90
Temp. dentro de la cámara	54	36	90
Facilidad de operación	56	49	69
Estética	39	33	56
Puntaje Total	691	548	1000

Se ha seleccionado como tipo de ventilación, **LA VENTILACIÓN MECÁNICA** ya que se debe asegurar la cantidad y calidad de inyección del aire necesario para una buena combustión.

Tabla 3.7 Matriz de selección del tipo de procesamiento del residuo utilizado

PARÁMETRO	Alter 1	Alter 2	Alter 3	Puntaje Máx.
Inversión inicial	67	117	50	167
Afectación al ambiente	107	107	92	153
Seguridad	79	92	66	132
Facilidad de mantenimiento	92	92	40	132
Materiales	44	78	33	111
Eficiencia	18	63	72	90
Temp. dentro de la cámara	45	54	72	90
Facilidad de operación	56	49	21	69
Estética	28	39	44	56
Puntaje Total	536	691	490	1000

El tamaño del combustible más adecuado es el que se obtiene a partir del **TRITURADO**, permitiendo optimizar el espacio de la cámara, evitando pérdidas por caída entre los huecos de la parrilla, garantizando un elevado estado de subdivisión para que la superficie específica sea la mayor posible.

3.6 RESUMEN DE CARACTERÍSTICAS DE LA ALTERNATIVA SELECCIONADA

Tabla 3.8 Características de la cámara de combustión

Tipo de hogar o cámara de combustión	Hogares de proyección o de lanzamiento
Temperatura de servicio	950 °C
Capacidad de Incineración	4.5 kg/h
Dimensiones exteriores de la cámara de combustión	499 x 499 x 350 mm (largo x ancho x alto)
Material de aislamiento	Manta de fibra cerámica T _{máx} =1260°C
Material refractario	Placa refractaria e=30 mm
Posición del residuo plástico	Pantalla térmica
Procesamiento del residuo plástico	Triturado
Composición del residuo en % de peso	PET 24 (%), PP 12 (%), PEHD fundas 24 (%), PEHD soplado 12 (%), PELD 12 (%), PS 6 (%), PVC 4 (%), Línea blanca 6 (%).
Potencia de los quemadores	Q _{m1} =44,27; Q _{m2} =24,59 (kJ/seg)
Tipo de combustible para el quemador	GLP =49190 (kJ/kg)
Sistema de suministro de aire	Ventilación mecánica

CAPÍTULO 4

DISEÑO TÉRMICO

4.1 PARÁMETROS DE DISEÑO

En el proceso de oxidar materiales combustibles elevando la temperatura del material por encima de su punto de auto-ignición en la presencia de oxígeno, y manteniéndolo a alta temperatura por un tiempo suficiente para completar su combustión a bióxido de carbono y agua. Tanto el tiempo como la temperatura, la turbulencia (para mezclado), y la disponibilidad de oxígeno afectan la velocidad y la eficiencia del proceso de combustión. Estos factores proporcionan los parámetros de diseño básico para los sistemas de oxidación².

Por lo tanto la cámara de combustión se diseñara con una carga térmica sensiblemente constante, para ello se debe cumplir con las siguientes condiciones:

² ICA, 1999: Institute of Clean Air Companies

- a. El poder calorífico inferior (PCI) de la carga a ser incinerada deberá ser constante, siendo necesario conocer la composición química del combustible sólido.
- b. La alimentación constante a la cámara, manteniendo en lo posible el mismo porcentaje en peso de cada uno de los componentes que conforman el combustible sólido.
- c. Asegurar una deshidratación homogénea del combustible sólido, manteniendo una temperatura constante en un periodo de tiempo igual para cada carga a ser incinerada.
- d. Mantener una temperatura constante en la cámara para obtener una mejor reacción entre el aire y los compuestos volátiles.
- e. Proveer la cantidad y calidad suficiente de comburente (aire) y combustible en la cámara, de esta manera estaremos asegurando una mezcla correcta entre los dos reactante que asegure la continuidad de la reacción.
- f. El tamaño del combustible sólido debe presentar un elevado grado de subdivisión para que la superficie específica sea la mayor posible.
- g. Determinar el comportamiento del combustible sólido frente al fuego: aglutinante, esponjable, vitrificante, terroso, para de esta manera determinar lo posición mas adecuada del combustible dentro de la cámara.
- h. La mayoría de los incineradores de desechos son operados entre 950°C a 1200°C para asegurar la destrucción casi completa de los compuestos orgánicos en el desecho³.

³ AWMA, 1992: Air & Waste Management Association of EE.UU.

4.2 ANÁLISIS DEL COMBUSTIBLE

4.2.1 COMPOSICIÓN ELEMENTAL DEL COMBUSTIBLE SÓLIDO (DESECHOS PLÁSTICOS)

Los combustibles importantes en la industrial contienen como elementos combustibles al carbono (C) e hidrogeno (H) y en pequeñas cantidades azufre (S), siendo estos líquidos, sólidos o gaseosos. Conocer la composición del porcentaje en peso de cada uno de estos elementos es muy importante debido tanto al aspecto energético, como la preocupación con la emisión de compuestos generados durante la combustión.

Uno de los parámetros mas importantes para poder realizar la caracterización térmica de los desechos plásticos que son generados en la ciudad de Quito, es conocer su composición química, para esto se utilizará como composición media, los datos obtenidos por los investigadores americanos: George Tchobanoglous y Hilary Theissen, en base seca, con estos datos se determinará la composición típica de los desechos plásticos utilizados en este proyecto, en función del contenido de humedad de estos, ya que de este parámetro depende directamente el valor del poder calorífico inferior (PCI), por lo tanto de la cantidad de calor disponible en la cámara.

Tabla 4.1 Análisis final de componentes combustibles en desechos sólidos municipales.

Componente	Por ciento en peso (base seca)					
	C(s)	H(s)	O(s)	N(s)	S(s)	A(s)
Plásticos	60	7,2	22,8	-	-	10

Fuente: George Tchobanoglous y Hilary Theissen

4.2.2 DETERMINACIÓN DE LA HUMEDAD

El contenido de humedad de un desecho sólido, generalmente, se expresa como el peso de humedad por unidad de peso de material húmedo.

Para esto se pesa la muestra inicial de los desechos plásticos, la cual será colocada en el interior de un horno o estufa de secado manteniendo una temperatura entre 105 - 110 °C, durante un tiempo de 100 a 150 minutos. Suponiendo que lo único que se volatiliza es la humedad, se pesa la muestra, la diferencia entre la masa inicial y la masa final es la masa de la humedad contenida en los desechos plásticos.

$M_o := 200$ g Masa inicial

$M_1 := 198$ g Masa seca

$W_t := \frac{M_o - M_1}{M_o} \cdot 100$ (%) Temp. Calentamiento aprox. 105 °C

$W_t = 1$ (%) Porcentaje de masa húmeda

4.2.3 COMPOSICIÓN TÍPICA DE LOS DESECHOS PLÁSTICOS DE LOS VERTEDEROS DE LA CIUDAD DE QUITO

Conocido el porcentaje de humedad contenido en los desechos plásticos de los vertederos de la ciudad de Quito, se determinará el porcentaje en peso de cada elemento en base húmeda.

$$C_1 := \frac{100 - W_t}{100}$$

$C_1 = 0.99$ Coeficiente de recálculo de masa

$C_t := C_1 \cdot C_s$		$H_t := C_1 \cdot H_s$	
$C_t = 59.4$	Carbono	$H_t = 7.128$	Hidrogeno
$O_t := C_1 \cdot O_s$		$A_t := C_1 \cdot A_s$	
$O_t = 22.572$	Oxigeno	$A_t = 9.9$	Ceniza
$S_t := S_s$		$N_t := N_s$	
$S_t = 0$	Azufre	$N_t = 0$	Nitrógeno

Tabla 4.2 Porcentaje de cada elemento en base húmeda

Componente	Por ciento en peso (base húmeda)					
	C(t)	H(t)	O(t)	N(t)	S(t)	A(t)
Plásticos	59,4	7,13	22,57	-	-	9,9

Fuente: Javier Salinas – Rony Vásquez

4.2.4 DETERMINACIÓN DEL PODER CALORÍFICO DE LOS DESECHOS PLÁSTICOS

Se define como Poder Calorífico de un combustible, a la cantidad de calor liberado durante la oxidación completa de los componentes de la unidad de masa o de volumen de dicho combustible. Se debe diferenciar entre poder calorífico inferior y superior.

El Poder Calorífico Superior (PCS): es el calor verdaderamente producido en la reacción de combustión, no se considera corrección por humedad, en los productos de la combustión el agua aparece en forma líquida.

El Poder Calorífico Inferior (PCI): es el calor realmente aprovechable, no se considera el calor latente del vapor de agua de la combustión, ya que no se produce cambio de fase, y se expulsa como vapor. Se mide en unidades de energía por masa, [cal/gr], [Kcal/kg], [BTU/lb].

Habitualmente el agua se evacua con los humos en fase vapor, por lo que el poder calorífico más comúnmente utilizado es el inferior.

4.2.4.1 Determinación del poder calorífico inferior (PCI)

El poder calorífico inferior puede ser calculado por medio de fórmulas empíricas obtenidas con base en experiencias. Para determinación del poder calorífico inferior de combustibles sólidos tenemos la siguiente fórmula de D.I. Mendeleev.

$$PCI := 339Ct + 1030Ht - 109(Ot - St) - 25Wl$$

$$PCI = 2.499 \times 10^4 \quad \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

$$PCIc := \frac{PCI}{4.184}$$

$$PCIc = 5.973 \times 10^3 \quad \frac{\text{kcal}}{\text{kg}}$$

4.2.4.2 Determinación del calor de condensación (Qw)

El calor de condensación del vapor de agua en los productos de combustión es calculado por la fórmula:

$$Qw1 := 600 \cdot \frac{Wt + 9Ht}{100} \quad \frac{\text{kcal}}{\text{kg}} \quad \text{Hütte; Manual del ingeniero Tomo I p. 1091}$$

$$Qw := (Qw1) \cdot 4.184$$

$$Qw = 1.636 \times 10^3 \quad \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

4.2.4.3 Determinación del poder calorífico superior (PCS)

El poder calorífico superior puede ser calculado por medio de la fórmula

$$\text{PCS} := \text{PCI} + Q_w$$

$$\text{PCS} = 2.663 \times 10^4 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

4.3 CÁLCULO DE LA CANTIDAD DE AIRE EN COMBUSTIÓN NEUTRA

El calor liberado en la cámara de combustión y los productos de combustión dependen de la cantidad de aire suministrado en la cámara. Para determinar la cantidad necesaria de aire para la combustión completa de un kg de combustible a temperatura de 0 °C, se utilizara la siguiente fórmula establecida por ROSIN y FEHLING:

$$\text{Vart} := 1.01 \cdot \frac{\text{PCIc}}{1000} + 0.5$$

$$\text{Vart} = 6.533 \frac{\text{Nm}^3}{\text{kg}}$$

Con este valor encontrado, se corregirá la cantidad de aire teórico, ya que la temperatura a la que se encuentra el aire es igual a la temperatura ambiente parámetro con el cual se realizarán los demás cálculos.

$$t_{\text{amb}} := 27 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$\text{Vartamb} := \text{Vart} \cdot \left(\frac{273 + t_{\text{amb}}}{273} \right)$$

$$\text{Vartamb} = 7.179 \frac{\text{m}^3}{\text{Kg}}$$

4.4 DETERMINACIÓN DEL COEFICIENTE DE EXCESO DE AIRE (α)

Para quemar bien el combustible y garantizar una combustión completa, es necesario suministrar en la cámara de combustión una cantidad de aire mayor al necesario en combustión neutra, siempre evitando un gran exceso de aire ya que puede disminuir la temperatura en el interior de la cámara de combustión y aumentar la cantidad de gases de escape, disminuyendo el rendimiento de la cámara.

Despreciando, para un cálculo aproximado, las pérdidas diversas (obsérvese que los in quemados no existen por la hipótesis de combustión completa), se puede escribir⁴:

$$\alpha := \frac{PClc - Vg \cdot Cpg \cdot tg}{Cpar \cdot tg \cdot Vart} \quad (4.1)$$

Donde:

PClc: Poder calorífico inferior de los desechos plásticos en (kcal/kg).

Vg: Volumen de los gases en Nm³ producidos en la combustión neutra de 1 Kg. de residuos.

Cpg: Calor volumétrico de calentamiento a presión constante de los gases de combustión entre 0 y t °C, en kcal/ Nm³.

Cpar: Calor volumétrico de calentamiento a presión constante del aire entre 0 y t °C, en kcal/Nm³.

tg: Temperatura de los gases en la cámara de combustión, igual a 950 °C.

⁴ Estudio de la incineración, p.113

4.4.1 DETERMINACIÓN DE Cpg y Cpar

Para determinar los valores de Cpg y Cpar, hallaremos los valores de calor específico de los gases de combustión y del aire como una función de la temperatura.

Tabla 4.3 Coeficientes para determinar los calores específicos

	A	b·10⁻²	c·10⁻⁵	d·10⁻⁹
Aire	28,11	0,1967	0,4802	-1,966
CO ₂	22,26	5,981	-3,5010	7,469
O ₂	25,48	1,5200	-0,7155	1,312
N ₂	28,90	-0,1571	0,8081	-2,873
H ₂ O	32,24	0,1923	1,0550	-3,595

Fuente: Yunus A. Cengel, Termodinámica, p. 887

Ejemplo de cálculo para el aire:

$$a := 28.11 \quad b := 0.1967 \cdot 10^{-2} \quad c1 := 0.4802 \cdot 10^{-5} \quad d := -1.966 \cdot 10^{-9}$$

$$t_g := 950 \quad ^\circ\text{C} \quad \text{Temperatura de los gases en el interior de la cámara}$$

$$T_g := t_g + 273$$

$$T_g = 1.223 \times 10^3 \quad \text{K}$$

$$c_{par} := a + b \cdot (T_g) + c1 \cdot (T_g)^2 + d \cdot (T_g)^3$$

$$c_{par} = 34.102 \quad \frac{\text{kJ}}{\text{kmol} \cdot \text{K}} \quad \text{Calor específico del aire}$$

Tabla 4.4 Calor volumétrico de los gases y del aire

	kJ/kmol K	kcal	kmol	Nm³	kcal/Nm³
aire	34,10	4,148	1000	24	0,325
CO ₂	56,71	4,148	1000	24	0,541
O ₂	35,77	4,148	1000	24	0,341
N ₂	33,81	4,148	1000	24	0,323
H ₂ O	43,80	4,148	1000	24	0,418

$$C_{pg} := 0.406 \quad \frac{\text{Kcal}}{\text{Nm}^3} \quad \text{Calor volumétrico de los gases}$$

$$C_{par} := 0.325 \quad \frac{\text{Kcal}}{\text{Nm}^3} \quad \text{Calor volumétrico del aire}$$

4.4.2 DETERMINACIÓN DEL VOLUMEN DE LOS GASES PRODUCIDOS EN LA COMBUSTIÓN NEUTRA (V_g)

Para determinar el volumen de los gases producidos en la combustión se utilizara la siguiente fórmula establecida por ROSIN y FEHLING:

$$V_g := 0.89 \cdot \frac{PCIc}{1000} + 1.65$$

$$V_g = 6.966 \quad \frac{\text{Nm}^3}{\text{kg}} \quad \text{Volumen de los gases sin exceso de aire}$$

Por lo tanto el coeficiente de exceso de aire será igual a:

$$\alpha = 1.629 \quad \text{Coeficiente de exceso de aire}$$

4.4.3 CÁLCULO DEL VOLUMEN REAL DE AIRE

$$V_{ar} := \alpha \cdot V_{artamb}$$

$$V_{ar} = 11.697 \quad \frac{\text{m}^3}{\text{kg}} \quad \text{Volumen real de aire}$$

La cantidad de aire en kilogramos será:

$$\rho_{ar} = 1.177 \quad \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

$$M_{ar} := V_{ar} \cdot \rho_{ar}$$

$$M_{ar} = 13.773 \quad \text{kg} \quad \text{Masa de aire}$$

4.5 CÁLCULO DE LA COMPOSICIÓN DE LOS PRODUCTOS DE COMBUSTIÓN

En el caso de la combustión completa con exceso de aire ($\alpha > 1$), la composición de los productos de combustión será la siguiente:

$$V_{RO_2} := 0.01866(Ct + 0.375St)$$

$$V_{RO_2} = 1.108 \quad \frac{m^3}{kg} \quad \text{Volumen de los gases triatómicos}$$

$$V_{O_2} := 0.21(\alpha - 1) \cdot V_{artamb}$$

$$V_{O_2} = 0.949 \quad \frac{m^3}{kg} \quad \text{Volumen de oxígeno}$$

$$V_{N_2} := 0.008Nt + 0.79\alpha \cdot V_{artamb}$$

$$V_{N_2} = 9.241 \quad \frac{m^3}{kg} \quad \text{Volumen de nitrógeno}$$

$$V_{H_2O} := 0.111Ht + 0.0124Wt + 0.0161 \cdot V_{ar}$$

$$V_{H_2O} = 0.992 \quad \frac{m^3}{kg} \quad \text{Volumen del vapor de agua}$$

4.5.1 VOLUMEN TOTAL DE LOS PRODUCTOS DE COMBUSTIÓN

$$V_{gases} := V_{RO_2} + V_{H_2O} + V_{O_2} + V_{N_2}$$

$$V_{gases} = 12.29 \quad \frac{m^3}{kg}$$

4.5.2 VOLUMEN DE LOS GASES SECOS

$$V_{gsecos} := V_{gases} - V_{H_2O}$$

$$V_{gsecos} = 11.298 \quad \frac{m^3}{kg}$$

4.6 CÁLCULO DE LA TEMPERATURA TEÓRICA DE COMBUSTIÓN (FLAMA ADIABÁTICA)

La temperatura de flama adiabática es la temperatura máxima de una cámara de combustión, siempre y cuando allí no exista transferencia de calor hacia los alrededores y la combustión sea completa.

Para poder determinar esta temperatura se considera un proceso de combustión de flujo permanente y en condiciones normales (temperatura del ambiente 25°C).

La temperatura de flama adiabática puede ser calculada a partir del balance térmico por la ecuación⁵:

$$t_{adiab} := \frac{PCI + q_c + q_{ar} - q_{diss}}{C_{pg} \cdot V_{gases}} \quad (4.2)$$

Donde:

q_c : Calor físico del combustible en kJ/kg

q_{ar} : Calor físico del aire kJ/kg

q_{diss} : Calor de reacciones de disociación

C_{pg} : Calor volumétrico de los productos de combustión kJ/m³ K

4.6.1 CALOR FÍSICO DE COMBUSTIBLE

El calor físico del combustible depende de su temperatura de precalentamiento y es calculado por la fórmula:

$$q_c := c_{pcomb} \cdot t_{comb} \quad (4.3)$$

Donde:

t_{comb} : Temperatura de precalentamiento del combustible, en °C.

c_{pcomb} : Calor específico medio del combustible, en kJ / kg °C

⁵ Dmitri Vlassov, Combustible, combustión y cámaras de combustión, p. 56

Para determinar el calor específico medio de los desechos plásticos, se utilizarán los valores de la siguiente tabla:

Tabla 4.5 Calor específico de polímeros

Polímero	<i>cpcomb</i> (kJ / kg*°C)
Acrilonitrilo butadieno estireno	1,47
Copolímero del acetal	1,47
Polimetil metacrilato	1,47
Nylon 6.6	1,67
Policarbonato	1,26
Polietileno, de alta densidad	2,3
Polipropileno	1,93
Poliestireno	1,34
Pseudocloruro de polivinilo	1
Acetato de celulosa	1,51
Difeniloxazol	1,34

Fuente: D.H. Morton-Janes; Procesamiento de plásticos, p.63

$$t_{comb} := 100 \quad ^\circ\text{C}$$

$$c_{pcomb} := 1.52 \quad \frac{\text{kJ}}{\text{kg}^\circ\text{C}}$$

$$q_c := c_{pcomb} \cdot t_{comb}$$

$$q_c = 152 \quad \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

4.6.2 CALOR FÍSICO DEL AIRE

El calor físico del aire es calculado por la siguiente fórmula:

$$c_{par} := 1.005 \quad \frac{\text{kJ}}{\text{kg}^\circ\text{C}} \quad \text{Calor específico del aire}$$

$$\rho_{par} = 1.177 \quad \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \quad \text{Densidad del aire}$$

$$q_{ar} := c_{par} \cdot \rho_{par} \cdot t_{amb} \cdot V_{ar}$$

$$q_{ar} = 373.719 \quad \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

4.6.3 CALOR DE REACCIONES DE DISOCIACIÓN

Las reacciones de disociación tienen lugar en cámaras de combustión a altas temperaturas (mayores que 1800 °C), para temperaturas de 1800 °C o menores, el calor de reacciones de disociación es pequeño y puede ser desconsiderado.

$$q_{diss} := 0 \quad \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

4.6.4 CALOR ESPECIFICO VOLUMÉTRICO DE LOS PRODUCTOS DE COMBUSTIÓN

El calor específico volumétrico de los productos de combustión a presión constante puede ser calculado por la fórmula de la termodinámica⁶.

$$C_{pg} = \sum c_{pi} * r_i \quad (4.4)$$

Donde:

c_{pi} : Calor específico de un componente de la mezcla, en kJ / m³K

r_i : Parte volumétrica de este componente en la mezcla.

Se sabe que el calor específico depende de la temperatura, sin embargo es el valor desconocido en la ecuación (4.2).

Para esto la ecuación (4.4) es escrita de la siguiente forma:

$$C_{pg} V_g T_{adiab} = \sum (C_p T_{adiab})_i V_i = PCI + qc + qar = Q_{dis} \quad (4.5)$$

Donde:

$(C_p T_{adiab})_i$: entalpía del i-jésimo componente en la mezcla, en kJ/m³

V_i : volumen del i-jésimo componente en la mezcla en m³/kg.

Q_{dis} : calor disponible en la cámara, en kJ/kg.

⁶ Dmitri Vlassov, Combustible, combustión y cámaras de combustión, p. 57

Para determinar el valor de la temperatura adiabática vamos a suponer algunos valores de temperatura adiabática, en función de estos valores se obtendrá una grafica la cual nos permitirá determinar el valor de la temperatura adiabática.

Los valores de las entapias de los componentes en función de la temperatura son presentados en la siguiente tabla.

Tabla 4.6 Entalpías de los componentes de la combustión

GASES	Volumen m ³ /kg	1500 °C		1600 °C		1700 °C	
		H(kj/m ³)	H(kj/kg)	H(kj/m ³)	H(kj/kg)	H(kj/m ³)	H(kj/kg)
CO2	1,108	3504,4	3884,3	3768,2	4176,7	4036,2	4473,7
H2O	0,992	2164,6	2146,8	2323,7	2304,6	2482,8	2462,4
O2	0,947	2779,4	2631,6	3002,0	2842,3	3228,1	3056,4
N2	9,234	2164,6	19986,9	2461,9	22732,0	2629,4	24278,6
$\sum (Cp * t_{adiab})_i * Vi =$			28649,5		32055,6		34271,1

Fuente: Dmitri Vlassov, Combustible, combustión y cámaras de combustión, p.185

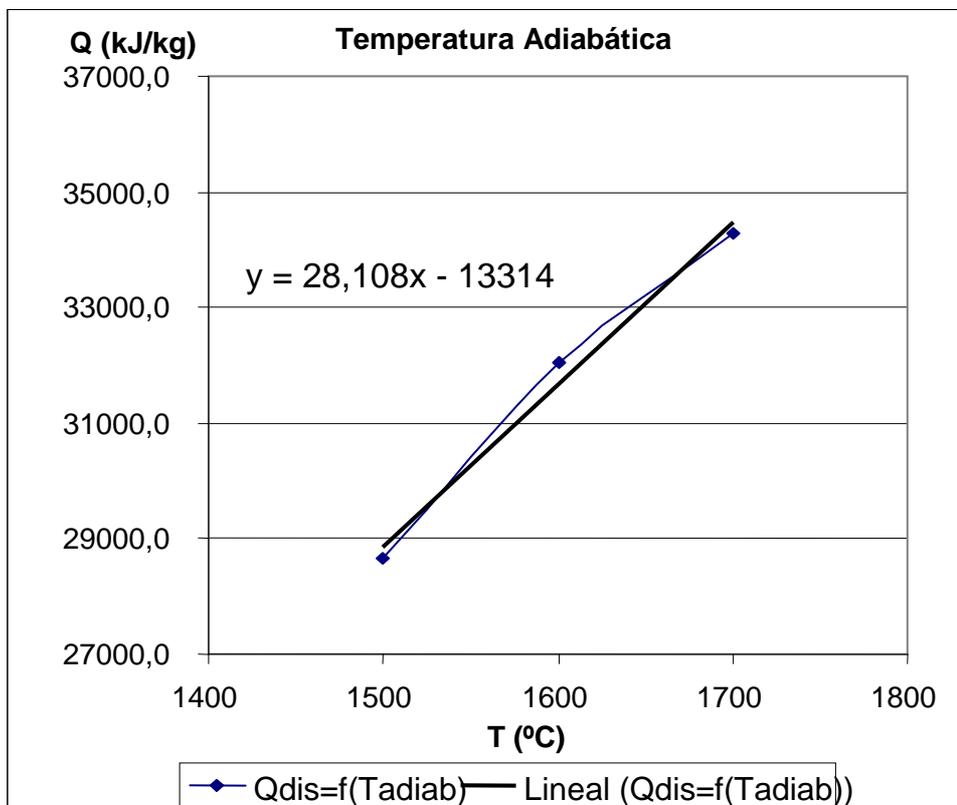


Figura 4.1 Temperatura adiabática

Con la ecuación de la recta que hemos obtenido se determinara el valor de la temperatura adiabática.

$$Q_{dis} := PCI + q_c + q_{ar}$$

$$Q_{dis} = 2.552 \times 10^4 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \quad \text{Calor disponible}$$

$$m_{recta} := 28.108 \quad \text{Pendiente de la recta}$$

Por lo tanto la temperatura adiabática será:

$$t_{adiab} := \frac{Q_{dis} + 13314}{m_{recta}}$$

$$t_{adiab} = 1.382 \times 10^3 \quad ^\circ\text{C}$$

4.7 DISEÑO DE LA CÁMARA DE COMBUSTIÓN

La misión de la cámara de combustión es transformar la energía química latente o potencial, del combustible (poder calorífico), por medio de la combustión con el oxígeno del aire, en calor, del cual se pueda disponer libremente.

4.7.1 ÁREA DE TRANSFERENCIA DE CALOR

Para determinar el área de transferencia de calor es necesario conocer las dimensiones tanto interiores como exteriores de las caras de la cámara de combustión.

4.7.1.1 Dimensiones interiores de la cámara de combustión

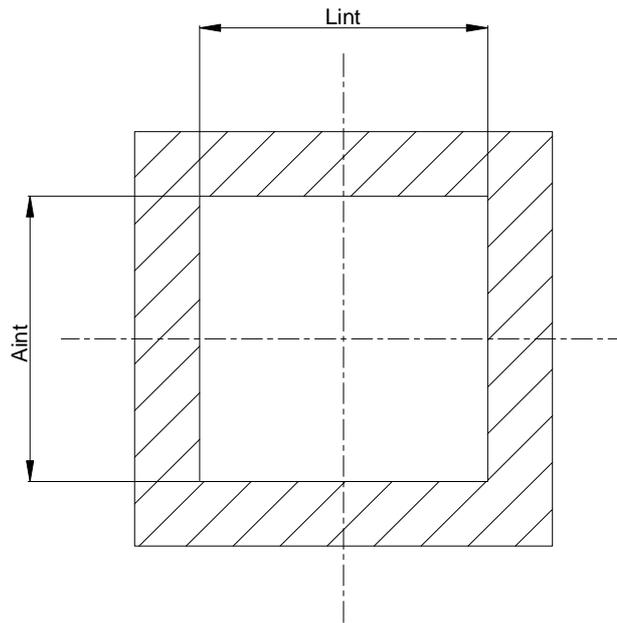


Figura 4.2 Dimensiones interiores de la cámara de combustión

$$\text{Lint} := 275 \cdot 10^{-3} \quad \text{m}$$

$$\text{Aint} := 275 \cdot 10^{-3} \quad \text{m}$$

$$\text{Hint} := 350 \cdot 10^{-3} \quad \text{m}$$

4.7.1.2 Dimensiones exteriores de la cámara de combustión

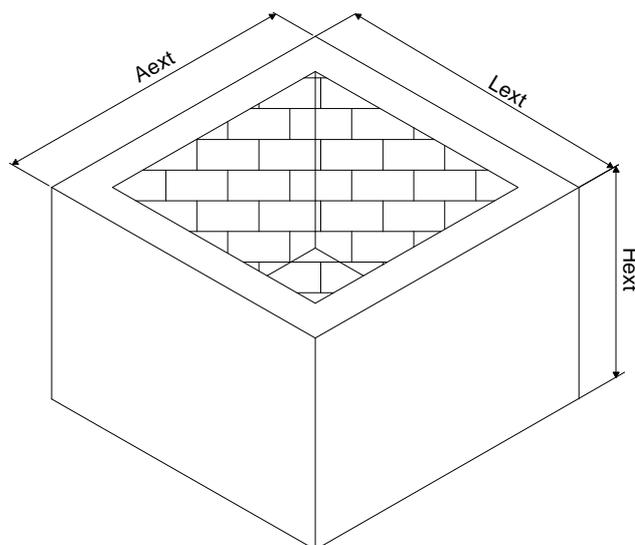


Figura 4.3 Dimensiones exteriores de la cámara de combustión

Espesor del tol interior

$$e1a := 2 \cdot 10^{-3} \quad \text{m}$$

Espesor de la primera capa de fibra cerámica

$$e1fc := 50.8 \cdot 10^{-3} \quad \text{m}$$

Espesor del tol intermedio

$$e2a := 2 \cdot 10^{-3} \quad \text{m}$$

Espesor de la segunda capa de fibra cerámica

$$e2fc := 25.4 \cdot 10^{-3} \quad \text{m}$$

Espesor del tol exterior

$$e3a := 2 \cdot 10^{-3} \quad \text{m}$$

Área de pared interna:

$$\dot{A}_{pi} := \text{Hint} \cdot \text{Lint}$$

$$\dot{A}_{pi} = 0.096 \quad \text{m}^2$$

Área de pared externa:

$$\dot{A}_{po} := \text{Hext} \cdot \text{Lext}$$

$$\dot{A}_{po} = 0.175 \quad \text{m}^2$$

Área de la sección transversal interior de la cámara:

$$\dot{A}_{st} := \text{Lint} \cdot \text{Aint}$$

$$\dot{A}_{st} = 0.076 \quad \text{m}^2$$

Perímetro de la sección transversal:

$$P := 2 \cdot (\text{Lint} + \text{Aint})$$

$$P = 1.1 \quad \text{m}$$

Volumen interior de la cámara:

$$V_{int} := L_{int} \cdot A_{int} \cdot H_{int}$$

$$V_{int} = 0.026 \quad m^3$$

Diámetro hidráulico de la cámara:

$$D_h := \frac{4 \cdot \dot{A}_{st}}{P}$$

$$D_h = 0.275 \quad m$$

4.7.2 DETERMINACIÓN DE LOS COEFICIENTES DE TRANSFERENCIA DE CALOR

Para poder determinar los coeficientes de transferencia de calor presentes en la cámara de combustión es necesario conocer la conductividad térmica de cada uno de los elementos que componen las paredes de la cámara, es decir, elementos refractarios, aislantes, etc.

Conductividad térmica de cada uno de los elementos:

Manta de fibra cerámica⁷:

$$k_{fc} := 0.07 \quad \frac{W}{m \cdot K}$$

Placa refractaria⁸:

$$k_{pr} := 1.09 \quad \frac{W}{m \cdot K}$$

Tol de acero A-36⁹:

$$k_a := 43 \quad \frac{W}{m \cdot K}$$

⁷ C.I. SEALCO S.A. Manta de fibra cerámica, Ref. 4780

⁸ J.P. Holman, Transferencia de calor, Tabla A-3 Valores de propiedades de no metales, p.592

⁹ J.P. Holman, Transferencia de calor, Tabla A-2 Valores de propiedades para metales, p. 589

4.7.2.1 Coeficientes de transferencia de calor internos

Es importante determinar el valor de los coeficientes de transferencia de calor internos (convección y radiación), porque la transferencia de calor a través de un fluido es mucho mayor que por conducción.

4.7.2.1.1 Coeficiente de transferencia de calor por convección (**h_{icv}**)

Para determinar el valor del coeficiente de transferencia de calor por convección es necesario conocer la temperatura de la pared interna de la cámara y del fluido, para de esta manera determinar la temperatura de película interna, parámetro con el cual se determina las propiedades Termofísicas del fluido.

$$t_{pi} := 4 \cdot t_g - 2 \cdot t_{adiab} - t_{amb}$$

$$t_{pi} = 1.01 \times 10^3 \quad ^\circ\text{C} \quad \text{Temperatura de pared.}$$

$$T_{pi} := t_{pi} + 273$$

$$T_{pi} = 1.283 \times 10^3 \quad \text{K}$$

$$T_g = 1.223 \times 10^3 \quad \text{K} \quad \text{Temperatura al interior de la cámara de combustión.}$$

$$T_{fi} := \frac{T_{pi} + T_g}{2}$$

$$T_{fi} = 1.253 \times 10^3 \quad \text{K} \quad \text{Temperatura de película interna}$$

Tabla 4.7 Propiedades Termofísicas de los gases para (T=1253 K)

T (K)	ρ (kg/m ³)	C_p (kJ/kg·K)	$\mu \cdot 10^7$ (N·s/m ²)	$\nu \cdot 10^6$ (m ² /s)	$k \cdot 10^3$ (W/m·K)	$\alpha \cdot 10^6$ (m ² /s)	Pr
1200	0,290	1,175	473,00	162,90	76,30	224,00	0,728
1253	0,278	1,182	485,19	174,67	79,32	231,42	0,723
1300	0,268	1,189	496,00	185,10	82,00	238,00	0,719

Fuente: INCROPERA Frank, Fundamentos de Transferencia de Calor, p 839

Viscosidad cinemática

$$\nu := 174.67 \cdot 10^{-6} \frac{\text{m}^2}{\text{s}}$$

Conductividad térmica

$$K := 79.32 \cdot 10^{-3} \frac{\text{W}}{\text{m} \cdot \text{K}}$$

Número de Prandtl

$$\text{Pr} := 0.723$$

Determinación del número de Reynolds

$$r := 0.030 \quad \text{m} \quad \text{Radio interno de la toma del ventorol}$$

$$\text{RPM} := 1500 \quad \text{rpm} \quad \text{Revoluciones por minuto del ventorol}$$

Velocidad de flujo del aire que ingresa en la cámara

$$v_f := \text{RPM} \cdot \frac{1}{60} \cdot 2\pi \cdot r$$

$$v_f = 4.712 \quad \frac{\text{m}}{\text{s}} \quad \text{Velocidad de flujo del fluido}$$

$$\text{Re} := \frac{v_f \cdot D_h}{\nu}$$

$$\text{Re} = 7.419 \times 10^3 \quad \text{Número de Reynolds}$$

Determinación del número de Nusselt

Para determinar el número de Nusselt se considerara como longitud característica el diámetro hidráulico (D_{hid}).

$$\text{Nu} := 0.023 \cdot \text{Re}^{\frac{4}{5}} \cdot \text{Pr}^n \quad (4.7)$$

Consideraciones de uso:

- Esta correlación es válida para los rangos $0.7 < Pr < 120$; $2500 < Re < 1,24 \times 10^5$
- El exponente de Pr tiene el valor de $n=0.3$ cuando el fluido se enfría y $n=0.4$ cuando el fluido se calienta.
- Las propiedades físicas se deben evaluar a la temperatura del fluido.
- Se puede utilizar en condiciones de temperatura de pared y fluido de calor constante.

Verificación de las consideraciones de uso para poder aplicar el número de Nusselt, para el diseño el fluido se calienta por lo tanto:

$$n := 0.4 \qquad Pr = 0.721 \qquad Re = 7.156 \times 10^3$$
$$Nu = 25.215$$

Por lo tanto el valor del coeficiente de transferencia de calor por convección interna es:

$$h_{icv} := \frac{Nu \cdot K}{D_h}$$
$$h_{icv} = 7.273 \quad \frac{W}{m^2 \cdot K}$$

4.7.2.1.2 Coeficiente de transferencia de calor por radiación (**hir**)

La transferencia de calor mediante radiación térmica, es relevante para muchos procesos industriales de enfriamiento, calentamiento, etc., esta forma de transferencia de calor también puede provenir de líquidos o gases, siendo necesario para este diseño realizar los cálculos de este coeficiente considerando únicamente los gases productos de la combustión al CO_2 y H_2O (vapor de agua), ya que estos gases son los que permiten la transmisión de calor por radiación¹⁰.

¹⁰ Principios Elementales de los Procesos Químicos, Fólter Richard

La ecuación para determinar el coeficiente de transferencia de calor por radiación será:

$$h_{ir} := \sigma \cdot \epsilon_s \left[\frac{\epsilon_g \cdot (T_g)^4 - \alpha_g \cdot (T_{pi})^4}{(T_g - T_{pi})} \right] \quad (4.8)$$

Donde

σ : Constante de Stefan-Boltzmann

ϵ_s : Emisividad de la placa refractaria

ϵ_g : Emisividad del gas

α_g : Absortancia del gas

Para este diseño se va a considerar dos gases por lo tanto la emisividad y la absortancia total del gas será:

$$\epsilon_g := \epsilon_{CO_2} + \epsilon_{H_2O} - \Delta\epsilon$$

$$\alpha_g := \alpha_{CO_2} + \alpha_W - \Delta\alpha$$

Donde:

$\Delta\epsilon$: Factor de corrección de emisividad

$\Delta\alpha$: Factor de corrección de absortancia

Para determinar la emisividad de los dos gases se utilizarán las siguientes figuras¹¹.

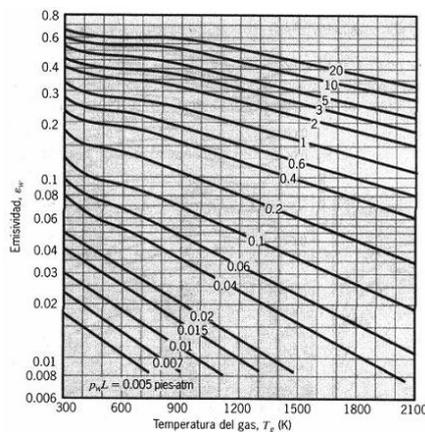


Figura 4.5 Emisividad de vapor de agua

¹¹ Frank P. Incropera, Fundamentos de transferencia de calor, pp. 751-753

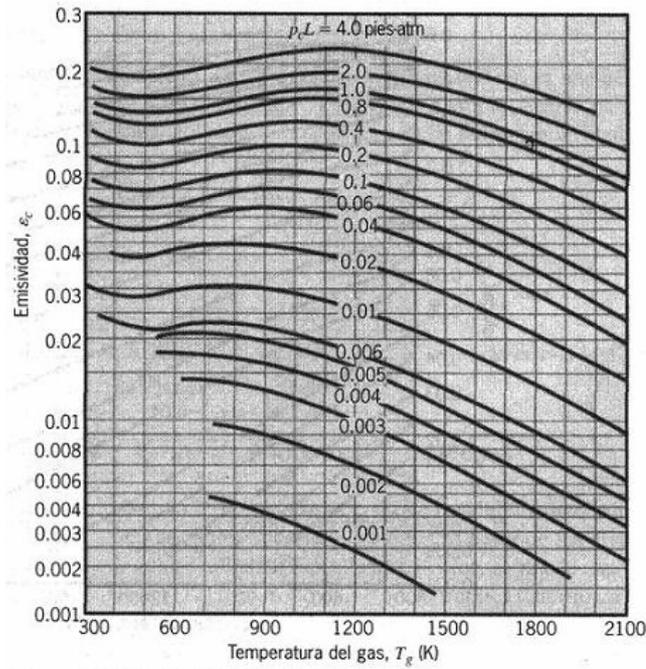


Figura 4.6 Emisividad de bióxido de carbono

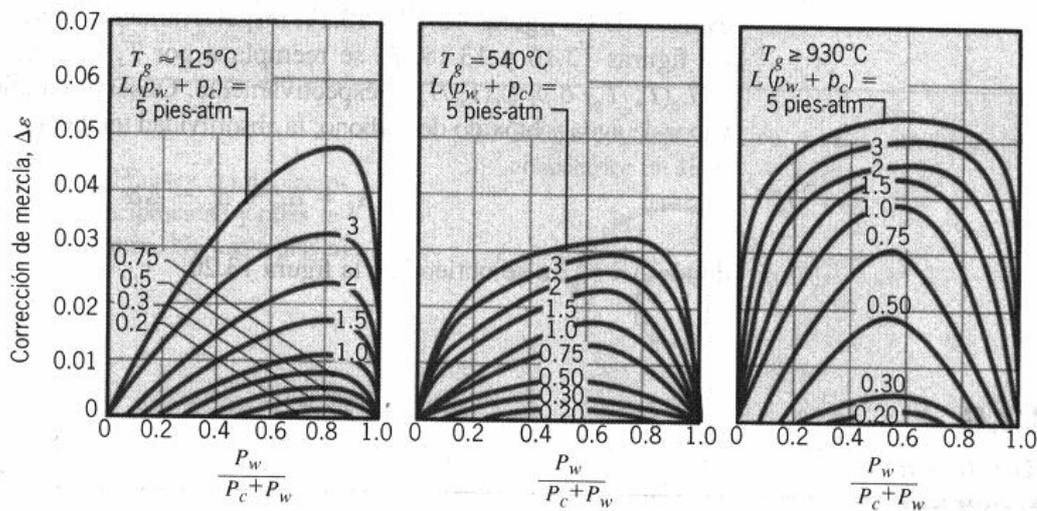


Figura 4.7 Factor de corrección asociado con mezclas de vapor de agua y bióxido de carbono

Para obtener la emisividad a partir de las graficas es necesario determinar los siguientes parámetros:

- Pw: Presión parcial del vapor de agua
- Pco2: Presión parcial del bióxido de carbono
- L: Longitud media del rayo en pies.

Determinación de la presión parcial del vapor de agua (P_w)

$P_{atm} := 0.72 \text{ atm}$ Presión atmosférica para la ciudad de Quito

$$x_{mw} := \frac{V_{H_2O}}{V_{gases}}$$

$x_{mw} = 0.081$ Fracción volumétrica del vapor de agua

$$P_w := x_{mw} \cdot P_{atm}$$

$P_w = 0.058 \text{ atm}$ Presión parcial del vapor de agua

Determinación de la presión parcial del bióxido de carbono (P_{CO_2})

$$x_{mCO_2} := \frac{V_{RO_2}}{V_{gases}}$$

$x_{mCO_2} = 0.09$ Fracción volumétrica del bióxido de carbono

$$P_{CO_2} := x_{mCO_2} \cdot P_{atm}$$

$P_{CO_2} = 0.065 \text{ atm}$ Presión parcial del bióxido de carbono

Cálculo de la longitud media del rayo (L_{rp})

Volumen interior de la cámara

$$V_{int} := L_{int} \cdot A_{int} \cdot H_{int}$$

$V_{int} = 0.026 \text{ m}^3$

Área de la superficie envolvente interior

$$A_{envol} := 4 \cdot \dot{A}_{pi} + (L_{int} + A_{int})$$

$A_{envol} = 0.935 \text{ m}^2$

$$L_r := 3.6 \left(\frac{V_{int}}{A_{envol}} \right)$$

$$L_r = 0.102 \quad \text{m}$$

$$L_{rp} := L_r \cdot 3.28$$

$$L_{rp} = 0.334 \quad \text{pies}$$

Determinación del factor (pL)

$$p_{Lco2} := L_{rp} \cdot P_{co2}$$

$$p_{Lco2} = 0.022 \quad \text{Pies-atm}$$

$$p_{wL} := L_{rp} \cdot P_w$$

$$p_{wL} = 0.019 \quad \text{Pies-atm}$$

$$T_g = 1.223 \times 10^3 \quad ^\circ\text{K}$$

$$\epsilon_{CO2} := 0.04$$

$$\epsilon_w := 0.014$$

Determinación del factor de corrección ($\Delta \epsilon$)

$$P_t := \frac{P_w}{P_{co2} + P_w}$$

$$P_t = 0.472 \quad \text{atm}$$

$$p_{Lt} := (P_{co2} + P_w) \cdot L_{rp}$$

$$p_{Lt} = 0.041 \quad \text{Pies-atm}$$

$$\Delta \epsilon := 0$$

Por lo tanto el valor de la emisividad de los gases es:

$$\epsilon_g := \epsilon_{CO2} + \epsilon_w - \Delta \epsilon$$

$$\epsilon_g = 0.054$$

Para determinar el valor de la absorptancia de los gases se utilizarán las siguientes graficas¹²:

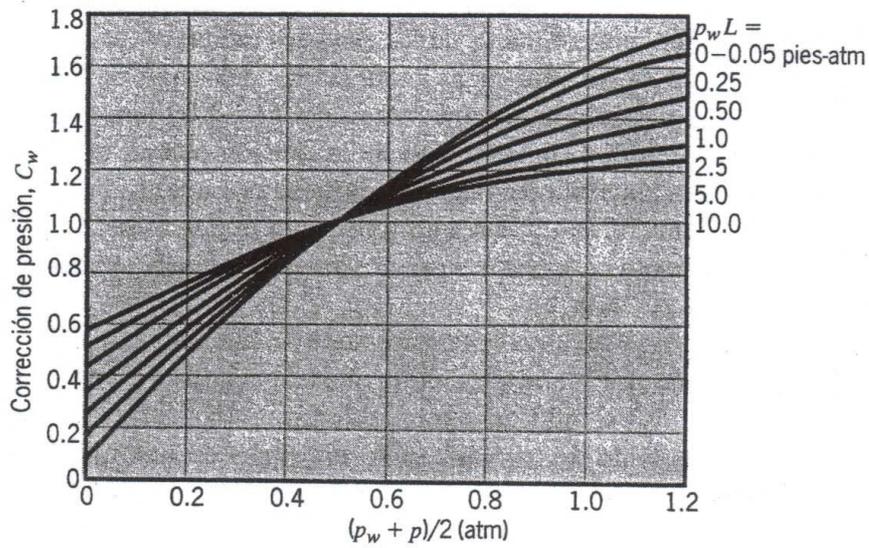


Figura 4.8 Factor de corrección para emisividad H₂O

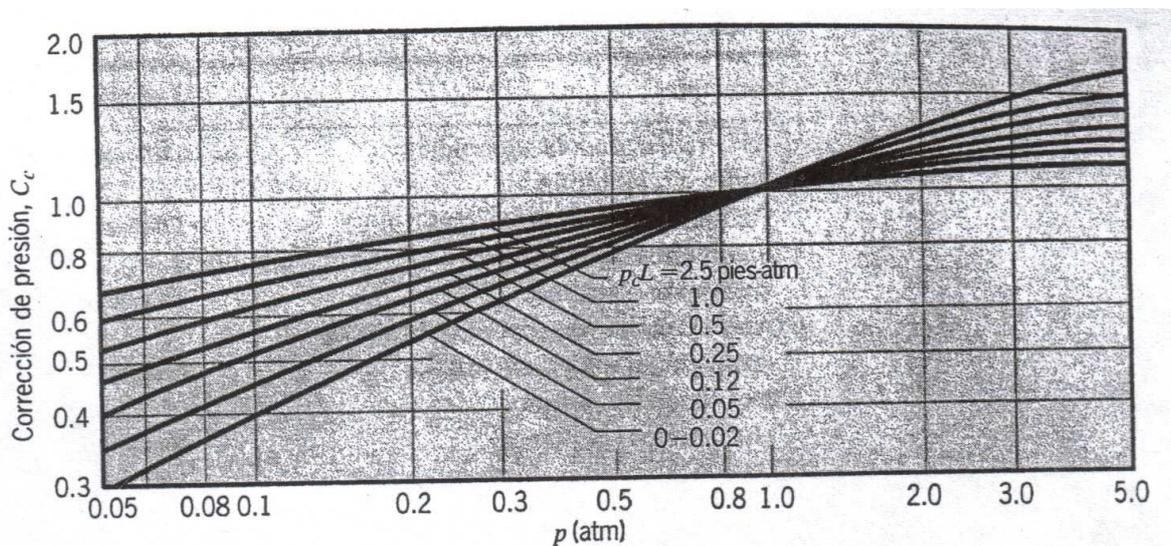


Figura 4.9 Factor de corrección para emisividad de CO₂

Para el vapor de agua

$$P := \frac{P_w + P_{atm}}{2}$$

$$P = 0.389 \quad \text{atm}$$

$$p_w L = 0.019 \quad \text{atm}$$

¹² Frank P. Incropera, Fundamentos de transferencia de calor, pp 752-753

$$C_W := 0.8$$

$$T_g = 1.223 \times 10^3 \quad \text{K} \quad T_{pi} = 1.283 \times 10^3 \quad \text{K}$$

$$\alpha_W := C_W \cdot \left(\frac{T_g}{T_{pi}} \right)^{0.45} \cdot \epsilon_W$$

$$\alpha_W = 0.011 \quad \text{Absortancia para el vapor de agua}$$

Para el bióxido de carbono

$$P_{atm} = 0.72 \quad \text{atm}$$

$$p_{LCO_2} = 0.022 \quad \text{atm}$$

$$C_C := 0.9$$

$$\alpha_{CO_2} := C_C \cdot \left(\frac{T_g}{T_{pi}} \right)^{0.65} \cdot \epsilon_{CO_2}$$

$$\alpha_{CO_2} = 0.035 \quad \text{Absortancia para el bióxido de carbono}$$

El factor de corrección para la absorción es igual a.

$$\Delta\alpha := \Delta\epsilon$$

$$\Delta\alpha = 0$$

El valor de absorción total es:

$$\alpha_g := \alpha_{CO_2} + \alpha_W - \Delta\alpha$$

$$\alpha_g = 0.046 \quad \text{Absortancia total}$$

Por lo tanto el valor del coeficiente de transferencia de calor por radiación interna es:

$$\epsilon_S := 0.75 \quad \text{Emisividad placa refractaria}$$

$$\sigma := 5.67 \cdot 10^{-8} \quad \frac{\text{W}}{\text{m} \cdot \text{K}^4} \quad \text{Constante de Stefan-Boltzmann}$$

$$h_{ir} := \sigma \cdot \varepsilon S \left[\frac{\varepsilon_g \cdot (T_g)^4 - \alpha_g \cdot (T_{pi})^4}{(T_g - T_{pi})} \right]$$

$$h_{ir} = 2.421 \quad \frac{W}{m^2 \cdot K} \quad \text{Coeficiente de radiación.}$$

4.7.2.1.3 Coeficiente total de transferencia de calor interno (**hi**)

$$h_i := h_{icv} + h_{ir}$$

$$h_i = 9.694 \quad \frac{W}{m^2 \cdot K}$$

4.7.2.2 Coeficientes de transferencia de calor externos

Para determinar estos coeficientes se debe señalar que se tiene convección natural, es decir, el movimiento del fluido es debido a causas naturales.

4.7.2.2.1 Coeficiente de transferencia de calor por convección (**hocv**)

Para determinar el valor del coeficiente de transferencia de calor por convección es necesario conocer la temperatura de la superficie exterior y la temperatura ambiente, para de esta manera determinar la temperatura de película externa, parámetro con el cual se determina las propiedades Termofísicas del fluido.

$$t_{po} := 50 \quad ^\circ\text{C} \quad \text{Temperatura de pared externa}$$

$$T_{po} := t_{po} + 273$$

$$T_{po} = 323 \quad K$$

$$T_{amb} := t_{amb} + 273$$

$$T_{amb} = 300 \quad K$$

$$T_{fo} := \frac{T_{po} + T_{amb}}{2}$$

$$T_{fo} = 311.5 \quad K \quad \text{Temperatura de película externa}$$

Tabla 4.8 Propiedades Termofísicas de los gases para (T=311,5 K)

T (K)	ρ (kg/m ³)	C_p (kJ/kg·K)	$\mu \cdot 10^7$ (N·s/m ²)	$\nu \cdot 10^6$ (m ² /s)	$k \cdot 10^3$ (W/m·K)	$\alpha \cdot 10^6$ (m ² /s)	Pr
300	1,161	1,007	184,60	15,89	26,30	22,50	0,707
311,5	1,123	1,007	190,03	17,05	27,11	24,20	0,705
350	0,995	1,009	208,20	20,92	30,00	29,90	0,700

Fuente: INCROPERA Frank, Fundamentos de Transferencia de Calor, p 839.

Viscosidad cinemática

$$\nu := 17.05 \cdot 10^{-6} \quad \frac{m^2}{s}$$

Conductividad térmica

$$k := 27.11 \cdot 10^{-3} \quad \frac{W}{m \cdot K}$$

Número de Prandtl

$$Pr := 0.705$$

Gravedad

$$g := 9.8 \quad \frac{m}{s^2}$$

Determinación del número de Grashof

El número de Grashof representa la relación existente entre las fuerzas de empuje y las fuerzas viscosas que actúan sobre el fluido, siendo un indicativo del régimen de flujo en convección natural¹³.

$$Gr := \frac{gr \cdot \beta \cdot (t_{po} - t_{amb}) \cdot H_{ext}^3}{\nu^2} \quad (4.9)$$

Donde:

Coefficiente de expansión volumétrica

$$\beta := \frac{1}{T_{fo}}$$

$$\beta = 3.21 \times 10^{-3} \quad \text{k}^{-1}$$

Longitud característica (longitud vertical de la pared)

$$H_{ext} = 0.35 \quad \text{m}$$

Por lo tanto el valor del número de Grashof es:

$$Gr = 1.067 \times 10^8$$

Determinación del número de Rayleigh

El número de Rayleigh es función del número de Grashof y del número de Prandtl, este parámetro se lo utiliza en convección natural.

$$Ra := Gr \cdot Pr$$

$$Ra = 7.524 \times 10^7$$

¹³ J.P.Holman, Transferencia de calor, ecuación (7-21), p.304

Determinación del número de Nusselt

En convección natural desde una superficie vertical, se puede emplear la correlación de Churchill y Chu¹⁴.

$$(4.10) \text{NuL} := \left[0.825 + \frac{0.387 \cdot \text{Ra}^{\frac{1}{6}}}{\left[1 + \left(\frac{0.492}{\text{Pr}} \right)^{\frac{9}{16}} \right]^{\frac{8}{27}}} \right]^2$$

Consideraciones de uso:

- Esta correlación es válida para los rangos $10^{-1} < \text{Ra} < 10^{12}$.
- La longitud característica (L) es la longitud vertical de la pared
- Las propiedades físicas se deben evaluar a la temperatura media de la pared y el medio ambiente.

Por lo tanto el valor del número de Nusselt es:

$$\text{NuL} = 56.058$$

El valor del coeficiente de transferencia de calor por convección externa es:

$$\text{hocv} := \frac{\text{NuL} \cdot K}{\text{Hext}}$$

$$\text{hocv} = 4.342 \quad \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \cdot \text{K}}$$

¹⁴ J.P.Holman, Transferencia de calor, ecuación (7-21), p.309

4.7.2.2.2 Coeficiente de transferencia de calor por radiación (**hor**)

Es importante determinar el valor del coeficiente de transferencia de calor por radiación externa, ya que este coeficiente va a depender directamente de las condiciones ambientales, las cuales varían constantemente.

$$T_{po} = 323 \quad K \quad \text{Temperatura de pared exterior}$$

$$T_{amb} = 300 \quad K$$

$$\varepsilon_a := 0.24 \quad \text{Emisividad acero A-36}$$

$$\sigma = 5.67 \times 10^{-8} \frac{W}{m^2 K^4} \quad \text{Constante de Stefan-Boltzmann}$$

$$hor := \varepsilon_a \cdot \sigma \cdot (T_{po} + T_{amb}) \cdot (T_{po}^2 + T_{amb}^2)$$

$$hor = 1.647 \quad \frac{W}{m^2 \cdot K}$$

Coeficiente total de transferencia de calor externo

$$ho := hocv + hor$$

$$ho = 5.99 \quad \frac{W}{m^2 \cdot K}$$

4.7.2.3 Coeficiente global de transferencia de calor

El valor de este coeficiente debe ser el menor posible, para de esta manera aprovechar al máximo el calor disponible en la cámara de combustión, para limitar el flujo de calor a través de las paredes de la cámara se ha dispuestos de material refractario, aislante térmico.

Resistencia térmica por conducción:

$$R_{\text{cond}} := \frac{e_{\text{pr}}}{k_{\text{pr}}} + \frac{e_{1a}}{k_a} + \frac{e_{1fc}}{k_{fc}} + \frac{e_{2a}}{k_a} + \frac{e_{2fc}}{k_{fc}} + \frac{e_{3a}}{k_a}$$

$$R_{\text{cond}} = 1.116 \quad \frac{\text{m}^2 \cdot \text{K}}{\text{W}}$$

Resistencia térmica por convección:

$$R_{\text{cov}} := \frac{1}{h_i} + \frac{1}{h_o}$$

$$R_{\text{cov}} = 0.27 \quad \frac{\text{m}^2 \cdot \text{K}}{\text{W}}$$

Resistencia térmica total:

$$R_{\text{total}} := R_{\text{cond}} + R_{\text{cov}}$$

$$R_{\text{total}} = 1.386 \quad \frac{\text{m}^2 \cdot \text{K}}{\text{W}}$$

Por lo tanto el calor perdido por la cámara de combustión es:

$$U := \frac{1}{R_{\text{total}}}$$

$$U = 0.721 \quad \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \cdot \text{K}} \quad \text{Coeficiente Global de Transferencia de Calor}$$

$$\dot{A} := 4\dot{A}_{\text{po}}$$

$$\dot{A} = 0.699 \quad \text{m}^2 \quad \text{Área de transferencia de calor.}$$

$$Q_{\text{pcam}} := U \cdot \dot{A} \cdot (T_g - T_{\text{amb}})$$

$$Q_{\text{pcam}} = 465.487 \quad \frac{\text{J}}{\text{seg}}$$

4.8 ANÁLISIS DEL INTERCAMBIADOR DE CALOR

Para poder determinar la cantidad de vapor que se puede generar por la combustión de desechos plásticos, se realizará el análisis con un intercambiador de calor en flujo paralelo¹⁵.

Para realizar el análisis del intercambiador de calor se empleara el método llamado efectividad-NTU (NTU= número de unidades de transferencia), ya que no se conoce la temperatura de salida tanto del fluido caliente (gases de combustión), así como del fluido frío (agua potable).

4.8.1 Geometría del intercambiador de calor

$\phi_{ext} := 25.4 \cdot 10^{-3}$	m	Diámetro exterior de los tubos
$e_{tubo} := 1.5 \cdot 10^{-3}$	m	Espesor de los tubos
$\phi_{int} := \phi_{ext} - 2e_{tubo}$		
$\phi_{int} = 0.022$	m	Diámetro interior de los tubos
$n_h := 8$		Número de hileras de alto.
$n_p := 5$		Número de hileras de profundidad
$L_{tubo} := 3$	m	Longitud de cada tubo.
$S_p := 110 \cdot 10^{-3}$	m	Distancia horizontal entre tubos.
$S_n := 140 \cdot 10^{-3}$	m	Distancia vertical entre tubos.
$N_{tubos} := n_h \cdot n_p$		
$N_{tubos} = 40$		Número total de tubos

¹⁵ Paredes, E; Gallardo, P; Tesis de grado: Diseño y construcción de un sistema de combustión con capacidad de 10 kw. para caracterización térmica de biomasa residual. DECEM, ESPE

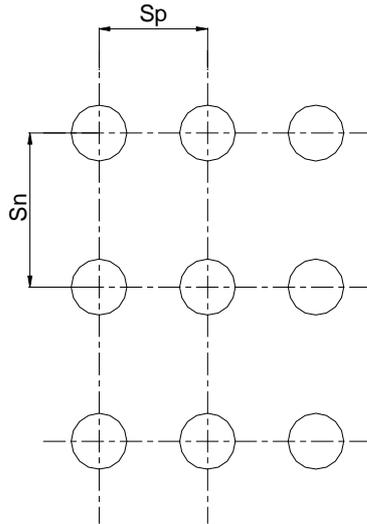


Figura 4.10 Disposición del banco de tubos

Dimensiones:

$$A_{ic} := 409.45 \cdot 10^{-3} \quad \text{m}$$

$$L_{ic} := 480 \cdot 10^{-3} \quad \text{m}$$

$$H_{ic} := 1126 \cdot 10^{-3} \quad \text{m}$$

$$e_{ic} := 2 \cdot 10^{-3} \quad \text{m} \quad \text{Espesor de las paredes del IC}$$

$$\dot{A} := 2 \cdot (H_{ic} \cdot L_{ic}) + 2 \cdot (H_{ic} \cdot A_{ic})$$

$$\dot{A} = 2.003 \quad \text{m}^2 \quad \text{Área de transferencia de calor para el IC.}$$

Propiedades del fluido frío a la entrada del intercambiador

$$t_{c1} := 22 \quad ^\circ\text{C} \quad \text{Temperatura de entrada al IC del fluido frío}$$

$$\rho_c := 997.61 \quad \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \quad \text{Densidad del fluido frío}$$

$$c_{pc} := 4.182 \quad \frac{\text{kJ}}{\text{kg}^\circ\text{C}} \quad \text{Calor específico fluido frío}$$

Propiedades del fluido caliente a la entrada del intercambiador

$th1 := 800$ °C Temperatura de entrada al IC del fluido caliente

$\rho_h := 0.319$ $\frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$ Densidad del fluido caliente

$c_{ph} := 1.157$ $\frac{\text{kJ}}{\text{kg}^\circ\text{C}}$ Calor específico fluido caliente

4.8.2 DETERMINACIÓN DE LAS TEMPERATURAS DE SALIDA DE LOS FLUIDOS FRÍO Y CALIENTE

4.8.2.1 Determinación de la capacidad calorífica de los fluidos

Para el fluido frío (agua potable):

$Q_c := 1 \cdot 10^{-4}$ $\frac{\text{m}^3}{\text{seg}}$ Caudal del fluido frío

$m_c := Q_c \cdot \rho_c$

$m_c = 0.1$ $\frac{\text{kg}}{\text{seg}}$ Flujo de masa del fluido frío

$C_c := m_c \cdot c_{pc}$

$C_c = 0.417$ $\frac{\text{kJ}}{\text{seg}^\circ\text{C}}$ Capacidad calorífica del fluido frío

Para el fluido caliente (gases de combustión)

$$u_h := 3 \quad \frac{\text{m}}{\text{s}} \quad \text{Velocidad de los gases}$$

$$L_{\text{paso}} := 0.20 \quad \text{m} \quad \text{Longitud del paso de los tubos del IC}$$

$$m_h := \rho_h \cdot u_h \cdot S_p \cdot n_p \cdot L_{\text{paso}}$$

$$m_h = 0.105 \quad \frac{\text{kg}}{\text{seg}} \quad \text{Flujo de masa del fluido caliente}$$

$$C_h := m_h \cdot c_{ph}$$

$$C_h = 0.122 \quad \frac{\text{kJ}}{\text{seg}^\circ\text{C}} \quad \text{Capacidad calorífica del fluido caliente}$$

4.8.2.2 Determinación de la razón máxima de transferencia de calor

Para determinar la razón máxima de transferencia de calor es necesario conocer cual de los dos fluidos posee la capacidad calorífica menor, ya que este experimentara la diferencia máxima de temperatura.

$$C_{\text{min}} := C_h$$

$$C_{\text{min}} = 0.122 \quad \frac{\text{kJ}}{\text{seg}^\circ\text{C}} \quad \text{Capacidad calorífica mínima}$$

$$Q_{\text{max}} := C_{\text{min}} \cdot (t_{h1} - t_{c1})$$

$$Q_{\text{max}} = 94.758 \quad \frac{\text{kJ}}{\text{seg}} \quad \text{Razón máxima de transferencia de calor}$$

4.8.2.3 Temperaturas de salida de los fluidos frío y caliente

$$\epsilon_1 := 0.55 \quad \text{Efectividad del intercambiador}$$

$$Q := \epsilon_1 \cdot Q_{\text{max}}$$

$$Q = 52.117 \quad \frac{\text{kJ}}{\text{seg}} \quad \text{Razón de transferencia de calor real}$$

$$tc2 := tc1 + \frac{Q}{Cc}$$

$$tc2 = 146.921 \quad ^\circ\text{C} \quad \text{Temperatura de salida del fluido frío}$$

$$th2 := th1 - \frac{Q}{Ch}$$

$$th2 = 372.1 \quad ^\circ\text{C} \quad \text{Temperatura de salida del fluido caliente}$$

4.8.3 CONVECCIÓN INTERNA

Coefficiente de transferencia de calor por convección interna.

Para determinar el coeficiente de transferencia de calor por convección interna es necesario conocer las propiedades termofísicas de los gases de combustión, las cuales se considerarán iguales a las propiedades termofísicas del aire a presión atmosférica, ya que el volumen de los gases esta compuesto en su mayoría por oxígeno y nitrógeno provenientes del aire que fue suministrado en la cámara de combustión.

$$Th2 := th2 + 273$$

$$Th2 = 645.1 \quad \text{K}$$

$$Th1 := th1 + 273$$

$$Th1 = 1.073 \times 10^3 \quad \text{K}$$

$$T_{mg} := \frac{Th1 + Th2}{2}$$

$$T_{mg} = 859.05 \quad \text{K} \quad \text{Temperatura media volumétrica para gases.}$$

Tabla 4.9 Propiedades Termofísicas de los gases para (T= 859.1 K)

T (K)	ρ (kg/m ³)	C_p (kJ/kg·K)	$\mu \cdot 10^5$ (kg/m·s)	$\nu \cdot 10^6$ (m ² /s)	$k \cdot 10^3$ (W/m·K)	$\alpha \cdot 10^6$ (m ² /s)	Pr
850	0,415	1,110	3,77	90,75	0,060	1,310	0,692
859,1	0,411	1,112	3,79	92,30	0,061	1,331	0,693
900	0,393	1,121	3,90	99,30	0,063	1,427	0,696

Fuente: J.P. Holman, Transferencia de Calor.p 596

Densidad

$$\rho := 0.411 \quad \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

Calor específico

$$c_p := 1.112 \quad \frac{\text{kJ}}{\text{kg} \cdot \text{K}}$$

Viscosidad Dinámica

$$\mu := 3.79 \cdot 10^{-5} \quad \frac{\text{kg}}{\text{m} \cdot \text{s}}$$

Viscosidad Cinemática

$$\nu := 92.30 \cdot 10^{-6} \quad \frac{\text{m}^2}{\text{s}}$$

Conductividad Térmica

$$K := 60.7 \cdot 10^{-3} \quad \frac{\text{W}}{\text{m} \cdot ^\circ\text{C}}$$

Número de Prandtl

$$\text{Pr} := 0.693$$

Determinación del Número de Reynolds

Para determinar el número de Reynolds es necesario determinar la velocidad máxima del fluido:

$$u_h = 3 \quad \frac{\text{m}}{\text{s}} \quad \text{Velocidad de los gases}$$

$$u_{\text{máx}} := u_h \cdot \frac{S_n}{S_n - \phi_{\text{ext}}}$$

$$u_{\text{máx}} = 3.665 \quad \frac{\text{m}}{\text{s}} \quad \text{Velocidad máxima}$$

$$Re := \frac{\rho \cdot u_{\text{máx}} \cdot \phi_{\text{ext}}}{\mu}$$

$$Re = 1.009 \times 10^3 \quad \text{Número del Reynolds}$$

Por lo tanto el coeficiente de transferencia de calor por convección interna se determinará a partir de la siguiente ecuación¹⁶:

$$h_{icv} := K \cdot \frac{Cf \cdot (Re)^{n_f} \cdot Pr^{\frac{1}{3}}}{\phi_{\text{ext}}} \quad (4.11)$$

Para $40 < Re < 4000$, los coeficientes de Cf y n_f son iguales a:

$$Cf := 0.683$$

J.P.Holman, Transferencia de calor, tabla 6-2, p.275

$$n_f := 0.466$$

$$h_{icv} = 36.274 \quad \frac{W}{m^2 \cdot ^\circ C}$$

Coeficiente de transferencia de calor por radiación interna (h_{ir})

Para determinar el valor de este coeficiente es necesario conocer la temperatura de pared del intercambiador de calor, la temperatura media volumétrica de los gases:

$$t_{po} := 200 \quad ^\circ C \quad \text{Temperatura de pared externa del IC}$$

$$t_{pi} := \frac{t_{po} + \frac{th_1 + th_2}{2}}{2}$$

$$t_{pi} = 393.025 \quad ^\circ C \quad \text{Temperatura de pared}$$

¹⁶ J.P.Holman, Transferencia de calor, ecuación (6-17), p.275

$$T_{pi} := t_{pi} + 273$$

$$T_{pi} = 666.025 \quad K$$

$$T_{mg} = 859.05 \quad K \quad \text{Temperatura media volumétrica de los gases en el IC}$$

El procedimiento para determinar el coeficiente de transferencia de calor por radiación interna de los gases de combustión en el intercambiador de calor, será el mismo que se aplicó para determinar el valor del coeficiente de transferencia de calor por radiación interna de la cámara de combustión.

Para esto se asumirá que el valor de la presión parcial del vapor de agua y del bióxido de carbono es la misma:

$$P_w = 0.058 \quad \text{atm} \quad \text{Presión parcial del vapor de agua}$$

$$P_{co2} = 0.065 \quad \text{atm} \quad \text{Presión parcial del bióxido de carbono}$$

Cálculo de la longitud media del rayo (L_{rp})

Volumen interior del Intercambiador de calor

$$V_{int} := L_{ic} \cdot A_{ic} \cdot H_{ic}$$

$$V_{int} = 0.221 \quad m^3$$

Área de la superficie envolvente interior

$$A_{envol} := A$$

$$A_{envol} = 2.003 \quad m^2$$

$$L_r := 3.6 \left(\frac{V_{int}}{A_{envol}} \right)$$

$$L_r = 0.398 \quad m$$

$$L_{rp} := L_r \cdot 3.28$$

$$L_{rp} = 1.305 \quad \text{pies}$$

Determinación del factor (p_L)

$$p_{LCO_2} := L_{rp} \cdot P_{CO_2}$$

$$p_{LCO_2} = 0.085 \quad \text{Pies-atm}$$

$$p_{wL} := L_{rp} \cdot P_w$$

$$p_{wL} = 0.076 \quad \text{Pies-atm}$$

Obtenidos los valores de p_{wL} y p_{LCO_2} ingresamos a las graficas (Figura 4.5 y Figura 4.6) para de esta manera determinar los valores de las emisividades del vapor de agua y del bióxido de carbono los cuales son:

$$T_{mg} = 859.05 \quad K \quad \text{Temperatura de los gases}$$

$$\varepsilon_{CO_2} := 0.07 \quad \text{Emisividad del bióxido de carbono}$$

$$\varepsilon_w := 0.07 \quad \text{Emisividad del vapor de agua}$$

Utilizando la grafica de la Figura 4.7 determinaremos el valor del coeficiente de corrección de la emisividad de los gases.

$$P_t := \frac{P_w}{P_{CO_2} + P_w}$$

$$P_t = 0.472$$

$$p_{Lt} := L_{rp} \cdot (P_{CO_2} + P_w)$$

$$p_{Lt} = 0.161 \quad \text{Pies-atm}$$

$$\Delta \varepsilon := 0.01$$

Siendo el valor de la emisividad de los gases igual a:

$$\varepsilon_g := \varepsilon_{CO_2} + \varepsilon_w - \Delta \varepsilon$$

$$\varepsilon_g = 0.13$$

Para determinar el valor de la absorptancia de los gases se utilizarán las siguientes graficas¹⁷:

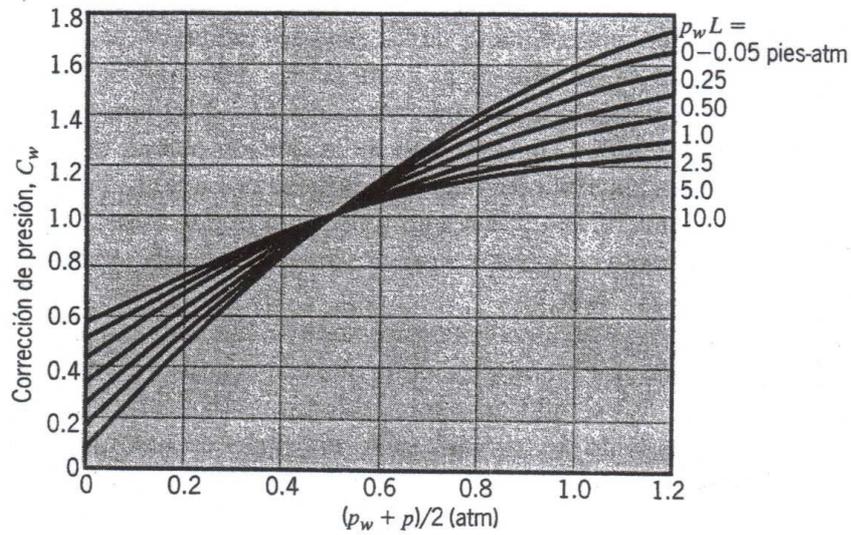


Figura 4.11 Factor de corrección para emisividad H₂O

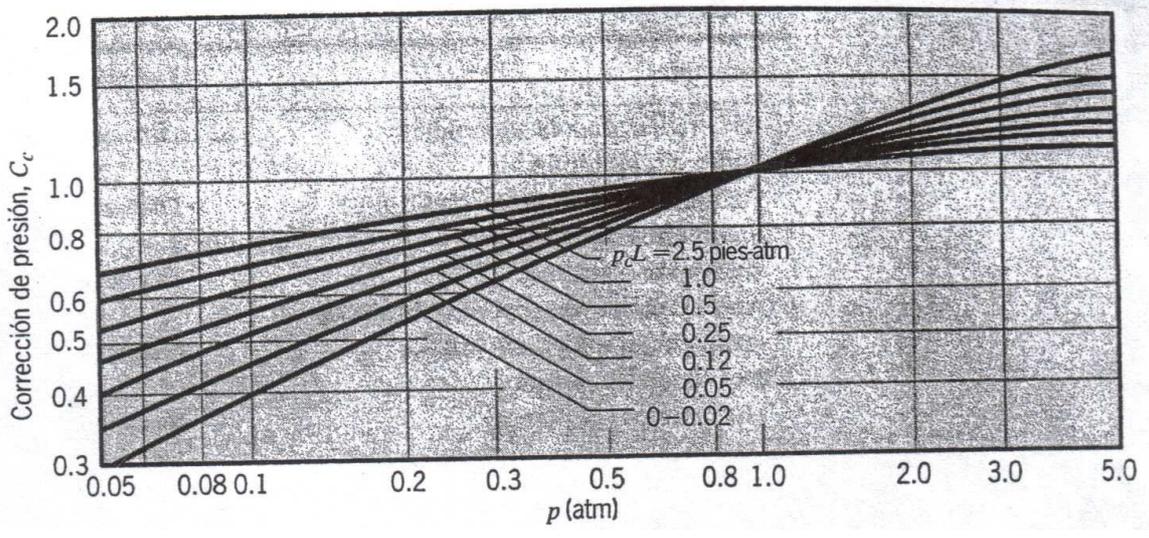


Figura 4.12 Factor de corrección para emisividad de CO₂

Para el vapor de agua

$$P_{ab} := \frac{P_w + P_{atm}}{2}$$

$$P_{ab} = 0.389 \text{ atm}$$

$$p_w L = 0.076 \text{ atm}$$

¹⁷ Frank P. Incropera, Fundamentos de transferencia de calor, pp 752-753

$$C_w := 0.8$$

$$\alpha_w := C_w \cdot \left(\frac{T_{mg}}{T_{h2}} \right)^{0.45} \cdot \varepsilon_w$$

$$\alpha_w = 0.064 \quad \text{Absortancia del vapor de agua}$$

Para el bióxido de carbono

$$P_{atm} = 0.72 \quad \text{atm}$$

$$p_{Lco2} = 0.085 \quad \text{atm}$$

$$C_c := 0.9$$

$$\alpha_{CO2} := C_c \cdot \left(\frac{T_{mg}}{T_{h2}} \right)^{0.65} \cdot \varepsilon_{CO2}$$

$$\alpha_{CO2} = 0.076 \quad \text{Absortancia del bióxido de carbono}$$

$$\Delta\alpha := \Delta\varepsilon$$

$$\Delta\alpha = 0.01$$

$$\alpha_g := \alpha_{CO2} + \alpha_w - \Delta\alpha$$

$$\alpha_g = 0.13 \quad \text{Absortancia total}$$

Por lo tanto el valor del coeficiente de transferencia de calor por radiación interna es igual a:

$$\sigma = 5.67 \times 10^{-8} \quad \frac{W}{m \cdot K^4} \quad \text{Constante de Stefan Boltzmann}$$

$$\varepsilon_a = 0.24 \quad \text{Emisividad del acero}$$

$$h_{ir} := \sigma \cdot \varepsilon_a \left[\frac{\varepsilon_g \cdot (T_{mg})^4 - \alpha_g \cdot (T_{pi})^4}{(T_{mg} - T_{pi})} \right]$$

$$h_{ir} = 3.193 \quad \frac{W}{m^2 \cdot K}$$

Coefficiente total de transferencia de calor por convección interna igual a:

$$h_i := h_{ir} + h_{icv}$$

$$h_i = 39.468 \quad \frac{W}{m^2 \cdot K}$$

4.8.4 CONVECCIÓN EXTERNA

Coefficiente de transferencia de calor por convección externa

$$T_{amb} = 300 \quad K$$

$$t_{po} = 200 \quad ^\circ C \quad \text{Temperatura de la pared exterior del IC}$$

$$T_{po} := t_{po} + 273$$

$$T_{po} = 473 \quad K$$

$$T_{fo} := \frac{T_{po} + T_{amb}}{2}$$

$$T_{fo} = 386.5 \quad K \quad \text{Temperatura de película externa}$$

Tabla 4.10 Propiedades Termofísicas de los gases para (T = 386,5 K)

T (K)	ρ (kg/m ³)	C_p (kJ/kg·K)	$\mu \cdot 10^5$ (kg/m·s)	$\nu \cdot 10^6$ (m ² /s)	$k \cdot 10^3$ (W/m·K)	$\alpha \cdot 10^6$ (m ² /s)	Pr
350	0,998	1,009	2,08	20,76	0,0300	0,298	0,697
386,5	0,914	1,013	2,23	24,51	0,0327	0,355	0,691
400	0,883	1,014	2,29	25,90	0,0337	0,376	0,689

Fuente: J.P. Holman, Transferencia de Calor. p 596

Viscosidad cinemática

$$\nu := 24.51 \cdot 10^{-6} \quad \frac{m^2}{s}$$

Conductividad térmica

$$K := 32.7 \cdot 10^{-3} \quad \frac{W}{m \cdot K}$$

Número de Prandtl

$$Pr := 0.691$$

Gravedad

$$gr = 9.8 \quad \frac{m}{s^2}$$

Coefficiente de expansión volumétrica

$$\beta := \frac{1}{T_{fo}}$$

$$\beta = 2.587 \times 10^{-3} \quad k^{-1}$$

Longitud característica (longitud vertical de la pared)

$$H_{ic} = 1.126 \quad m$$

Número de GRASHOF

El número de Grashof representa la relación existente entre las fuerzas de empuje y las fuerzas viscosas que actúan sobre el fluido, siendo un indicativo del régimen de flujo en convección natural.

$$Gr := \frac{gr \cdot \beta \cdot (t_{po} - t_{amb}) \cdot H_{ic}^3}{\nu^2}$$

$$Gr = 1.042 \times 10^{10}$$

Número de RAYLEIGH

El número de Rayleigh es función del número de Grashof y del número de Prandtl, este parámetro se lo utiliza en convección natural.

$$Ra := Gr \cdot Pr$$

$$Ra = 7.203 \times 10^9$$

Determinación del número de Nusselt

En convección natural desde una superficie vertical, se puede emplear la correlación de Churchill y Chu¹⁸.

Consideraciones de uso:

- Esta correlación es válida para los rangos $0.1 < Ra < 10^{12}$.
- La longitud característica (L) es la longitud vertical de la pared
- Las propiedades físicas se deben evaluar a la temperatura media de la pared y el ambiente.

$$NuL := \left[0.825 + \frac{0.387 \cdot Ra^{\frac{1}{6}}}{\left[1 + \left(\frac{0.492}{Pr} \right)^{\frac{9}{16}} \right]^{\frac{8}{27}}} \right]^2$$

$$NuL = 226.594$$

Coefficiente de transferencia de calor por convección externa igual a:

$$hocv := \frac{NuL \cdot K}{Hic}$$

$$hocv = 6.58 \quad \frac{W}{m^2 \cdot K}$$

Coefficiente de transferencia de calor por radiación externa

$$T_{po} = 473 \quad K \quad \text{Temperatura de pared exterior}$$

$$\epsilon_a = 0.24 \quad \text{Emisividad acero A-36}$$

$$hor := \epsilon_a \cdot \sigma \cdot (T_{po} + T_{amb}) \cdot (T_{po}^2 + T_{amb}^2)$$

$$hor = 3.3 \quad \frac{W}{m^2 \cdot K}$$

¹⁸ J.P.Holman, Transferencia de calor. p.309

Coeficiente total de transferencia de calor por convección externa

$$h_o := h_{ocv} + h_{or}$$

$$h_o = 9.881 \quad \frac{W}{m^2 \cdot K}$$

4.8.5 CALOR PERDIDO POR EL INTERCAMBIADOR DE CALOR

Resistencia térmica por conducción:

$$R_{cond} := \frac{e_a}{K_a}$$
$$R_{cond} = 4.651 \times 10^{-5} \quad \frac{m^2 \cdot K}{W}$$

Resistencia térmica por convección

$$R_{cov} := \frac{1}{h_i} + \frac{1}{h_o}$$
$$R_{cov} = 0.127 \quad \frac{m^2 \cdot K}{W}$$

Resistencia total

$$R_{total} := R_{cond} + R_{cov}$$

$$R_{total} = 0.127 \quad \frac{m^2 \cdot K}{W} \quad \text{Resistencia total}$$

Calor perdido por el intercambiador de calor

$$U := \frac{1}{R_{total}}$$

$$U = 7.899 \quad \frac{W}{m^2 \cdot K} \quad \text{Coeficiente global de transferencia de calor}$$

$$\dot{A} = 2.003 \quad m^2 \quad \text{Área de transferencia de calor para el IC.}$$

$$Q_{pIC} := U \cdot \dot{A} \cdot (T_{mg} - T_{amb})$$

$$Q_{pIC} = 8.846 \times 10^3 \quad \frac{J}{seg}$$

4.9 DISEÑO DE LA CHIMENEA

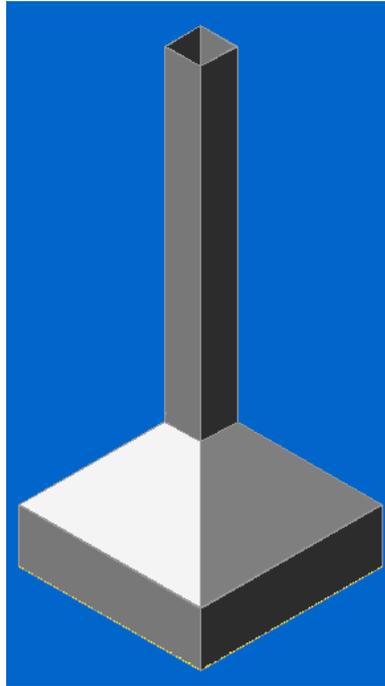


Figura 4.13 Esquema de la chimenea

Para determinar la altura de la chimenea se utilizara la siguiente ecuación¹⁹:

$$H_c := \frac{\Delta p + \zeta \cdot \frac{\omega_g^2 \cdot \rho}{2} \cdot (1 + \beta \cdot tsch)}{gr \cdot \left(\frac{\rho_{ar}}{1 + \beta \cdot tamb} - \frac{\rho}{1 + \beta \cdot tmg} \right) - \frac{\lambda}{3 \cdot Dh} \cdot \left(\frac{\omega_g^2 \cdot \rho}{2} \right) (1 + \beta \cdot tmg)} \quad (4.12)$$

Donde:

Δp - Tiro térmico

ζ - coeficiente de resistencia localizada en la salida de la chimenea, $\zeta = 1.06$

ω_g - velocidad de los gases en la salida de la chimenea, en m/s

$tsch$ - Temperatura de los gases a la salida de la chimenea, en °C

tmg - Temperatura media de los gases, en °C.

λ - coeficiente de rozamiento en la pared interna de la chimenea

Dh - Diámetro de la chimenea en la salida, en m.

¹⁹ Dmitri Vlassov, Combustible, combustión y cámaras de combustión. p.170

4.9.1 DETERMINACIÓN DE LA ALTURA DE LA CHIMENEA

Para encontrar el tiro térmico de la chimenea se necesita conocer el valor de la altura de la chimenea, pero este es el parámetro que estamos calculando por tal motivo se realizará un proceso de aproximación, está cuando el último valor calculado de la altura de la chimenea no presente una diferencia mayor al 10 % del penúltimo valor.

Geometría de la chimenea

$$A_{ch} := 15 \cdot 10^{-3} \quad \text{m} \quad \text{Ancho de la chimenea}$$

$$L_{ch} := 15 \cdot 10^{-3} \quad \text{m} \quad \text{Largo de la chimenea}$$

$$\dot{A}_{st} := L_{ch} \cdot A_{ch}$$

$$\dot{A}_{st} = 2.25 \times 10^{-4} \quad \text{m}^2 \quad \text{Sección transversal de la chimenea}$$

Composición volumétrica de los gases

Cálculo de los productos de combustión completa sin exceso de aire ($\alpha=1$)

$$V_{RO_2} := 0.01866(Ct + 0.375St) \quad \text{Volumen de los gases triatómicos}$$

$$V_{RO_2} = 1.108 \quad \frac{\text{m}^3}{\text{kg}}$$

$$V_{O_2} := 0.21(\alpha - 1) \cdot V_{artamb}$$

$$V_{O_2} = 0 \quad \frac{\text{m}^3}{\text{kg}} \quad \text{Volumen de oxígeno}$$

$$V_{N_2} := 0.008Nt + 0.79 \cdot V_{artamb}$$

$$V_{N_2} = 5.671 \quad \frac{\text{m}^3}{\text{kg}} \quad \text{Volumen de nitrógeno}$$

$$V_{H_2O} := 0.111Ht + 0.0124Wt + 0.0161 \cdot V_{artamb}$$

$$V_{H_2O} = 0.919 \quad \frac{\text{m}^3}{\text{kg}} \quad \text{Volumen del vapor de agua}$$

Volumen total de los productos de combustión neutra

$$V_{\text{gases}} := V_{\text{RO}_2} + V_{\text{H}_2\text{O}} + V_{\text{O}_2} + V_{\text{N}_2}$$

$$V_{\text{gases}} = 7.699 \quad \frac{\text{m}^3}{\text{kg}}$$

Determinación de la composición volumétrica de los gases

$$\text{CO}_2 := \frac{V_{\text{RO}_2}}{V_{\text{gases}}} \cdot 100 \quad \text{H}_2\text{O} := \frac{V_{\text{H}_2\text{O}}}{V_{\text{gases}}} \cdot 100 \quad \text{N}_2 := \frac{V_{\text{N}_2}}{V_{\text{gases}}} \cdot 100$$

$$\text{CO}_2 = 14.396 \quad (\%) \quad \text{H}_2\text{O} = 11.939 \quad (\%) \quad \text{N}_2 = 73.665 \quad (\%)$$

Densidad de gases estequiométricos a temperatura de 0 °C

$$\rho_0 := \frac{44 \cdot \text{CO}_2 + 18 \cdot \text{H}_2\text{O} + 28 \cdot \text{N}_2}{22.4 \cdot 100}$$

$$\rho_0 = 1.3 \quad \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \quad \text{Densidad de los gases sin exceso de aire}$$

$$\rho_{\text{ar}} = 1.177 \quad \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \quad \text{Densidad del aire}$$

$$t_{\text{sch}} := 250 \quad ^\circ\text{C} \quad \text{Temperatura a la salida de la chimenea}$$

$$t_{\text{h2}} := 372.1 \quad ^\circ\text{C} \quad \text{Temperatura a la salida del IC}$$

$$t_{\text{mg}} := \frac{t_{\text{sch}} + t_{\text{h2}}}{2}$$

$$t_{\text{mg}} = 311.05 \quad ^\circ\text{C}$$

$$T_{\text{mg}} := t_{\text{mg}} + 273$$

$$T_{\text{mg}} = 584.05 \quad \text{K} \quad \text{Temperatura media volumétrica}$$

Tabla 4.11 Propiedades Termofísicas de los gases para (T=584.1 K)

T (K)	ρ (kg/m ³)	C_p (kJ/kg°C)	$\mu \cdot 10^5$ (kg/m*s)	$\nu \cdot 10^6$ (m ² /s)	$k \cdot 10^3$ (W/m*K)	$\alpha \cdot 10^6$ (m ² /s)	Pr
550	0,633	1,040	288,40	45,57	43,90	66,70	0,683
584,1	0,597	1,047	300,25	50,42	45,94	73,65	0,684
600	0,580	1,051	305,80	52,69	46,90	76,90	0,685

Fuente: J.P. Holman, Transferencia de Calor. p 596

Densidad

$$\rho := 0.605 \quad \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

Calor específico

$$c_p := 1.050 \quad \frac{\text{kJ}}{\text{kg} \cdot \text{K}}$$

Viscosidad cinemática

$$\nu := 49.11 \cdot 10^{-6} \quad \frac{\text{m}^2}{\text{s}}$$

Gravedad

$$g := 9.8 \quad \frac{\text{m}}{\text{s}^2}$$

$$\beta := \frac{1}{273} \quad \text{K}^{-1}$$

Coefficiente de expansión volumétrica

$$P_{\text{atm}} := 720 \quad \text{mmHg}$$

$$\omega_g := 2 \quad \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

Velocidad de los gases a la salida de la chimenea

$$\omega_{gt} := \omega_g \cdot (1 + \beta \cdot t_{mg})$$

$$\omega_{gt} = 4.279$$

Velocidad de los gases a $t_{mg} = 311.0^\circ\text{C}$

$$D_{h1} := \frac{4 \cdot (L_{\text{ext}} \cdot A_{\text{ext}})}{2(L_{\text{ext}} + A_{\text{ext}})}$$

$$D_{h1} = 0.409 \quad \text{m}$$

$$\text{Reg} := \frac{\omega_{gt} \cdot D_{h1}}{\nu}$$

$$\text{Reg} = 3.561 \times 10^4$$

$A_c := 57$ Coeficiente que depende de la forma de la chimenea

$$\lambda := \frac{A_c}{\text{Reg}}$$

$\lambda = 1.601 \times 10^{-3}$ Coeficiente de rozamiento

$$D_h := \frac{4 \cdot \dot{A}_{st}}{2 \cdot (L_{ch} + A_{ch})}$$

$D_h = 0.015$ Diámetro hidráulico de la chimenea

$H_{ch} := 1.5 \text{ m}$ Dato para realizar las aproximaciones

$$\Delta p := H_{ch} \cdot g \cdot (\rho_{ar} - \rho)$$

$\Delta p = 8.408 \text{ Pa}$ Tiro Térmico

$$H_c := \frac{\Delta p + \zeta \cdot \frac{\omega g^2 \rho}{2} \cdot (1 + \beta \cdot tsch)}{g \cdot \left(\frac{\rho_{ar}}{1 + \beta \cdot tamb} - \frac{\rho}{1 + \beta \cdot tmg} \right) - \frac{\lambda}{3 \cdot D_h} \cdot \left(\frac{\omega g^2 \rho}{2} \right) (1 + \beta \cdot tmg)}$$

$H_c = 1.423 \text{ m}$

4.9.2 CALOR PERDIDO POR LA CHIMENEA

Para determinar el calor perdido por la chimenea es necesario determinar el flujo de masa en función de la temperatura media volumétrica de los gases.

$$m_{ch} := \rho \cdot \omega g t \cdot D_h$$

$m_{ch} = 0.039 \frac{\text{kg}}{\text{seg}}$ Flujo de masa

$$Q_{pCH} := m_{ch} \cdot c_p \cdot (tmg - tsch)$$

$Q_{pCH} = 2.489 \frac{\text{kJ}}{\text{seg}}$

4.10 SISTEMA DE COMBUSTIÓN

Según la agencia de protección del medio ambiente de los Estados Unidos (EPA), la temperatura con la cual debe operar una planta incineradora de desechos sólidos, debe estar entre el rango de 950 a 1200°C, para de esta manera garantizar la destrucción completa de los compuestos orgánicos en los desechos, para este proyecto se decidió trabajar con la temperatura mínima de 950 °C.

La cámara de combustión estará compuesta por dos quemadores, el quemador primario se utilizará para iniciar el proceso de combustión de los desechos plásticos, este quemador estará ubicado en la parte inferior de la cámara, mientras que el quemador secundario o auxiliar se encontrará en la parte superior de la cámara, siendo el objetivo principal de este quemador el mantener la temperatura de los gases de combustión en los 950 °C, ya que el término quemador auxiliar es generalmente apropiado sólo para describir a un oxidador termal utilizado para controlar gases provenientes de un proceso en donde la combustión es incompleta, el combustible utilizado para los quemadores será GLP.

4.10.1 DISEÑO DE LOS QUEMADORES

Debido a que el espacio en el interior de la cámara de combustión es reducido, se decidió realizar la construcción de quemadores en línea aprovechando el espacio de combustión para optimizar la temperatura del aire en el interior de la cámara.

4.10.1.1 Análisis del quemador primario (Qm1)

Geometría:

$\phi_{Qm1} := 19.05 \cdot 10^{-3}$ m Diámetro de Qm1

$L_{Qm1} := 520 \cdot 10^{-3}$ m Longitud de Qm1

$$e_{Qm1} := 2 \cdot 10^{-3} \quad \text{m} \quad \text{Ancho del agujero}$$

$$\dot{A}_{\text{proy}Qm1} := \phi_{Qm1} \cdot e_{Qm1}$$

$$\dot{A}_{\text{proy}Qm1} = 3.81 \times 10^{-5} \quad \text{m}^2 \quad \text{Área proyectada del agujero para el } Qm1$$

Determinación de la potencia de Qm1

El combustible con el cual trabajará el quemador primario será GLP, el cual posee un poder calorífico de 49190 kJ/kg, por lo tanto la potencia del quemador será igual a:

$$m_{Qm1} := 0.9 \cdot 10^{-3} \quad \frac{\text{kg}}{\text{seg}} \quad \text{Flujo de masa}$$

$$PC_{\text{comb}} := 49190 \quad \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \quad \text{Poder calorífico del combustible GLP}$$

$$P_{Qm1} := PC_{\text{comb}} \cdot m_{Qm1}$$

$$P_{Qm1} = 44.271 \quad \frac{\text{kJ}}{\text{seg}} \quad \text{Potencia de } Qm1$$

Determinación del número de agujeros para el Qm1

Para determinar el número de agujeros para el quemador primario es necesario conocer la carga por unidad de área que produce el GLP en quemadores similares. En estudios realizados en la Escuela Politécnica Nacional se ha establecido que el GLP produce una carga por unidad de área igual a 11106.68 kW/m².²⁰

$$\text{Carga} := 11106.68 \quad \frac{\text{kW}}{\text{m}^2}$$

²⁰ DISEÑO DE QUEMADORES ATMOSFÉRICOS A GAS, Tesis EPN 1981

$$\dot{A}_{ag} := \frac{P_{Qm1}}{\text{Carga}}$$

$$\dot{A}_{ag} = 3.986 \times 10^{-3} \quad \text{m}^2 \quad \text{Área total de los agujeros para el Qm1}$$

$$\phi_{Qm1} = 0.019 \quad \text{m}$$

$$N_{agQm1} := \frac{\dot{A}_{ag}}{\dot{A}_{proyQm1}}$$

$$N_{agQm1} = 104.619 \quad \text{Número de agujeros para el Qm1}$$

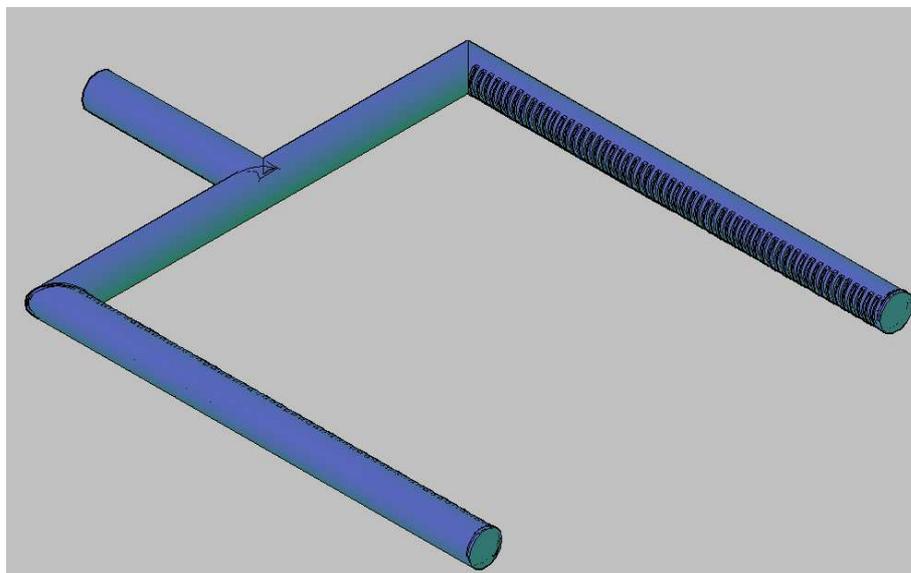


Figura 4.14 Disposición de los agujeros en el quemador primario

4.10.1.2 Análisis del quemador secundario (Qm2)

Geometría:

$$\phi_{Qm2} := 15.87 \cdot 10^{-3} \quad \text{m} \quad \text{Diámetro de Qm2}$$

$$L_{m2} := 520 \cdot 10^{-3} \quad \text{m} \quad \text{Longitud de Qm2}$$

$$e_{Qm2} := 2 \cdot 10^{-3} \quad \text{m} \quad \text{Ancho del agujero}$$

$$\dot{A}_{proyQm2} := \phi_{Qm2} \cdot e_{Qm2}$$

$$\dot{A}_{proyQm2} = 3.174 \times 10^{-5} \quad \text{m}^2 \quad \text{Área proyectada del agujero para el Qm2}$$

Determinación de la potencia de Qm2

El combustible con el cual trabajará el quemador secundario será GLP, el cual posee un poder calorífico de 49190 kJ/kg, por lo tanto la potencia del quemador será igual a:

$$m_{Qm2} := 0.5 \cdot 10^{-3} \quad \frac{\text{kg}}{\text{seg}} \quad \text{Flujo de masa}$$

$$P_{Qm2} := PC_{\text{comb}} \cdot m_{Qm2}$$

$$P_{Qm2} = 24.595 \quad \frac{\text{kJ}}{\text{seg}} \quad \text{Potencia de Qm2}$$

Determinación del número de agujeros para el Q2

Para determinar el número de agujeros para el quemador secundario se asumirá que la carga por unidad de área que produce el GLP es el mismo:

$$\dot{A}_{ag} := \frac{P_{Qm2}}{\text{Carga}}$$

$$\dot{A}_{ag} = 2.214 \times 10^{-3} \quad \text{m}^2 \quad \text{Área total de los agujeros para el Qm2}$$

$$\phi_{Qm2} = 0.016 \quad \text{m}$$

$$N_{agQm2} := \frac{\dot{A}_{ag}}{\dot{A}_{\text{proyQm2}}}$$

$$N_{agQm2} = 69.768 \quad \text{Número de agujeros para el Qm2}$$

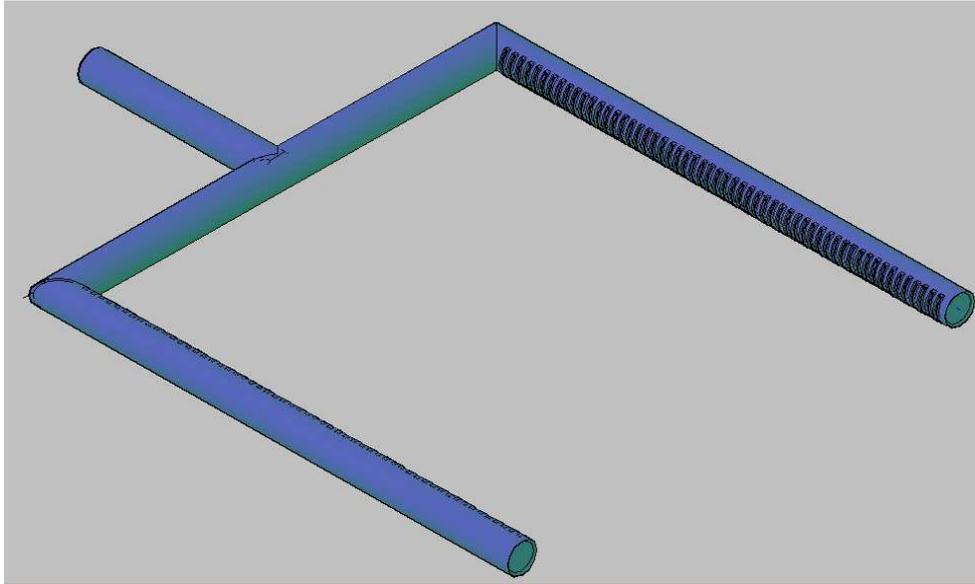


Figura 4.15 Disposición de los agujeros en el quemador secundario

El sistema de encendido de los quemadores está compuesto por tres bujías, un magneto, un pulsador y un toma corriente de 110 voltios, las bujías serán accionadas por el pulsador el cual enviará una señal eléctrica al magneto y este a la bujía, produciendo una chispa la cual encenderá el combustible de los quemadores.

La disposición de las bujías en los quemadores es de la siguiente forma: para el quemador primario dos bujías y una bujía para el quemador secundario.

4.11 CALOR PERDIDO TOTAL

Es muy importante determinar el valor del calor perdido total en un sistema de combustión ya que con este parámetro es posible determinar el rendimiento, el calor útil que se puede obtener con dicho sistema de combustión, para nuestro estudio se considerarán las siguientes pérdidas:

- Q2: Calor perdido por los gases de escape, en (kJ/kg)
- Q3: Calor perdido por combustión química incompleta, en (kJ/kg)
- Q4: Calor perdido por combustión mecánica incompleta, en (kJ/kg)

Q5: Calor perdido por el enfriamiento externo de las paredes del sistema de combustión, en (kJ/kg)

4.11.1 CALOR PERDIDO POR LOS GASES DE ESCAPE (Q2)

Es el calor sensible de los gases de combustión que ya no pueden ser aprovechados en los aparatos de transferencia de calor, el cálculo de esta pérdida puede efectuarse por la fórmula:

$$Q2 := [V_{\text{gases}} \cdot (c_{\text{pg}} \cdot \rho_{\text{g}}) \cdot t_{\text{h2}} - V_{\text{ar}} \cdot (c_{\text{par}} \cdot \rho_{\text{ar}}) \cdot t_{\text{amb}}] \cdot \frac{100 - q4}{100} \quad (4.13)$$

Donde:

V_{gases} : Volumen de los productos de combustión

c_{pg} : Calor específico de los productos de combustión

c_{par} : Calor específico del aire ambiente

t_{g} : Temperatura de los productos de combustión a la salida del IC

$q4$: Pérdida relativa de calor por la combustión mecánica incompleta.

$$t_{\text{h2}} = 372.1 \quad ^\circ\text{C}$$

$$t_{\text{amb}} = 27 \quad ^\circ\text{C}$$

$$c_{\text{pg}} := 1.063 \quad \frac{\text{kJ}}{\text{kg} \cdot \text{K}}$$

$$c_{\text{par}} = 1.005 \quad \frac{\text{kJ}}{\text{kg} \cdot \text{K}}$$

$$\rho_{\text{g}} := 0.547 \quad \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

$$\rho_{\text{ar}} = 1.177 \quad \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

$$V_{\text{gases}} = 12.29 \quad \frac{\text{m}^3}{\text{kg}}$$

$$V_{\text{ar}} = 11.697 \quad \frac{\text{m}^3}{\text{kg}}$$

$$q4 = 2.189 \quad \%$$

Por lo tanto la pérdida de calor por los gases es igual a:

$$Q2 := [V_{\text{gases}} \cdot (c_{\text{pg}} \cdot \rho_{\text{g}}) \cdot t_{\text{h2}} - V_{\text{ar}} \cdot (c_{\text{par}} \cdot \rho_{\text{ar}}) \cdot t_{\text{amb}}] \cdot \frac{100 - q4}{100}$$

$$Q2 = 2.235 \times 10^3 \quad \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

4.11.2 CALOR PERDIDO POR COMBUSTIÓN QUÍMICA INCOMPLETA (Q3)

Resultan de una combustión incompleta del monóxido de carbono CO, hidrogeno H y metano CH₄, la pérdida relativa del calor Q3 depende generalmente del porcentaje de CO en los gases, para nuestro estudio se admitirá un valor igual a Q3 = 0,5%.

$$Q_{dis} = 2.552 \times 10^4 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

$$Q_3 := 0.005 Q_{dis}$$

$$Q_3 = 127.594 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

4.11.3 CALOR PERDIDO POR COMBUSTIÓN MECÁNICA INCOMPLETA (Q4)

Por lo general este tipo de pérdida aparece cuando se quema un combustible sólido, esta constituida por los siguientes componentes:

Qpar: Pérdida por caída a través de la parrilla (admitida) = 0.5 %

Qcoque: Pérdida por coque volante (admitida) = 1 %

Qescor: Pérdida por escorias siendo: At= 9.9 % y Cfijo= 5 %

$$PClc = 5.973 \times 10^3 \frac{\text{kcal}}{\text{kg}}$$

$$Q_{escor} := \frac{C_{fijo} \cdot A_t}{100 - C_{fijo}} \cdot \frac{7900}{PClc}$$

$$Q_{escor} = 0.689 \quad \% \quad Q_{par} := 0.5 \quad \% \quad Q_{coque} := 1 \quad \%$$

$$q_4 := Q_{escor} + Q_{coque} + Q_{par}$$

$$q_4 = 2.189 \quad \%$$

$$Q_4 := \frac{q_4}{100} Q_{dis}$$

$$Q_4 = 558.632 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

4.11.4 CALOR PERDIDO POR EL ENFRIAMIENTO EXTERNO DE LAS PAREDES DEL SISTEMA DE COBUSTIÓN (Q5)

$$Q_{pcam} = 465.487 \quad \frac{J}{seg}$$

$$Q_{pIC} = 8.846 \times 10^3 \quad \frac{J}{seg}$$

$$Q_{pCH} = 2.489 \quad \frac{kJ}{seg}$$

$$Q_5 := \left(\frac{Q_{pcam}}{1000} + \frac{Q_{pIC}}{1000} + Q_{pCH} \right)$$

$$Q_5 = 11.8 \quad \frac{kJ}{seg}$$

El calor perdido será:

$$Q_{perdido1} := Q_2 + Q_3 + Q_4$$

$$Q_{perdido1} = 2.922 \times 10^3 \quad \frac{kJ}{kg}$$

$$Q_{perdido2} := Q_5$$

$$Q_{perdido2} = 11.8 \quad \frac{kJ}{seg}$$

4.12 BALANCE ENERGÉTICO

Siendo la combustión de los residuos sólidos un fenómeno que libera la energía térmica obtenida en los mismos, no puede hacerse un análisis preciso cuantitativo de esta transformación más que con ayuda de balances térmicos.

Los elementos de los balances son necesarios para:

- Controlar la capacidad de incineración de una parrilla.
- Determinar el PCI de los residuos
- Determinar las características de los gases de combustión, el exceso de aire, la refrigeración correcta de los gases de combustión, etc.

Nosotros utilizaremos el balance térmico para determinar el rendimiento de la cámara y del intercambiador de calor. Una vez conocido el rendimiento global calcularemos la tasa de vapor, es decir, la cantidad de vapor producido por un kilogramo de desechos plásticos.

La cantidad de calor contenida en el vapor la calcularemos por diferencia entre las cantidades de calor que entran en la instalación y las pérdidas de calor habidas en la misma, tomando como base un kilogramo de desechos plásticos.

Donde las pérdidas relativas de calor serán:

$$B = 2.829 \times 10^{-3} \frac{\text{kg}}{\text{seg}} \quad \text{Consumo de combustible}$$

$$q_2 := \frac{Q_2 \cdot B}{Q_{\text{dis}}} \cdot 100 \quad q_3 := \frac{Q_3 \cdot B}{Q_{\text{dis}}} \cdot 100 \quad q_4 := \frac{Q_4 \cdot B}{Q_{\text{dis}}} \cdot 100 \quad q_5 := \frac{Q_5}{Q_{\text{dis}}} \cdot 100$$

$$q_2 = 8.76 \quad \% \quad q_3 = 0.5 \quad \% \quad q_4 = 2.189 \quad \% \quad q_5 = 16.348 \quad \%$$

Rendimiento obtenido en el sistema de combustión:

$$\eta := \frac{Q}{Q_{\text{dis}}} \cdot 100$$

$$\eta = 72.203 \quad \%$$

Calor disponible:

$$Q_{\text{dis}} := Q_{\text{dis}} \cdot B$$

$$Q_{\text{dis}} = 72.181 \quad \frac{\text{kJ}}{\text{seg}}$$

Pérdida de calor total igual a:

$$Q_{pTotal} := (Q_{perdido1} \cdot B) + Q_{perdido2}$$

$$Q_{pTotal} = 20.064 \quad \frac{\text{kJ}}{\text{seg}} \quad \text{Calor perdido total}$$

Calor aprovechado por el intercambiador de calor:

$$Q = 52.117 \quad \frac{\text{kJ}}{\text{seg}} \quad \text{Calor aprovechado por el agua en el IC}$$

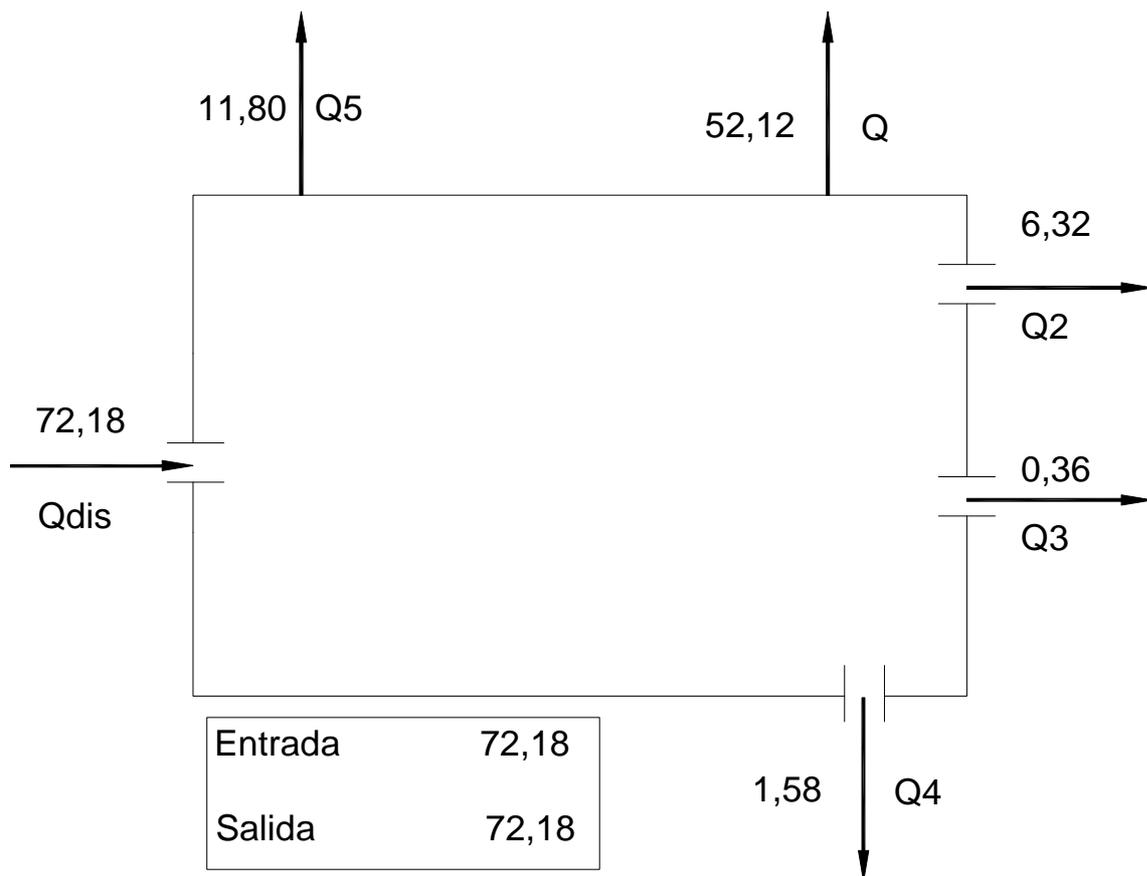


Figura 4.16 Esquema del balance energético en kJ/seg.

4.13 CÁLCULO DE MASA

Para determinar la tasa de producción de vapor obtenido por la combustión de un kilogramo de desechos plásticos, se asumirá que el vapor es saturado a temperatura igual a t_{c2}

$$h_g := 2742.7 \quad \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \quad \text{Entalpía a } t_{c2} = 146.921 \quad ^\circ\text{C}$$

$$h_f := 92.296 \quad \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \quad \text{Entalpía a } t_{c1} = 22 \quad ^\circ\text{C}$$

$$\Delta H := h_g - h_f$$

$$\Delta H = 2.65 \times 10^3 \quad \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

$$\text{Tasa} := \frac{1}{\Delta H} \cdot Q_{\text{dis}} \cdot \frac{n}{100}$$

$$\text{Tasa} = 6.952 \quad \text{kg}$$

Es decir por la combustión de un kilogramo de desechos plásticos se obtiene 6.952 kg de vapor.

El consumo de combustible se determina a partir de la siguiente ecuación de balance energético

$$B \cdot Q_{\text{dis}} := (Q_{\text{perdido1}} \cdot B) + Q_{\text{perdido2}} + Q$$

$$B := \frac{Q_{\text{perdido2}} + Q}{Q_{\text{dis}} - Q_{\text{perdido1}}}$$

$$B = 2.829 \times 10^{-3} \quad \frac{\text{kg}}{\text{seg}} \quad \text{Consumo de combustible}$$

4.14 BALANCE DE MASA

Masa de combustible (residuos plásticos)

$$M_{\text{residuos}} := 1 \quad \text{kg}$$

Masa de aire necesaria para la combustión de un kilogramo de residuos plásticos

$$V_{\text{ar}} = 11.697 \quad \frac{\text{m}^3}{\text{kg}}$$

$$\rho_{\text{ar}} = 1.177 \quad \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

$$M_{\text{ar}} := V_{\text{ar}} \cdot \rho_{\text{ar}}$$

$$M_{\text{ar}} = 13.773 \quad \text{kg}$$

Masa total que ingresa al sistema:

$$M_{\text{entrada}} := M_{\text{ar}} + M_{\text{residuos}}$$

$$M_{\text{entrada}} = 14.773 \quad \text{kg}$$

Masa de los gases de combustión

$$V_{\text{gases}} = 12.29 \quad \frac{\text{m}^3}{\text{kg}}$$

$$t_{\text{sch}} = 250 \quad ^\circ\text{C}$$

$$\rho_{\text{w}} := 0.676 \quad \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

$$M_{\text{g}} := V_{\text{gases}} \cdot \rho$$

$$M_{\text{g}} = 8.308 \quad \text{kg}$$

Masa de vapor producido:

$M_{\text{vapor}} := \text{Tasa}$

$M_{\text{vapor}} = 6.952 \quad \text{kg}$

Masa de cenizas:

$M_{\text{ceniza}} := 0.099 \cdot M_{\text{residuos}}$

$M_{\text{ceniza}} = 0.099 \quad \text{kg}$

Masa total que sale:

$M_{\text{salida}} := M_g + M_{\text{vapor}} + M_{\text{ceniza}}$

$M_{\text{salida}} = 15.359 \quad \text{kg}$

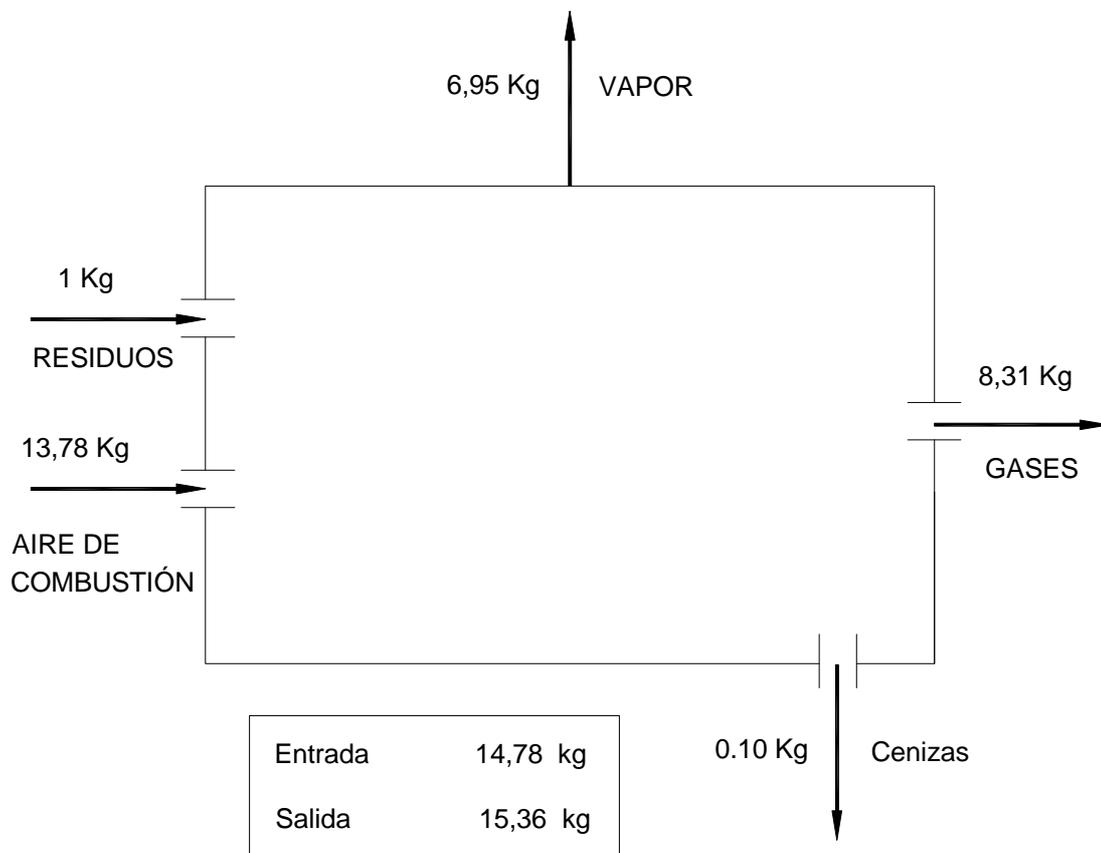


Figura 4.17 Esquema del balance de masa en kg.

CAPÍTULO 5

CONSTRUCCIÓN Y MONTAJE

5.1 DIAGRAMAS DE PROCESO

5.1.1 PASOS DE FABRICACIÓN DE LAS CARAS INTERIORES, INTERMEDIAS Y EXTERIORES DE LA CÁMARA DE COMBUSTIÓN

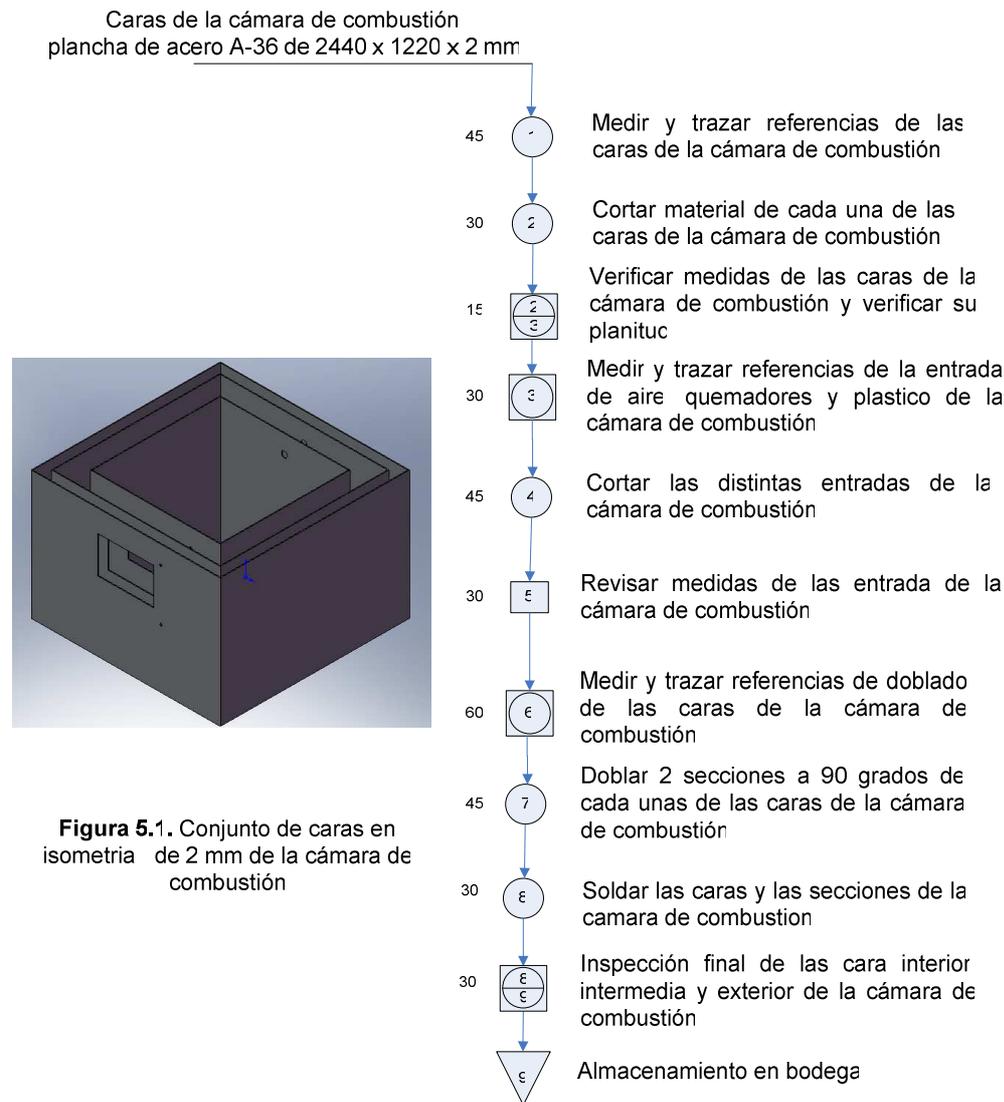


Figura 5.1. Conjunto de caras en isometría de 2 mm de la cámara de combustión

5.1.2 PASOS DE FABRICACIÓN DE LA BASE DE LA CÁMARA DE COMBUSTIÓN

Base de la cámara de combustión,
plancha de acero A-36 de 2440 x 1220 x 3 mm

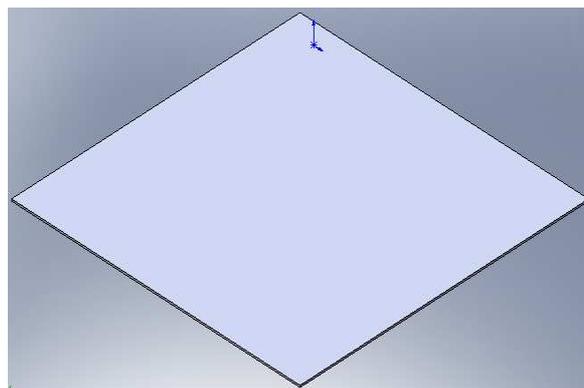
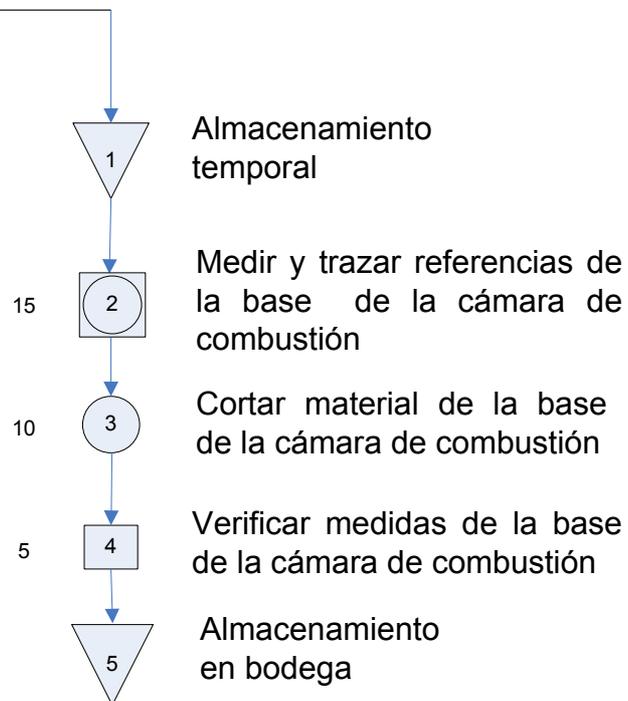


Figura 5.2. Base de 3 mm de la cámara de combustión

5.1.3 PASOS DE LA UTILIZACIÓN DE LA FIBRA CERÁMICA

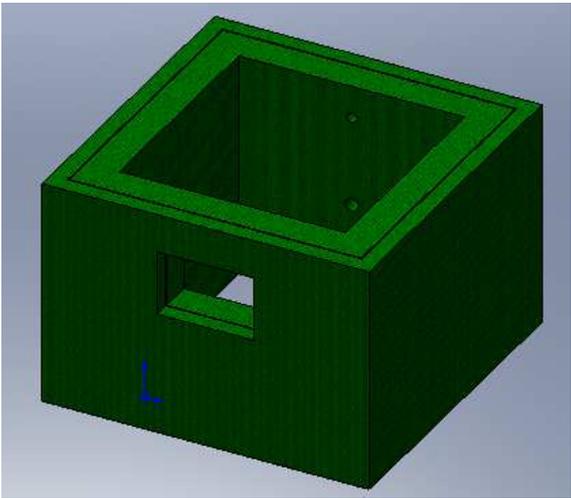
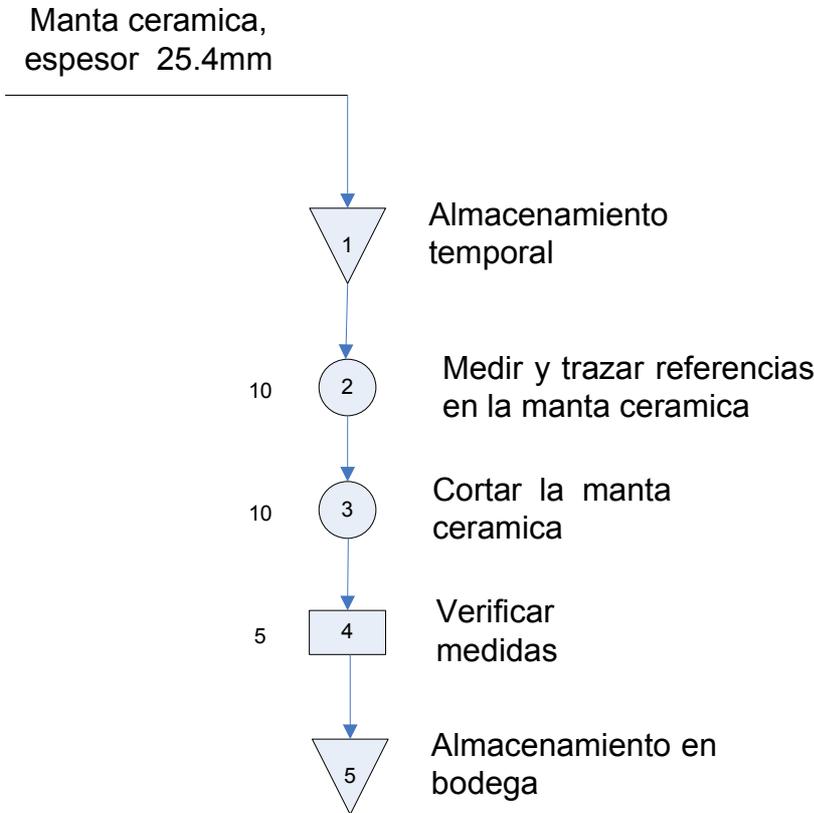


Figura 5.3. Manta ceramica.

5.1.4 PASOS DE LA UTILIZACIÓN DE LA PLACA REFRACTARIA

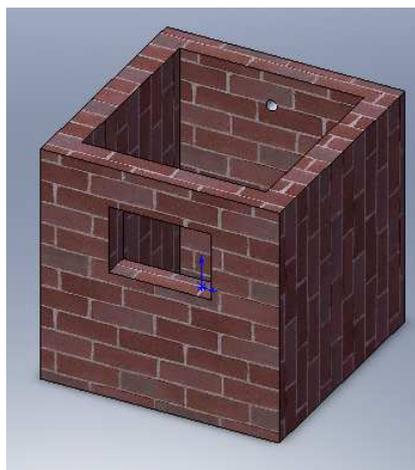
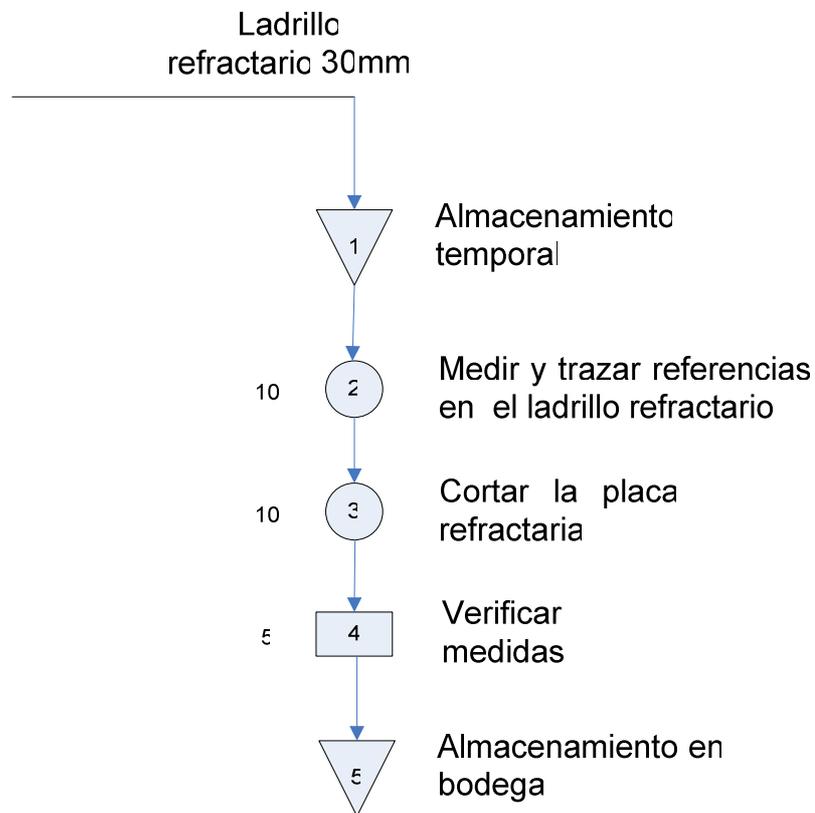


Figura 5.4. Placa Refractaria

5.1.5 PASOS DE FABRICACIÓN DEL CANAL EN C DE LA CÁMARA DE COMBUSTIÓN

Canal en C plancha de acero A-36 de
2440 x 1220 x 2 mm

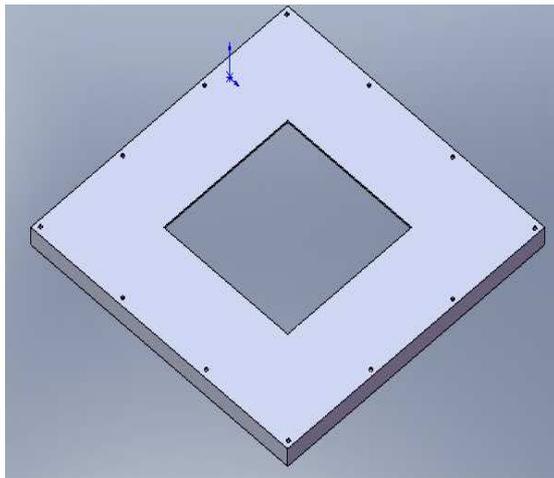
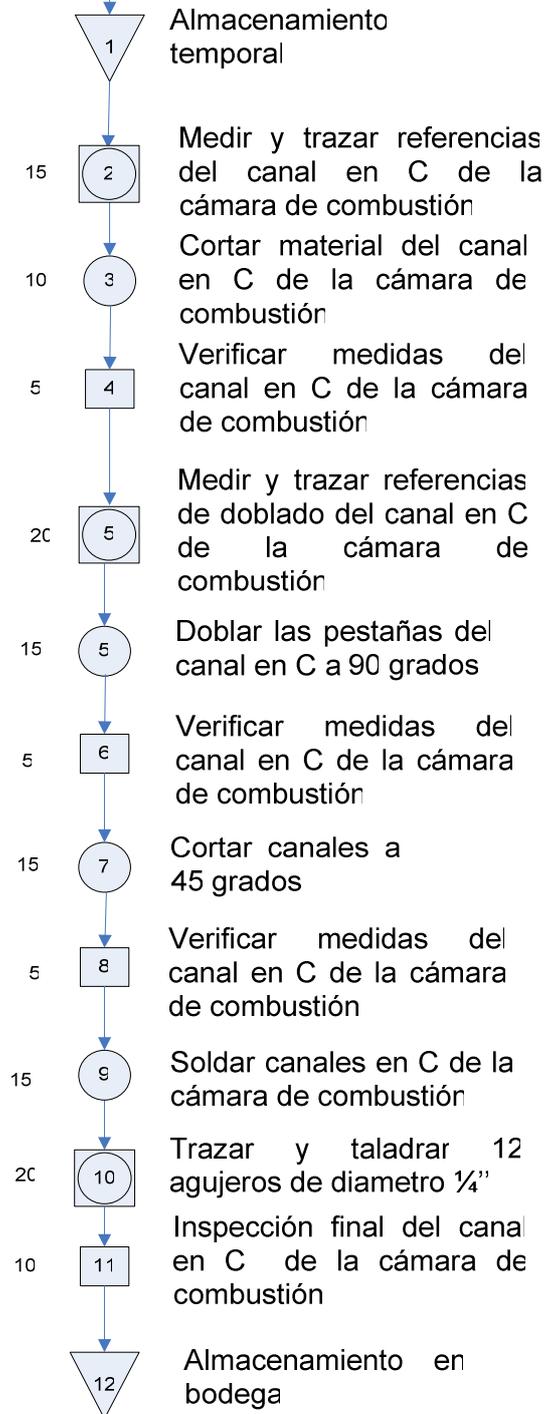


Figura 5.5. Canal en C de la cámara de combustión.



5.1.6 PASOS DE LA CONSTRUCCIÓN DE LOS QUEMADORES

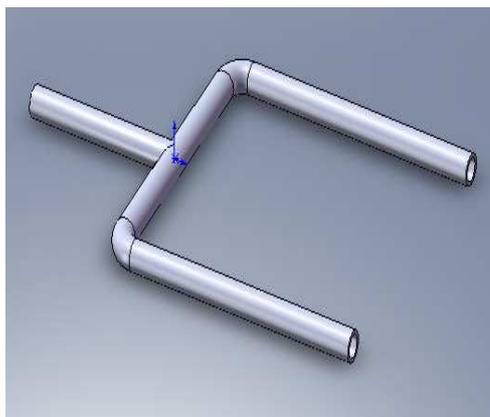
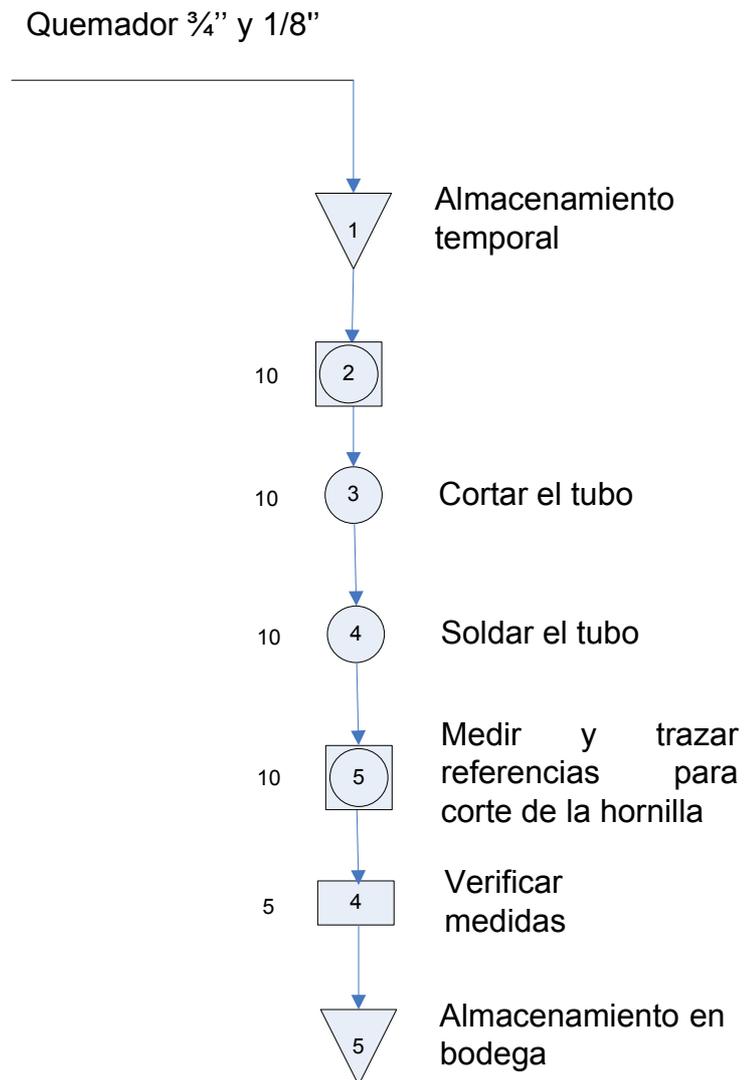


Figura 5.6. Quemador $\frac{3}{4}$ " y $\frac{1}{8}$ "

5.1.7 PASOS DE FABRICACIÓN DEL COLECTOR DE CENIZA DE LA CÁMARA DE COMBUSTIÓN

Colector de ceniza, plancha de acero A-36 de 2440 x 1220 x 2 mm

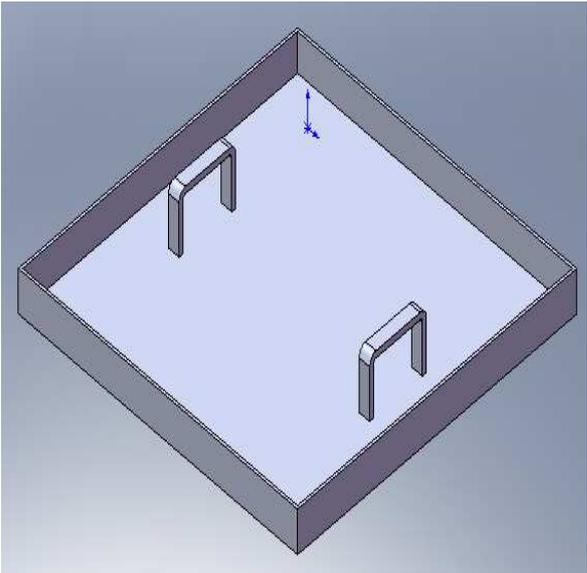
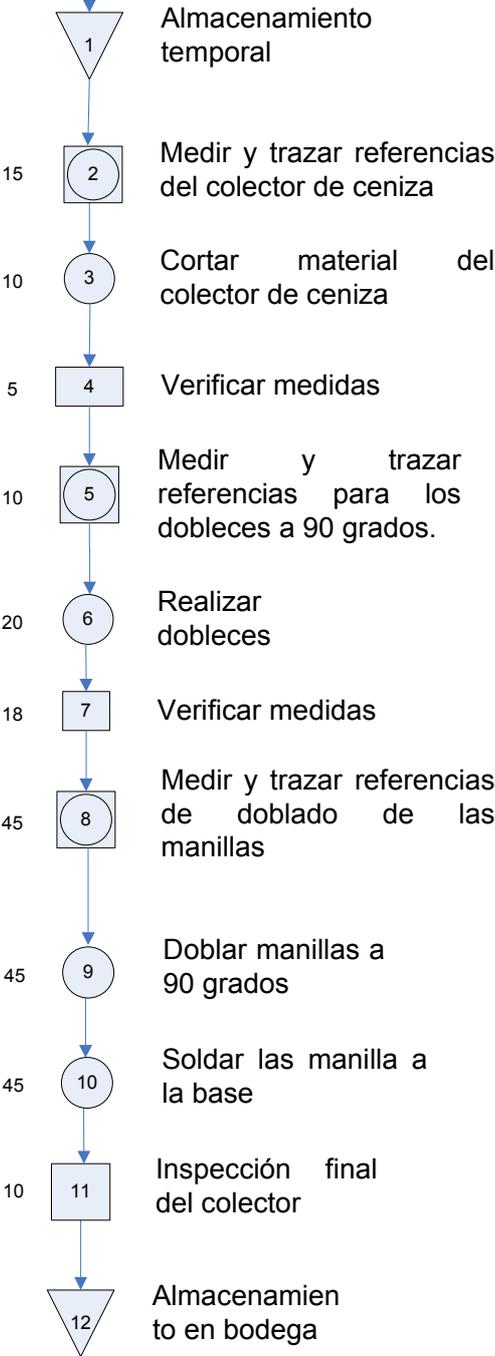


Figura 5.7. Colector de ceniza de la cámara de combustión



5.1.8 PASOS DE FABRICACIÓN DEL MARCO DE LA BASE DE LA CÁMARA DE COMBUSTIÓN

Marco de la base ángulo de acero A-36
de 40.2 x 40.2 x 4 mm

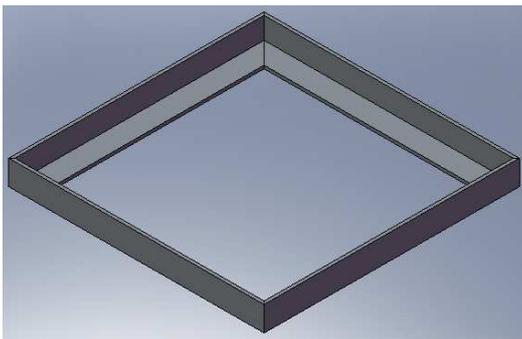
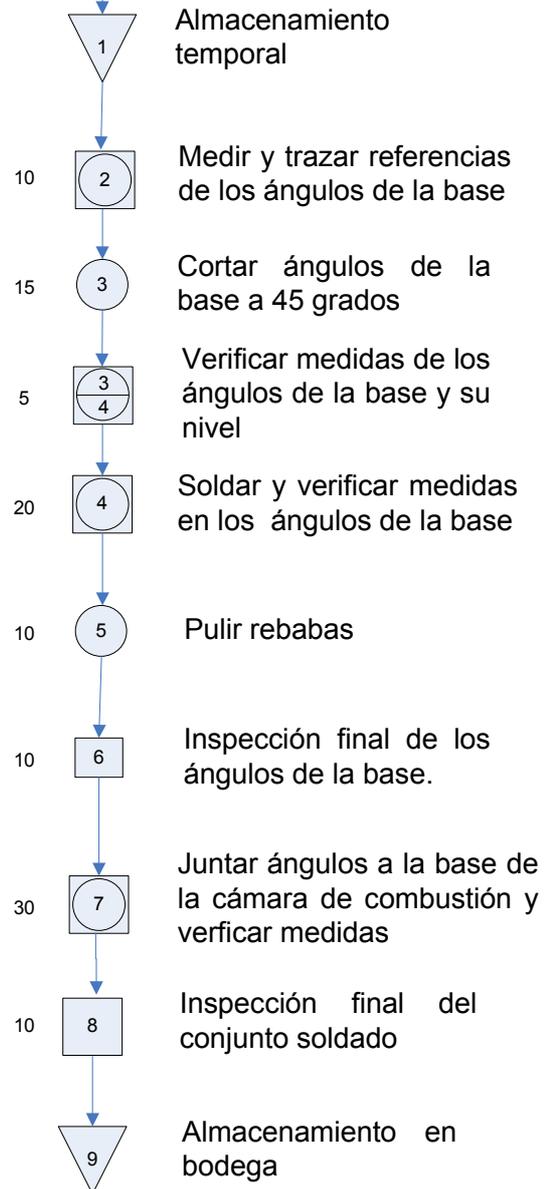


Figura 5.8. Marco de la base de la cámara de combustión del ángulo de 40.2 x 40.2 x 4 mm



5.1.9 PASOS DE FABRICACIÓN DE LA BASE DE LA CÁMARA DE COMBUSTIÓN

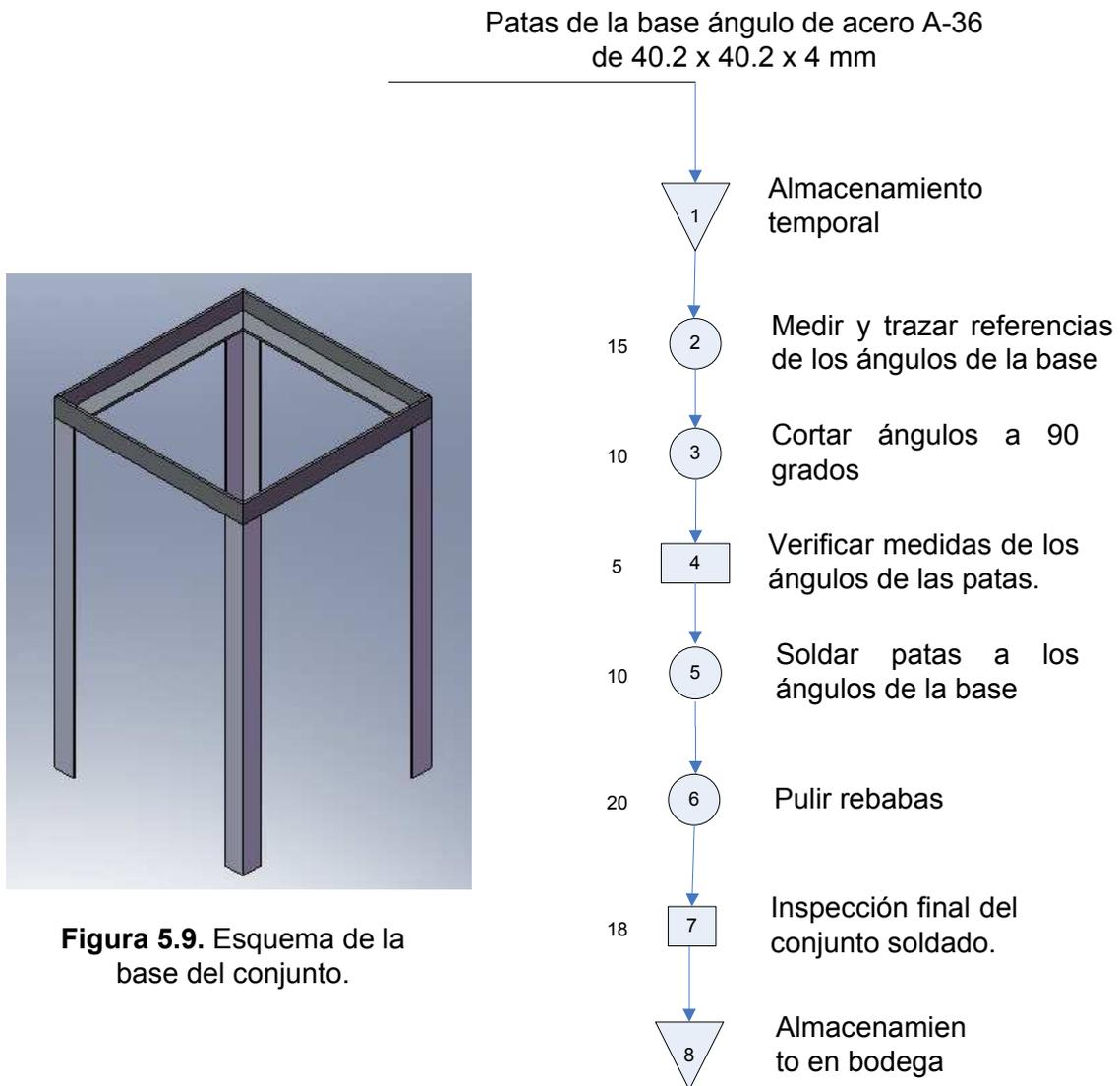
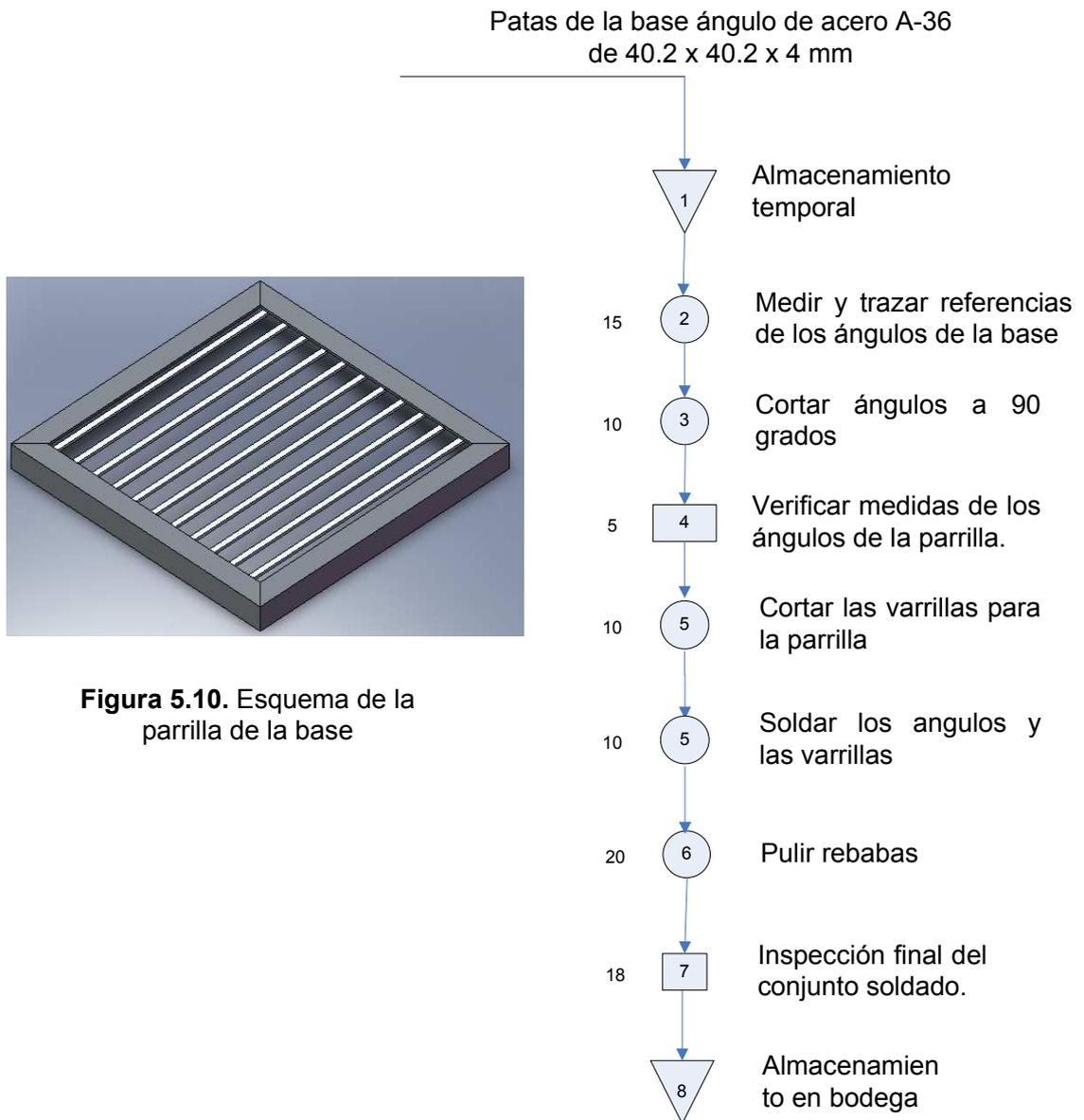


Figura 5.9. Esquema de la base del conjunto.

5.1.10 PASOS DE FABRICACIÓN DE LA PARRILLA



5.1.11 PASOS DE FABRICACIÓN DE LOS ÁNGULOS DE LAS PAREDES DE LA CÁMARA DE COMBUSTIÓN

Ángulos de la paredes, ángulo de acero A-36 de 40.2 x 40.2 x 4 mm

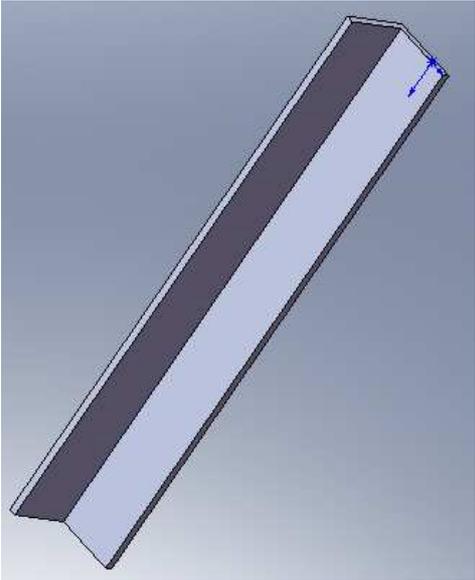
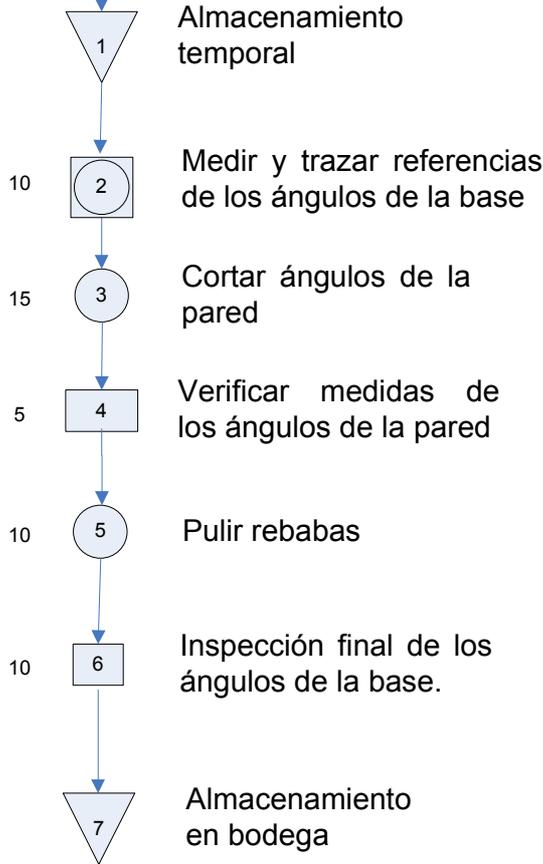


Figura 5.11. Angulos de las paredes de 40.2 x 40.2 x 4 mm



5.1.12 PASOS DE FABRICACIÓN DE UNA FUNDA DE LA CÁMARA DE COMBUSTIÓN

Caras de la cámara de combustión,
plancha de acero A-36 de 2440 x 1220 x 2 mm

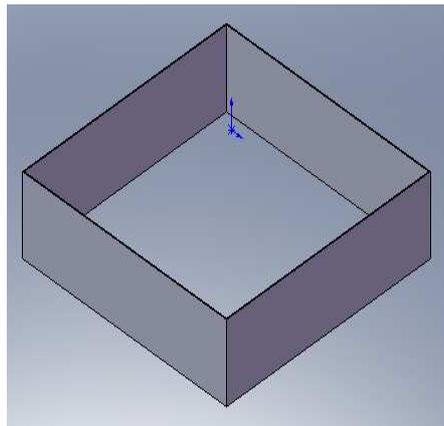
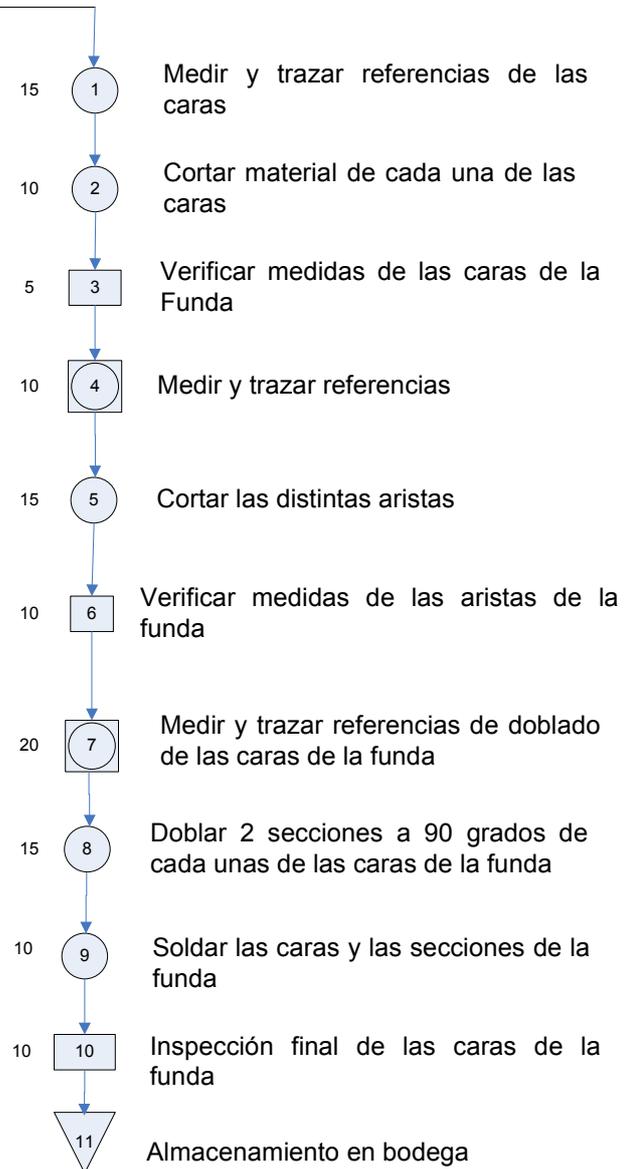


Figura 5.12. Funda de 2 mm de la cámara de combustión



5.1.13 PASOS DE FABRICACIÓN DE LA CHIMENEA

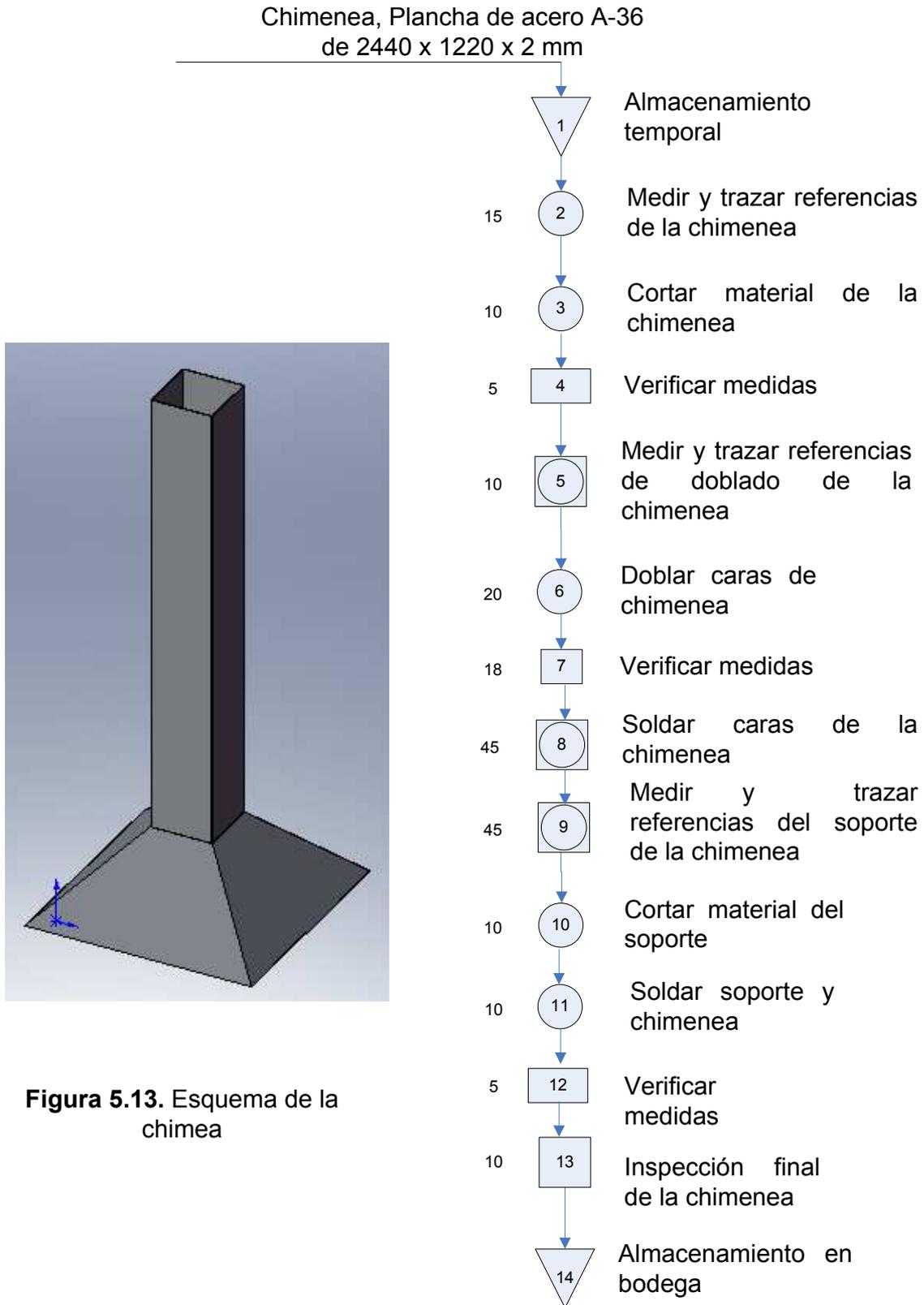


Figura 5.13. Esquema de la chimea

5.1.14 PASOS DE FABRICACIÓN DE LA BATERÍA DE TUBOS DEL INTERCAMBIADOR DE CALOR

Batería del intercambiador de calor,
tubo galvanizado de 24.5 mm por 3 m de largo

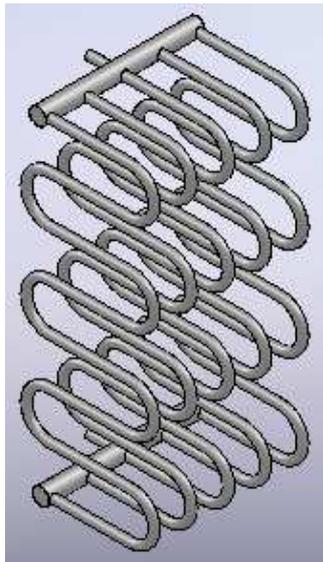
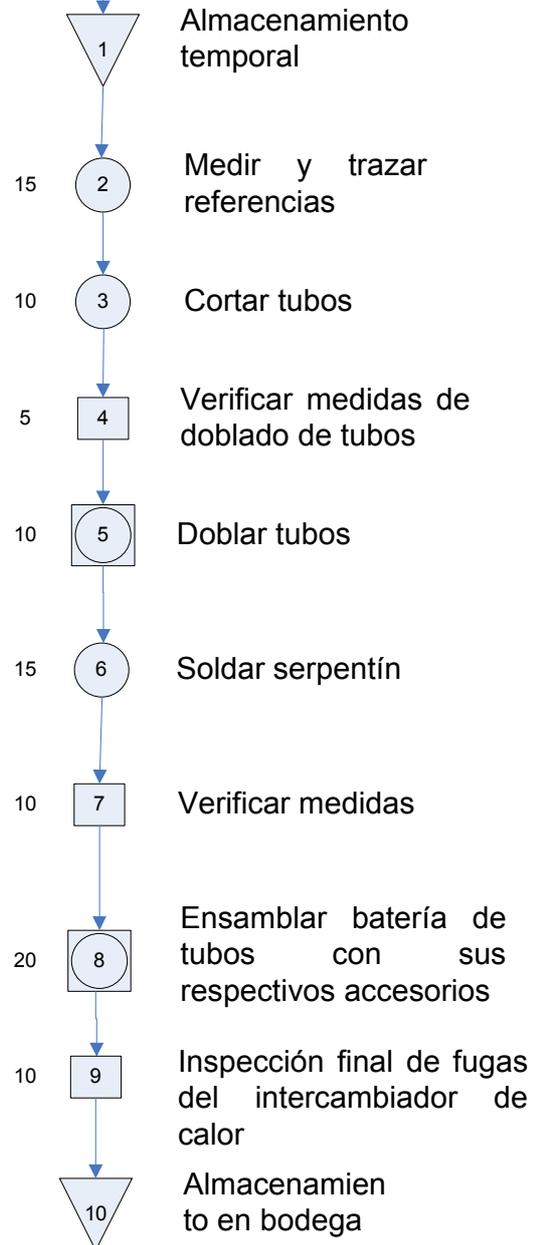


Figura 5.14. Esquema de armado de la batería del intercambiador de calor



5.1.15 PASOS DE FABRICACIÓN DEL INTERCAMBIADOR DE CALOR

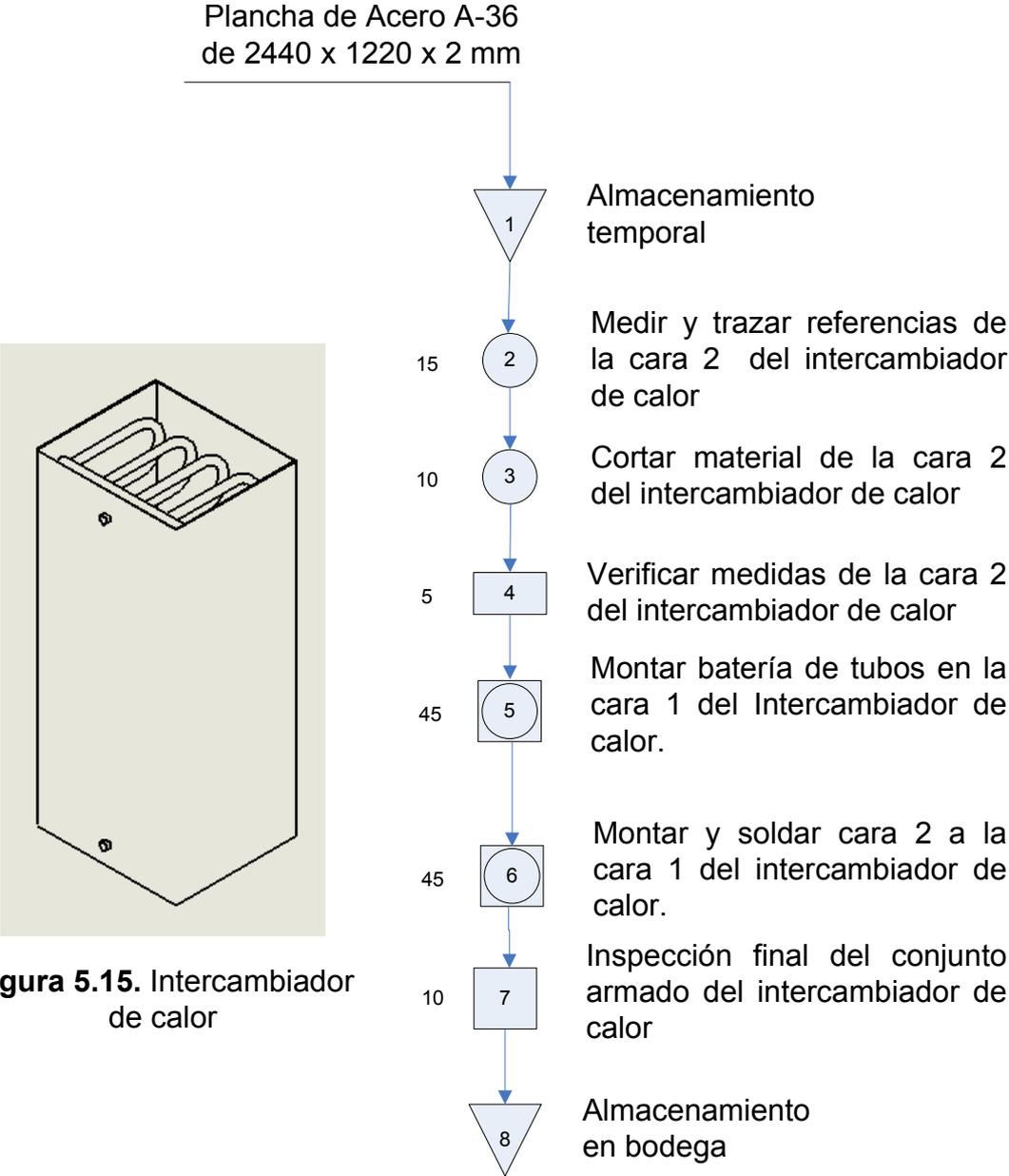


Figura 5.15. Intercambiador de calor

5.1.16 PASOS PARA EL MONTAJE DE LA CÁMARA DE COMBUSTIÓN

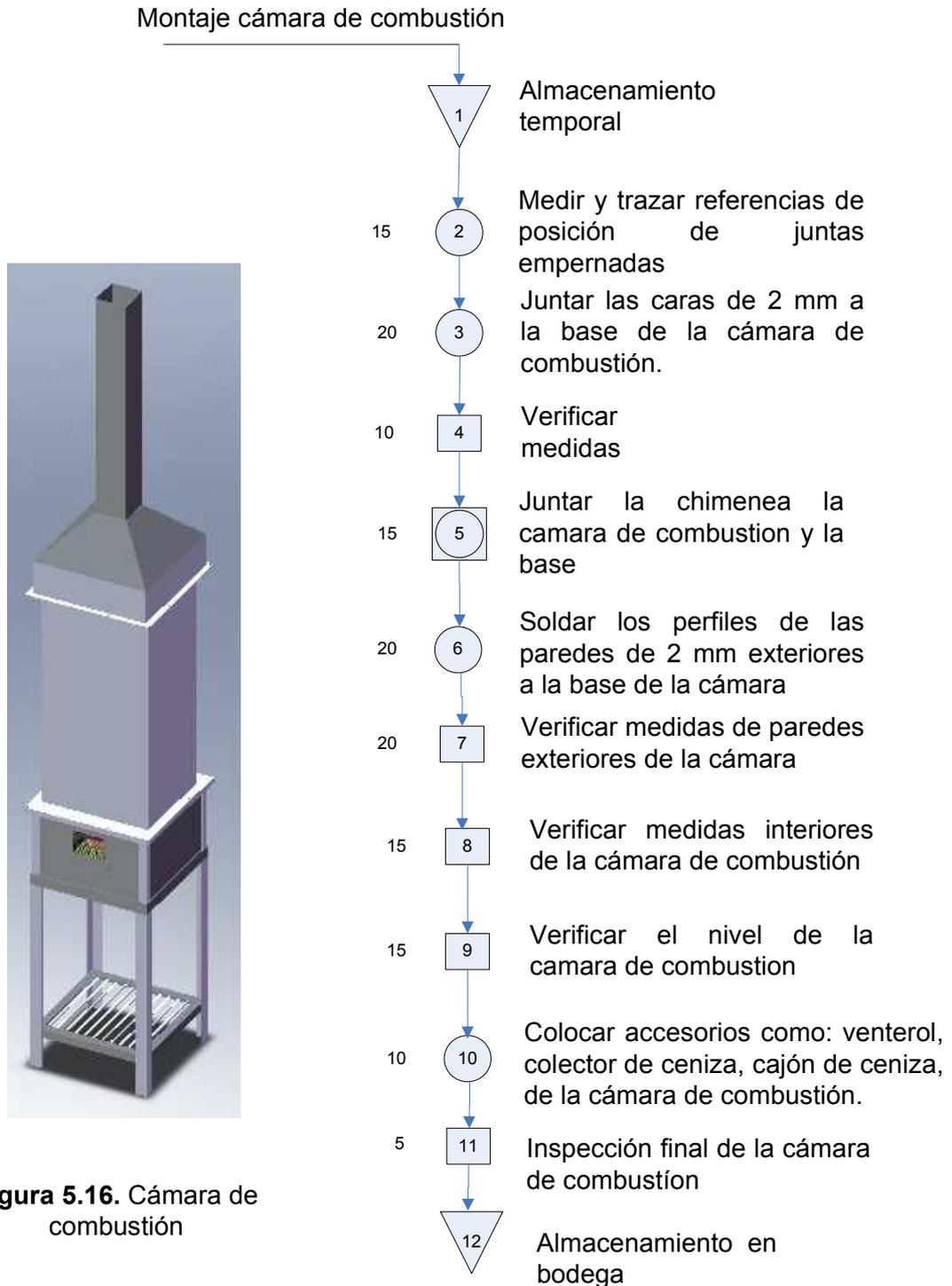


Figura 5.16. Cámara de combustión

5.2 PLANOS DE FABRICACION

Para que el prototipo se acerque todo lo posible a la teoría y los resultados sean lo mas exactos posibles debemos hacer una buena construcción siguiendo cada una de las normativas de proceso de construcción y montaje de todo el equipo para lo cual se implemento un orden lógico de ensamblado y de montaje para lo cual se ha desarrollado un sistema internacional de planos con sus respectivas vistas y una isometría de cada una de las piezas construidas además algunos esquemas de montaje.

Ver ANEXO PLANOS

5.3 EQUIPOS Y HERRAMIENTAS.

EQUIPOS

Los equipos utilizados en nuestro proyecto están descritos según la operación y las características individuales y propias:

- Soldadora eléctrica de arco para electrodo

Entrada: voltaje 220V, electrodo específico

Salida: unión de tubos

- Moladora

Entrada: voltaje 110V, disco de desbaste, disco de corte

Salida: desbaste de acero

- Cizalla

Entrada: placa de acero

Salida: placa cortada

- Dobladora

Entrada: placa de acero

Salida: placa doblada

– Torno

Entrada: 220V

Salida: balanceo eje del ventilador

– Tronzadora, cortadora tubos y perfiles

Entrada: voltaje 220V

Salida: corte

– Fresadora

Entrada: 220V

Salida: Perforación de placa

– Taladro de pedestal

Entrada: 110V

Salida: Agujeros en las distintas placas

HERRAMIENTAS

Las herramientas utilizadas en el proceso se describen a continuación:

- Martillos.
- Pistola de pintura.
- Remachadora
- Juego de llaves.
- Juego de destornilladores.
- Playo manual y de presión.
- Cepillos de alambre.
- Flexómetro
- Rayador
- Escuadras
- Pie de Rey

INSTRUMENTOS

- Termómetro digital y analógico.
- Medidor de flujo.
- Medidor de humedad.
- Barómetro.
- Balanza.
- Además de cámara fotográfica, computadora, Impresora y programas computacionales como son: Autocad, Solidworks, Mathcad, Office, Project.

EQUIPO DE SEGURIDAD INDUSTRIAL

- Gafas de protección
- Overol
- Guantes antideslizantes
- Guantes para soldar
- Casco de soldador
- Botas de seguridad
- Extinguidor
- Mascarilla de carbón activado
- Botas Industriales

5.4 MANO DE OBRA

Cantidad	Descripción	Unidad
30	Proyectista 1	horas
30	Proyectista 2	horas
40	Soldador	horas
25	Ayudante de taller	horas
50	Jefe de Taller	horas
10	Transporte	horas

5.5 MATERIALES

Materiales				
No.	Descripción	Observación	Unidad	Cant.
1	Plancha de tol 3mm 4x8x3	Caja interior de cámara.	u	1
2	Plancha de tol 2mm	Caja exterior de intercambiador	u	2
3	Plancha de tol 4mm	Recolector de cenizas	u	1
4	Angulo	Estructura conjunto	m	12
5	Placa Refractaria	Cámara	u	5
6	Mortero	Cámara	u	1
7	Electrodo 6011	Conjunto	Kg.	2
8	Electrodo 6018	Conjunto	Kg.	5
9	Varilla	Conjunto	Kg.	1
10	Pintura Alta Temperatura	Conjunto	u	3
11	Diluyente Thinner	Conjunto	Lt	1
12	Pernos	Recolector	u	50
13	Fibra Ceramica	Cámara	m ²	1
14	Masilla	Conjunto	u	1
15	Termocupla K	Medición	u	4
16	Termocupla J	Medición	u	1
17	Manómetro	Medición	u	1
18	Limas media Cana	Acabados	u	3
19	Llave esferica	Conjunto	u	5
20	Venterol	Conjunto	u	1
21	Lija de hierro	Acabados	u	8

CAPÍTULO 6

PRUEBAS DE OPERACIÓN DEL SISTEMA

6.1 PROCEDIMIENTO

Para poder realizar las pruebas de operación del sistema se debe de proceder de la siguiente manera:

6.1.1 DESCRIPCION DEL TIPO DE RESIDUO A INCINERAR

Residuos plásticos:

- Para la optimización del espacio en la cámara los residuos plásticos deberán ser triturados.
- Su composición aproximada será de: PET 24 (%), PP 12 (%), PEHD fundas 24 (%), PEHD soplado 12 (%), PELD 12 (%), PS 6 (%), PVC 4 (%), Línea blanca 6 (%), residuos que son generados por los habitantes de la ciudad de Quito.
- La carga máxima a ser incinerada será de 1500 gr con un periodo aproximado de 20-25 minutos.
- La carga de los residuos plásticos en la cámara de combustión actuara de pantalla térmica (forma de un cono).



Figura 6.1 Residuos plásticos (Composición)



Figura 6.2 Pantalla térmica (residuos plásticos)

6.1.2 ARMADO DEL EQUIPO

El sistema de incineración de residuos plásticos esta compuesto por tres elementos: la cámara de combustión, el intercambiador de calor y la chimenea.

Secuencia para el armado de los elementos que conforman la cámara de combustión:

- 1.- Ubicar el colector para las cenizas.
- 2.- Ubicación del quemador primario (parte inferior de la cámara).
- 3.- Ubicación del sistema de encendido para el quemador primario.
- 4.- Ubicación del quemador secundario y/o auxiliar.
- 5.- Ubicación del sistema de encendido para el quemador secundario.
- 6.- Ubicación del venterol.



Figura 6.3 Ubicación de las bujías para el encendido de los quemadores

Nota: La distancia máxima de separación entre el electrodo de la bujía y el cuerpo cilíndrico del quemador no debe ser mayor a 3 mm, para de esta manera generar un mejor arco eléctrico.



Figura 6.4 Ensamblaje del venterol y los quemadores

Ubicados cada uno de los componentes en la cámara de combustión se procederá a ubicar el intercambiador de calor junto con la chimenea.



Figura 6.5 Sistema de combustión ensamblado

6.1.3 PUESTA EN MARCHA DEL SISTEMA DE COMBUSTIÓN

La operación del sistema de combustión, tendrá la secuencia siguiente:

- Ubicación de las termocuplas para la toma de temperaturas:
 - 1.- En la entrada del fluido caliente (th1).
 - 2.- En la salida del fluido caliente (th2).
 - 3.- En la toma de entrada del fluido frío (tc1).
 - 4.- En la toma de salida del fluido frío (tc2).
 - 5.- En la salida de la chimenea (tsch).

- Regular el caudal del fluido frío a la entrada del intercambiador de calor, para nuestro estudio dicho caudal será de 100 ml/seg.
- La alimentación de los desechos plásticos, se realizará mediante una bandeja metálica la cual se apoyará en la abertura existente en la pared de la cámara de combustión, la cantidad a ser incinerada será de 1500 gr.

- Encendido del quemador primario (accionar el pulsador), para dar inicio a la combustión, el quemador permanecerá encendido hasta alcanzar la temperatura de ignición de los desechos plásticos.

- Con el sensor láser se controlara la temperatura:
 - 1.- En la pared interior de la cámara de combustión (tpiCAM).
 - 2.- En la pared exterior de la cámara de combustión (tpoCAM).
 - 3.- En la pared exterior del intercambiador de calor (tpoIC).
 - 4.- En la pared exterior de la chimenea (tpoCH).

La toma de estas temperaturas se realizará en el punto medio de la pared de la cámara de combustión, intercambiador de calor y chimenea.

- La frecuencia para la toma de datos de cada una de las temperaturas será de 5 min.
- De acuerdo a la composición elemental de los desechos plásticos se obtendrá un volumen de ceniza generada del 9,85% de la cantidad de desechos plásticos incinerados, para lo cual será necesario realizar la remoción de cenizas periódicamente.

6.2 ADQUISICIÓN DE DATOS

Los datos fueron obtenidos el 21/12/09, a las 10:00 horas.

Temperatura ambiente: 20 °C.

Carga a ser incinerada: 1500 gr

Cauda (fluido frío): 100 ml/seg,

Tiempo de combustión: 15-20 min aprox.

Tabla 6.1 Datos experimentales

Temperatura (°C)	Tiempo (min)						
	0,0	5,0	10,0	15,0	20,0	25,0	30,0
tamb	22,0	22,0	22,0	22,0	22,0	22,0	22,0
tpoCAM	28,5	37,7	50,4	53,4	45,3	42,8	41,0
tpoIC.	124,0	148,5	168,3	188,5	146,5	133,0	125,1
tpoCH	113,0	131,0	144,2	133,5	129,6	121,4	117,0
th1	675,4	735,2	835,0	816,0	783,4	751,0	695,8
tc1	20,0	20,0	20,0	20,0	20,0	20,0	20,0
th2	312,7	325,1	340,1	353,0	336,4	322,0	317,0
tc2	105,5	118,5	127,3	138,0	132,0	127,2	119,1
tsch	205,2	224,1	231,0	240,5	228,4	219,2	214,9

Para determinar las pérdidas de calor y el calor neto se trabajará con las temperaturas promedio de los datos adquiridos.

Tabla 6.2 Temperaturas promedio

Temperatura (°C)	Promedio
tamb	22,0
tpoCAM	42,7
tpoIC.	147,7
tpoCH	127,1
th1	756,0
tc1	20,0
th2	329,5
tc2	123,9
tsch	223,3

6.3 DETERMINACIÓN DEL CALOR NETO

El valor del calor neto se lo obtendrá en función de las temperaturas de entrada y salida del fluido frío, ya que este fluido será el que ganará calor.

Propiedades del fluido frío a la entrada del intercambiador

tc1 := 20 °C Temperatura de entrada al IC del fluido frío

$\rho_c := 998.2$ $\frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$ Densidad del fluido frío

cpc := 4.182 $\frac{\text{kJ}}{\text{kg}^\circ\text{C}}$ Calor específico fluido frío

$Q_c := 1.0 \cdot 10^{-4}$ $\frac{\text{m}^3}{\text{seg}}$ Caudal del fluido frío

$$m_c := Q_c \cdot \rho_c$$

$$m_c = 0.1 \quad \frac{\text{kg}}{\text{seg}} \quad \text{Flujo masico del fluido frío}$$

$$t_{c2} := 123.9 \quad ^\circ\text{C} \quad \text{Temperatura de salida del fluido frío}$$

$$Q := m_c \cdot c_{pc} \cdot (t_{c2} - t_{c1})$$

$$Q = 43.373 \quad \frac{\text{kJ}}{\text{seg}}$$

6.4 PÉRDIDAS DE CALOR

Calor perdido debido al enfriamiento externo de las paredes de la cámara de combustión

$$t_{amb} := 22 \quad ^\circ\text{C}$$

$$t_{poCAM} := 42.7 \quad ^\circ\text{C} \quad \text{Dato experimental}$$

$$\dot{A} := 0.699 \quad \text{m}^2 \quad \text{Área de transferencia de calor.}$$

$$h_o := 5.99 \quad \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \cdot \text{K}} \quad \text{Coeficiente transferencia de calor externo}$$

$$Q_{pcam} := \dot{A} \cdot h_o \cdot (t_{poCAM} - t_{amb})$$

$$Q_{pcam} = 86.671 \quad \frac{\text{J}}{\text{seg}}$$

Calor perdido debido al enfriamiento externo de las paredes del intercambiador de calor

$$t_{poIC} := 147.7 \quad ^\circ\text{C} \quad \text{Dato experimental}$$

$$t_{amb} = 22 \quad ^\circ\text{C}$$

$$h_o := 9.881 \quad \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \cdot \text{K}} \quad \text{Coeficiente de transferencia de calor externo}$$

$$\dot{A} := 2.003 \quad \text{m}^2 \quad \text{Área de transferencia de calor.}$$

$$Q_{pIC} := h_o \cdot \dot{A} \cdot (t_{poIC} - t_{amb})$$

$$Q_{pIC} = 2.488 \times 10^3 \quad \frac{\text{J}}{\text{seg}}$$

Calor perdido debido al enfriamiento externo de las paredes de la chimenea

$$t_{poCH} := 127.1 \quad ^\circ\text{C} \quad \text{Temperatura experimental}$$

$$t_{amb} = 22 \quad ^\circ\text{C}$$

$$h_o = 9.881 \quad \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \cdot \text{K}} \quad \text{Coeficiente de transferencia de calor externo}$$

$$\dot{A} := 0.72 \quad \text{m}^2 \quad \text{Área de la chimenea}$$

$$Q_{pCH} := \dot{A} \cdot h_o \cdot (t_{poCH} - t_{amb})$$

$$Q_{pCH} = 747.715 \quad \frac{\text{J}}{\text{seg}}$$

Calor total perdido por las pares exteriores del sistema de combustión (Q5)

$$Q_5 := \frac{Q_{pcam} + Q_{pIC} + Q_{pCH}}{1000}$$

$$Q_5 = 3.322 \quad \frac{\text{kJ}}{\text{seg}}$$

Para determinar las pérdidas de calor de Q2, Q3, Q4, es necesario conocer el consumo de combustible, para de esta manera obtener el calor en función del tiempo.

Consumo de combustible

$$B := 0.00147 \quad \frac{\text{kg}}{\text{seg}} \quad \text{Dato obtenido en forma experimental}$$

Calor perdido por la combustión mecánica incompleta (Q4)

$$q4 := 100 - (n + q2 + q3 + q5)$$

$$q4 := 3.03 \quad \%$$

$$Q4 := 1.58 \quad \frac{\text{kJ}}{\text{seg}}$$

Calor perdido por los gases de escape (Q2)

$$th2 := 329.5 \quad ^\circ\text{C} \quad \text{tamb} = 22$$

$$cpg := 1.034 \quad \frac{\text{kJ}}{\text{kg} \cdot \text{K}} \quad cpa := 1.005$$

$$\rho g := 0.661 \quad \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \quad \rho ar := 1.177$$

$$Vgases := 12.281 \quad \frac{\text{m}^3}{\text{kg}} \quad \text{Vaire} := 11.688$$

$$Q2 := [Vgases \cdot (cpg \cdot \rho g) \cdot th2 - \text{Vaire} \cdot (cpa \cdot \rho ar) \cdot tamb] \cdot \frac{100 - q4}{100}$$

$$Q2 = 2.387 \times 10^3 \quad \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

$$\underline{Q2} := Q2 \cdot B$$

$$Q2 = 3.509 \quad \frac{\text{kJ}}{\text{seg}}$$

Calor perdido por la combustión química incompleta (Q3)

$$Q3 := 0.36 \quad \frac{\text{kJ}}{\text{seg}} \quad \text{Pérdida admitida por diseño}$$

Calor perdido total

$$Q_{pT} := Q2 + Q3 + Q4 + Q5$$

$$Q_{pT} = 8.771 \quad \frac{\text{kJ}}{\text{seg}}$$

Pérdidas relativas de calor

$$q2 := \frac{Q2}{PC_{\text{Iexp}} \cdot B} \cdot 100$$

$$q2 = 6.729 \quad \%$$

$$q3 := \frac{Q3}{PC_{\text{Iexp}} \cdot B} \cdot 100$$

$$q3 = 0.69 \quad \%$$

$$q4 := \frac{Q4}{PC_{\text{Iexp}} \cdot B} \cdot 100$$

$$q4 = 3.03 \quad \%$$

$$q5 := \frac{Q5}{PC_{\text{Iexp}} \cdot B} \cdot 100$$

$$q5 = 6.371 \quad \%$$

6.5 DETERMINACIÓN DE EFICIENCIAS TÉRMICAS

RENDIMIENTO DEL SISTEMA (n)

$$Q = 43.373 \quad \frac{\text{kJ}}{\text{seg}}$$

$$n := \frac{Q}{PC_{\text{exp}} \cdot B} \cdot 100$$

$$n = 83.179 \quad \%$$

RENDIMIENTO DEL HOGAR (n_{hogar})

$$q_3 = 0.69 \quad \%$$

$$q_4 = 3.03 \quad \%$$

$$q_{\text{hogar}} := q_3 + q_4$$

$$\eta_{\text{hogar}} := 100 - q_{\text{hogar}}$$

$$\eta_{\text{hogar}} = 96.28 \quad \%$$

EFICIENCIA DE DESTRUCCIÓN TÉRMICA (DRE)

$$\text{mentrada} := 1500 \quad \text{g} \quad \text{Masa de desechos entrante}$$

$$\text{msalida} := 82.3 \quad \text{g} \quad \text{Masa de desechos saliente}$$

$$\text{DRE} := \frac{\text{mentrada} - \text{msalida}}{\text{mentrada}} \cdot 100$$

$$\text{DRE} = 94.513 \quad \%$$

EFICACIA DE LA COMBUSTIÓN (CE)

$$\text{CO}_2 := 9.032 \quad \% \quad \text{CO} := 0.02 \quad \%$$

$$\text{CE} := 100 \cdot \frac{\text{CO}_2}{\text{CO}_2 + \text{CO}}$$

$$\text{CE} = 99.779 \quad \%$$

6.6 ANÁLISIS INMEDIATO DE LOS DESECHOS PLÁSTICOS

La información sobre la composición química de los desechos sólidos es importante en la evaluación de opciones alternativas de procesamiento y recuperación. En el proceso de incineración de desechos plásticos encontramos una combinación de materiales combustibles semihumedos.

Para el análisis de los desechos plásticos como combustible se puede utilizar un análisis simplificado que se conoce en la industria como análisis inmediato.

Este análisis consiste en separar:

- La humedad total (Wt).
- El contenido en compuestos volátiles (Vg), que es la masa de materiales combustibles que se gasifica en el calentamiento previo a la combustión (principalmente monóxido de carbono).
- El carbono fijo (Cfijo), que es la masa de materiales combustibles que queda en forma sólida hasta la combustión.
- Las cenizas (Ag)

Cumpléndose que:

$$Wt + Vg + Cfijo + At = 1$$

6.6.1 DETERMINACIÓN DE LA HUMEDAD (Wt)

Es la disminución en peso de la muestra colocada en el interior de un horno o estufa de secado, mantenida entre 105-110 °C durante un tiempo de 100 a 150 minutos. Se supone que lo único que se volatiliza es la humedad que se evapora en su totalidad.

La diferencia de la masa inicial y final es la masa de la humedad contenida en los desechos plásticos.

$M_o := 200$	g	Masa inicial
$M_1 := 198$	g	Masa seca
$Wt := \frac{M_o - M_1}{M_o} \cdot 100$		Temp calentamiento aprox. 105 °C
$Wt = 1$	(%)	Porcentaje de masa de humedad

6.6.2 DETERMINA DEL CONTENIDO EN MATERIAS VOLÁTILES (Vg)

Es la pérdida de peso que experimenta una muestra seca, M1 al calentarla en ausencia del oxígeno en un horno, durante 10 minutos a 850 ± 25 °C, debido a la alta temperatura ocurre descomposición del combustible y de él salen materias volátiles, que en su mayoría son hidrocarburos gaseosos (CO, H₂, CH₂, CO₂). Por la ausencia de oxígeno en el medio del horno, no se produce la combustión.

La pérdida en peso se obtiene después de enfriada la muestra y el porcentaje en volátiles se calcula teniendo en cuenta la humedad original del carbón, quedando un residuo sólido, de masa M2, que recibe el nombre de coque.

$M_2 := 29$	g	Masa de coque
$Vg := \frac{M_1 - M_2}{M_o} \cdot 100$		Calentamiento durante 10 min a (850 +/- 25) °C en ausencia de oxígeno
$Vg = 84.5$	(%)	Porcentaje de materias volátiles

6.6.3 DETERMINACIÓN DE LA CANTIDAD DE CENIZA (At)

El coque es colocado nuevamente en el horno y calentado a 1000°C, con la presencia de aire, siendo la ceniza el peso del resto de masa (M3) después de incinerar el residuo (el coque).

$$At := \frac{M3}{M0} \cdot 100$$

At = 9 (%) Porcentaje de cenizas

6.6.4 DETERMINACIÓN DEL CARBONO FIJO (Cfijo)

El carbono fijo es la diferencia de la masa del coque y la masa de las cenizas.

M3 := 18 g Masa de ceniza

$$Cfijo := \frac{M2 - M3}{M0} \cdot 100$$

Calentamiento durante 30 min a 1000 °C con presencia de aire

Cfijo = 5.5 (%) Porcentaje de carbono fijo

Tabla 6.3 Valores del análisis inmediato del combustible

Componente	Porcentaje en Peso			
	Wt	Vg	At	Cfijo
Plásticos	1	84,5	9	5,5

Fuente: Javier Salinas y Rony Vásquez

Para que este análisis sea repetitivo y tenga un valor industrial, es preciso normalizar su proceso.

En España existen las siguientes normas relativas a estos procedimientos²¹:

- Norma UNE 32-102. Partes 1 y 2. Lignitos duros, hullas y antracitas. Toma y preparación de muestras.
- Norma UNE 32-001. Hulla y antracita. Determinación de la humedad total.
- Norma UNE 32-019. Combustibles minerales sólidos. Determinación del contenido en material volátil.
- Norma UNE 32-004. Determinación de las cenizas.

6.7 DETERMINACIÓN DEL PODER CALÓRICO EXPERIMENTAL

El poder calorífico experimental se lo obtendrá a partir de un balance energético considerando las pérdidas obtenidas en función de las temperaturas obtenidas en forma experimental:

$$B \cdot PC_{\text{lexp}} := Q + Q_{pT}$$

Calor perdido total:

$$Q_{pT} = 8.771 \frac{\text{kJ}}{\text{seg}}$$

Calor neto:

$$Q = 43.373 \frac{\text{kJ}}{\text{seg}}$$

Consumo de combustible:

$$B := 0.00147 \frac{\text{kg}}{\text{seg}}$$

²¹ Tecnología Energética: Fuentes de energía no renovables (I) – El carbón

Por lo tanto el poder calorífico experimental es:

$$PC_{\text{lexp}} := \frac{Q + Q_{pT}}{B}$$

$$PC_{\text{lexp}} = 3.547 \times 10^4 \quad \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \quad \text{Poder calorífico inferior experimental}$$

$$Q_w := 1636 \quad \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \quad \text{Calor de condensación admitido por diseño}$$

$$PC_{\text{Sexp}} := PC_{\text{lexp}} + Q_w$$

$$PC_{\text{Sexp}} = 3.711 \times 10^4 \quad \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \quad \text{Poder calorífico superior experimental}$$

6.8 DETERMINACIÓN APROXIMADA DE LOS CONTENIDOS DE HIDROGENO Y CARBONO DE LOS DESECHOS PLÁSTICOS

Es posible determinar de forma aproximada los contenidos de hidrógeno y carbono de un combustible, en función de sus compuestos volátiles V (en %) y su PC_{Sexp} (kJ/kg).

$$C_{\text{exp}} := \left[\left(\frac{PC_{\text{Sexp}}}{71000} \right) - \left(\frac{V_g}{462} \right) + 0.434 \right] \cdot 100$$

$$C_{\text{exp}} = 77.375 \quad \%$$

$$H_{\text{exp}} := \left[\left(\frac{PC_{\text{Sexp}}}{607000} \right) + \left(\frac{V_g}{1450} \right) - 0.0286 \right] \cdot 100$$

$$H_{\text{exp}} = 9.081 \quad \%$$

$$O_{\text{exp}} := 100 - C_{\text{exp}} - H_{\text{exp}} - A_t - W_i$$

$$O_{\text{exp}} = 3.544 \quad \%$$

Tabla 6.4 Composición química aproximada obtenida en forma experimental

Elemento	Por ciento en peso (base húmeda)				
	C(exp)	H(exp)	O(exp)	A(t)	W(t)
Porcentaje (%)	77,37	9,08	3,54	9	1

Fuente: Javier Salinas y Rony Vásquez

6.9 OBTENCIÓN DEL PODER CALORÍFICO TEÓRICO

Para determinar el valor del poder calorífico superior teórico, se utilizará la BOMBA CALORIMÉTRICA ADIABÁTICA DE GALLENKAMP, este equipo es esencialmente un calorímetro de agua convencional, adquiere la característica de adiabática al tener una camisa alrededor del recipiente que contiene agua en el cual se sumerge la bomba. En el calorímetro se mide la variación de temperatura del agua provocada por la combustión completa de la muestra de combustible. El calor proveniente de la combustión pasa a través de las paredes de la bomba y calienta el agua. Pasado algún tiempo, se establece un equilibrio térmico y se registra la variación de la temperatura.

Los valores obtenidos por el calorímetro son:

Tabla 6.5 Datos del ácido benzoico

1	Valor calorífico del Ácido Benzoico	J / g	26454
2	Peso del Ácido Benzoico quemado	g	1
3	Energía liberada por el ácido, (1 x 2)	J	26454
4	Temperatura inicial	°C	21,15
5	Temperatura final	°C	23,43
6	Elevación de temperatura, (5 – 4)	°C	2,28
7	Capacidad calorífica total del aparato, (1 / 6)	J / g °C	11602,6

Tabla 6.6 Datos de la muestra

8	Peso del porta muestra	g	
9	Peso del porta muestra más combustible	g	
10	Peso del combustible, (9 – 8)	g	0,9
11	Temperatura inicial	°C	21,15
12	Temperatura final	°C	24,2
13	Elevación de temperatura, (12 – 11)	°C	3,05
14	Energía total liberada, (13 x 7)	J	35388,0
15	Valor calorífico de la muestra, (14 / 10)	J / g	39320,0

Por lo tanto el valor del poder calorífico superior teórico de los desechos plásticos es igual a:

$$PC_{\text{teorico}} := 39320 \quad \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

6.10 ANÁLISIS DE RESULTADOS

Obtenidos los valores del poder calorífico superior de los desechos plásticos, se determinara el margen de error obtenido entre los diferentes valores.

Tabla 6.7 Valores del poder calorífico superior

Poder calorífico superior	Teórico	Experimental
PCS (kJ/kg)	39320	37110
Error (%)		5.62

El margen de error obtenido entre el poder calorífico teórico y el experimental se debe a que es muy difícil obtener muestras de desechos plásticos con la misma composición. Para la obtención del poder calorífico experimental se

asume que el porcentaje de PET fue mayor al utilizado en la muestra para obtener el poder calorífico teórico, lo cual disminuyó el valor del poder calorífico experimental ya que el PET contiene mayor cantidad de oxígeno en su unidad estructural, el cual afecta directamente en el valor del poder calorífico.

Tabla 6.8 Poder calorífico de diversos polímeros

Poliestireno	46000
Polietileno	46000
Polipropileno	44000
PVC	18900
PET	23000

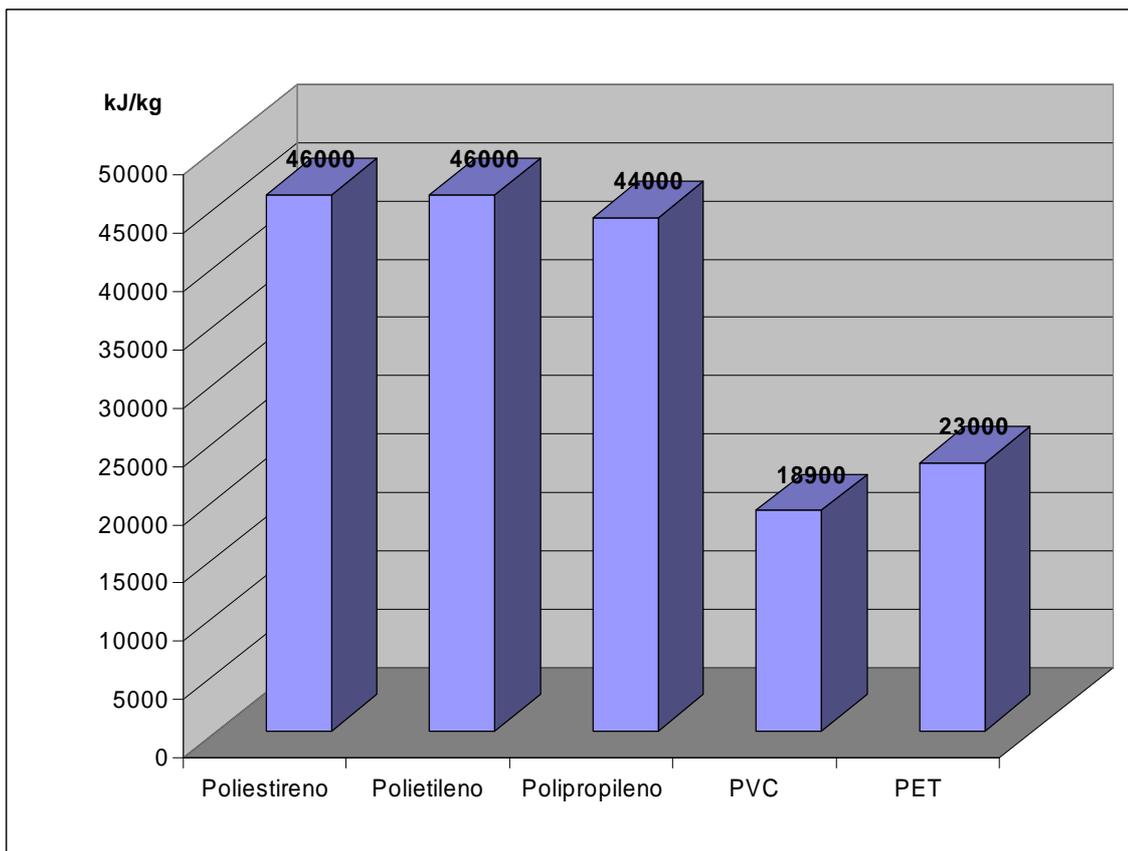


Figura 6.6 Poder calorífico de diversos polímeros

La composición de desechos plásticos utilizada para nuestro estudio fue aproximadamente de: HDPE 30 %, LDPE 25%, PET 35 %, Varios 10%

6.11 ESTUDIO COMPARATIVO

Uno de los objetivos propuestos en este proyecto fue determinar el poder calorífico de los residuos plásticos urbanos, el cual será comparado con el poder calorífico de combustibles convencionales y alternativos.

Tabla 6.9 Poder calorífico de diversos materiales en (kJ/kg)

<i>Residuos Plásticos (teórico)</i>	39320
<i>Residuos Plásticos (exp)</i>	37110
Residuos Sólidos Urbanos	15983
Madera Seca	20000
Madera, 30% húmeda	12970
Papel y Cartón	17489
Textiles	18995
Caucho y Cuero	22468
Restos de Comida y Vegetales	17489

Fuente: Plastivida, Boletín técnico informativo N° 32

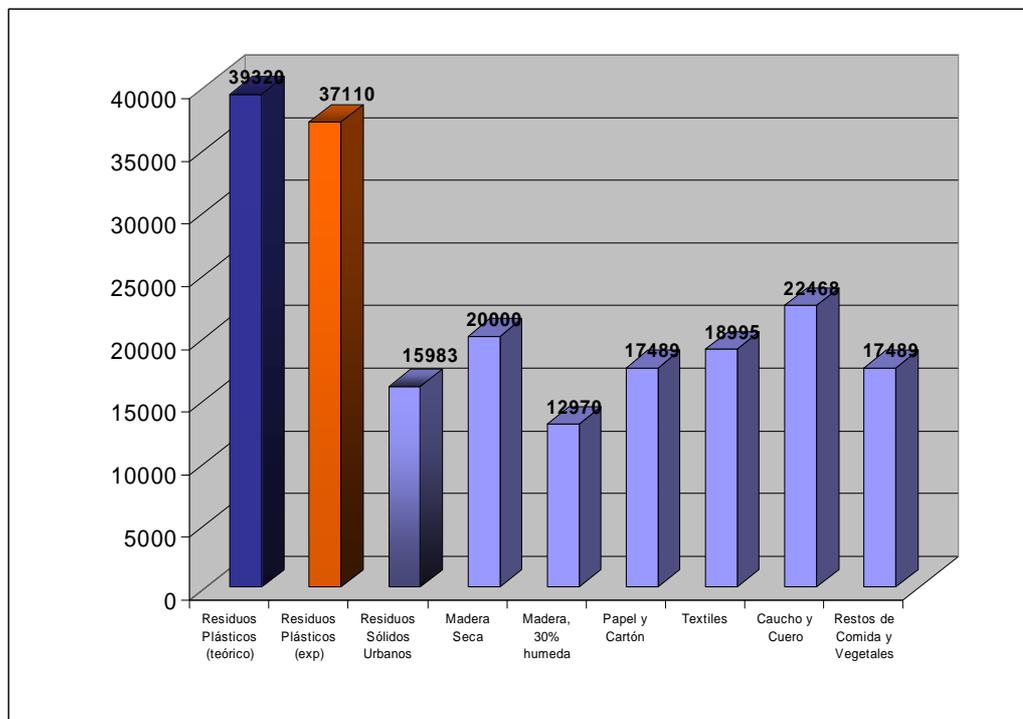


Figura 6.7 Poder calorífico de diversos materiales en (kJ/kg)

Como combustibles convencionales tenemos entre otras: al diesel, bunker, querosén, como los más utilizados en el país a nivel industria

Tabla 6.10 Poder calorífico de combustibles convencionales en (kJ/kg)

Gas natural	48000
Fuel-Oil	44000
Hulla	29000
<i>Residuos Plásticos (teórico)</i>	<i>39320</i>
<i>Residuos Plásticos (exp)</i>	<i>37110</i>
Lignito	20000
Carbón	29000
Petróleo	40000
Bunker	40100
Diesel	42920
Kerosén	43380

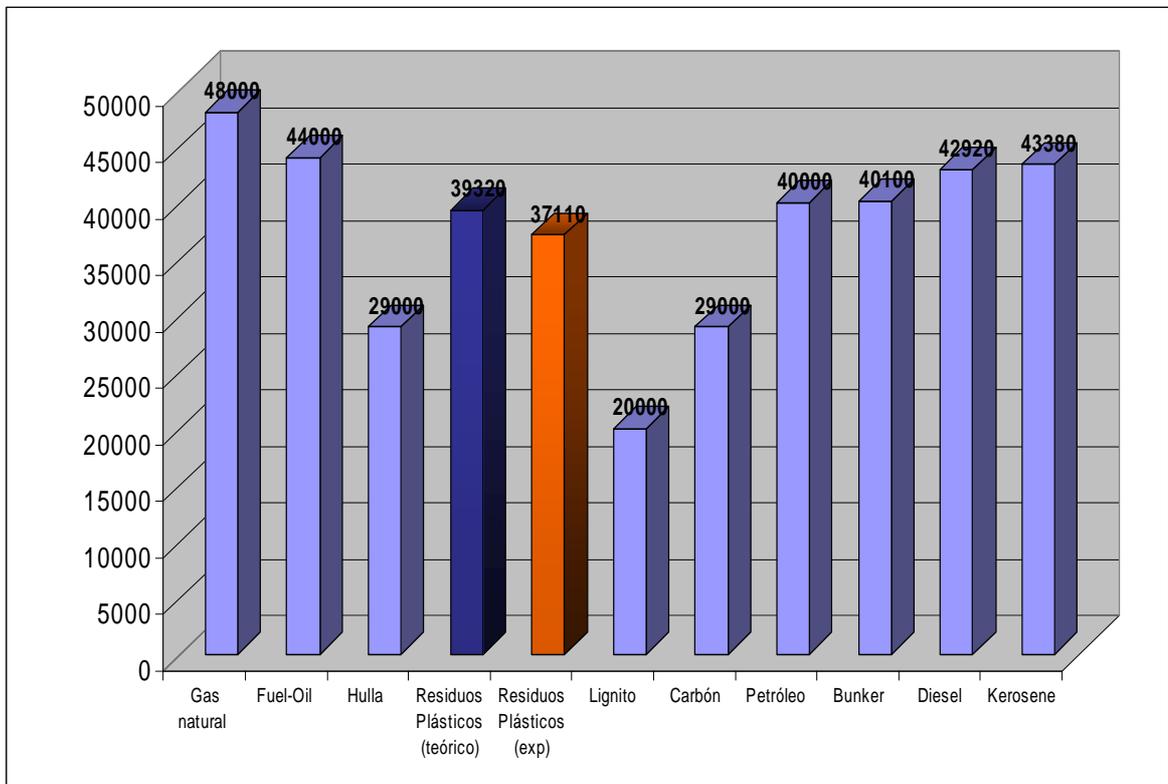


Figura 6.8 Poder calorífico combustibles convencionales en kJ/kg

Tabla 6.11 PCS experimental de biomasa y desechos plásticos en (kJ/kg)

Cascarilla Seca	10063
Hierba húmeda	7820
Eucalipto húmedo	12566
<i>Residuos Plásticos (exp)</i>	<i>37110</i>

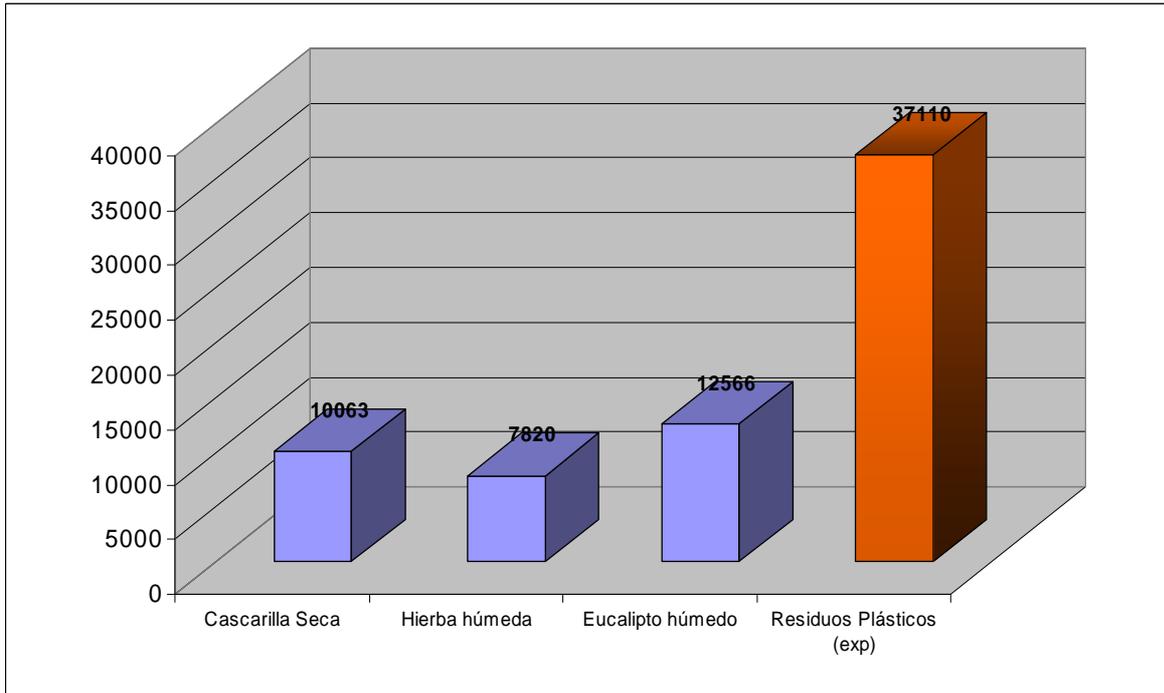


Figura 6.9 Poderes caloríficos obtenidos en forma experimental

CAPÍTULO 7

ANALISIS DEL IMPACTO AMBIENTAL

7.1 DETERMINACIÓN DEL ORIGEN DE LOS DESECHOS PLÁSTICOS QUE SERÁN UTILIZADOS EN EL ESTUDIO

La determinación de los desechos plásticos utilizados en el estudio son desde hace varios años, este es un problema social y ambiental razón por la cual, se ha implementado en las diferentes ciudades del Ecuador distintos sistemas para la recolección, tratamiento y disposición final de los residuos, siendo algunos de estos no muy eficientes, debido a estudios deficientes, una mala administración o por falta de fuentes de recursos.

El origen de los desechos en el distrito metropolitano de Quito, podemos observar en el mapa temático la concentración de producir desechos y estos son desde los domiciliarios, industriales, oficinas, construcción entre otros, pero cabe recalcar que no utilizaremos los desechos hospitalarios por el tratamiento especial que se les da a esta clase de desechos ya que son considerados nocivos para la salud.

Los desechos plásticos tales como las fundas, botellas, diferentes envases, entre otros que se generan en nuestro diario vivir son nuestro principal

producto para ser utilizado como un combustible alternativo, pero debemos tener presente el problema ambiental que se nos viene o ya estamos viviendo, ya que el plástico es un producto que se demora mucho en degradarse y el espacio que ocupa en los rellenos sanitarios es muy grande así que tenemos que hacer una conciencia moral a la sociedad frente a este problema.

Figura 7.1 Mapa Temático Producción Diaria de Basura en Distrito Metropolitano de Quito



Fuente: EMASEO

7.2 DETERMINACIÓN DEL VOLUMEN DISPONIBLE DE DESECHOS

Los desechos plásticos de nuestro estudio, se centran en el distrito metropolitano de Quito, y los datos a trabajar son las proyecciones de la ciudad según la cantidad de habitantes por año y el factor de crecimiento según el INEC que es de 0.68, estudio que haremos énfasis en el presente año 2009.

Distrito Metropolitano de Quito produce mil 550 toneladas de basura al día, según el diario EL COMERCIO y un estudio realizado por fundación NATURA, en el año 2007 y según las proyecciones de crecimiento de habitantes en la ciudad los siguientes datos.

Tabla 7.1 Desechos Totales

Año 2009	Habitantes	Desechos Totales Kg./día	Desechos Totales T/ día	Desechos Totales T/ año
Quito	2122594,00	1453459,98	1453,46	530512,89

Fuente: Javier Salinas- Rony Vásquez

Esta cantidad es similar al estudio realizado por el diario el comercio, obteniéndose una media de mil 550 toneladas diarias de basura recolectadas en el distrito metropolitano de Quito, los desechos plásticos usados en el estudio son los plásticos de todos los tipos y que cubren un porcentaje del 3,35 el resto se divide entre desechos orgánicos, vidrios, metales, cartones, papeles y otros.

Tabla 7.2 Desechos Plásticos

Desechos Totales	Desechos Plásticos	Desechos Totales
Ton. Por día	3,35% T/día	96,65% T/día
1453,46	48,69	1404,77

Fuente: Javier Salinas- Rony Vásquez

Observamos una producción media de desechos plásticos de 50 toneladas por día en distrito metropolitano de Quito, las empresas que reciclan los desechos plásticos solo utilizan un 14,15% que es la cantidad que pueden procesar y el resto se va a los rellenos sanitarios y a contribuir con este mega problema ambiental.

Tabla 7.3 Desechos Plásticos Útiles

Desechos Plásticos 100% T/ día	Desechos Plásticos Procesados 14,15% T/ día	Desechos Plásticos NO Procesados 85,85% T/día
48,69	6,89	41,80

Fuente: Javier Salinas- Rony Vásquez

De tal manera que tenemos una media de 40 toneladas para usar como combustible alternativo en nuestro proyecto en el cual se encuentran los desechos plásticos, mismos que se dividen en , PET , Polipropileno, PEHD Fundas, PEHD Soplado, PELD PS, PVC, Línea Blanca, los mismos que se encuentran en los siguientes porcentajes y cantidades.

Tabla 7.4 Cantidad de desechos plásticos según sus diferentes tipos

Tipos	Porcentajes	Cantidad
Polímetros	%	T/ día
PET	0,24	10,03
Polipropileno	0,12	5,02
PEHD Fundas	0,24	10,03
PEHD Soplado	0,12	5,02
PELD	0,12	5,02
PS	0,06	2,47
PVC	0,04	1,67
Línea Blanca	0,06	2,51
TOTAL	1,00	41,80

Fuente: Javier Salinas- Rony Vásquez

7.3 APLICACIÓN DEL MÉTODO EIAS.

Descripción del proyecto

El proyecto ha desarrollarse consiste en diseño y construcción de un sistema de combustión para caracterización térmica de los desechos plásticos utilizados como combustible alternativo, a manera de prototipo para su posterior utilización y funcionamiento en la Escuela Politécnica Del Ejército en el Departamento de Ciencias de la Energía y Mecánica, para el laboratorio de Mecánica de Materiales, ubicado en la provincia de Pichincha en el cantón Rumiñahui en la Parroquia Selva Alegre. El área de intervención directa posee una flora y una fauna de poca diversidad por las múltiples construcciones y desarrollo mismo del sector. Debido al espacio del laboratorio donde se va a ubicar la cámara es en un lugar alejado del campo estudiantil no representa niveles elevados de contaminación para el ser humano directamente.

En cuanto a la instalación de los sistemas anexos necesarios para el funcionamiento del prototipo cumplen con todas las normas de emisiones gaseosas exigidas por las instituciones regulatorias; ya que es un sistema de quemado con gas licuado de petróleo, y un sistema eléctrico básico de bujías.

La seguridad operacional tanto en la construcción como en el funcionamiento de la cámara han sido consideradas de tal manera que no se afecte el medio ambiente.

Descripción del Ambiente

Las condiciones ambientales afectadas directamente en el desarrollo e implementación del prototipo es la calidad del aire, debido a la quema de plásticos.

Es importante recalcar que en el funcionamiento de la cámara las cenizas del incinerador de desechos plásticos, en general, contienen sustancias peligrosas como dioxinas, partículas de hollín, ácido clohídrico, furanos, plomo, cadmio, arsénico, plomo zinc, mercurio, cadmio y otros metales tóxicos son altamente

peligrosos llegando a un nivel de cancerígenos y generan trastornos en el sistema nervioso. Tomando medidas de prevención como filtros u otros sistemas de reducción de gases y material particulado no se reducen en gran cantidad estos efectos por los que es un punto importante en que se debe trabajar más a detalle.

Caracterización del medio físico

En cuanto al medio físico de influencia del prototipo de combustión de plásticos tiene un bajo impacto sobre el suelo ya que las cenizas producidas son eliminadas durante el mismo proceso de combustión.

El agua utilizada no sufre gran impacto, ya que esta es utilizada solo para el lavado de la cámara y se desecha sin ningún tratamiento por los drenajes de la universidad.

La calidad de aire es el medio físico más afectado por lo que se requiere de mayor atención en este punto para su tratamiento y no alterar las condiciones naturales del medio donde se va a realizar el trabajo.

Caracterización del medio biótico

El medio biótico afectado por la implementación del prototipo de combustión de plásticos no se ve afectada en gran medida a nivel general en cuanto a flora y fauna existente en la zona. Estos no se ven afectados debido a que por la ubicación del lugar donde se va a llevar a cabo el trabajo y tomando en cuenta que es una zona poblada no se encuentra gran proporción flora y fauna, además de la que ha sido adaptada especialmente para la zona.

Estudio socio económico cultural y étnico

Debido a que es un prototipo de combustión de plásticos no tiene gran impacto sobre el análisis económico, cultural y étnico. Sin embargo si este se tratara de un proyecto a nivel industrial sería necesario realizar un estudio de mayor alcance y que satisfaga todas las necesidades del área de influencia.

Este prototipo tiene como objetivo educar a la población sobre el manejo y utilización de los plásticos y obtener de estos los mejores beneficios.

Por este motivo es necesario respetar el entorno cultural social del area de influencia directa, de tal manera que se logre mantener una armonía hombre-naturaleza.

Identificación y valorización de impactos ambientales

Matrices de interacción e identificación de impactos.

Tabla 7.5 Matriz de evaluación de construcción, montaje y funcionamiento de la cámara

MATRIZ DE EVALUACION DE CONSTRUCCION, MONTAJE Y FUNCIONAMIENTO DE LA CAMARA												
ACCIONES	ETAPA DE CONSTRUCCION	Preparación de material	Acabados de Construcción	Instalación de Sistemas Anexos	ETAPA DE EJECUCION	Calentamiento de Cámara (210-310)	Introducción de Combustible Alternativo en la Cámara	Generación de Energía Térmica, Humo, Ceniza	Generación de Desechos	AFECTACIONES NEGATIVAS	AFECTACIONES POSITIVAS	AGREGACION DE IMPACTOS
MEDIO FISICO												
Calidad del aire		1,7	-4	2,2		-4	1,6	-4,6	-6,9	4	3	
Calidad del suelo		-3,4	-5,4	1,9		-1	4,6	-3,2	-3,2	5	2	-9,7
MEDIO BIOTICO												
Flora		1	-4,6	1,6		-3,4	1,3	-7,8	-7,8	4	3	-19,7
Fauna		1	-4,6	-2,3		-3,4	1	-7,8	-7,8	5	2	-23,9
MEDIO SOCIOECONOMICO												
Actividades Económicas				4,6				6	4,6	0	3	15,2
Empleo				6,9				-2,3	7,8	1	2	12,4
Salud y Seguridad			-4	5,2		-4	-1,3	-6,9	-4,6	5	1	
MEDIO PERCEPTUAL												
Vista de Influencia Panorámica			-4,6	-4,6				-4,6	-4,6	4	0	-18,4
AFECTACIONES NEGATIVAS		1	6	2		5	1	7	6	45 IMPACTOS		
AFECTACIONES POSITIVAS		4	0	6		0	4	1	2			
AGREGACION DE IMPACTOS		0,3	-27,2	15,5		0	7,2	-31,2	-22,5			

Tabla 7.6 Matriz de calificación a los diferentes medios según las acciones de cada etapa del proceso de la cámara.

MATRIZ DE CALIFICACION A LOS DIFERENTES MEDIOS SEGÚN LAS ACCIONES DE CADA ETAPA DEL PROCESO DE LA CAMARA																		
PARAMETROS AMBIENTALES	ACCIONES	ETAPA DE CONSTRUCCION	ETAPA DE EJECUCION				Calentamiento de Cámara (210-310)	Introducción de Combustible Alternativo en la Cámara	Generación de Energía Térmica, Humo, Ceniza	Generación de Desechos								
			Preparación de material	Acabados de construcción	Instalación de Sistemas Anexos													
MEDIO FISICO																		
Calidad del aire																		
			1	1	2	-1	1	1			2	-1	1	1	2	-1	3	-1
			2	1	2	2	1	5			2	2	1	3	2	3	2	3
Calidad del suelo																		
			2	-1	2	-1	1	1			1	-1	2	1	2	-1	2	-1
			2	1	3	2	1	4			1	1	2	3	1	3	1	3
MEDIO BIOTICO																		
Flora																		
			1	1	2	-1	1	1			2	-1	1	1	3	-1	3	-1
			1	1	2	3	1	3			2	1	1	2	2	4	2	4
Fauna																		
			1	1	2	-1	1	-1			2	-1	1	1	3	-1	3	-1
			1	1	2	3	2	3			2	1	1	1	2	4	2	4
MEDIO SOCIOECONOMICO																		
Actividades Económicas																		
							2	1							2	1	2	1
							2	3							3	3	2	3

Continuación...

Tabla 7.6 Matriz de calificación a los diferentes medios según las acciones de cada etapa del proceso de la cámara.

MATRIZ DE CALIFICACION A LOS DIFERENTES MEDIOS SEGÚN LAS ACCIONES DE CADA ETAPA DEL PROCESO DE LA CAMARA													
PARAMETROS AMBIENTALES	ACCIONES	ETAPA DE CONSTRUCCION	ETAPA DE EJECUCION				ACCIONES						
			Preparación de material	Acabados de construcción	Instalación de Sistemas Anexos	Calentamiento de Cámara (210-310)	Introducción de Combustible Alternativo en la Cámara	Generación de Energía Térmica, Humo, Ceniza	Generación de Desechos				
Empleo					3 1					1 -1	2 1		
					2 3					2 3	2 4		
Salud y Seguridad					2 1					3 -1	2 -1		
					2 4					2 2	2 3		
MEDIO PERCEPTUAL													
Vista de Influencia Panorámica					2 -1					2 -1	2 -1		
					2 3					2 3	2 3		

Tabla 7.7 Matriz de interacciones de las acciones de la cámara.

MATRIZ DE INTERACCIONES DE LAS ACCIONES DE LA CÁMARA									
PARAMETROS AMBIENTALES	ACCIONES	ETAPA DE CONSTRUCCION			ETAPA DE EJECUCION				
		Preparación de material	Acabados de construcción	Instalación de Sistemas Anexos	Calentamiento de Cámara (210-310)	Introducción de Combustible Alternativo en la Cámara	Generación de Energía Térmica, Humo, Ceniza	Generación de Desechos	
MEDIO FISICO									
Calidad del aire			X		X		X	X	
Calidad del suelo		X	X			X	X	X	
MEDIO BIOTICO									
Flora			X		X		X	X	
Fauna			X		X		X	X	
MEDIO SOCIOECONOMICO									
Actividades Economicas		X		X			X	X	
Empleo			X	X				X	
Salud y Seguridad			X		X		X	X	
MEDIO PERCEPTUAL									
Vista de Influencia Panorámica							X	X	

La evaluación de impactos ambientales se desarrolla a través de la identificación de las acciones del proyecto susceptibles de producir impactos en los factores ambientales detallados anteriormente en la matriz de evaluación.

Se califican los efectos en el ambiente de acuerdo a cuatro parámetros fundamentales: magnitud, importancia, duración y carácter de cada impacto.

En el desarrollo e implementación del proyecto “Diseño y construcción de una cámara de combustión para caracterización térmica de los desechos plásticos

utilizados como combustible alternativo” y con la ayuda de la evaluación del impacto ambiental que esta causa sobre los medios físico, biótico, socioeconómico y perceptual; se puede llegar a la conclusión que los 45 impactos causados por este prototipo no son de gran influencia.

Al realizar el análisis de los impactos negativos y positivos que tiene el prototipo es necesario tomar en cuenta que la principal fuente de contaminación se genera en la etapa misma de ejecución. Lo más destacado de esta etapa es la generación de desechos, por lo que debería tomarse en cuenta en un futuro para dar el tratamiento adecuado y disminuir todos los efectos negativos para el medio en donde se ejecuta la acción propia de la cámara de combustión.

En la etapa de construcción, es importante destacar que las afectaciones positivas que genera el proyecto son mayores que las afectaciones negativas. Esto se debe a que se han tomado en cuenta todas las medidas necesarias de bioseguridad, de tal manera que en la construcción de la cámara no se vea afectado directamente los diferentes medios y en un futuro se pueda visualizar el efecto positivo en gran medida. Permitiendo así que al final del desarrollo del proyecto; este colabore con el medio ambiente y de una solución positiva y factible a la producción innecesaria de desechos plásticos que pueden tener una finalidad más útil como la generación de combustibles alternativos y evitar la posterior destrucción del medio por la acumulación de materiales innecesarios.

Los cuarenta y cinco impactos generados tanto en las etapas de construcción, como en la etapa de ejecución son de magnitud e importancia baja dentro del medio donde se va a desarrollar el proyecto. Este nivel bajo de impacto permite que este prototipo sea amigable con el medio ambiente, dando soluciones efectivas a la acumulación de desperdicios plásticos innecesarios, por lo que es necesario incluir el desarrollo de un Plan de Manejo Ambiental en el cual se incluirán medidas preventivas y mitigadoras y lograr una buena actividad de combustión de plásticos en el futuro si el proyecto prototipo llega a tener una aplicación industrial.

7.4 IMPLEMENTACIÓN DE UN DISPOSITIVO PARA REDUCIR LA EMISIÓN DE GASES.

Los valores de concentración de contaminantes comunes del aire, establecidos en la norma, así como los que sean determinados en los programas públicos de medición, están sujetos a las condiciones de referencia de 25 °C y 760 mm Hg.

Las mediciones observadas de concentraciones de contaminantes comunes del aire deberán corregirse de acuerdo a las condiciones de la localidad en que se efectúen dichas mediciones, para lo cual se utilizará la siguiente ecuación:

$$C_c = C_o * \frac{760mmHg}{P_{blmmHg}} * \frac{(273 + t^{\circ}C)^{\circ}K}{298^{\circ}K} \quad (7.31)$$

Donde:

Cc: concentración corregida

Co: concentración observada

Patm: presión atmosférica local, en milímetros de mercurio.

t°C: temperatura local, en grados centígrados.

De los planes de alerta, alarma y emergencia de la calidad del aire

La entidad ambiental de control establecerá un plan de alerta, de alarma y de emergencia ante situaciones críticas de contaminación del aire, basado en el establecimiento de tres niveles de concentración de contaminantes. La ocurrencia de estos niveles determinará la existencia de los estados de alerta, alarma y emergencia.

Se definen los siguientes niveles de alerta, de alarma y de emergencia en lo referente a la calidad del aire. Cada uno de los tres niveles será declarado por la entidad ambiental de control cuando uno o más de los contaminantes comunes indicados excedan la concentración establecida en la siguiente tabla,

o cuando las condiciones atmosféricas se espera que sean desfavorables en las próximas 24 horas.

Tabla 7.8 Concentraciones de contaminantes comunes que definen los niveles de alerta, de alarma y de emergencia en la calidad del aire [1]

Contaminante y período de tiempo	Alerta	Alarma	Emergencia
Monóxido de carbono concentración promedio en ocho horas	15000	30 000	40 000
Oxidantes fotoquímicos, expresados como ozono. concentración promedio en una hora	300	600	800
Óxidos de nitrógeno, como no2 concentración promedio en una hora	1 200	2 300	3 000
Dióxido de azufre concentración promedio en veinticuatro horas	800	1 600	2 100
Material particulado pm10 concentración en veinticuatro horas	250	400	500

Fuente: Entidad ambiental de control

Nota:

[1] Todos los valores de concentración expresados en microgramos por metro cúbico de aire, a condiciones de 25 °C y 760 mm Hg.

Cada plan contemplará la adopción de medidas que, de acuerdo a los niveles de calidad de aire que se determinen, autoricen a limitar o prohibir las operaciones y actividades en la zona afectada, a fin de preservar la salud de la población.

La entidad ambiental de control podrá proceder a la ejecución de las siguientes actividades mínimas:

En Nivel de Alerta:

Informar al público, mediante los medios de comunicación, del establecimiento del Nivel de Alerta.

Restringir la circulación de vehículos así como la operación de fuentes fijas de combustión en la zona en que se está verificando el nivel de alerta para uno o más contaminantes específicos. Estas últimas acciones podrán consistir en limitar las actividades de mantenimiento de fuentes fijas de combustión, tales como soplado de hollín, o solicitar a determinadas fuentes fijas no reiniciar un proceso de combustión que se encontrase fuera de operación

En Nivel de Alarma:

Informar al público del establecimiento del Nivel de Alarma.

Restringir, e inclusive prohibir, la circulación de vehículos así como la operación de fuentes fijas de combustión en la zona en que se está verificando el nivel de alarma. Esto podrá incluir en limitar el tiempo de operación para aquellas fuentes fijas que no se encontraren en cumplimiento con las normas de emisión.

Suspender cualquier quema a cielo abierto.

En Nivel de Emergencia:

Informar al público del establecimiento del Nivel de Emergencia.

Prohibir la circulación y el estacionamiento de vehículos así como la operación de fuentes fijas de combustión en la zona en que se está verificando el nivel de emergencia. Se deberá considerar extender estas prohibiciones a todo el conjunto de fuentes fijas de combustión, así como vehículos automotores, presentes en la región bajo responsabilidad de la Entidad Ambiental de Control. Suspender cualquier quema a cielo abierto, e inclusive, proceder a combatir dichas quemas.

POSIBLES SOLUCIONES PARA EL TRATAMIENTO DE LAS EMISIONES GASEOSAS

Para un primer paso la reducción de emisiones gaseosas se implemento un sistema de combustión el mismo que costa de un quemador alimentado por gas licuado de petróleo que tiene por finalidad combustionar completamente a los gases que no han alcanzado una combustión completa y así reducir la producción de óxidos de azufre y nitrógeno como también CO, por otro lado el problema que se genero con este problema es el incremento de la temperatura de los gases de escape, para esto implementamos en la base de chimenea un venterol para ingresar aire fresco y de temperatura menor, aquí nos ayudaremos con un sistema de diseño de chimenea tipo pitot también tenemos que incrementar la distancia del conducto de salida de la chimenea para que se reduzca la temperatura y cumplir con las normas vigentes en el distrito metropolitano de quito.

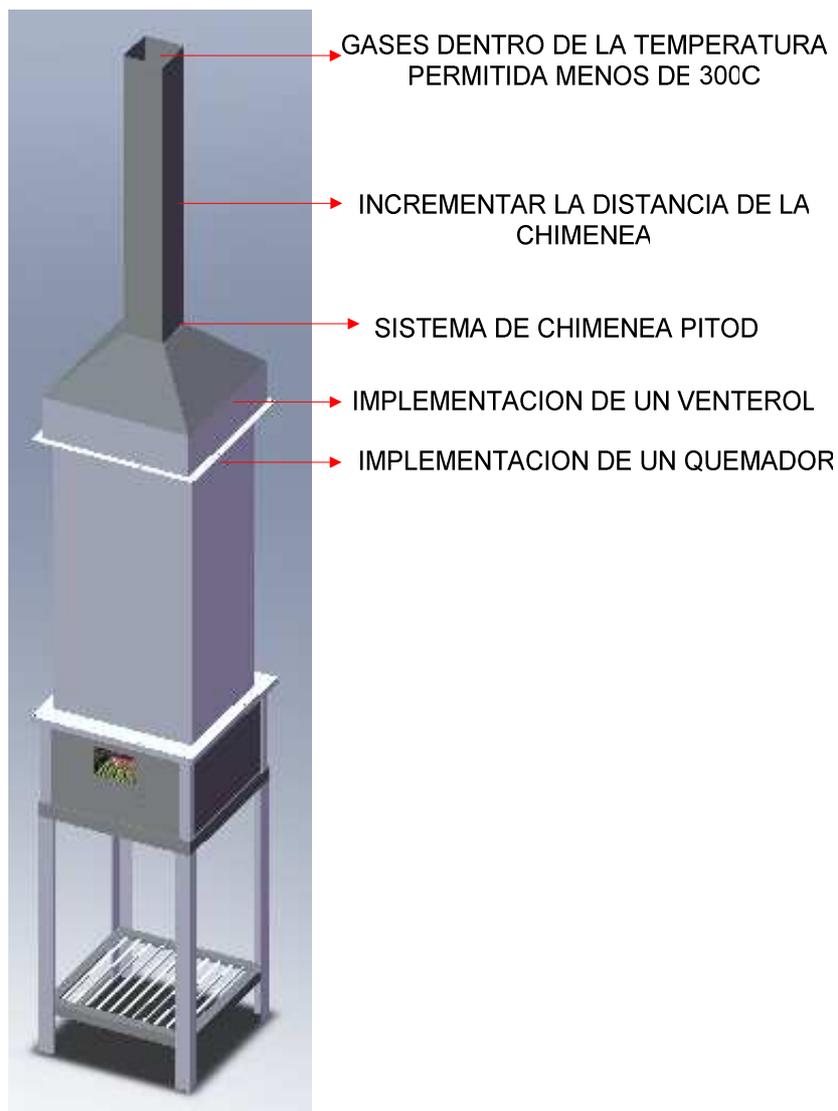


Figura 7.2 Implementación de un sistema para la reducción de emisiones gaseosas

La segunda opción que podemos dar al tratamiento de los gases siendo segura para un tratamiento mas adecuado de los gases de combustión se trata de incorporar un sistema de duchas para hacer un efecto de lluvia acida a continuación un esquema:

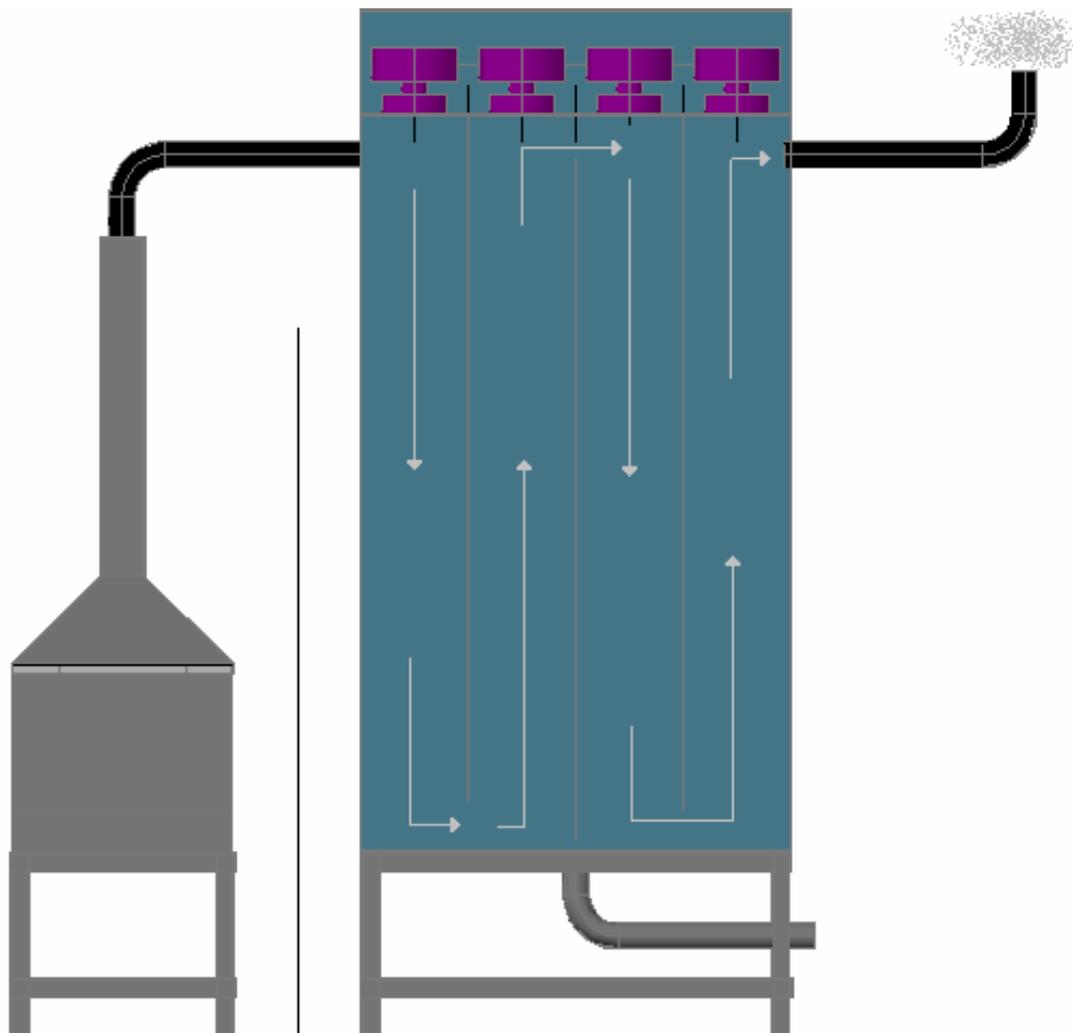


Figura 7.3 Implementación de un sistema para la reducción de emisiones gaseosas duchas

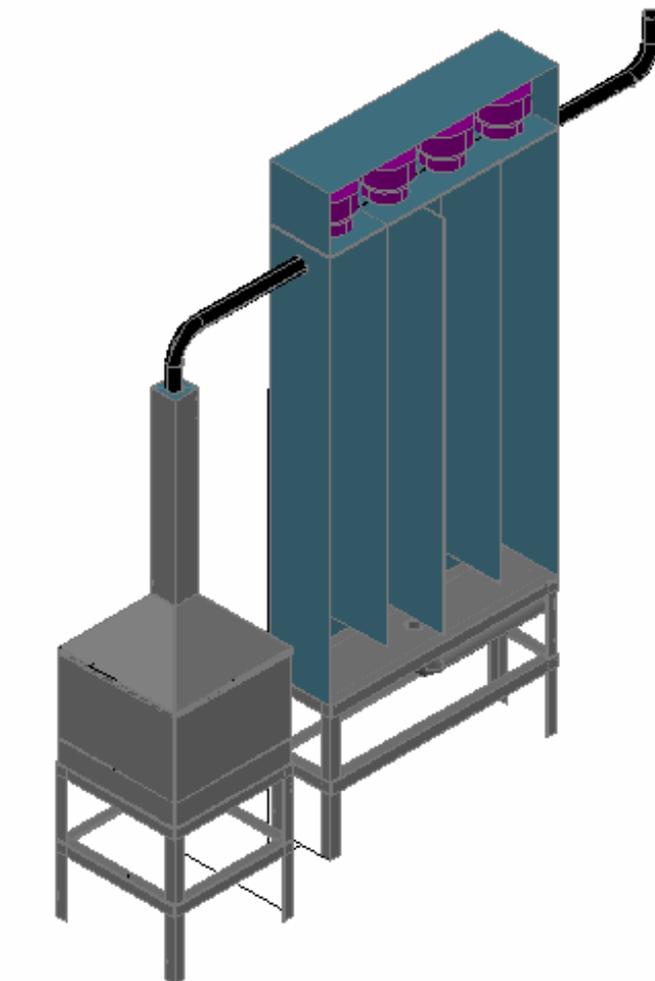


Figura 7.4 Implementación de un sistema para la reducción de emisiones gaseosas dichas isometría

EQUIPOS PARA RETENER MATERIAL PARTICULADO (POLVOS)

CÁMARA DE SEDIMENTACIÓN POR GRAVEDAD.

Aquí la corriente de gases se hace ingresar a una cámara de grandes dimensiones donde su velocidad disminuye bruscamente, lo que favorece la sedimentación de las partículas de mayor tamaño. Para que los equipos no lleguen a tener tamaños extremadamente grandes y para aumentar la eficacia, se suelen colocar placas inclinadas dónde las partículas al chocar pierden aun más velocidad.

Con estos equipos se pueden lograr detener partículas mayores a 50 micrones de diámetro con eficiencias medias.

Debida a su escasa eficiencia y a la limitación en el tamaño de retención, se suelen usar solo como pretratamientos, dispuestos antes de otros equipos de retención.

CICLONES Y CICLONES MÚLTIPLES.

En estos aparatos se aprovecha la velocidad de los humos que entrando en un equipo de forma circular se ven forzados a recorrer una trayectoria helicoidal, lo cual produce una fuerza centrífuga sobre las partículas forzándolas a que se muevan hacia el exterior de la corriente gaseosa, donde por rozamiento con la pared del ciclón pierden velocidad y así se separan cayendo en el fondo del mismo. El gas tratado sale por el centro del equipo por su parte superior.

La eficacia de retención varía de acuerdo al tamaño de la partícula y su peso específico pero oscila desde 30 a 90 % para partículas de diámetros entre 5 y 20 micrones.

Los multiciclones son un mismo equipo donde se encuentra una batería de pequeños ciclones.

SEPARADORES HÚMEDOS.

Dentro de estas unidades la separación se realiza por medio de una corriente líquida pulverizada (gotas), que es inyectada dentro de una cámara por donde circulan los humos en contra o cococorriente.

Las partículas se ven arrastradas por la corriente líquida hacia la parte inferior del equipo. El líquido cumple solo con una función mecánica.

La colisión de las partículas con el medio líquido puede efectuarse de diversos modos, el equipo más común es el equipo tipo Venturi.

Hay otros tipos como los separadores Spray, o los lavadores de placas.

La eficacia depende del grado de contacto e interacción que tengan las partículas con el líquido, es por ello que es muy importante la atomización del líquido y un adecuado tiempo de contacto.

En este tipo de equipo se pueden alcanzar eficiencias de 80 a 99 %.

PRECIPITADORES ELECTROSTÁTICOS (ELECTROFILTROS)

Fue el sistema más difundido durante los '80, luego con la aplicación de nuevos materiales, y debido a que los parámetros en emisión fueron cada vez más estrictos, el filtro a mangas, paso a ser el sistema por elección..

Este sistema se basa en que las partículas contenidas en la corriente gaseosa cuando atraviesan un campo eléctrico elevado (entre 20000 a 800000 volt) adquieren una carga negativa, y debido a esto son atraídas por unas placas con carga positiva y luego mediante mecanismos apropiados son recogidas.

Específicamente están formados por una o varias cámaras donde en su interior se encuentran los electrodos negativos encargados de generar el elevado campo eléctrico, alternados por placas colocadas a tierra y en su parte inferior tolvas para recoger el particulado separado.

Las principales características de los electrofiltros son:

Posibilidad de trabajar a temperaturas elevadas 250 a 350 C.

Bajísimas pérdida de carga.

Bajo mantenimiento.

Amplio ciclo de vida del orden de las décadas.

Amplia elasticidad en relación a las características de los humos.

Alta confiabilidad.

Alto costo de instalación.

Alto costo de ejercicio.

Las concentraciones de salida suelen alcanzar valores de 20 mg / Nm³

La eficiencia es del orden 90 a 95 % para partículas muy finas (2 micrones) hasta alcanzar valores del 99.9 % para partículas finas (10 micrones).

FILTROS DE MANGAS.

Este equipo esta compuesto por una serie de filtros (bolsas cilíndricas, con una malla de alambre que les proporciona la forma, recubiertas exteriormente por el tejido en cuestión), todas estas unidades de filtro se montan en una cámara donde el humos ingresa y se ve forzado a atravesar los filtros desde afuera hacia dentro, quedando así retenido el particulado en la cara externa del filtro que luego es recogido en una tolva que se encuentra en la parte inferior.

Con el fin de que el filtro no se obstruya se limpian periódicamente en forma automática, inyectando aire a presión desde el interior de los filtros, haciendo esto desprender el particulado adherido.

Debido a los problemas de corrosión es necesario trabajar a más de 140-150 C es por ello que no se pueden utilizar tejidos de tipo naturales, poliesteres, polipropileno.

Los más utilizados son:

Fibra de vidrio, que soporta temperaturas de hasta 250 C, pero son extremadamente frágiles y atacables por el FH.

Nomex hasta 220 C pero puede hidrolizarse en presencia de CIH y alta humedad.

Teflon útil hasta los 260 C, con elevada resistencia química pero elevado costo y una resistencia mecánica no muy buena.

Las principales características de los filtros de manga son:

Menor costo de ejercicio

Mayor mantenimiento

Alta perdida de carga

Limitaciones en cuanto a la temperatura.

Las concentraciones de salida suelen alcanzar valores del orden de los 5 mg / Nm³

La eficiencia es elevada y llegan alcanzar valores del 99.9 % .

Retienen partículas pequeñas como del orden de 0.1 micrón debido a la capa de polvo que se forma en su superficie.

Los poros de los filtro suelen ser del orden de 50 micrones.

EQUIPOS PARA EL TRATAMIENTO DE VAPORES Y/O SUSTANCIAS ACIDAS

El objetivo de estos equipos es retener y neutralizar los vapores ácidos como los óxidos de Azufre SO_2 y SO_3 , el ácido Clorhídrico, HCl y los distintos hidrácidos de los Halógenos que se encuentren presentes (HF , HBr , HI).

Para ello existen substancialmente dos tecnologías:

- A seco o semisecco
- A húmedo

A SECO O SEMISECO

El principio del proceso de retención es la neutralización, es decir reacciones químicas entre los vapores ácidos y el reactivo neutralizador CaO sólido o $\text{Ca}(\text{OH})_2$ en suspensión u otros óxidos o sales alcalinas en equipos determinados.

Las sales formadas y los reactivos que no reaccionaron son retenidas luego en el equipo para particulado.

A HÚMEDO

Aquí el principio del proceso de retención se basa en la absorción de los gases y vapores en las soluciones lavadoras, que a su vez reaccionan químicamente neutralizando los ácidos. Generalmente se usa como neutralizante una solución de soda cáustica (NaOH)

Pueden estar constituidos por:

- Torres de lavado (scrubber)
- Torres de relleno
- Torres de platos

Todos ellos están constituidos por columnas o torres donde se ponen en contacto el gas y los vapores a depurar con las soluciones neutralizantes.

En el scrubber la sección de pasaje es totalmente libre, logrando con esto la imposibilidad de obturarse y dando lugar a bajas pérdidas de carga, en ella se inyecta la solución generalmente en contracorriente respecto del gas y vapores a depurar, la superficie de intercambio se logra mediante la fina nebulización del líquido de lavado.

Las torres de relleno, poseen cuerpos de formas características en su interior para lograr así una mejor retención pues ofrecen una mayor superficie de contacto entre el líquido y los gases

Los cuerpos o material de relleno pueden ser esferas, anillos, placas onduladas, etc. en general son todos productos comerciales bien identificados. La solución absorbente entra desde la parte superior en contracorriente a los vapores, el líquido luego se recircula dentro de la misma torre, existiendo controles de pH y conductividad para saber cuando hay que descargar una parte de la solución que reaccionó (purga) y reponer solución fresca. Es necesario luego poseer un tratamiento posterior para la solución descargada. Este tratamiento puede consistir en un filtro prensa, a bandas, de vacío, una concentración por calor, etc; de modo tal de separar los barros del líquido. Los barros separados deben ser tratados o dispuestos posteriormente.

Las torres de platos poseen en su interior distintos pisos donde en cada uno de ellos los gases deben burbujear en la solución lavadora, no son muy utilizadas para estos casos, pues se obstruyen fácilmente.

En todos los casos de tratamiento a húmedo, la salida de los gases tratados se hace a temperaturas relativamente bajas (60-70 C) y saturados, esto da lugar al característico penacho. Para evitar o minimizar este efecto visivo los gases son recalentados a temperaturas de 130-180 C.

Las eficiencias de retención de estos equipos es variable y depende de su diseño y operación. Pero se encuentran siempre en el orden de 98 a 99 %.

EQUIPOS PARA CONTROL DE ÓXIDOS DE NITRÓGENO²²

Los Óxidos de Nitrógeno se produce por las reacciones entre el nitrógeno y el Oxígeno del aire en los procesos de combustión debido a la elevada temperatura generada en el mismo, siendo uno de los controles, se basa en la cantidad de aire en exceso y las temperaturas alcanzadas sobre todo en los quemadores, y el tipo de quemador utilizado.



Figura 7.5 Equipos para de tratamiento de Emisiones Gaseosas

²² Grupo SIGEA S.A. diseña, proyecta, construye e instala equipos para el tratamiento de emisiones gaseosas.

7.5 ANÁLISIS DE LOS RESIDUOS DE LA COMBUSTIÓN DE LOS DESECHOS PLÁSTICOS.

Para los contaminantes comunes del aire, se establecen las siguientes concentraciones máximas permitidas. La entidad ambiental de control utilizará los valores de concentraciones máximas de contaminantes del aire ambiente aquí definidos, para fines de elaborar su respectiva norma sectorial. Esto si los resultados de las evaluaciones de calidad de aire que la autoridad indiquen esta necesidad.

Partículas sedimentables.- La máxima concentración de una muestra, colectada durante 30 días de forma continua, será de un miligramo por centímetro cuadrado (1 mg/cm² x 30 d).

Material particulado menor a 10 micrones (PM10).- El promedio aritmético de la concentración de PM10 de todas las muestras en un año no deberá exceder de cincuenta microgramos por metro cúbico (50 ug/m³). La concentración máxima en 24 horas, de todas las muestras colectadas, no deberá exceder ciento cincuenta microgramos por metro cúbico (150 ug/m³), valor que no podrá ser excedido más de 2 veces en un año.

Material particulado menor a 2,5 micrones (PM2,5).- Se ha establecido que el promedio aritmético de la concentración de PM2,5 de todas las muestras en un año no deberá exceder de quince microgramos por metro cúbico (15 µg/m³). La concentración máxima en 24 horas, de todas las muestras colectadas, no deberá exceder sesenta y cinco microgramos por metro cúbico (65 µg/m³), valor que no podrá ser excedido más de 2 veces en un año.

Dióxido de azufre (SO₂).- El promedio aritmético de la concentración de SO₂ determinada en todas las muestras en un año no deberá exceder de ochenta microgramos por metro cúbico (80 ug/m³). La concentración máxima en 24 horas no deberá exceder trescientos cincuenta microgramos por metro cúbico (350 ug/m³), más de una vez en un año.

Monóxido de carbono (CO).- La concentración de monóxido de carbono de las muestras determinadas de forma continua, en un período de 8 horas, no deberá exceder diez mil microgramos por metro cúbico (10 000 ug/m³) más de una vez en un año. La concentración máxima en una hora de monóxido de carbono no deberá exceder cuarenta mil microgramos por metro cúbico (40 000 ug/m³) más de una vez en un año.

Oxidantes fotoquímicos, expresados como ozono.- La máxima concentración de oxidantes fotoquímicos, obtenida mediante muestra continua en un período de una hora, no deberá exceder de ciento sesenta microgramos por metro cúbico (160 ug/m³), más de una vez en un año. La máxima concentración de oxidantes fotoquímicos, obtenida mediante muestra continua en un período de ocho horas, no deberá exceder de ciento veinte microgramos por metro cúbico (120 ug/m³), más de una vez en un año.

Óxidos de nitrógeno, expresados como NO₂.- El promedio aritmético de la concentración de óxidos de nitrógeno, expresada como NO₂, y determinada en todas las muestras en un año, no deberá exceder de cien microgramos por metro cúbico (100 ug/m³). La concentración máxima en 24 horas no deberá exceder ciento cincuenta microgramos por metro cúbico (150 ug/m³) más de 2 veces en un año.

Las flechas indican el rango de temperaturas mínima y máxima en las que suele iniciarse y concluirse el proceso. La zona fundamental, que abarca de los 300 a los 1.000°C corresponde a la oxidación de la materia orgánica con la consiguiente formación de SO_x y CO₂. A mayor temperatura, y en función de la naturaleza reductora del medio toman fuerza las reacciones de gasificación, el equilibrio se desplaza y se forman CO y SO_x.

A medida que prosigue la temperatura se inicia la formación de NO_x de origen térmico, esto es a partir del nitrógeno del aire.

Cuanto mayor sea la temperatura tanto mayor será la fase vítrea de la escoria formada y mas peligro existirá de volatilización de metales.

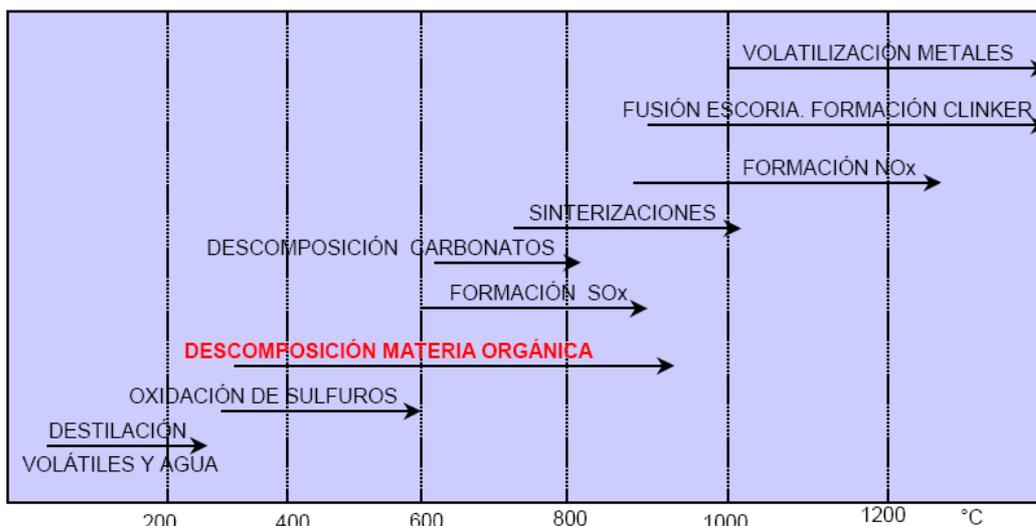


Figura 7.6 Rango de temperatura y la producción de residuos

7.6 COMPARACIÓN DE LA EMISIÓN DE GASES DE CONTAMINACIÓN DE LOS RESIDUOS PLÁSTICOS CON LOS COMBUSTIBLES CONVENCIONALES CON LA DISPOSICIÓN QUE RIGE EN EL DISTRITO METROPOLITANO.

Tabla 7.9 Composición teórica de los desechos plásticos (base seca)

PLÁSTICOS							
Componente	Por ciento en peso (base seca)						
	C(s)	H(s)	O(s)	N(s)	S(s)	A(s)	W
Plásticos	60	7,2	22,8	0	0	10	1,5

Fuente: Javier Salinas-Rony Vásquez

Tabla 7.10 Composición teórica de los desechos plásticos (base húmeda)

PLÁSTICOS							
Componente	Por ciento en peso (base húmeda)						
	C(t)	H(t)	O(t)	N(t)	S(t)	A(t)	W(t)
Plásticos	59,10	7,09	22,46	0,00	0,00	9,85	1,5

Fuente: Javier Salinas-Rony Vásquez

Tabla 7.11 Productos de la combustión de los desechos plásticos teórica

CÁLCULO DE LA COMPOSICIÓN DE LOS PRODUCTOS DE COMBUSTIÓN		
VRO ₂	1,11	m ³ /kg
VO ₂	0,95	m ³ /kg
VN ₂	9,24	m ³ /kg
VH ₂ O	0,99	m ³ /kg
TOTAL Vgases	12,29	m³/kg

Fuente: Javier Salinas-Rony Vásquez

Tabla 7.12 Composición teórica del petróleo (base seca)

PETRÓLEO							
Componente	Por ciento en peso (base seca)						
	C(c)	H(c)	O(c)	N(c)	S(c)	A(t)	Wt
	83	14	1,3	1,7	0	0,1	1,5

Fuente: Javier Salinas-Rony Vásquez

Tabla 7.13 Composición teórica del petróleo (base húmeda)

PETRÓLEO							
Componente	Por ciento en peso (base húmeda)						
	C(t)	H(t)	O(t)	N(t)	S(t)	A(t)	W(t)
	81,67	13,78	1,28	1,67	0,00	0,10	1,5

Fuente: Javier Salinas-Rony Vásquez

Tabla 7.14 Productos de la combustión del petróleo

CÁLCULO DE LA COMPOSICIÓN DE LOS PRODUCTOS DE COMBUSTIÓN		
VRO ₂	1,52	m ³ /kg
VO ₂	1,98	m ³ /kg
VN ₂	16,63	m ³ /kg
VH ₂ O	1,89	m ³ /kg
TOTAL Vgases	22,02	m³/kg

Fuente: Javier Salinas-Rony Vásquez

Tabla 7.15 Composición teórica del carbón (base seca)

CARBÓN							
Componente	Por ciento en peso (base seca)						
	C(c)	H(c)	O(c)	N(c)	S(c)	A(t)	Wt
	78	5	10	1	6	10	4

Fuente: Javier Salinas-Rony Vásquez

Tabla 7.16 Composición teórica del carbón (base húmeda)

CARBÓN							
Componente	Por ciento en peso (base húmeda)						
	C(t)	H(t)	O(t)	N(t)	S(t)	A(t)	W(t)
	67,08	4,30	8,60	0,86	5,16	10,00	4

Fuente: Javier Salinas-Rony Vásquez

Tabla 7.17 Producción de la combustión del carbón

CÁLCULO DE LA COMPOSICIÓN DE LOS PRODUCTOS DE COMBUSTIÓN		
VRO ₂	1,29	m ³ /kg
VO ₂	1,05	m ³ /kg
VN ₂	10	m ³ /kg
VH ₂ O	0,73	m ³ /kg
TOTAL Vgases	13,07	m ³ /kg

Fuente: Javier Salinas-Rony Vásquez

Tabla 7.18 Composición teórica de la leña (base seca)

LEÑA							
Componente	Por ciento en peso (base seca)						
	C(c)	H(c)	O(c)	N(c)	S(c)	A(t)	Wt
	50	6	43	1	0	3	30

Fuente: Javier Salinas-Rony Vásquez

Tabla 7.19 Composición teórica de la leña (base húmeda)

LEÑA							
Componente	Por ciento en peso (base húmeda)						W(t)
	C(t)	H(t)	O(t)	N(t)	S(t)	A(t)	
	33,50	4,02	28,81	0,67	0,00	3,00	30

Fuente: Javier Salinas-Rony Vásquez

Tabla 7.20 Producción de la combustión de la leña

CÁLCULO DE LA COMPOSICIÓN DE LOS PRODUCTOS DE COMBUSTIÓN		
VRO ₂	0,63	m ³ /kg
VO ₂	0,12	m ³ /kg
VN ₂	3,34	m ³ /kg
VH ₂ O	0,89	m ³ /kg
TOTAL Vgases	4,97	m ³ /kg

Fuente: Javier Salinas-Rony Vásquez

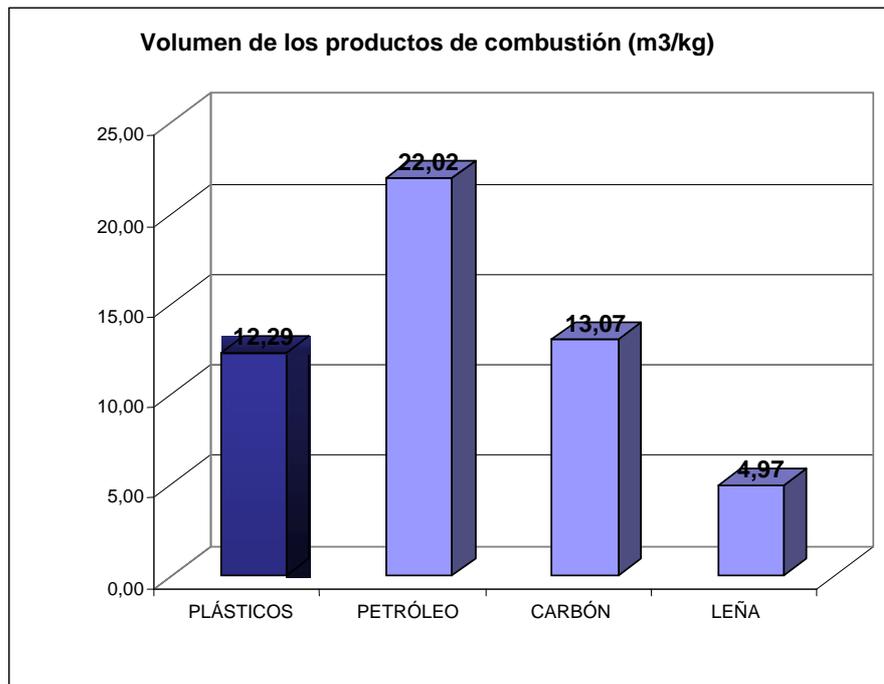


Figura 7.7 Volumen de los productos de combustión

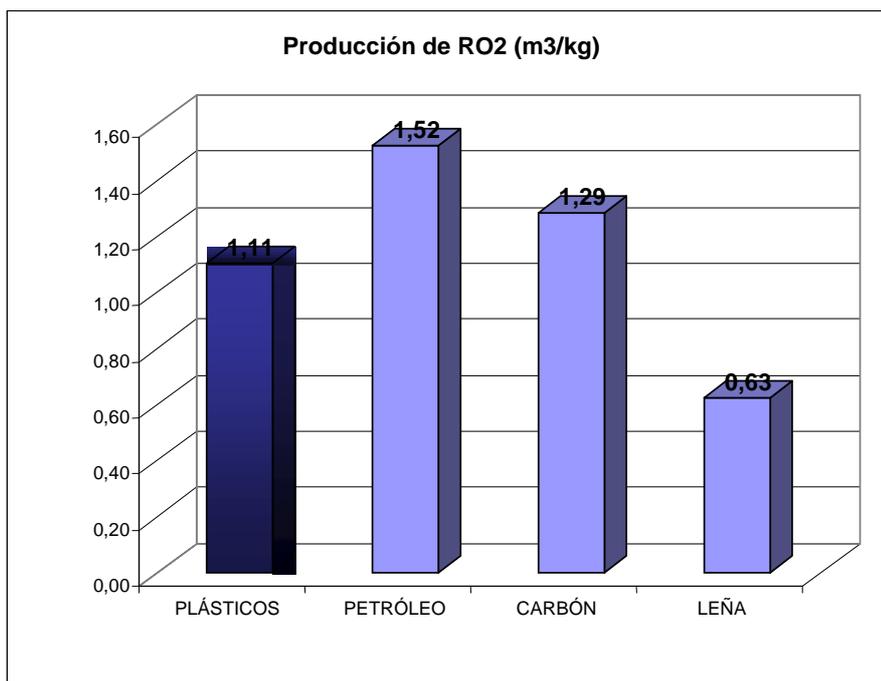


Figura 7.8 Volumen de producción de RO2

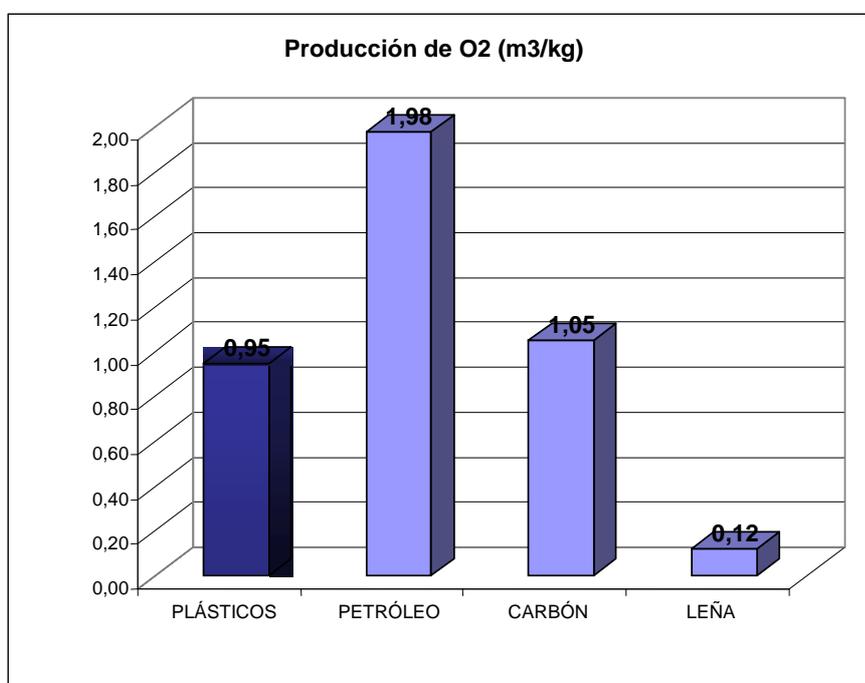


Figura 7.9 Volumen de producción de O2

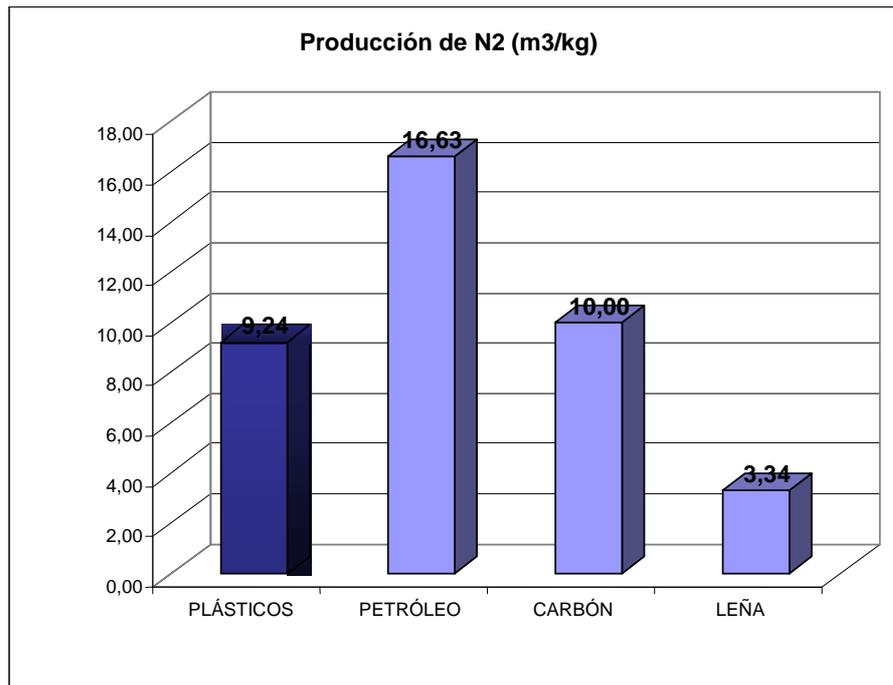


Figura 7.10 Volumen de producción de N₂

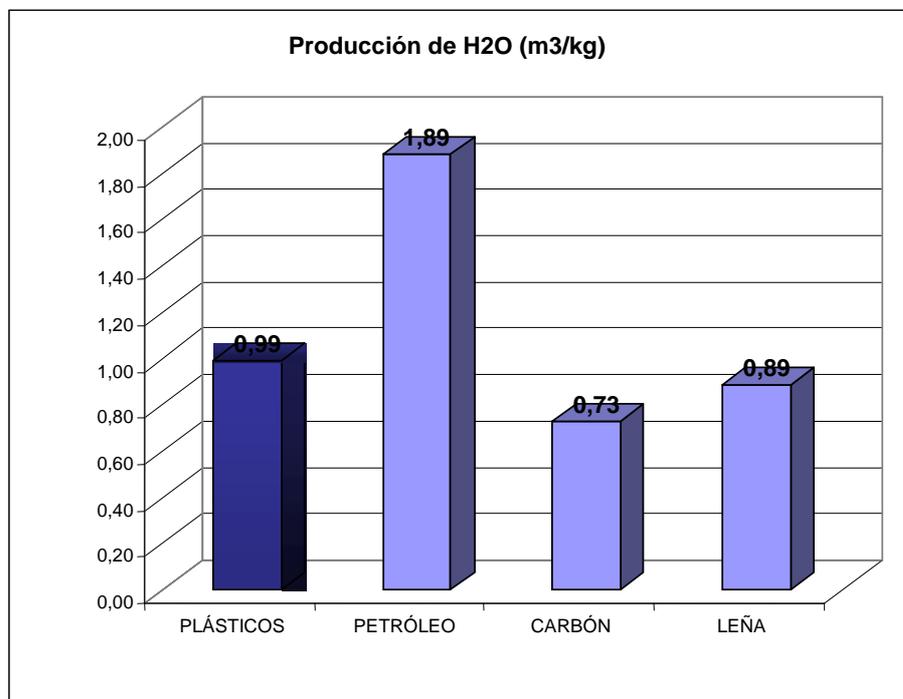


Figura 7.11 Volumen de producción de H₂O

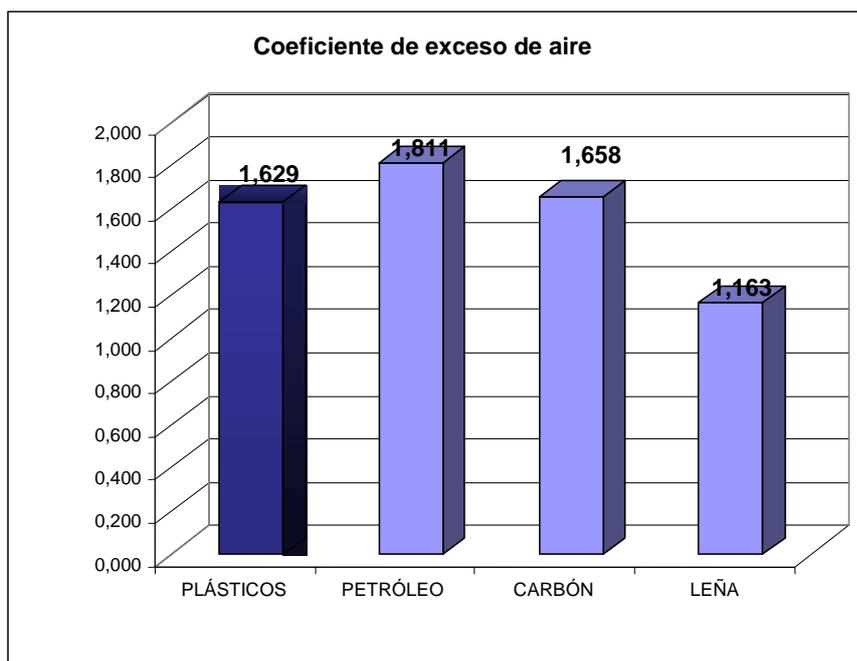


Figura 7.12 Coeficiente de exceso de aire

VALORES MÁXIMOS PERMISIBLES DE EMISIÓN

Los valores de emisión máxima permitida, para fuentes fijas de combustión existentes, son los establecidos en la tabla de esta norma.

Tabla 7.21 Límites máximos permisibles de emisiones al aire para fuentes fijas de combustión. Norma para fuentes en operación

CONTAMINANTE EMITIDO	COMBUSTIBLE UTILIZADO	VALOR	UNIDADES [1]
Partículas Totales	Sólido	355	mg/Nm ³
	Líquido [2]	355	mg/Nm ³
	Gaseoso	No Aplicable	No Aplicable
Óxidos de Nitrógeno	Sólido	1 100	mg/Nm ³
	Líquido [2]	700	mg/Nm ³
	Gaseoso	500	mg/Nm ³
Dióxido de Azufre	Sólido	1 650	mg/Nm ³
	Líquido [2]	1 650	mg/Nm ³
	Gaseoso	No Aplicable	No Aplicable

Notas:

[1] mg/Nm³: miligramos por metro cúbico de gas, a condiciones normales, mil trece milibares de presión (1 013 mbar) y temperatura de 0 °C, en base seca y corregidos a 7% de oxígeno.

[2] combustibles líquidos comprenden los combustibles fósiles líquidos, tales como diesel, kerosene, búnker C, petróleo crudo, naftas.

Los valores de emisión máxima permitida, para fuentes fijas de combustión nuevas, son los establecidos en la tabla de esta norma.

Tabla 7.22 Límites máximos permisibles de emisiones al aire para fuentes fijas de combustión. Norma para fuentes en operación

CONTAMINANTE EMITIDO	COMBUSTIBLE UTILIZADO	VALOR	UNIDADES [1]
Partículas Totales	Sólido	150	mg/Nm ³
	Líquido [2]	150	mg/Nm ³
	Gaseoso	No Aplicable	No Aplicable
Óxidos de Nitrógeno	Sólido	850	mg/Nm ³
	Líquido [2]	550	mg/Nm ³
	Gaseoso	400	mg/Nm ³
Dióxido de Azufre	Sólido	1 650	mg/Nm ³
	Líquido [2]	1 650	mg/Nm ³
	Gaseoso	No Aplicable	No Aplicable

Notas:

[1] mg/Nm³: miligramos por metro cúbico de gas, a condiciones normales, de mil trece milibares de presión (1 013 mbar) y temperatura de 0 °C, en base seca y corregidos a 7% de oxígeno.

[2] combustibles líquidos comprenden los combustibles fósiles líquidos, tales como diesel, kerosene, búnker C, petróleo crudo, naftas.

La entidad ambiental de control utilizará los límites máximos permisibles de emisiones indicados en las tablas para fines de elaborar su respectiva norma. La entidad ambiental de control podrá establecer normas de emisión de mayor exigencia, esto si los resultados de las evaluaciones de calidad de aire que efectúe indicaren dicha necesidad.

El ministerio del ambiente definirá la frecuencia de revisión de los valores establecidos como límite máximo permitido de emisiones al aire. De acuerdo a lo establecido en el reglamento para la prevención y control de la contaminación, se analizará la conveniencia de unificar los valores de emisión para fuentes en operación y posteriores a esta fecha. La revisión deberá considerar, además, las bases de datos de emisiones, así como de los datos de concentraciones de contaminantes en el aire ambiente, efectúe la entidad ambiental de control.

CAPÍTULO 8

ANÁLISIS ECONÓMICO Y FINANCIERO

8.1 ANÁLISIS ECONÓMICO.

Para determinar el costo de producción del equipo, en el análisis económico es necesario tener presente conceptos que nos facilitarán la clasificación y la determinación del mismo. Estos conceptos son:

Materia prima directa: Son los costos de los materiales que intervienen o son parte directa del equipo, tales como perfiles, manta cerámica, plancha de tol, etc.

Materia prima indirecta: Son los costos de los materiales que intervienen en el proceso de construcción del equipo pero no son parte del mismo, como lijas, pintura, etc.

Mano de obra directa: Son los costos de los procesos directos que son parte de la construcción del equipo, como servicio de corte, doblado, soldadura, etc.

Mano de obra indirecta: Son los costos de los procesos indirectos que no forman parte de la construcción del equipo, pago a director y codirector, transporte, etc.

Imprevistos: Este rubro nos sirve para cubrir cualquier eventualidad que se presente durante la realización del proyecto, y que no conste dentro de los campos anteriores, y es igual al 10% del valor máximo establecido entre la materia prima directa, indirecta, mano de obra directa, indirecta.

Tabla 8.1 Materiales secundarios

Cantidad	Detalle	Observación	Valor Unitario Valor Total	Valor Total
2	Disco de corte de concreto	Para ladrillos	4,00	8,00
6	Disco de corte de acero	Para ángulos y planchas	3,50	21,00
2	Disco de pulido de acero	Para ángulos y planchas	6,00	12,00
4	Broca para acero	Para orificio en ladrillo	1,50	6,00
3	Broca para concreto	Para orificio en ladrillo	1,00	3,00
4	Lija de hierro	Conjunto	1,25	5,00
125	Energía eléctrica	Utilizada en las horas de trabajo	0,04	5,00
			Subtotal	60,00
			IVA	7,20
			Total	67,20

Fuente: Javier Salinas – Rony Vásquez

Tabla 8.2 Mano de obra indirecta

Cantidad	Detalle	Unidad	Valor Unitario	Valor Total
30	Director	horas	15	450,00
30	Codirector	horas	15	450,00
10	Transporte	horas	8	80,00
			Subtotal	980,00
			IVA	117,60
			Total	1097,60

Fuente: Javier Salinas – Rony Vásquez

Tabla 8.3 Imprevistos

Detalle	Observación	Valor MOI	Valor Total
Imprevistos	10% Mano de obra indirecta	109,76	109,76

Fuente: Javier Salinas – Rony Vásquez

Costos de producción.

Son todos aquellos rubros que intervienen en el proceso de implementación del bien o servicio, que en nuestro caso se lo presenta en la siguiente Tabla 8.4.

Tabla 8.4 Costos de producción

Detalle	Año 0
Costo de materia prima directa	900,00
Costo de mano de obra directa	550,00
Costo de materiales indirectos	67,20
Costo de mano de obra indirecta	1097,60
Imprevistos	109,76
Costo Total	2724,56

Fuente: Javier Salinas – Rony Vásquez

REPORTE DE GASTOS REALIZADOS

Depreciación

Es la reducción anual del valor de la cámara de combustión, es utilizado para dar a entender que la inversión permanente en este proyecto ha disminuido según su servicio.

Se fundamenta en criterios económicos, tomando en cuenta el tiempo productivo.

Se realizara a través del método decreciente, ya que nos permite hacer depreciaciones más altas durante los primeros años, y más bajo durante los últimos ciclos.

Las variables en consideración para el caso se indican a continuación para una maquina industrial:

- Número de años de vida útil del equipo: 15 años
- Número de años máximo a depreciarse: n = 10 años.
- Valor inicial del equipo: Vo = 3000 USD
- Valor final del equipo: Vr = 600 USD

Dicho esto se calcula la tasa de depreciación¹:

$$\phi = 1 - \sqrt[n]{\frac{V_f}{V_o}}$$

$$\phi = 0,14866$$

La depreciación del periodo ai es:

$$a_i = \phi * V_i$$

Donde Vi es el valor final del periodo.

Elaboramos una tabla para el número de años de vida útil del sistema de combustión.

Tabla 8.5 Depreciación por tasa constante

Años	Ai	vi
0	X	3000
1	445,98	2554,02
2	379,68	2174,34
3	323,24	1851,10
4	275,18	1575,92
5	234,28	1341,64
6	199,45	1142,19
7	169,80	972,39
8	144,56	827,84
9	123,07	704,77
10	104,77	600,00

Fuente: Javier Salinas – Rony Vásquez

¹ Administración de Producción y Operaciones, Pág. 559

Graficando la tabla anterior se obtiene el siguiente gráfico:

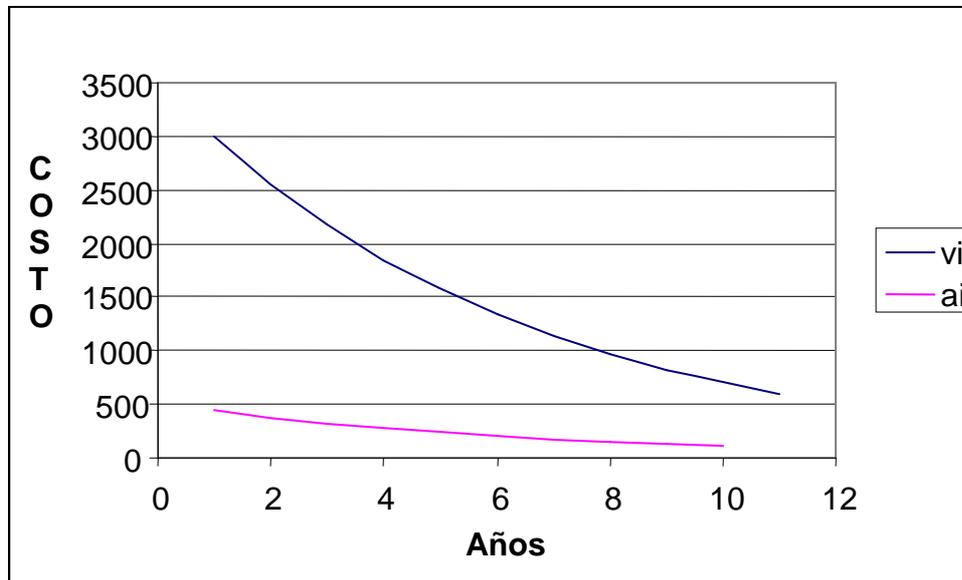


Figura 8.1 Depreciación del equipo

8.2 ANÁLISIS FINANCIERO

Para determinar la viabilidad de este proyecto, es necesario realizar un análisis de los costos de venta de la energía producida de diferentes maneras.

Tabla 8.6 Comparación de costo de venta de energía

Tipo de Energía	Costo por Kw./h (USD)
Eólica	0,02
Hidráulica	0,07
Térmica	0,06
Solar fotovoltaica**	8,75
Mareomotriz*	0,11
Nuclear*	0,06

Fuente: Javier Salinas – Rony Vásquez

*Este tipo de energía no está disponible en Ecuador.

**Energía utilizada en pequeñas aplicaciones dentro del territorio Ecuatoriano.

De la tabla anteriormente expuesta podemos observar, que la energía eólica es la que nos presenta el menor costo para el usuario, después de ella tenemos la Energía Nuclear, Térmica, Hidráulica, Mareomotriz y Solar Fotovoltaica.

Tabla 8.7 Precio de desechos plásticos en dólares

Tipo	Desecho plástico Al Peso por 1 Ton	Desecho plástico Molido por 1 Ton
Polietileno Baja	220	350
Polietileno Alta	250	450
PET	235	400
PVC	200	370
Polipropileno	220	390
Poliestireno	200	360
Otros	210	340

Fuente: MAXMETAL

Como análisis de las tablas 8,6 y 8,7 podemos decir que las energías renovables son otras fuentes de energía viables, pero aquí entran las distintas circunstancias de utilización de cada una de las energías, es así como:

Eólica se necesita de viento.

Hidráulica se necesita de un caudal de agua.

Solar necesita de mucho sol.

Mareomotriz solo en el océano.

Nuclear de mucho dinero.

Térmica de mucho calor.

Por lo tanto la inversión inicial de estas tecnologías es muy elevada y compleja, por lo que la generación de calor por los distintos medios tiene un precio, pero como estamos utilizando la basura que todos arrojamos de donde es mas barato utilizar los desechos plásticos como combustible alternativo en comparación a los combustibles tradicionales por su costo en el mercado y tienen ciertas características que le favorecen como son por el poder calorífico y su tiempo de combustión.

Para nuestro proyecto estamos utilizando desechos plásticos molidos y clasificados, pero cabe recalcar que para la industrialización de este proyecto el material que se ocupe seria al peso por la cantidad y el volumen que se manejaría

CAPÍTULO 9

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

9.1 CONCLUSIONES

- Las condiciones de diseño con las cuales se construyó la cámara de combustión nos permitió obtener buenas eficiencias siendo del 96.28 % rendimiento del hogar y del 94.513% de eficiencia de destrucción térmica.
- En teoría fue posible demostrar que la producción de gases triatómicos (CO_2 y SO_2) generados por la combustión de desechos plásticos es menor al generado por el petróleo en un 26.9 %, carbón 13.9%, esto se debe a que en la composición química de algunos desechos plásticos no contienen Azufre ni Nitrógeno.
- Al combustionar las muestras de desechos plásticos se pudo determinar que el consumo de combustible es muy bajo, parámetro muy favorable al momento de determinar el poder calorífico inferior ya que este depende directamente del consumo de combustible.

- El tiempo necesario para combustionar una muestra de desechos plásticos de 1500 gr fue de aproximadamente 17 min, siendo posible alcanzar una buena estabilidad en la llama y temperatura, lo cual le convierte a los desechos plásticos como un buen combustible para aplicaciones como el secado de cemento.
- Con la combustión de 1,5 kg de desechos plásticos fue posible generar una tasa de producción de vapor de aproximadamente 8,6 kg, con una eficiencia térmica del sistema de 83.18%, una eficiencia de combustión del 99,7%.
- Se pudo determinar que la temperatura de autoinflamación para las muestras de desechos plásticos utilizados en este proyecto se encuentra entre 350 a 400 °C.
- Se ha permitido mostrar una distinta posibilidad de tratamiento de los residuos plásticos, haciendo especial referencia al que, desde el punto de vista energético, los desechos plásticos son los más ventajosos, con lo cual con el proceso de incineración se solucionan dos graves problemas la eliminación de los residuos plásticos y la necesidad de encontrar fuentes de energía.
- Uno de los principales objetivos de contar con un quemador en la cámara de combustión es estimular la mezcla entre el comburente (aire) y los compuestos volátiles (C, H, O, S), para lo cual la configuración adoptada para la cámara de combustión fue la más acertada, así como el sistemas de inyección de aire primario, el combustible utilizado por el quemador, la aplicación de nuevos materiales aislantes como es el caso de la manta de fibra cerámica y placas refractarias, permitieron la obtención de una combustión de alta calidad materializada en un bajo porcentaje de inquemados, aumentando la transferencia de calor por convección.

- Al realizar el estudio comparativo del PC de los desechos plásticos con respecto a los combustibles convencionales se determinó que no existe una gran diferencia entre estos, con excepción del GLP cuya diferencia es del 22,7%.

9.2 RECOMENDACIONES

- Si se desea conocer el valor exacto del poder calorífico de un combustible sólido y poderlo aplicar en un balance térmico, es necesario utilizar equipos especializados como es el caso de la bomba calorimétrica o determinar la composición química de dicho combustible en laboratorios especializados.
- El método desarrollado para realizar el análisis inmediato de los desechos plásticos, sólo se lo puede aplicar cuando se desee conocer de forma aproximada el poder calorífico de un combustible sólido, ya que este análisis es más cualitativo, habiendo un margen de inexactitud en la determinación del carbono fijo y de los compuestos volátiles.
- En la actualidad, muchas centrales térmicas y cementeras utilizan como combustible el carbón. La utilización de residuos plásticos como sustituto parcial del carbón incrementa el poder calorífico a la vez que disminuye substancialmente la emisión de anhídrido carbónico, produce menos metales pesados, no genera dióxido de azufre, al no ser el azufre un componente de los plásticos y produce menos cenizas, lo que implica un menor impacto ambiental. Diferentes residuos plásticos son adecuados para ser combustibles en cementeras. Como por ejemplo, el film agrícola, ciertos residuos plásticos del comercio e industria y recortes industriales.
- En la actualidad se encuentran desarrollando nuevas tecnologías en plantas incineradoras, como por ejemplo el sistema DeNox, el cual permite neutralizar casi totalmente las escorias y cenizas volantes

producidas. La cantidad máxima de dioxinas y furanos generados es solamente de 0,000000000000003 (13 ceros) por metro cúbico de aire.

- Los resultados obtenidos se consideraron un éxito desde la perspectiva económica, ya que los costos de materia prima son más económicos, desde la perspectiva medioambiental se comprobó en teoría que no existía cambio de emisiones al utilizar el desechos plásticos y desde el punto de vista operacional se evaluó el rendimiento térmico y se demostró que se encontraba en línea con los parámetros normales de funcionamiento, no afectando a la operatividad del intercambiador de calor.
- Debido a las altas temperaturas que pueden alcanzar los gases de combustión se recomienda colocar algún tipo de aislante térmico alrededor de las paredes del intercambiador de calor para de esta manera disminuir las pérdidas de calor.
- Esta alternativa de recuperación es viable desde el punto de vista energético y ambiental en teoría, pudiendo ser llevado a la industrialización como una nueva fuente de energía.
- Para disminuir la cantidad de inquemados se recomienda instalar un sistema de aire secundario, para de esta manera permitir que los inquemados reaccionen con la cantidad de aire adicional que se haría ingresar en la cámara.
- Para asegurar que el proceso de combustión sea continuo y uniforme, es necesario mantener encendido el quemador hasta llegar a la temperatura de auto ignición, punto en el cual los desechos plásticos empezarán con el proceso de combustión sin la necesidad de energía adicional.

REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

- **Hütte;** Manual del Ingeniero Tomo I, II, III Ed. Gustavo Pili, 2da Edición.
- **Vlasso,D.** Combustibles, Combustión y Cámaras de Combustión.
(Curitiba): Editora de la UFPR 2001.
- **Chávez, J.** Guía para la Caracterización y Análisis de los Residuos Sólidos Generados en Centros de Atención de Salud., Lima, enero de 1994.
- **Poletto, JA y Celso LS;** Influencia de la Separación de Residuos Sólidos Urbanos para Reciclaje en el Proceso de Incineración con Generación de Energía, Universidad Estadual Paulista, Departamento de Ingeniería Mecánica, São Paulo, SP – Brasil.
- **Tchobanoglous, G. y Theisen HS.** Integrated Solid Waste Management: Engineering Principles and Management Issues (pg. 669), McGraw-Hill, Inc. International Ed. (1996).
- **López, Y.** La Incineración: Una Alternativa Ecológica En La Gestión De [R_S_U.html](#)
- **Morton-Janes, D.H.;** Procesamiento de plásticos, Editorial LIMUSA, S.A
- **Florencio Benito Gil;** Fuel Oil, editorial Blume, España primera ed.
- **Cevallos, J. y Ospina, P.** evaluación de impactos e indicadores ambientales en el Ecuador
- **Tecnología Energética;** Fuentes de energía no renovables (I) – EL CARBÓN
- **San José, García, R.** COMBUSTION Y COMBUSTIBLES

- **Informe Técnico N° 5;** Valorización de residuos plásticos. AIMPLAS instituto tecnológico del plástico, agosto de 2007.
- **Informe Técnico N° 32;** Recuperación energética de los residuos plásticos. PLASTIVIDA, Entidad técnica profesional especializada en plásticos y medio ambiente, octubre de 2009.
- **Elias, X.** Los residuos como combustibles. nociones sobre la combustión. Bogota, agosto de 2003
- **Anexo 9,** Estudio y resultados de la incineración de los residuos.
- **Autor desconocido.** Diseño de Quemadores atmosféricos a gas. Tesis. 1981.
- **Norma Ambiental.** Norma para emisiones gaseosas y sólidas que rige en el DQM, por CEPL.
- **Autor desconocido.** Tesis. Dinámica de fluidos computacional aplicada a la simulación de un sistema de extinción de incendios en una sala de ordenadores
- **Gallardo, P. y Paredes, E.** Diseño y construcción de un sistema de combustión con capacidad de 10 kw. para caracterización térmica de biomasa residual, con aplicación al laboratorio de energías renovables del DECEM. Tesis. Escuela Politécnica del Ejército.
- **Manosalvas, C. y Ramos, J.** Diseño y construcción de un modelo a escala del horno para el curado de partes de muebles metálicos usando pintura electrostática en la empresa stilo muebles. Tesis. Escuela Politécnica del Ejército.

ANEXOS

ANEXO A: BOMBA CALORIMETRICA PODER CALOFICO TEORICO

ANEXO B: PROPIEDADES TERMOFISICAS

ANEXO C: PLANOS DE CONSTRUCCION

ANEXO D: FOTOS DE LA CONSTRUCCION

ANEXO E: NORMAS TECNICAS PARA IMPACTO AMBIENTAL

ANEXO F: ANALISIS ECONOMICO FINANCIERO

ANEXO G: CRONOGRAMA DE ACTIVIDADES