

# **ESCUELA POLITÉCNICA DEL EJÉRCITO**

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

### **CARRERA DE INGENIERÍA MECÁNICA**

#### **MONTAJE, IMPLEMENTACIÓN Y BALANCE ENERGÉTICO DEL SISTEMA DE COMBUSTIÓN DE BIOMASA RESIDUAL CON CAPACIDAD DE 250.000 BTU/hr PARA EL LABORATORIO DE ENERGÍAS RENOVABLES DEL DECEM**

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

**ELABORADO POR:**

**ALEX FRANCISCO MAYORGA RODRÍGUEZ.  
JOSÉ GABRIEL VACA MEDINA.**

**DIRECTOR: ING. JOSE GUASUMBA  
CODIRECTOR: ING. CARLOS SUNTAXI**

**24 de Marzo 2010  
Sangolquí - Ecuador**



## **CERTIFICACIÓN DE LA ELABORACIÓN DEL PROYECTO**

El proyecto “MONTAJE, IMPLEMENTACION Y BALANCE ENERGETICO DEL SISTEMA DE COMBUSTIÓN DE BIOMASA RESIDUAL CON CAPACIDAD DE 250.000 BTU/hr PARA EL LABORATORIO DE ENERGÍAS RENOVABLES DEL DECEM” fue realizado en su totalidad por los señores José Gabriel Vaca Medina y Alex Francisco Mayorga Rodríguez, como requerimiento parcial para la obtención del título de Ingeniero Mecánico.

-----  
Ing. José Guasumba  
Director del Proyecto

-----  
Ing. Carlos Suntaxi  
Codirector del Proyecto

Sangolquí, 24 de marzo 2010



## **LEGALIZACIÓN DEL PROYECTO**

“MONTAJE, IMPLEMENTACION Y BALANCE ENERGETICO DEL  
SISTEMA DE COMBUSTIÓN DE BIOMASA RESIDUAL CON CAPACIDAD  
DE 250.000 BTU/hr PARA EL LABORATORIO DE ENERGÍAS  
RENOVABLES DEL DECEM”

### **ELABORADO POR:**

-----  
Sr. Alex Francisco Mayorga Rodríguez

-----  
Sr. José Gabriel Vaca Medina

### **CARRERA DE INGENIERÍA MECÁNICA**

-----  
ING. Emilio Tumipamba  
DIRECTOR DE LA CIME

Sangolquí, 24 de marzo 2010



## **DEDICATORIA**

Este proyecto de grado lo dedico en especial a mis padres Juan Francisco y Nancy Susana, quienes con su esfuerzo, sacrificio y paciencia han creído en mí y han estado presentes en todos los momentos buenos y malos, recordándome siempre que cada día debo ser mejor, a mis hermanos, a todos mis amigos que han sido parte de mi vida y a las personas que me conocen y aprecian mucho.

**ALEX FRANCISCO**

Este proyecto se lo dedico a las personas más importantes en mi vida, mis padres Alicia y José Bernardo que con su amor y esfuerzo me impulsaron a culminar mi carrera con éxito, a mis abuelitos José Carlos que ha sido un ejemplo a seguir en mi vida y a mi abuelita Elsitita que desde el cielo me acompaña y siempre ha sido una luz guía en mi vida.

**JOSÉ GABRIEL**



## **AGRADECIMIENTOS**

Agradezco al Ing. José Guasumba y al Ing. Carlos Suntaxi, quienes con su apoyo hicieron posible la finalización de este proyecto.

También a la ESCUELA POLITÉCNICA DEL EJÉRCITO sobre todo a la CARRERA DE INGENIERÍA MECÁNICA por haber brindado sus conocimientos y a todo el personal de los laboratorios de: Maquinas-Herramientas, Termodinámica, Motores de Combustión Interna, Metrología, Mecánica de Materiales.

También a mi buen compañero y amigo José Gabriel Vaca Medina por su tiempo y paciencia en la elaboración de este proyecto.

**ALEX FRANCISCO**

Agradezco a mis hermanas Andrea y Gaby por su apoyo incondicional durante todo este tiempo, a mi tía Gladys por todo su cariño y aliento, a mis amigos que siempre estuvieron presentes en los momentos difíciles.

También quiero agradecer al Ing. José Guasumba y al Ing. Carlos Suntaxi ya que gracias a su apoyo se logró la realización de este proyecto.

Por último quiero agradecer a los grandes amigos y compañeros de carrera, los famosos reyes que entre risas y llantos compartimos grandes momentos dentro de las aulas en las que nos forjamos como profesionales.

**JOSÉ GABRIEL**



## ÍNDICE GENERAL

CERTIFICACIÓN DE LA ELABORACIÓN DEL PROYECTO .....	iii
LEGALIZACIÓN DEL PROYECTO .....	iii
DEDICATORIA.....	v
AGRADECIMIENTOS .....	vii
INDICE GENERAL .....	ix
LISTA DE FIGURAS .....	xv
LISTA DE TABLAS.....	xix
GLOSARIO DE TÉRMINOS.....	xxiii
RESUMEN .....	xxvii
INTRODUCCIÓN .....	xxix
<b>CAPÍTULO 1 .....</b>	<b>1</b>
<b>GENERALIDADES .....</b>	<b>1</b>
1.1 Antecedentes .....	1
1.2 Definición del problema .....	2
1.3 Objetivos.....	2
1.3.1 General .....	2
1.3.2 Especificos .....	2
1.4 Alcance.....	3
1.5 Justificación e importancia.....	3
<b>CAPÍTULO 2 .....</b>	<b>5</b>
<b>MARCO TEORICO .....</b>	<b>5</b>

2.1	Aprovechamiento energético de la biomasa .....	5
2.1.1	Energías renovables y la biomasa .....	5
2.1.2	Métodos de conversión de la biomasa en energía.....	6
2.1.3	Biomasa como recurso energético y sus aplicaciones.....	8
2.1.4	Ventajas y desventajas de la biomasa .....	11
2.2	Análisis de modelos de combustión.....	12
2.2.1	Naturaleza del tema .....	12
2.2.2	Clasificación de los combustibles.....	13
2.2.3	Conceptos básicos.....	14
2.2.4	Procesos de combustión.....	16
2.2.5	Análisis de la combustión completa e incompleta.....	18
2.3	Intercambiadores de calor .....	23
2.3.1	Definición .....	23
2.3.2	Disposición de las corrientes .....	24
2.3.3	Clases de intercambiadores.....	25
2.4	Transferencia de calor en ductos.....	33
2.4.1	Conducción .....	33
2.4.2	Convección .....	42
2.4.3	Radiación .....	48
2.5	Evacuación de gases.....	49
2.5.1	Efluentes gaseosos.....	49
2.5.2	Efecto sobre las plantas.....	54
2.6	Residuos sólidos.....	55
2.6.1	Residuos sólidos y clasificación.....	55
2.6.2	Sistema de manejo de residuos.....	58
2.6.3	Composición de residuos.....	59

2.6.4	Características de los residuos .....	60
2.6.5	Reciclaje de los residuos .....	62
<b>CAPÍTULO 3 .....</b>		<b>65</b>
<b>LEVANTAMIENTO TÉCNICO .....</b>		<b>65</b>
3.1	Dimensionamiento del sistema .....	65
3.2	Materiales e insumos .....	67
3.3	Análisis de partes y piezas .....	71
3.4	Evaluación de subsistemas de transferencia de energía.....	72
3.4.1	Subsistema de alimentación .....	72
3.4.2	Subsistema de combustión.....	74
3.4.3	Subsistema de transferencia de energía.....	75
3.4.4	Subsistema de escape de gases .....	77
3.5	Alternativas de montaje .....	78
<b>CAPITULO 4 .....</b>		<b>81</b>
<b>FABRICACIÓN DE COMPONENTES Y MONTAJE DEL SISTEMA .....</b>		<b>81</b>
4.1	Diagramas de procesos .....	81
4.2	Mecanismos de movimiento.....	88
4.3	Alimentación de combustible .....	90
4.4	Soportes para aislamientos térmicos .....	90
4.5	Estructura de sujeción del sistema .....	92
4.6	Cimentación .....	93
4.7	Montaje del sistema .....	94
4.7.1	Maquinarias y herramientas utilizados .....	94
4.7.2	Montaje mecánico .....	96
4.7.3	Montaje eléctrico .....	104
4.8	Criterios de seguridad industrial.....	109

<b>CAPÍTULO 5</b> .....	113
<b>PLAN DE MANEJO AMBIENTAL</b> .....	113
5.1    Términos de referencia .....	113
5.1.1  Introducción .....	113
5.1.2  Ficha técnica .....	114
5.1.3  Objetivos .....	117
5.1.4  Alcance y ámbito técnico del estudio .....	118
5.1.5  Descripción general de los componentes ambientales .....	118
5.1.6  Descripción ambiental del sitio de montaje del proyecto.....	119
5.1.7  Descripción del proyecto y análisis de alternativas .....	119
5.1.8  Identificación y evaluación de impactos .....	120
5.1.9  Plan de manejo ambiental.....	120
5.2    Normativas del tulas .....	121
5.3    Mitigación de riesgos ambientales .....	126
5.4    Procedimientos para reducciones de co, h <sub>2</sub> s .....	127
5.4.1  Métodos de reducción de CO <sub>2</sub> .....	127
5.4.2  Métodos de reducción de H <sub>2</sub> S.....	134
<b>CAPÍTULO 6</b> .....	145
<b>PRUEBAS</b> .....	145
6.1    Parámetros de proceso.....	145
6.2    Procedimiento .....	146
6.3    Guía de pruebas .....	147
6.4    Materia prima .....	154
6.5    Equipo utilizado.....	160
6.5.1  Anemómetro .....	161
6.5.2  Termómetro laser.....	162

6.6	Toma de datos .....	164
6.7	Análisis estadístico de datos.....	170
<b>CAPÍTULO 7 .....</b>		<b>179</b>
<b>ANÁLISIS EXERGÉTICO .....</b>		<b>179</b>
7.1	Determinación del rendimiento energético del equipo .....	179
7.1.1	Balance de masa .....	179
7.1.2	Temperatura de llama adiabática.....	182
7.1.3	Cálculo del calor generado por la combustión .....	183
7.1.4	Cálculo del calor perdido en la cámara de combustión.....	184
7.1.5	Cálculo de la temperatura teórica de salida del aire del subsistema de transferencia de energía. ....	194
7.1.6	Pérdidas de presión en el subsistema de transferencia de energía. ....	197
7.1.7	Cálculo de la presión y velocidad teórica de salida del aire del subsistema de transferencia de energía .....	206
7.1.8	Cálculo de la presión y velocidad real de salida del aire del subsistema de transferencia de energía .....	206
7.1.9	Transferencia de calor en el subsistema de transferencia de energía ... ..	208
7.1.10	Pérdidas de calor en las paredes del subsistema de transferencia de energía.....	223
7.3	Resultados .....	236
7.5	Elaboración de programa de cálculo en mathcad .....	241
<b>CAPÍTULO 8 .....</b>		<b>243</b>
<b>ANÁLISIS ECONÓMICO FINANCIERO .....</b>		<b>243</b>
8.1	Análisis económico .....	243
8.1.1	Costos directos .....	244
8.1.2	Costos indirectos.....	246

8.1.3	Costo total del proyecto .....	248
8.2	Análisis financiero .....	249
<b>CAPÍTULO 9 .....</b>		<b>253</b>
<b>CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES .....</b>		<b>253</b>
9.1	Conclusiones .....	253
9.2	Recomendaciones .....	255
BIBLIOGRAFÍA .....		257
DIRECCIONES DE INTERNET .....		258
<b>ANEXOS .....</b>		<b>259</b>
ANEXO A: TABLAS DE ANÁLISIS DE PARTES Y PIEZAS .....		261
ANEXO B: TABLAS DE PROPIEDADES .....		289
ANEXO C: TOMA DE DATOS .....		301
ANEXO D: GRÁFICOS DE ANÁLISIS DE DATOS .....		313
ANEXO E: TABLAS DE RESULTADOS .....		327
ANEXO F: PROGRAMA DE CÁLCULO EN MATHCAD .....		331
ANEXO G: MANUAL DE USUARIO Y MANTENIMIENTO .....		355
ANEXO H: PLANOS .....		361

## LISTA DE FIGURAS

<b>Figura</b>	<b>Contenido</b>	<b>Pág.</b>
2.1	Métodos de conversión .....	6
2.2	Biomasa y aplicaciones .....	9
2.3	Intercambiador de calor .....	24
2.4	Disposición de las corrientes .....	24
2.5	Disposición de mayor frecuencia .....	25
2.6	Intercambiadores de calor .....	26
2.7	Intercambiadores de doble tubo .....	27
2.8	Intercambiadores de haz de tubos y coraza .....	28
2.9	Disposiciones del haz de tubos .....	29
2.10	Intercambiadores de doble tubo aleteados .....	31
2.11	Intercambiadores compactos de espiral .....	32
2.12	Disposiciones de los intercambiadores de calor en espiral. ....	32
2.13	Diagrama de gradiente térmico .....	34
2.14	Diagrama de conducción unidimensional en pared plana .....	35
2.15	Diagrama de analogía eléctrica .....	38
2.16	Cilindro hueco con conducción unidimensional .....	39
2.17	Diagrama de capa límite térmica .....	43
2.18	Diagrama de capa límite térmica .....	45
2.19	Esquema de dispositivo de medida de opacidad de los gases .....	51
3.1	Tolva de carga .....	73
3.2	Canal tornillo sin fin .....	73
3.3	Motor-reductor .....	74
3.4	Cámara de combustión .....	74

3.5	Tapas de aislamiento térmico.....	75
3.6	Intercambiador de calor de tubos de acero inoxidable .....	76
3.7	Intercambiadores de calor .....	76
3.8	Ductos de rotación de aire.....	76
3.9	Tapas aislamiento intercambiadores .....	77
3.10	Chimenea .....	78
4.1	Movimiento rotatorio - rotatorio.....	89
4.2	Rotatorio - rectilíneo .....	89
4.3	Ensamble base - cámara de combustión .....	97
4.4	Ensamble intercambiadores de calor .....	98
4.5	Ensamble ducto de salida de aire .....	99
4.6	Aislamiento térmico .....	99
4.7	Montaje tapas de aislamiento térmico .....	100
4.8	Ensamble de ductos de aire .....	101
4.9	Montaje ventilador 1 .....	102
4.10	Ensamble ventilador 2 .....	103
4.11	Ensamble sistema de alimentación .....	104
4.12	Toma principal de energía.....	106
4.13	Instalación caja de control .....	107
4.14	Instalación eléctrica.....	108
4.15	Diagrama eléctrico.....	108
4.16	Área de tornos.....	109
4.17	Área de fresas .....	109
4.18	Área de soldadura .....	110
4.19	Área de ajuste .....	110
4.20	Equipo de seguridad industrial .....	111

5.1	Constantes de equilibrio de los óxidos más comunes.....	136
5.2	Estabilidad frente a los óxidos más comunes.....	136
5.3	Curvas de reducción y sulfuración ZFT a diferentes temperaturas ...	138
5.4	Curvas de ruptura en un reactor de lecho fijo.....	140
5.5	Curvas de ruptura de sulfuración.....	141
5.6	Curvas de ruptura de regeneración.....	142
5.7	Evolución del volumen del poro ZFT.....	143
5.8	Evolución de la resistencia mecánica.....	143
6.1	Toma de datos de velocidades y temperaturas.....	149
6.2	Distribución de temperaturas para la toma de datos de las tapas de aislamiento térmico laterales. ....	150
6.3	Distribución de temperaturas para la toma de datos – cara 1 cámara de combustión. ....	151
6.4	Distribución de temperaturas para la toma de datos – cara 2 cámara de combustión. ....	151
6.5	Distribución de temperaturas para la toma de datos – cara 3 cámara de combustión. ....	152
6.6	Distribución de temperaturas para la toma de datos – cara 4 cámara de combustión. ....	152
6.7	Anemómetro.....	161
6.8	Termómetro láser.....	163
6.9	Gráfico Temperatura de la cámara de combustión vs Tiempo.....	170
6.10	Gráfico Temperatura tapas laterales vs Tiempo.....	171
6.11	Gráfico Velocidad de salida del aire vs Tiempo.....	172
6.12	Gráfico Temperatura de salida del aire vs Tiempo.....	172
6.13	Gráfico Velocidad de salida del aire vs Temperatura de salida del aire.....	173
6.14	Gráfico Temperatura de salida de gases de combustión vs Tiempo.	174

6.15	Gráfico Velocidad de salida de gases de combustión vs Tiempo.....	174
6.16	Gráfico Velocidad de salida gases de combustión vs Temperatura de gases de combustión.....	175
6.17	Gráfico Temperatura de entrada al intercambiador de calor vs Tiempo.....	176
6.18	Gráfico Velocidad de salida gases de combustión vs Temperatura de entrada al intercambiador de calor. ....	176
6.19	Gráfico Temperatura de salida del aire vs Temperatura intercambiadores de calor .....	177
7.1	Análisis de mecánica de fluidos en la cámara de combustión.....	185
7.2	Analogía eléctrica de la transferencia de calor en la cámara de combustión. ....	191
7.3	Análisis de pérdidas de presión en el subsistema de transferencia de energía .....	197
7.4	Analogía de un ducto de rotación de aire con dos codos circulares lisos de 90°. ....	204
7.5	Analogía eléctrica en los intercambiadores de calor .....	216
7.6	Gráfica de temperatura media logarítmica para un sistema a contra-flujo .....	220
7.7	Analogía eléctrica de las tapas laterales de aislamiento térmico .....	225
7.8	Análisis de exergía de flujo en el sistema.....	228

## LISTA DE TABLAS

<b>Tabla</b>	<b>Contenido</b>	<b>Pág.</b>
2.1	Sustancias que se pueden encontrar en los humos.....	16
2.2	Datos que se utiliza en la combustión .....	19
2.3	Propiedades ATS .....	19
2.4	Principales reacciones químicas en combustión .....	20
2.5	Masas moleculares.....	20
2.6	Valores de composición de residuos .....	60
2.7	Resumen de valores de caracterización.....	62
3.1	Lista de elementos del sistema de combustión de biomasa residual.	65
3.2	Lista de elementos para el levantamiento de planos.....	66
3.3	Equipos de medición .....	67
3.4	Lista de materiales del sistema por elementos.....	68
3.5	Lista general de materiales del sistema .....	70
3.6	Lista general de insumos.....	71
3.7	Sub-sistemas de transferencia de energía .....	72
4.1	Máquinas y aparatos utilizados .....	94
4.2	Herramientas e instrumentos utilizados.....	96
4.3	Lista de materiales eléctricos .....	105
5.1	Ficha de identificación del proyecto.....	115
5.2	Características del área de influencia.....	116
5.3	Opciones de reducción de emisiones.....	130
5.4	Tecnologías seleccionadas en este estudio .....	131
6.1	Tabla de datos.....	153

6.2	Análisis de la cascarilla de arroz .....	155
6.3	Composición elemental de la cascarilla de arroz a diferentes % de humedad.....	156
6.4	Poder calorífico inferior de la cascarilla de arroz en función del contenido de humedad. ....	157
6.5	Análisis químico de la composición de la cascarilla de arroz .....	158
6.6	Composición mineral de ceniza en la cascarilla de arroz .....	158
6.7	Variación de los volátiles de la cáscara de arroz, con la temperatura	160
6.7	Tabla de especificaciones del anemómetro .....	161
6.8	Tabla de especificaciones de escalas del anemómetro .....	162
6.9	Tabla de especificaciones del termómetro. ....	163
6.10	Factores de emisividad para materiales comunes .....	164
6.11	Tabla de datos primera prueba, tiempo 0 min. ....	165
6.12	Tabla de datos primera prueba, tiempo 15 min. ....	166
6.13	Tabla de datos primera prueba, tiempo 30 min. ....	167
6.14	Tabla de datos primera prueba, tiempo 45 min. ....	168
6.15	Tabla de datos primera prueba, tiempo 60 min. ....	169
7.1	Promedio de velocidad de salida.....	207
7.2	Tabla de resultados del análisis energético y exergético .....	236
7.3	Tabla de resultados del análisis energético y exergético (otras unidades).....	237
8.1	Lista de materiales y costos del proyecto .....	244
8.2	Gastos de dirección de tesis .....	246
8.3	Misceláneos .....	247
8.4	Maquinaria utilizada.....	247
8.5	Costos directos.....	248
8.6	Costos indirectos.....	248

8.7	Costo total .....	248
8.8	Ingresos proyectados a 10 años .....	251
8.9	Costos proyectados a 10 años .....	252
8.10	Cálculo de ingresos y egresos para el TIR, VAN .....	252
8.11	Cálculo TIR VAN .....	252



## GLOSARIO DE TÉRMINOS

$P_c$	:	Poder calorífico de la biomasa.
$\dot{m}$	:	Flujo másico de la biomasa.
$h_c$	:	Coefficiente de convección de calor externo.
$V_v$	:	Velocidad del viento en los alrededores.
$V_g$	:	Velocidad de los gases en la cámara de combustión.
$L_c$	:	Altura de la cámara de combustión.
$\nu$	:	Viscosidad cinemática.
$\gamma$	:	Densidad específica del aire.
$H_v$	:	Presión producida por la velocidad del aire.
$g$	:	Gravedad.
$V$	:	Velocidad del aire.
$H_L$	:	Pérdida de presión.
$C$	:	Coefficiente de pérdidas dinámicas.
$Nu$	:	Número de Nusselt.
$Re$	:	Número de Reynolds.
$Pr$	:	Número de Prandtl.
$h_{ci}$	:	Coefficiente de convección interna.
$K_{gc}$	:	Coefficiente de conductividad térmica del aire.
$R_1$	:	Resistencia por convección interna.
$R_2$	:	Resistencia por conducción de calor del ladrillo refractario.
$R_3$	:	Resistencia por conducción de calor del acero.
$R_4$	:	Resistencia por conducción de calor de la lana de vidrio.
$R_5$	:	Resistencia por conducción de calor del acero.
$R_6$	:	Resistencia por convección externa.
$L_{c1}$	:	Espesor ladrillo refractario.
$L_{c2}$	:	Espesor tapa de acero de la cámara de combustión.
$L_{c3}$	:	Espesor de la lana de vidrio.
$L_{c4}$	:	Espesor de acero de la tapa de aislamiento térmico de la cámara de combustión.
$K_{lr}$	:	Coefficiente de conductividad térmica del ladrillo refractario.
$K_{lv}$	:	Coefficiente de conductividad térmica de la lana de vidrio.

$K_{ac}$	:	Coeficiente de conductividad térmica del acero.
$U$	:	Coeficiente global de transferencia de calor.
$A_t$	:	Área total de transferencia de calor.
$\Delta T$	:	Diferencia de la temperatura de la cámara de combustión. Y la temperatura ambiente.
$Q$	:	Calor del sistema.
$\dot{m}_a$	:	Flujo másico de aire en el subsistema de transferencia de energía.
$h_{2a}$	:	Entalpía a la temperatura de salida del aire.
$h_{1a}$	:	Entalpía a la temperatura de entrada del aire.
$\rho$	:	Densidad del aire.
$A$	:	Área por la cual ingresa el aire al subsistema de transferencia de energía en $m^2$ .
$H_{L A-B}$	:	Pérdidas de presión por contracción súbita.
$H_{L B-C}$	:	Pérdidas de presión por fricción en tuberías.
$H_{L C-D}$	:	Pérdidas de presión por expansión súbita.
$H_{L D-E}$	:	Pérdidas de presión por ductos de rotación de aire.
$L$	:	Longitud del tubo en m.
$D_i$	:	Diámetro interno del tubo en m.
$\mu$	:	Viscosidad cinemática a temperatura ambiente.
$\mu_s$	:	Viscosidad cinemática a la máxima temperatura.
$\bar{v}$	:	Velocidad promedio de los gases de combustión.
$St$	:	Distancia entre centros de los tubos en m.
$Det$	:	Diámetro externo de los tubos en m.
$FC$	:	Factor de corrección.
$\Delta T_m$	:	Temperatura media logarítmica.
$F$	:	Factor de corrección.
$T_{ent}$	:	Temperatura gases de combustión de entrada.
$T_{sal}$	:	Temperatura de gases de combustión de salida.
$T_{cent}$	:	Temperatura de aire de entrada.
$T_{csal}$	:	Temperatura de aire de salida.
$L_{t1}$	:	Espesor tapa de acero del intercambiador de calor.
$L_{t2}$	:	Espesor de la lana de vidrio.
$h_2$	:	Entalpía del aire a la temperatura del estado 2.

$h_1$	:	Entalpía del aire a la temperatura del estado 1.
$S_2$	:	Entropía del aire a la temperatura en el estado 2.
$S_1$	:	Entropía del aire a la temperatura en el estado 1.
$T_o$	:	Temperatura ambiente.
$X_{entra}$	:	Exergía total que entra.
$X_{sale}$	:	Exergía total que sale.
$X_{destr}$	:	Exergía total destruida.
$\Delta X_{sist}$	:	Cambio en la exergía total del sistema.
$X_{entra} - X_{sale}$	:	Tasa de transferencia de exergía por calor y masa.
$X_{destr}$	:	Tasa de destrucción de exergía.
$\Delta X_{sist}$	:	Tasa de cambio de exergía.
$T_{entra}$	:	Temperatura en el muro interno.
$T_{sale}$	:	Temperatura en el muro externo.
$T_k$	:	Temperatura promedio en el subsistema de transferencia de energía.
$Q_k$	:	Calor transferido al subsistema de transferencia de energía.
$m_e$	:	Flujo másico de salida de aire.
$m_i$	:	Flujo másico de ingreso de aire.
$\varphi_e$	:	Exergía de flujo de salida.
$\varphi_i$	:	Exergía de flujo de entrada.
$\Delta X_{sist}$	:	Tasa de variación total de exergía del sistema.



## RESUMEN

En la actualidad, las investigaciones científicas relacionadas con energías limpias están en auge, una de ellas comprende este proyecto, la utilización de biomasa residual (cascarilla de arroz, vagas de caña de azúcar) como fuente de combustión, materia prima para la cual se han hecho varias propuestas y proyectos aplicados a varios sistemas para reducir las grandes cantidades de contaminación que posee el medio ambiente en la actualidad.

En el presente proyecto se ha realizado en primer lugar el análisis técnico-mecánico de cada uno de sus componentes para su posterior montaje e implementación y se ha puesto a punto el sistema de combustión para hacer sus primeras pruebas, para posteriormente realizar un balance energético y exergético del sistema de combustión biomasa residual, dependiendo de las condiciones y de los recursos existente para su operación.

Se plantean los determinados parámetros de funcionamiento y análisis con el que se procedió a estudiar su factibilidad y eficiencia para el aprendizaje, para el nuevo laboratorio de Energías Renovables del DECEM, su diseño está comprendido para una capacidad de 250.000 BTU/hr.

La característica principal del sistema consiste en el análisis termodinámico de tipo aire-aire que está comprendido mediante los parámetros de transferencia de calor y diseño térmico.



## INTRODUCCIÓN

El objetivo esencial para este proyecto de grado es el montaje, implementación y análisis energético de un sistema de combustión de biomasa residual que fue construido por el CICTE en el año 2006, para investigaciones sobre biomasa y sus potenciales aplicaciones que beneficien a la comunidad y a las F.F.A.A.

Este proyecto consta de nueve capítulos: el capítulo 1 nos indica los antecedentes, la importancia que tiene este proyecto y los objetivos que se pretende cumplir, y a partir de esto se establece los parámetros que dirigen la realización del proyecto.

En el capítulo 2 se comprende el marco teórico, a partir de definiciones y teorías que explican el funcionamiento técnico y termodinámico de los sistemas de transferencia de calor, principalmente el análisis de cámaras de combustión, tipos de intercambiadores de calor, analogías eléctricas y teoremas, en este capítulo se presentan todos los fundamentos teóricos necesarios que se utilizó en este proyecto para su estudio.

En los capítulos 3 y 4 se comprende todo el levantamiento técnico-mecánico, es decir un análisis actual y posterior de todos los componentes o elementos que conforman el sistema de combustión residual, el montaje e implementación el cual se vuelve operativo, es uno de los objetivos esenciales de este proyecto.

El capítulo 5 comprende todo sobre el manejo ambiental que se debe seguir el cual detalla y establece las acciones que se requieren para prevenir, mitigar, controlar, compensar y corregir los posibles efectos o impactos ambientales negativos causados en los desarrollos de un proyecto.

En el capítulo 6 y en el capítulo 7 se presentan los resultados de las pruebas realizadas al equipo, en este se desarrolla un análisis energético y exergético y

una hoja de cálculo a partir de datos obtenidos en campo, poniendo énfasis en los requerimientos que el proceso necesita.

El capítulo 8, detalla el análisis económico y el análisis financiero, en este se estudia la factibilidad del proyecto, el costo que genera la construcción, montaje e implementación de este tipo de sistema.

Para terminar, en el capítulo 9 se presentan las conclusiones y recomendaciones a las que se llegó al culminar el proyecto y la parte final contiene los anexos dentro de los cuales no está de por demás mencionar los planos, tablas de propiedades termodinámicas, manuales de equipos, fotos, etc.



# **CAPÍTULO 1**

## **GENERALIDADES**

### **1.1 ANTECEDENTES**

A partir del año 2002, con el apoyo del Centro de Investigación Científica y Tecnológica del Ejército (CICTE), se han desarrollado pequeñas instalaciones energéticas de tipo experimental para la conversión de fuentes de energías alternativas como la solar, térmica, fotovoltaica, biomasa.

Estos dispositivos sirvieron para que en el año 2006, bajo la dirección del Sr. Ing. Myr. Edgar Pazmiño Decano de la Facultad de Ingeniería Mecánica período 2006 - 2007, se dé inicio el laboratorio de Energías Renovables.

En lo referente a equipamiento de laboratorio, en el caso de la biomasa se dispone de un sistema de combustión y transferencia de energía, el mismo que no se encuentra operativo debido a la complejidad de sistemas que conforman esta tecnología, por lo que en el presente proyecto se pretende analizar cada una de las partes y piezas para proceder al ensamblaje definitivo y al mismo tiempo realizar las primeras pruebas experimentales a nivel de laboratorio del modelo de combustión.

## **1.2 DEFINICIÓN DEL PROBLEMA**

En el Centro de Investigación Científica y Tecnológica del Ejército (CICTE), en los últimos años se han venido realizando varios proyectos de desarrollo tecnológico entre los cuales estuvo la construcción de un sistema de combustión de biomasa y transferencia de energía pero no se realizó el montaje e implementación del sistema debido a la falta de presupuesto e interés por la complejidad que suponía el montaje de las partes.

## **1.3 OBJETIVOS**

### **1.3.1 GENERAL**

Realizar el montaje, implementación y realizar un análisis energético del sistema de combustión de biomasa residual con capacidad de 250.000 Btu/hr para el laboratorio de energías renovables del DECEM.

### **1.3.2 ESPECIFICOS**

- Verificar y dar mantenimiento de los elementos del sistema de combustión de biomasa residual.
- Estudiar el funcionamiento de cada una de las partes que conforman el sistema de combustión de biomasa residual.
- Realizar el montaje del sistema de combustión de biomasa residual en el laboratorio de energías renovables.
- Efectuar pruebas y hacer el análisis energético del sistema de combustión una vez ya instalado en el laboratorio.

## **1.4 ALCANCE**

Realizar la habilitación, ensamblaje y estudio técnico del sistema de combustión de biomasa residual, para beneficios académicos del laboratorio de energías renovables del DECEM.

Con la habilitación de este sistema de combustión como parte del laboratorio de energías renovables, se podrá realizar un estudio a profundidad de las propiedades de la biomasa como combustible alternativo.

También se puede hacer una investigación más a profundidad con respecto a los análisis energéticos y exergéticos para incrementar la eficiencia del equipo y aplicar estos análisis a diversas máquinas térmicas.

## **1.5 JUSTIFICACIÓN E IMPORTANCIA**

El presente proyecto es de gran interés para el Departamento de Ciencias de la Energía y Mecánica debido al gran aporte tecnológico e investigativo que este proyecto representa en el área de energías alternativas, un área que apenas de empieza a desarrollar dentro de nuestro país.

El proyecto va a beneficiar en gran medida a los futuros estudiantes de la carrera de ingeniería mecánica puesto que van a tener a su disposición un laboratorio de energías renovables muy completo en el cual podrán implementar diversos proyectos relacionados con desarrollar el potencial de energías renovables en nuestro medio.

En la actualidad a nivel mundial se está dando mucha importancia a la investigación, desarrollo e implementación de los sistemas de energías renovables o alternativas.

La importancia del estudio de esta clase de recursos se debe a que comprenden fuentes de energía que tienen bajo impacto ambiental, esto quiere decir, que su uso no genera ningún tipo de contaminación, como lo hacen la mayoría de recursos energéticos convencionales que se utilizan actualmente a nivel mundial.

## **CAPÍTULO 2**

### **MARCO TEORICO**

#### **2.1 APROVECHAMIENTO ENERGÉTICO DE LA BIOMASA**

##### **2.1.1 ENERGÍAS RENOVABLES Y LA BIOMASA**

Durante muchos millones de años, el clima de la tierra se ha mantenido a una temperatura relativamente estable, lo que ha permitido el desarrollo de la vida. Los gases invernadero han conservado su equilibrio, fundamentalmente a la acción de la lluvia y de los árboles, que regulan las cantidades de dióxido de carbono en la atmósfera.

Sin embargo, en los últimos 50 años, las concentraciones de gases invernadero están creciendo rápidamente como consecuencia de la acción humana. El uso generalizado de los combustibles fósiles, el debilitamiento de la capa de ozono y la destrucción de las masas forestales y otros factores más están favoreciendo al aumento de la temperatura de la Tierra, provocando cambios abruptos y drásticos en el clima mundial y haciéndolo cada vez más impredecible.<sup>1</sup>

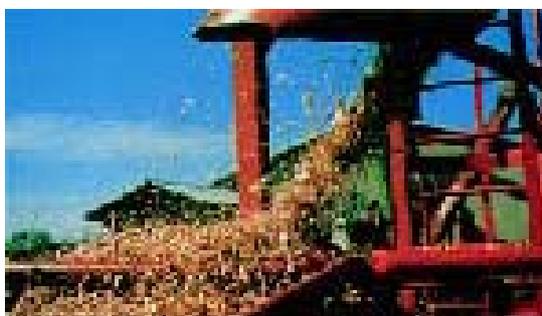
---

<sup>1</sup> Soluciones de Ingeniería SOLVENTA, S. L., Págs. 1-2. Web: [www.solventa.com.es](http://www.solventa.com.es)

Por lo tanto, ante este problema los gobiernos mundiales acordaron en el año 1997 en el protocolo de Cambio Climático dirigido por la ONU, que marcaron objetivos legalmente obligatorios para que, durante el periodo de 2008-2012, los países industrializados reduzcamos un 5,2 % sobre los niveles de las emisiones de los principales gases de efecto invernadero que se generaron en el año 1990, y cada uno de nosotros podemos contribuir en alcanzar esta meta, utilizando energías renovables y fomentando el ahorro energético.

### **2.1.2 MÉTODOS DE CONVERSIÓN DE LA BIOMASA EN ENERGÍA**

La biomasa comprende una amplísima gama de materiales orgánicos que son incorporados y transformados por el reino animal, incluido el hombre. El hombre, además, la transforma por procedimientos artificiales para obtener bienes de consumo.<sup>2</sup>



**Figura 2.1** Métodos de conversión

Existen dos métodos de conversión de la biomasa en energía:

- Termoquímicos
- Biológicos

---

<sup>2</sup> Soluciones de Ingeniería SOLVENTA, S. L., Págs. 10-12. Web: [www.solventa.com.es](http://www.solventa.com.es)

## a) MÉTODOS TERMOQUÍMICOS

Estos métodos son los que se basan en la utilización del calor como fuente de transformación de la biomasa, dentro de este método hay dos clases, la de combustión y la de la pirolisis.

**La combustión:** Es la oxidación completa de la biomasa por el oxígeno del aire, libera agua y gas carbónico, y puede servir para la calefacción doméstica y para la producción de calor industrial.

**La pirólisis:** Es la combustión incompleta de la biomasa en ausencia de oxígeno, a unos 500 °C, se utiliza para producir carbón vegetal.

También la pirolisis lleva a la liberación de un gas pobre, mezcla de monóxido, dióxido de carbono, de hidrógeno y de hidrocarburos ligeros. Este gas de débil poder calorífico, sirve para accionar motores diesel, para producir electricidad, o para mover vehículos.

Una variante de la pirólisis, la pirólisis flash, llega a 1000°C en menos de un segundo, tiene la ventaja de asegurar una gasificación casi total de la biomasa. De todas formas, la gasificación total puede obtenerse mediante una oxidación parcial de los productos no gaseosos de la pirólisis.

Las instalaciones en las que se realizan la pirólisis y la gasificación de la biomasa reciben el nombre de gasógenos.

## b) MÉTODOS BIOLÓGICOS

Estos métodos son los que utilizan la fermentación, dentro de este método hay dos clases, la fermentación alcohólica y la fermentación metánica.

**La fermentación alcohólica:** Es una técnica empleada desde tiempos antiguos con los azúcares que también puede utilizarse con la celulosa y el almidón.

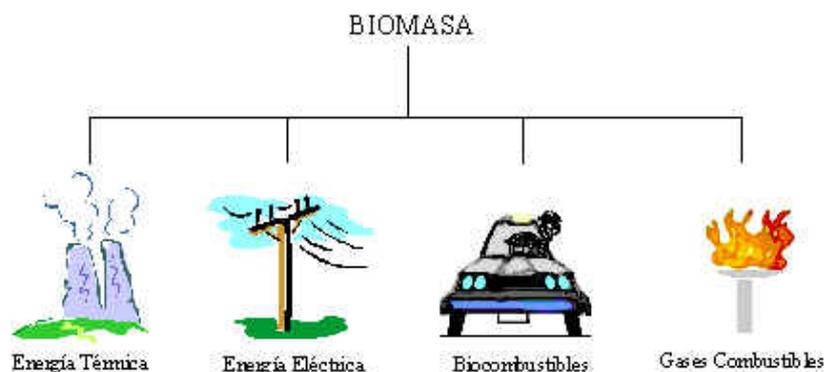
La destilación, que permite obtener alcohol etílico prácticamente anhidrido, es una operación muy costosa en energía. En estas condiciones, la transformación de la biomasa en etanol y después la utilización de este alcohol en motores de explosión, tienen un balance energético global dudoso.

**La fermentación metánica:** es la digestión anaerobia de la biomasa por bacterias. Es idónea para la transformación de la biomasa húmeda (más del 75 % de humedad relativa). En los fermentadores, o digestores, la celulosa es esencialmente la sustancia que se degrada en un gas, que contiene alrededor de 60 % de metano y 40 % de gas carbónico. El problema principal consiste en la necesidad de calentar el equipo, para mantenerlo a la temperatura óptima de 30–35°C. No obstante, el empleo de digestores es un camino prometedor hacia la autonomía energética de las explotaciones agrícolas, por recuperación de las deyecciones y camas del ganado. Además, es una técnica de gran interés para los países en vías de desarrollo.

### **2.1.3 BIOMASA COMO RECURSO ENERGÉTICO Y SUS APLICACIONES**

Se le llama biomasa al combustible energético que se obtiene directa o indirectamente de los recursos biológicos. La energía de la biomasa procede de la madera, residuos agrícolas y estiércol, continúa siendo la fuente de energía principal en los países en desarrollo.

Cuando la materia viva se descompone, la energía contenida en ella se libera, esto ocurre mediante el metabolismo de los alimentos, la descomposición de la materia viva o la combustión de la leña. Por tanto, podemos decir, que el conjunto de materia viva que existe en un momento dado, o biomasa, es un gran depósito energético temporal, cuya magnitud está mantenida a base de un constante flujo de captación y liberación.



**Figura 2.2** Biomasa y aplicaciones

Como es de esperar de la variedad de productos resultantes de la biomasa las aplicaciones posibles son también numerosas.<sup>3</sup>

### a) **BIOCOMBUSTIBLES**

La producción de biocombustibles tales como el etanol y el biodiesel tiene el potencial de sustituir cantidades significativas de combustibles fósiles en varias aplicaciones de transporte. El uso extenso del etanol en Brasil ha demostrado que los biocombustibles son técnicamente factibles en gran escala.

La producción de biocombustibles en los EE.UU. y Europa (etanol y biodiesel) está aumentando, siendo la mayoría de los productos utilizados en combustible mezcla, por ejemplo E20 está compuesto por 20% de etanol y 80% de gasolina y se ha descubierto que es eficaz en la mayoría de los motores de ignición sin ninguna modificación.

Actualmente la producción de biocombustibles es apoyada con incentivos del gobierno, pero en el futuro, con el crecimiento de los sembrados dedicados a la bioenergía, y las economías de la escala, las reducciones de costos pueden hacer competitivos a los biocombustibles.

<sup>3</sup> Biomasa Textos Científicos.mht

## **b) PRODUCCIÓN ELÉCTRICA**

La electricidad puede ser generada a partir de un número de fuentes de biomasa y al ser una forma de energía renovable se la puede clasificar como "energía verde".

La producción de electricidad a partir de fuentes renovables de biomasa no contribuye al efecto invernadero ya que el dióxido de carbono liberado por la biomasa cuando es quemado, (directa o indirectamente después de que se produzca un biocombustible) es igual al dióxido de carbono absorbido por el material de la biomasa durante su crecimiento.

## **c) CALOR Y VAPOR**

La combustión de la biomasa o de biogás puede utilizarse para generar calor y vapor. El calor puede ser el producto principal, en usos tales como calefacción de hogares y cocinar, o puede ser un subproducto de la producción eléctrica en centrales combinadas de calor y energía.

El vapor generado por la biomasa puede utilizarse para accionar turbinas de vapor para la producción eléctrica, utilizarse como calor de proceso en una fábrica o planta de procesamiento, o utilizarse para mantener un flujo de agua caliente.

## **d) GAS COMBUSTIBLE**

Los biogases producidos de la digestión o de la pirólisis anaerobia tienen un número de aplicaciones. Pueden ser utilizados en motores de combustión interna para accionar turbinas para la producción eléctrica, puede utilizarse para producir calor para necesidades comerciales y domésticas, y en vehículos especialmente modificados como un combustible.

## **2.1.4 VENTAJAS Y DESVENTAJAS DE LA BIOMASA**

### **a) VENTAJAS**

Ayuda a la economía de los sectores rurales<sup>4</sup>, es decir que la biomasa se basa de los residuos orgánicos vegetales que se trabajan en los sectores rurales.

Es abundante, a diferencia de otras energías, la biomasa es abundante y puede ser muy aprovechada.

Beneficios ambientales, es muy buena para el medio ambiente ya que esta energía es renovable y no proporciona contaminaciones al ecosistema.

Prometedora, se la ve con un gran futuro ya que como mencionamos antes arriba, esta energía es abundante y a la vez no es contaminante.

Puede solucionar:

- acumulación de los desechos
- contaminación por combustión incontrolada
- eliminar focos infecciosos y liberar olores desagradables que provocan los excrementos de los animales

### **b) DESVENTAJAS**

La utilización energética de la biomasa presenta, debido a sus características, pequeños inconvenientes con relación a los combustibles fósiles:

- La biomasa posee menor densidad energética, o lo que es lo mismo, para conseguir la misma cantidad de energía es necesario utilizar más cantidad de recurso. Esto hace que los sistemas de almacenamiento sean, en general, mayores.

---

<sup>4</sup> López Darío D., Energía de biomasa, Págs. 8-9

- Los sistemas de alimentación de combustible y eliminación de cenizas son más complejos y requieren unos mayores costos de operación y mantenimiento (respecto a las que usan un combustible fósil líquido o gaseoso). No obstante, cada vez existen en el mercado sistemas más automatizados que van minimizando este inconveniente.

Muchos de estos recursos tienen elevados contenidos de humedad, lo que hace que en determinadas aplicaciones puede ser necesario un proceso previo de secado.

## **2.2 ANÁLISIS DE MODELOS DE COMBUSTIÓN**

### **2.2.1 NATURALEZA DEL TEMA**

El proceso de combustión<sup>5</sup> es probablemente, de todos los procesos químicos, el más importante, puesto que en él se basa la civilización actual. La diferencia fundamental entre el hombre civilizado y el primitivo es el consumo de energía. Mientras que el hombre primitivo consumía muy poca energía por persona y por día (alimentos, leña), el hombre civilizado consume una enorme cantidad, ya sea directamente (energía eléctrica, combustible) o indirectamente (plásticos, papel, comunicaciones, vivienda, vestido).

Los consumos de energía del hombre actual se pueden agrupar en dos formas básicas: energía eléctrica para la producción de bienes o servicios (producida mayoritariamente por combustión de combustibles fósiles) y energía química para el transporte (aprovechada por un proceso de combustión).

Sin embargo, el tema combustión es mucho más amplio. El quemado bajo control de combustibles en calderas de vapor, o para calentar aire, o para procesos metalúrgicos, en motores para producir empuje o potencia, en incineradores para destruir residuos, son ejemplos de combustión. Pero también es combustión el

---

<sup>5</sup> Ing. Brizuela E. & Ing. Romano S. D., Combustion, Intro.

quemado fuera de control de materiales combustibles en los casos de explosiones de gases y polvos (silos), y en incendios de bosques, edificios y combustibles líquidos derramados (accidentes).

La variedad de combustibles propiamente dichos y de materiales combustibles es muy amplia donde se puede citar:

- Madera
- Carbón de leña y de piedra
- Desechos de agricultura
- Nafta, diesel oil, fuel oil, kerosene
- Alcoholes, solventes
- Gas natural, gas licuado de petróleo, gas de agua
- Polvo de cereales, pasto, ramas, leña
- Materiales celulósicos
- Polímeros
- Materiales de construcción, muebles

### **2.2.2 CLASIFICACIÓN DE LOS COMBUSTIBLES**

Los combustibles se clasifican<sup>6</sup> teniendo en cuenta su estado de agregación en sólidos, líquidos y gaseosos. Un ejemplo de combustible sólido es el carbón o la madera. Un ejemplo de combustible líquido es el gasóleo, y de combustibles gaseosos, el propano y el gas natural.

Los combustibles fósiles son aquellos que provienen de restos orgánicos vegetales y animales y se extraen de la naturaleza. Un ejemplo es el petróleo, que si bien es un combustible, no se utiliza directamente como tal, sino como excelente materia prima de muchos combustibles, como el kerosene o las naftas.

---

<sup>6</sup> Ing. Brizuela E. & Ing. Romano S. D., Combustion, Págs. 12-

### 2.2.3 CONCEPTOS BÁSICOS

La combustión puede llevarse a cabo directamente con el oxígeno o con una mezcla de sustancias que contengan oxígeno. Esta mezcla de sustancias que contiene oxígeno se denomina comburente. El aire es el comburente más usual.

Si se supone (caso más común) que la combustión se realiza con aire, la reacción química que se debe plantear es la del proceso por el cual el combustible reacciona con el aire para formar los productos correspondientes, es decir:



Una forma general de plantear una reacción química es la siguiente:



donde las letras escritas en mayúsculas indican las sustancias químicas y las minúsculas indican la cantidad de moles de dichas sustancias. Se denominan genéricamente reactantes a las sustancias escritas antes del signo igual (A y B) y productos a las escritas detrás (C y D). Como se indicó anteriormente, la combustión es una reacción de oxidación exotérmica.

Esto significa que durante la reacción se libera calor. La variación de entalpía que acompaña a la combustión completa de un mol de un compuesto se denomina calor de combustión. Este calor de combustión puede determinarse tanto en forma experimental como por medio de cálculos (teniendo en cuenta las entalpías de los reactivos y productos). La reacción química entre el combustible y el oxígeno origina sustancias gaseosas. Los productos más comunes son CO<sub>2</sub> y H<sub>2</sub>O. A los productos de una reacción de combustión se los denomina, en forma genérica, humos.

Es importante hacer notar que el combustible sólo reacciona con el oxígeno del aire. La composición del aire es 20.99% de  $O_2$ , 78.03% de  $N_2$ , 0.94% de Ar (argón), 0.03% de  $CO_2$  y 0.01% de  $H_2$ . Debido a que ni el  $N_2$  ni el Ar reaccionan durante la combustión, se los suele agrupar considerando que el aire está formado por 21% de  $O_2$  y 79% de  $N_2$ . Por lo tanto, el  $N_2$  pasará íntegramente a los humos. Se puede dar el caso en que el combustible esté formado por una mezcla de sustancias entre las cuales hay una o más que no reaccionan con el  $O_2$ , por ejemplo  $SO_2$ . En este caso, estas sustancias también pasarán en forma completa a los humos.

Otro caso en que parte de algún reactivo pasa al producto es cuando hay más aire del que se necesita para la combustión; el  $O_2$  que no se utiliza en la reacción formará parte de los humos. Se habla entonces de reacciones con exceso de aire. Por último, es útil indicar que los humos pueden contener parte del combustible que no haya reaccionado y sustancias con un grado de oxidación incompleto, como el  $CO$ . Cuando el  $O_2$  que se necesita para la reacción no es suficiente, se habla de reacciones con defecto de aire.

En la tabla 2.1 se indican las sustancias más comunes que se pueden encontrar en los humos.

**Tabla 2.1** Sustancias que se pueden encontrar en los humos.

<b>Formula Química</b>	<b>Nombre</b>	<b>Procedencia principal</b>	<b>Otras procedencias</b>
C <sub>2</sub> O	Dióxido de Carbono	Combustión de sustancias que contiene C.	Componente no combustible del combustible.
H <sub>2</sub> O	Vapor de agua	Combustión de sustancias que contiene H <sub>2</sub> .	Combustible húmedo.
N <sub>2</sub>	Nitrógeno	Aire	Componente no combustible del combustible
O <sub>2</sub>	Oxígeno	Combustión realizada con aire en exceso.	Un gas combustible puede tener O <sub>2</sub> en su composición.
CO	Monóxido de Carbono	Combustión realizada con aire en defecto.	Un gas combustible puede tener CO en su composición.
H <sub>2</sub>	Hidrógeno	Combustión realizada con aire en defecto.	
C	Carbono (hollín)	Combustión realizada con aire en defecto.	
SO <sub>2</sub>	Dióxido de Azufre	Presencia de S en el combustible.	Un gas combustible puede tener SO <sub>2</sub> en su composición.

## 2.2.4 PROCESOS DE COMBUSTIÓN

Los procesos de combustión se pueden clasificar en:

- Combustión completa.
- Combustión incompleta.
- Combustión teórica o estequiométrica.
- Combustión con exceso de aire.
- Combustión con defecto de aire.

### **a) COMBUSTIÓN COMPLETA**

Las sustancias combustibles del combustible se queman hasta el máximo grado posible de oxidación. En consecuencia, no habrá sustancias combustibles en los humos. En los productos de la combustión se puede encontrar  $N_2$ ,  $CO_2$ ,  $H_2O$  y  $SO_2$ .

### **b) COMBUSTIÓN INCOMPLETA**

Sucede lo contrario que en la combustión completa. O sea, como el combustible no se oxida completamente, se forman sustancias que todavía pueden seguir oxidándose; por ejemplo,  $CO$ . Estas sustancias se denominan inquemados. La presencia de inquemados indica que la combustión se está realizando en forma incompleta. Otros inquemados pueden ser  $H_2$ ,  $C_nH_m$ ,  $H_2S$  y  $C$ . Estas sustancias son los contaminantes más comunes que escapan a la atmósfera en los gases de combustión.

### **c) COMBUSTIÓN TEÓRICA O ESTEQUIOMÉTRICA**

Es la combustión que se realiza con la cantidad teórica de oxígeno estrictamente necesaria para producir la oxidación total del combustible sin que se produzcan inquemados. En consecuencia, no se encuentra  $O_2$  en los humos, ya que dicho  $O_2$  se consumió totalmente durante la combustión. Esta combustión se denomina teórica porque en la práctica siempre se producen inquemados, aunque sea en muy pequeña proporción.

### **d) COMBUSTIÓN CON EXCESO DE AIRE**

Es la combustión que se lleva a cabo con una cantidad de aire superior a la estequiométrica. Esta combustión tiende a no producir inquemados. Es típica la presencia de  $O_2$  en los humos.

Si bien la incorporación de aire permite evitar la combustión incompleta y la formación de inquemados, trae aparejada la pérdida de calor en los productos de combustión, reduciendo la temperatura de combustión, la eficiencia y la longitud de llama.

#### **e) COMBUSTIÓN CON DEFECTO DE AIRE**

En esta combustión, el aire disponible es menor que el necesario para que se produzca la oxidación total del combustible. Por lo tanto, se producen inquemados.

### **2.2.5 ANÁLISIS DE LA COMBUSTIÓN COMPLETA E INCOMPLETA**

#### **a) AIRE**

El aire que se usa en las reacciones de combustión es el aire atmosférico, debido a que ni el  $N_2$  ni los gases inertes del aire reaccionan durante la combustión, se los suele agrupar, y se considera que el aire está formado por 21% de  $O_2$  y 79% de  $N_2$ . Es decir, que 1 kmol de aire contiene 0.21 kmol de  $O_2$  y 0.79 kmol de  $N_2$ . En consecuencia, para obtener 1 kmol de  $O_2$  se necesitan 4.762 kmol de aire.

La masa molecular ( $W_a$ ) promedio de este aire, llamado comúnmente aire técnico simplificado (ATS) es  $W_a = 28.85$  kg/kmol. Por lo tanto, si expresamos las relaciones anteriores en kg en vez de kmol, estas cantidades serán distintas. Un kg de aire contiene 0.233 kg de  $O_2$  y 0.766kg de  $N_2$ . La cantidad de aire necesaria para obtener 1 kg de  $O_2$  es de 4.292kg de aire.

Todos estos datos, que se utilizan en la combustión con ATS, se resumen en la tabla 2.2.

**Tabla 2.2** Datos que se utiliza en la combustión

<b>Cantidad de aire</b>	<b>Composición</b>
1 kmol	0.79 Kmol N <sub>2</sub> - 0.21 Kmol O <sub>2</sub>
4.762 kmol	3.762 Kmol N <sub>2</sub> - 1 Kmol O <sub>2</sub>
1 Kg	0.767 Kg N <sub>2</sub> - 0.233 Kg O <sub>2</sub>
4.292 Kg	3.292 Kg N <sub>2</sub> - 1 Kg O <sub>2</sub>

En la tabla 2.3 se indican algunas propiedades del ATS, a 0°C y 101325 kPa (1atm).

**Tabla 2.3** Propiedades ATS

	<b>Símbolo</b>	<b>Valor</b>	<b>Unidad</b>
Masa molecular	$W_a$	28.85	Kg/Kmol
Densidad	$P_a$	1.287	Kg/m <sup>3</sup>

## **b) REACCIONES QUÍMICAS**

Las principales reacciones químicas que se utilizan para estudiar un proceso de combustión, se muestran en la tabla 2.4.

Dichas reacciones corresponden a reacciones completas de sustancias que pueden pertenecer a un combustible sólido, líquido o gaseoso.

Es importante hacer notar que las reacciones fueron planteadas para 1 kmol de combustible y se ha utilizado oxígeno puro como comburente.

**Tabla 2.4** Principales reacciones químicas en combustión

$C + O_2 = CO_2$
$CO + 1/2O_2 = CO_2$
$H_2 + 1/2O_2 = H_2O$
$S + O_2 = SO_2$
$SH_2 + 3/2O_2 = SO_2 + H_2O$
$C_nH_m + (m/4 + n)O_2 = nCO_2 + m/2 H_2O$

En la tabla 2.5 se indican las masas moleculares de las principales sustancias que intervienen en las reacciones de combustión.

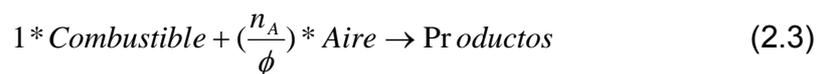
**Tabla 2.5** Masas moleculares

Componente	Masa molecular (Kg/Kmol)
O <sub>2</sub>	32
N <sub>2</sub>	28
H <sub>2</sub>	2
S	32
C	12
CO	28
CO <sub>2</sub>	44
SO <sub>2</sub>	64
C <sub>n</sub> H <sub>m</sub>	12n + m
H <sub>2</sub> O	18
SH <sub>2</sub>	34

## c) PRODUCTOS DE COMBUSTIÓN

### Casos de combustión técnica

La combustión de hidrocarburos en aire involucra centenares de reacciones químicas elementales y decenas de especies químicas. El cálculo de tales problemas está fuera del alcance del ingeniero de diseño o de operación de una planta térmica, por lo que se plantean casos simplificados de combustión denominada técnica, basados en el análisis de la reacción de un solo paso como en la ecuación:



Considerando la riqueza de la mezcla se presentan tres casos:

1. Combustión con exceso de combustible (combustión rica)
2. Combustión estequiométrica
3. Combustión con exceso de aire (combustión pobre)

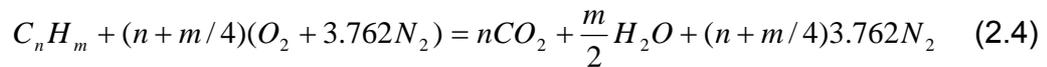
Los productos de la combustión de los hidrocarburos en aire se denominan genéricamente humos, y están constituidos por dióxido de carbono, agua y el nitrógeno del aire, comúnmente denominado balasto. En los casos de combustión rica o pobre aparecerán también entre los productos de combustión el combustible (rica) o el aire (pobre) que haya en exceso.

Estos casos, en los que sólo aparecen las especies mencionadas, se denominan de combustión completa.

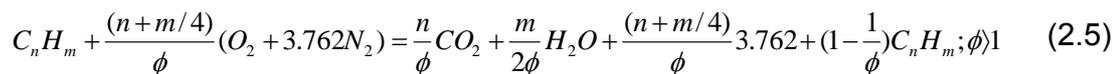
Como se menciona más arriba, se forman en la combustión muchas otras especies, y ocasionalmente algunas de ellas aparecen entre los productos. Estos son casos de combustión incompleta.

### Combustión completa

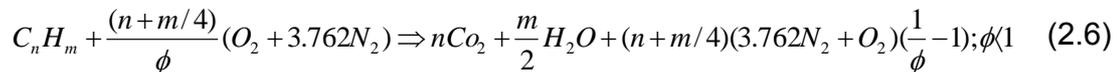
Para el hidrocarburo de composición general  $C_nH_m$  escribimos la reacción de combustión completa estequiométrica:



Para la combustión con exceso de combustible:



Con exceso de aire:



### Combustión incompleta

La combustión incompleta puede presentarse en mezclas ricas, pobres o estequiométricas. En cualquier caso la resolución del problema puede encararse con los procedimientos ya vistos de balance de especies atómicas y las leyes de la estequiometría.

Se estudiarán dos casos de combustión incompleta que son de aplicación usual en la operación de plantas térmicas: la combustión de Kissel, en la que los inquemados son el CO y el H<sub>2</sub>, y la combustión de Ostwald, en la que hay un solo inquemado, el CO. Para ambos casos se encuentran soluciones gráficas que

permiten una rápida evaluación de las condiciones globales de la combustión, la eficiencia de la combustión y la producción de contaminantes ambientales. Estos diagramas se pueden utilizar para supervisar una instalación de combustión. Las grandes calderas, por ejemplo, poseen instrumentos para analizar los gases de combustión. Debido a que estos instrumentos reciben los gases fríos, el agua condensa en la pesca de medición, y el análisis es en base seca. Se mide la fracción molar (% en volumen) de  $O_2$  y de  $CO_2$ , lo que permite saber rápidamente si hay inquemados. Con la medición de temperatura y un ábaco o tabla se pueden hallar las concentraciones de los inquemados.

## **2.3 INTERCAMBIADORES DE CALOR**

### **2.3.1 DEFINICIÓN**

Un intercambiador<sup>7</sup> de calor se puede describir de un modo muy elemental como un equipo en el que dos corrientes a distintas temperaturas fluyen sin mezclarse con el objeto de enfriar una de ellas o calentar la otra o ambas cosas a la vez.

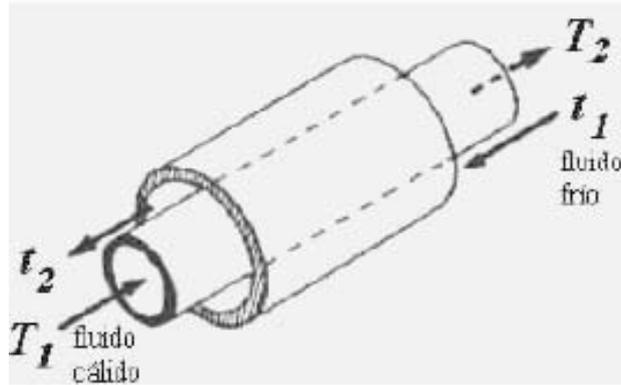
Un esquema de intercambiador de calor sumamente primitivo puede ser el siguiente:

$T_1$  y  $T_2$  = temperaturas de entrada y salida de fluido caliente.

$t_1$  y  $t_2$  = temperaturas de entrada y salida de fluido frío.

---

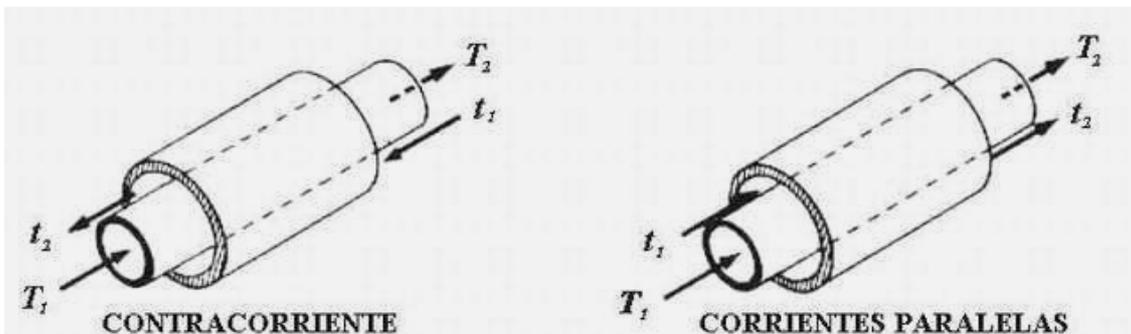
<sup>7</sup> Jorge A. Rodríguez, INTRODUCCION A LA TERMODINAMICA CON ALGUNAS APLICACIONES DE INGENIERIA, Cap. 18



**Figura 2.3** Intercambiador de calor

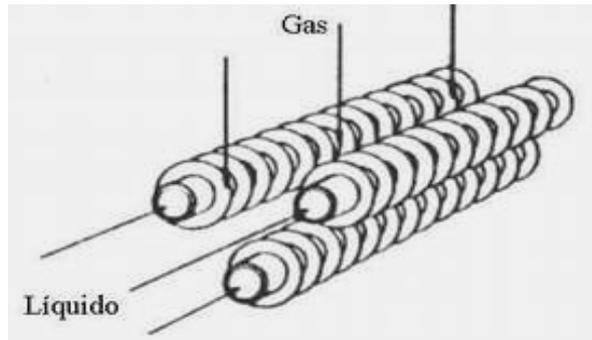
### 2.3.2 DISPOSICIÓN DE LAS CORRIENTES

En el esquema anterior se tiene una situación que se a dado en llamar “contra corriente” o “corrientes opuestas”. En cambio si ambas corrientes tiene el mismo sentido se trata de “corrientes paralelas” o “equicorrientes”.



**Figura 2.4** Disposición de las corrientes

También se presenta una situación en las que ambas corrientes se cruzan en ángulo recto. En ese caso se habla de “corrientes cruzadas”. Esta disposición se da con mayor frecuencia en el intercambio de calor de gases con líquidos, como se ve a continuación.



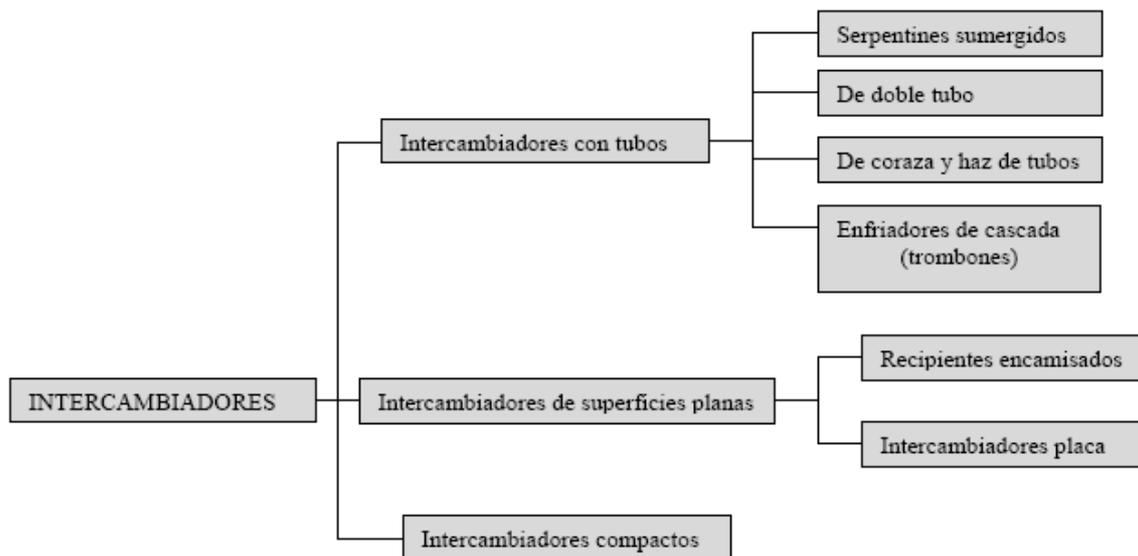
**Figura 2.5** Disposición de mayor frecuencia

### **2.3.3 CLASES DE INTERCAMBIADORES**

En el intercambiador de calor es uno de los equipos industriales más frecuentes. Prácticamente no existen industria en la que no se encuentre intercambiador de calor, debido a que la operación de enfriamiento o calentamiento es inherente a todo proceso que maneje energía en cualquier de sus formas.

Existe mucha variación de diseños en los equipos de intercambio de calor. En ciertas ramas de la industria se han desarrollado intercambiadores muy especializados para ciertas aplicaciones puntuales. Tratar todos los tipos sería imposible, por la cantidad y variedad de ellos que se puede encontrar.

En forma muy general, se los puede clasificar según el tipo de superficie en:



**Figura 2.6** Intercambiadores de calor

De los más comunes que se puede encontrar en el área industrial se nombrará y explicará los siguientes.

### a) INTERCAMBIADORES CON TUBOS LISOS

Los intercambiadores más habituales son, como se dijo, los que usan tubos. Estos comprenden a los serpentines, intercambiadores de doble tubo y los intercambiadores de tubo y coraza.

Se va a describir brevemente cada uno de ellos, y a discutir los usos y aplicación de cada uno.

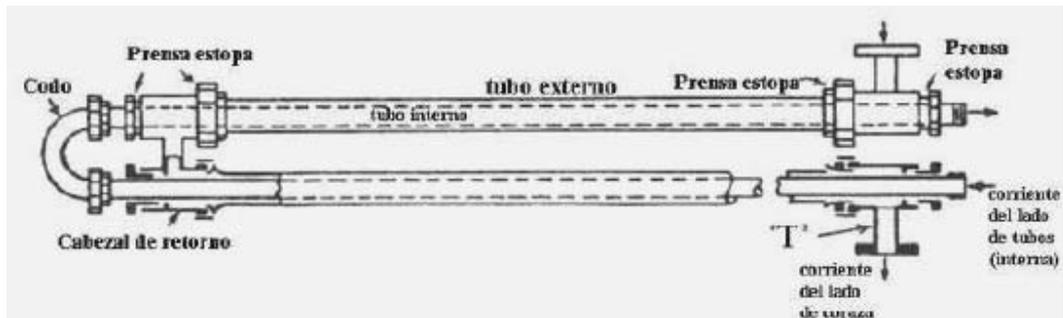
#### **Serpentines**

Un intercambiador de serpentín es un simple tubo que se dobla en forma helicoidal y se sumerge en el líquido. Se usa normalmente para tanques y puede operar por convección natural o forzada. Debido a su bajo costo y rápida construcción se

improvisa fácilmente con materiales abundantes en cualquier taller de mantenimiento. Usualmente se emplea tubería lisa de  $\frac{3}{4}$  a 2 pulgadas.

### Intercambiadores de doble tubo.

El intercambiador de doble tubo es el tipo más simple que se puede encontrar de tubos rectos. Básicamente consiste en dos tubos concéntricos, lisos o aleteados. Normalmente el fluido frío se coloca en el espacio anular, y el fluido caliente va en el interior del tubo interno. La disposición geométrica es la siguiente:



**Figura 2.7** Intercambiadores de doble tubo

El intercambiador está formado por varias unidades como las mostradas en el esquema. Cada una de ellas se llama "horquilla" y se arma con tubo roscado o bridado común y corriente. Las uniones también pueden ser soldadas, pero esto no es habitual pues dificulta el armado y desarmado para su limpieza.

El flujo en este tipo y similares es a contracorriente pura, excepto cuando hay caudales grandes que desmandan un arreglo en serie-paralelo. El flujo en contracorriente pura resulta en hasta un 20% más de intercambio comparado con el arreglo en equicorrientes de modo que si se manejan corriente pequeñas este equipo es el mejor, y también el más económico.

### Intercambiadores de haz de tubos y coraza

Los intercambiadores de tipo haz de tubos y coraza se usan para servicios en los que se requieren grandes superficies de intercambio, generalmente asociadas a caudales muchos mayores de los que puede manejar un intercambio de doble tubo. En efecto, el intercambiador de doble tubo requiere una gran cantidad de horquillas para manejar servicios como los descritos, pero a expensas de una considerable consumo de espacio y con un aumento de la cantidad de uniones que son puntos débiles porque en ellas la posibilidad de fugas es mayor.

La solución consiste en ubicar los tubos en un haz, rodeados por un tubo de gran diámetro denominado coraza. De este modo los puntos débiles donde se pueden producir fugas, en las uniones del extremo de los tubos con la placa, están contenidos en la coraza. En cambio en un conjunto de horquillas estos puntos están al aire libre.

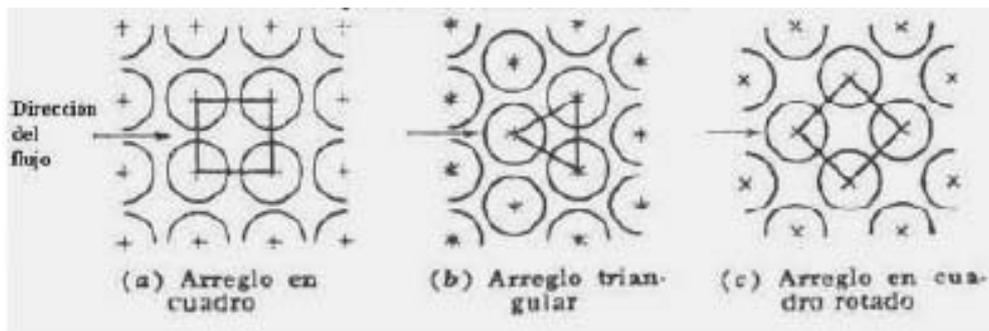
En la siguiente ilustración se ve un intercambiador de haz de tubos y coraza.



**Figura 2.8** Intercambiadores de haz de tubos y coraza

Como se puede observar, el fluido que ha de circular en el interior de los tubos ingresa por el cabezal derecho y se distribuye por los orificios de la placa en el haz de tubos. El fluido de la coraza, en cambio circula por el exterior del haz de tubos, siguiendo una trayectoria tortuosa por el efecto de las pantallas o tabiques deflectores. A este intercambiador se lo denomina tipo 1-1 por tener un solo paso por la coraza y por los tubos. De tener dos pasos por los tubos y uno por la coraza se llamaría tipo 2-1.

El flujo en la coraza es casi perpendicular al haz de tubos. Las disposiciones del haz se pueden observar en el siguiente esquema.



**Figura 2.9** Disposiciones del haz de tubos

Existen tres tipos básicos de intercambiadores de haz de tubos y coraza.

Los tres tipos básicos son:

- Tubos en U
- De cabezal fijo
- De cabezal flotante

## **b) INTERCAMBIADORES CON SUPERFICIES EXTENDIDAS**

Los tubos aleteados se usan porque las aletas aumentan el intercambio de calor en alrededor de 10 a 15 veces por unidad de longitud.

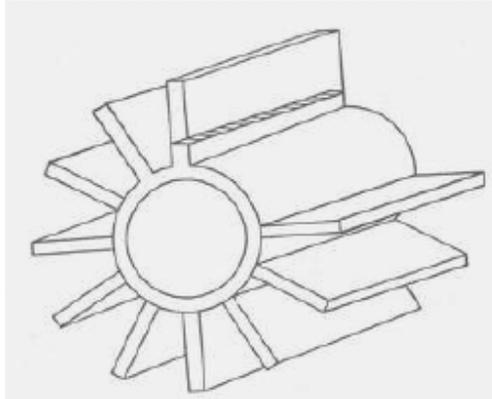
Las aletas se fabrican de una gran variedad de diseños y formas geométricas. Las aletas longitudinales se usan en intercambiadores de doble tubo, mientras que las aletas transversales circulares cortas se usan en intercambiadores de haz de tubos y coraza.

Esto se debe al hecho de que en los intercambiadores de doble tubo el flujo es paralelo a los tubos, mientras que en los de haz de tubos y coraza es normal al banco de tubos. Aletas más altas se usan en intercambiadores sin coraza o con flujo normal al eje del banco de tubos.

## **c) INTERCAMBIADORES DE DOBLE TUBO ALETEADOS**

Tanto en el caso de intercambiadores de un solo tubo como multi-tubo las aletas son longitudinales, continuas y rectas. Otros tipos de aletas son poco usadas, porque la resistencia hidráulica que ofrecen es mayor sin aumento de la eficacia de intercambio, además de ser más caras. Se usan principalmente en el calentamiento de líquidos viscosos, en casos en que los líquidos tienen propiedades de intercambio de calor y de ensuciamiento muy diferentes, y cuando la temperatura del fluido a calentar no puede exceder un máximo.

Por lo general la disposición geométrica de las aletas es en el exterior del tubo interno, como vemos en el siguiente croquis.



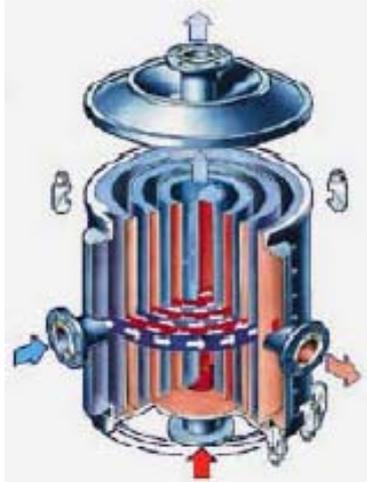
**Figura 2.10** Intercambiadores de doble tubo aleteados

#### **d) INTERCAMBIADORES COMPACTOS DE ESPIRAL**

Los intercambiadores compactos más frecuentes son del tipo espiral. El intercambiador de placas en espiral se comenzó a usar en Suecia alrededor de 1930 para recuperar calor de efluente contaminado de la industria papelera. En 1965 la empresa que los fabrica fue comprada por el grupo sueco Alfa-Laval que es el fabricante más grande en la actualidad, aunque no el único.

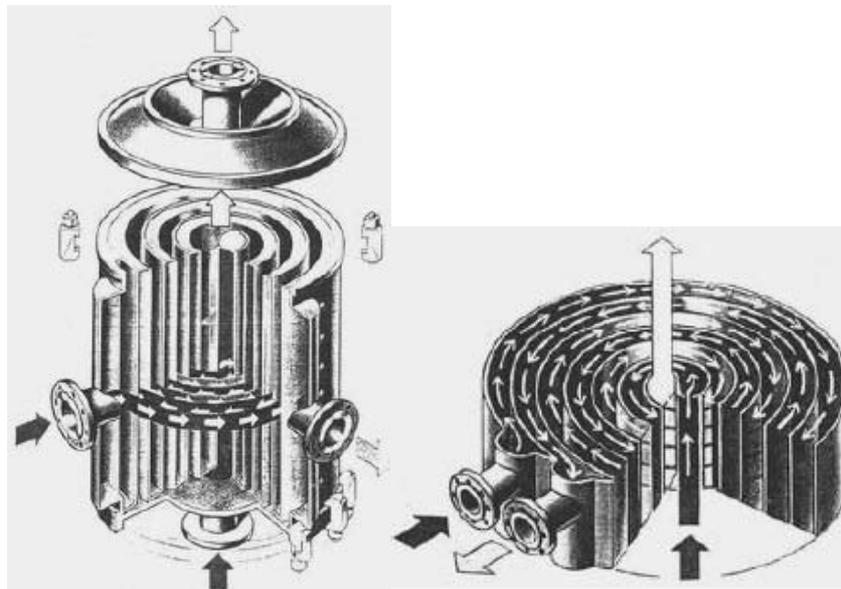
Encuentra aplicación en casos en los que los fluidos no ensucian muy poco, porque su construcción no permite la limpieza mecánica. Para poder acceder al interior del equipo habría que desarmarlo y volver a soldar, lo que por supuesto esta fuera de la cuestión y no debería siquiera pensarse en encarar semejante tarea. El único en condiciones de hacerlo es el fabricante. No obstante algunas marcas producen modelos desarmables en los que se han remplazado las uniones soldadas por uniones con junta empaquetada. Este tipo de equipo no se puede someter a presiones elevada, pero permite un acceso más fácil aunque siempre limitado al interior para efectuar limpieza mecánica.

Tampoco se puede usar cuando algunas de las corrientes son corrosivas, debido a que no se pueden reemplazar las partes dañadas.



**Figura 2.11** Intercambiadores compactos de espiral

El siguiente croquis muestra la estructura de un intercambiador placa espiral de una conocida marca, con un detalle de la disposición de las corrientes.



**Figura 2.12** Disposiciones de los intercambiadores de calor en espiral.

## 2.4 TRANSFERENCIA DE CALOR EN DUCTOS

### 2.4.1 CONDUCCIÓN

La conducción<sup>8</sup>, es uno de los tipos de transferencia de calor, se produce por la transferencia de energía de las partículas más energéticas a las menos energéticas de una sustancia, por la interacción entre ellas. La energía térmica se asocia a la energía cinética que poseen las partículas, así a mayor movilidad de las mismas, las sustancias presentan una mayor o menos energía térmica.

Las partículas presentan tres movimientos fundamentales, el de traslación aleatorio, interno y vibratorio; siendo el primero el mayor responsable de la transferencia de energía por conducción. El proceso de transferencia de calor sucede cuando las partículas con niveles energéticos más altos, chocan durante su movimiento aleatorio con otras partículas, durante esta interacción se produce la transferencia de energía. Este tipo de transferencia de calor, se presenta de múltiples formas en la vida diaria, como pérdidas a través de las paredes de hornos y calderas, o en el calor que se trasfiere desde la hornilla de una cocina a los alimentos a través de un sartén.

Para determinar la cantidad de calor transferida mediante este mecanismo, se puede emplear el modelo matemático de la ley de Fourier. En el caso particular de la conducción en una pared plana, se puede emplear la siguiente expresión:

$$q''_x = -k \frac{dT}{dx} \quad (2.7)$$

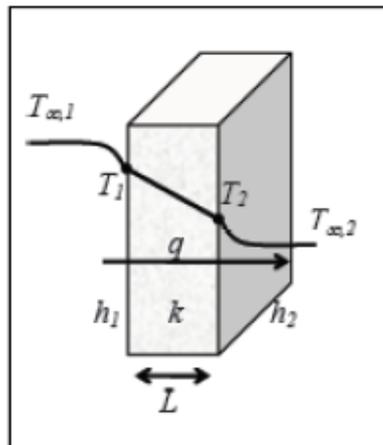
La cantidad de calor que se trasfiere por unidad de área,  $q''_x$  ( $W/m^2$ ), es la velocidad del flujo de calor que atraviesa una superficie perpendicular al mismo, y es proporcional al gradiente de temperatura presente entre las dos superficies de

---

<sup>8</sup> INCROPERA, Frank, Fundamentos de Transferencia de Calor, Edit. Prentice Hall, Cap. II y III

la pared. El signo menos que precede a la expresión se debe a que la conducción térmica se realiza de una zona de mayor energía a una de menor.

La constante de proporcionalidad,  $k$ , es una propiedad característica de cada material conocida como conductividad térmica (W/m.k). En el caso de condiciones de estado estable, el gradiente de temperatura se puede visualizar en la figura.



**Figura 2.13** Diagrama de gradiente térmico

Expresándose de la siguiente manera:

$$\frac{dT}{dx} = \frac{T_2 - T_1}{L} \quad (2.8)$$

Relacionando las ecuaciones 2.7 con 2.8, se tiene:

$$q''_x = -k \frac{T_2 - T_1}{L}$$

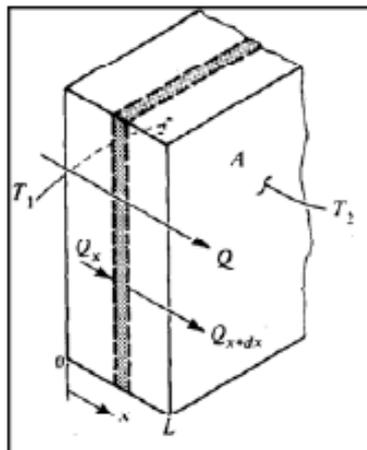
$$q''_x = k \frac{T_1 - T_2}{L} = k \frac{\Delta T}{L} \quad (2.9)$$

Donde:  $k$  Constante de conductividad térmica en W/m. K;  $\Delta T$  Diferencia de Temperaturas en K; Longitud en m;  $q''_x$  Calor transferido por unidad de área en W/m<sup>2</sup>.

### a) Conducción Unidimensional de estado estable

Un sistema unidimensional, se entiende como el modelo de transferencia de calor por conducción que sucede en un solo eje coordenado, mismo por el cual se presenta el gradiente de temperatura. Si bien este sistema, se caracteriza por permitir un análisis muy sencillo de los procesos de transferencia de calor, entrega resultados muy preciosos para varias aplicaciones de ingeniería.

#### Pared Plana:



**Figura 2.14** Diagrama de conducción unidimensional en pared plana

Para determinar la transferencia de calor en una pared plana, se determina un sistema unidimensional de estado estable en una pared sin generación interna de calor, en el cual el flujo de calor sea constante e independiente del espesor de la pared. Para estas condiciones el primer paso es establecer la distribución de temperaturas del sistema aplicando las condiciones de frontera adecuadas, empleando la siguiente expresión de la ecuación de calor:

$$\frac{d}{dx} \left( k \frac{dT}{dx} \right) = 0 \quad (2.10)$$

Al suponer constante la conectividad térmica de la pared, integramos dos veces la expresión anterior, para conseguir la solución general.

$$T(x) = C_1 x + C_2 \quad (2.11)$$

Para determinar las constantes de integración, aplicamos las condiciones de frontera  $x=0$  y  $x=L$  en la solución general y se obtiene:

$$\begin{aligned} T_{s,1} &= C_2 \\ T_{s,2} &= C_1 L + T_{s,1} \end{aligned}$$

Obteniendo la siguiente expresión, que demuestra que la temperatura varía de forma lineal con  $x$ .

$$T(x) = (T_{s,2} - T_{s,1}) \frac{x}{L} + T_{s,1} \quad (2.12)$$

A partir de este análisis, determinamos la distribución de temperaturas y procedemos a utilizar la ley de Fourier, para determina el calor transferido por conducción.

$$q_x = -kA \frac{dT}{dx} = \frac{kA}{L} (T_{s,1} - T_{s,2}) \quad (2.13)$$

El flujo de calor se determina utilizando el valor del área de la pared normal, así el flujo de calor es:

$$q''_x = \frac{qx}{A} = \frac{k}{L}(T_{s,1} - T_{s,2}) \quad (2.14)$$

### **Analogía Eléctrica de la Conducción:**

Mediante el análisis de la ley de Fourier en sistemas de pared plana, se puede inferir la relación entre la difusión de calor y la carga eléctrica. Dado que una resistencia térmica se asocia con la conducción de calor, se determina que la resistencia térmica para la conducción es:

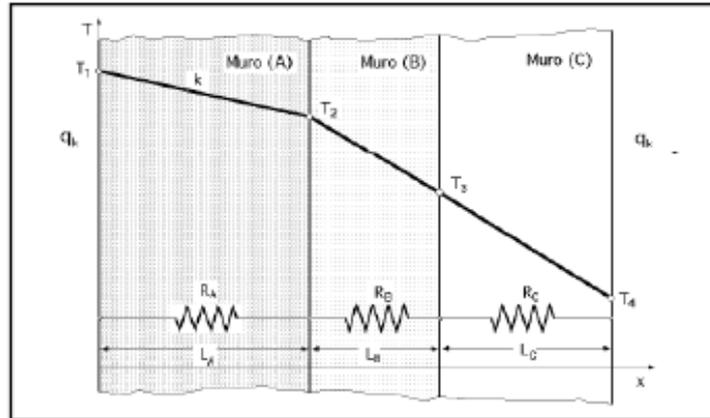
$$R_{t,cond} = \frac{(T_{s,1} - T_{s,2})}{qx} = \frac{L}{kA} \quad (2.15)$$

Esta expresión se puede relacionar con la resistencia a la conducción eléctrica expresada en la Ley de Ohm.

$$R_e = \frac{E_{s,1} - E_{s,2}}{l} = \frac{L}{\sigma A} \quad (2.16)$$

La analogía entre el flujo de calor y la electricidad, permite ampliar el problema de la transmisión de calor por conducción a sistemas más complejos, utilizando conceptos desarrollados en la teoría de circuitos eléctricos. De esta manera se resuelven problemas de paredes múltiples, en paralelo o en disposiciones más complejas, al relacionar cada elemento con una resistencia eléctrica y considerar el análisis, como el de un sistema de circuitos eléctricos, en el cual las resistencias pueden estar en serie o paralelo.

En el caso de un sistema de capas múltiples, por ejemplo, el flujo de calor es constante para todo el sistema, flujo que es análogo a la corriente eléctrica (I). Sin embargo, los gradientes de temperatura entre las capas son distintos.



**Figura 2.15** Diagrama de analogía eléctrica

Dado que el calor es el mismo para todas las secciones, se puede expresar en función de la resistividad térmica de cada sección, así:

$$q = \frac{T_1 - T_2}{\left(\frac{L}{kA}\right)_A} = \frac{T_2 - T_3}{\left(\frac{L}{kA}\right)_B} = \frac{T_3 - T_4}{\left(\frac{L}{kA}\right)_C} = \frac{T_1 - T_4}{\left(\frac{L}{kA}\right)_A + \left(\frac{L}{kA}\right)_B + \left(\frac{L}{kA}\right)_C} \quad (2.17)$$

Al considerar un conjunto de n capas en perfecto contacto, el flujo de calor estará dado por la siguiente expresión:

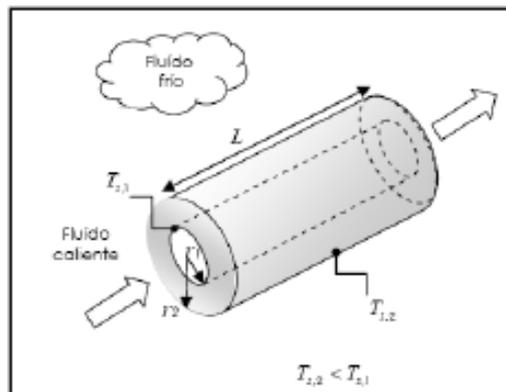
$$q_x = \frac{T_i - T_{i+1}}{\left(\frac{L}{kA}\right)_i} = \frac{T_1 - T_{n+1}}{\sum_{i=1}^n \left(\frac{L}{kA}\right)_i} \quad (2.18)$$

Donde  $T_1$  es la temperatura superficial de la primera capa;  $T_{n+1}$  temperatura superficial de la capa n.

### Cilindro

En la mayoría de los casos los sistemas que están compuestos por superficies circulares, como tubos y esferas, experimentan gradientes de temperatura solamente en la dirección radial, por esta razón son tratados como sistemas unidimensionales. De esta manera se puede determinar el calor que se trasmite por un cilindro aplicando la forma apropiada de la ley de Fourier.

En un cilindro hueco, que se presenta en la figura..., posee dos superficies que están expuestas a fluidos de diferentes temperaturas  $T_{s,1}$  y  $T_{s,2}$ , respectivamente; que posee condiciones de estado estacionario, sin generación interna de calor.



**Figura 2.16** Cilindro hueco con conducción unidimensional

La ley de Fourier en coordenadas cilíndricas se expresa de la siguiente manera:

$$q_r = -kA_r \frac{dT}{dr} \quad (2.19)$$

Al considerar la geometría del área que realiza la transferencia de calor, la fórmula del área normal a la dirección de la transferencia de calor, tenemos

$$A_r = 2\pi r \quad (2.20)$$

Así la expresión de la ley de Fourier, para el flujo de calor es cilindros es:

$$q_r = -k(2\pi rL) \frac{dT}{dr} \quad (2.21)$$

Expresando la ecuación 2.21, en términos de integrales con las condiciones de frontera  $T(r_1)=T_{s,1}$  y  $T(r_2)=T_{s,2}$ , podemos obtener la expresión de la distribución de temperatura en la dirección radial del cilindro.

$$\frac{q_r}{2\pi L} \int_{T_1}^{T_2} \frac{dr}{r} = - \int_{T_{s,1}}^{T_{s,2}} k dT$$

Suponemos que el valor de  $k$  es constante y procedemos a integrar dos veces, con la finalidad de obtener la solución general:

$$T(r) = C_1 \ln r + C_2 \quad (2.22)$$

Aplicamos las condiciones de frontera a la solución general para obtener las constantes de integración:

$$\begin{aligned} T_{s,1} &= C_1 \ln r_1 + C_2 \\ T_{s,2} &= C_1 \ln r_2 + C_2 \end{aligned}$$

Resolvemos para  $C_1$  y  $C_2$ , se sustituye en la solución general para obtener la expresión de distribución de temperatura

$$T(r) = \frac{T_{s,1} - T_{s,2}}{\ln\left(\frac{r_1}{r_2}\right)} \ln\left(\frac{r}{r_2}\right) + T_{s,2} \quad (2.23)$$

Donde:  $r_1$  radio interno en m;  $r_2$  radio externo en m;  $r$  radio en m;  $T_{s,1}$  temperatura de la superficie interna en K;  $T_{s,2}$  temperatura de la superficie externa en K;  $T$  temperatura en el radio deseado en K.

Utilizando la distribución de temperaturas expresada en la fórmula 2.22, con la ley de Fourier, obtenemos la expresión para la transferencia de calor en cilindros:

$$q_r = \frac{2\pi Lk(T_{s,1} - T_{s,2})}{\ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right)} \quad (2.24)$$

Donde:  $L$  longitud del cilindro en m;  $q_r$  flujo de calor W.

### **Analogía eléctrica:**

Del estudio de la expresión de la ley de Fourier, se puede establecer que la resistencia térmica para la conducción radial esta dado por la siguiente fórmula:

$$R_{cond} = \frac{\ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right)}{2\pi Lk} \quad (2.25)$$

## 2.4.2 CONVECCIÓN

La transferencia de calor por convección está compuesta por dos mecanismos, el primero producto del movimiento molecular aleatorio y el segundo causado por el movimiento global de los fluidos. El movimiento de un fluido, en presencia de un gradiente de temperatura, genera transferencia de calor; debido a que las partículas en el fluido mantienen su movimiento aleatorio, de tal manera que la transferencia se debe a la superposición de la energía transportada, por el movimiento aleatorio y el movimiento del fluido. La velocidad de transferencia de calor a través de un fluido es mucho mayor por convección que por conducción. Cuanto mayor es la velocidad del fluido mayor es la velocidad de transferencia de calor.

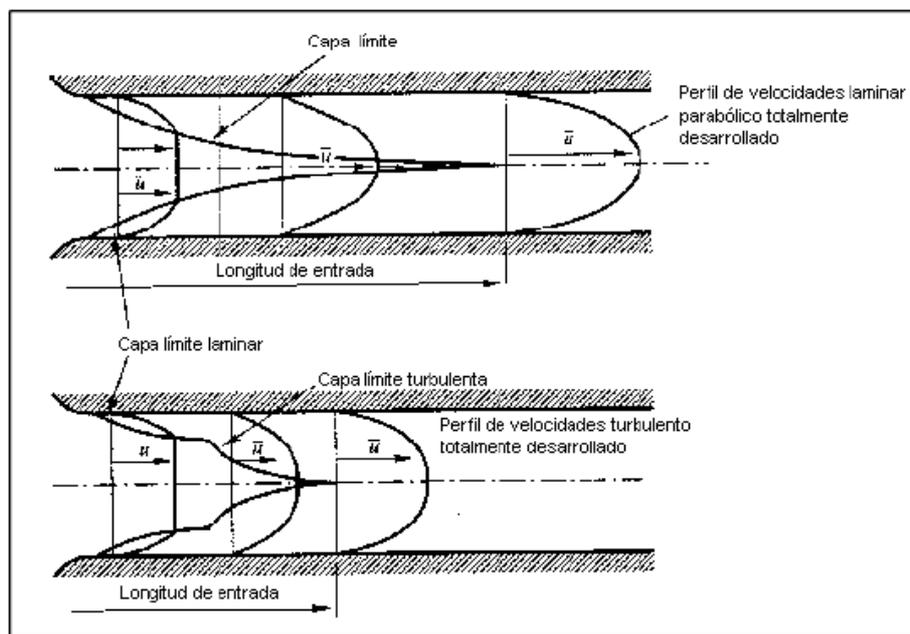
El proceso de transferencia de calor por convección<sup>9</sup>, es de gran interés en sistemas en que se combinan fluidos en movimiento y superficies limitadas, con diferentes temperaturas. Durante la interacción entre fluido y una superficie, se produce una región en el fluido conocida como capa límite de velocidad, en esta la velocidad del fluido varía desde cero en la superficie a un valor infinito  $U_{\infty}$ . De la misma manera, si existe una diferencia de temperatura entre el fluido y la superficie, se genera en el fluido una capa conocida como capa límite térmica, que puede tener un tamaño igual o diferente a la capa límite de velocidad, dependiendo de las condiciones del sistema.

La transferencia de calor por convección depende de las propiedades del fluido, de la superficie en contacto con el fluido y del tipo de flujo. Entre las propiedades del flujo se encuentran: la viscosidad dinámica  $\mu$ , la conductividad térmica  $k$ , la densidad  $\rho$ . Entre las propiedades de la superficie que intervienen en la convección están la geometría y el grado de aspereza. El tipo de flujo, laminar o turbulento, también influye en la velocidad de transferencia de calor por convección.

---

<sup>9</sup> INCROPERA, Frank, Fundamentos de Transferencia de Calor, Edit. Prentice Hall, Cap. VI.

El conocimiento del fenómeno de capa límite es de vital importancia, para comprender el proceso de convección. En las moléculas del fluido que se encuentran en contacto con la superficie de forma directa, tiene una velocidad muy cercana a cero, en este punto se produce una transferencia por el mecanismo de movimiento aleatorio; a medida que la capa límite se incrementa mientras sigue su movimiento por la superficie, estas partículas arrastran el calor corriente abajo y de ahí al resto del fluido.



**Figura 2.17** Diagrama de capa límite térmica

La transferencia de calor por convección se clasifica en base a la manera en que se produce el movimiento del fluido. La convección forzada se produce cuando el movimiento del fluido es producido por medios externos como bombas y ventiladores, por el contrario en la convección natural el movimiento del fluido se produce por variaciones de densidades asociadas a los gradientes de temperatura. La utilización de ambos mecanismos, produce la convección combinada, en la cual se potencializa el movimiento natural de los fluidos mediante elementos externos, con el objeto de lograr una mayor transferencia de calor.

La ley de enfriamiento de Newton, ofrece una expresión que permite establecer el valor de calor transferido por convección es siempre proporcional al gradiente de temperaturas, y es igual a:

$$q'' = h(T_s - T_\infty) \quad (2.26)$$

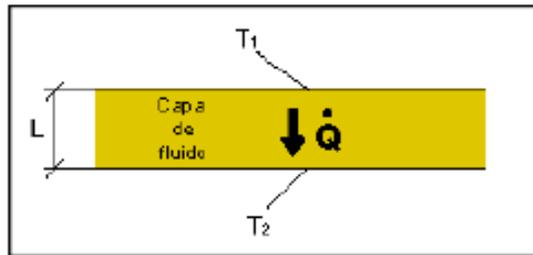
Donde:  $q''$  calor transferido por convección en  $W/m^2$ ;  $T_s$  temperatura de la superficie en K;  $T_\infty$  temperatura del fluido en K;  $h$  coeficiente de película de convección  $W/m^2.K$ .

#### a) Cálculo del coeficiente de película de convección.

Este coeficiente de convección se obtiene a partir del estudio de las condiciones de capa límite, considerando las distintas situaciones entre una superficie y un fluido en movimiento. Para determinar el valor del coeficiente de convección, se utilizan expresiones obtenidas a partir de complejos procesos matemáticos, aplicados a las relaciones entre capa límite de velocidad y de temperatura.

Las expresiones obtenidas emplean las siguientes variables, conocidas como números adimensionales, llamadas de esta manera porque es una práctica común retirar las dimensionales a las expresiones físico-matemático que modelan el mecanismo y agrupan las variables. En convección se emplean los siguientes números adimensionales:

**Número de Nusselt (Nu):** Es la relación que existe entre el calor transferido por convección a través del fluido y el que se transferiría si sólo existiese conducción. Se considera una capa de fluido de espesor  $L$  con sus superficies a diferentes temperaturas,  $T_1$  y  $T_2$ .



**Figura 2.18** Diagrama de capa límite térmica

Calor de convección:

$$q_{conv} = h\Delta T \quad (2.27)$$

Calor de conducción:

$$q_{ond} = \frac{k\Delta T}{L} \quad (2.28)$$

Dividiendo ambas expresiones se tiene:

$$\frac{q_{conv}}{q_{cond}} = \frac{h\Delta T}{k \frac{\Delta T}{L}} = \frac{hL}{k} \quad (2.29)$$

$$Nu = \frac{hL}{k}$$

Donde: **Nu** número de Nusselt; **L** longitud en m; **k** constante de conductividad térmica en W/m.k; **h** coeficiente de película de convección en W/m<sup>2</sup>.K.

En el caso de sistemas compuestos por tubos circulares, se emplea la siguiente expresión:

$$Nu = \frac{h\phi}{k} \quad (2.30)$$

Donde:  $\phi$  diámetro de la tubería en m.

El valor del número de Nusselt indica la eficiencia de la convección, a mayor número mayor eficiencia. El número de Nusselt se emplea en todos los sistemas de convección, tanto en la natural como en la forzada.

a) **Número de Prandtl (Pr):** Es la relación que existe entre la difusividad molecular de la cantidad de movimiento y la difusividad molecular del calor ente el espesor de la capa límite, representando además la relación entre la capa límite de velocidad y la capa límite térmico:

$$\frac{\text{Difusividad..molecular..de..la..cantidad..de..movimiento}}{\text{Difusividad..molecular..del..calor}} = \frac{\nu}{\alpha} = \frac{\mu C_p}{k}$$

$$P_r = \frac{\mu C_p}{k} \quad (2.31)$$

Donde: **Pr** número de Prandtl;  $\mu$  viscosidad dinámica en kg/s.m; **k** constante de conductividad térmica en W/m.K; **Cp** calor específico a presión constante J/kg.k.

El número de Prandtl tiene valores que van desde menos de 0.01 para metales líquidos hasta más de 1000.000 para aceites pesados, esto significa que la capa límite térmica es mucho más gruesa para los metales líquidos y mucho más delgada para aceites, en relación con la capa límite de velocidad; los gases poseen valores cercanos a 1, lo que indica que el calor y la cantidad de movimiento se transmiten por el fluido una velocidad similar. Mientras más gruesa sea la capa límite térmica con mayor rapidez se difundirá el calor en el fluido. Este valor se emplea en el cálculo del coeficiente, tanto en los casos naturales como forzados de convección.

**Número de Reynolds (Re):** Es la relación que existe entre las fuerzas de inercia y las fuerzas viscosas que actúan sobre un elemento de volumen del fluido. Es un indicativo del tipo de flujo del fluido, ya sea laminar o turbulento.

$$\frac{\text{Fuerzas de inercia}}{\text{Fuerzas viscosas}} = \frac{VL}{\nu} = \frac{\rho VL}{\mu}$$

$$Re = \frac{\rho U_f L}{\mu} \quad (2.32)$$

Donde: **Re** número de Reynolds;  $\rho$  densidad en  $\text{kg/m}^3$ ; **L** longitud en m;  $\mu$  viscosidad dinámica en  $\text{kg/s.m}$ ; **V** velocidad del fluido en m/s.

Un valor grande del número de Reynolds indica régimen turbulento, por el contrario un número pequeño indica régimen laminar. El valor de número de Reynolds en el cual el régimen se vuelve turbulento, se conoce como número crítico, tiene un valor de  $5 \times 10^5$ . El número de Reynolds sólo se utiliza en casos de convección forzada.

## b) Método de calculo

El problema básico en convección consiste en determinar el valor del coeficiente de película de convección,  $h$ . El coeficiente de película se calcula a partir del número de Nusselt, dado que:

$$Nu = \frac{hL}{k}$$

Entonces:

$$h = \frac{Nu.k}{L}$$

Para encontrar el número de número de Nusselt, es necesario determinar que tipo de convección está ocurriendo, forzada y natural. En convección forzada en número de Nusselt es función del número de Reynolds y de Prandtl,  $Nu=f(Re,Pr)$ . En convección natural el número de Nusselt, es una función de los números de Prandtl y Grashof.

El análisis de la convección está basado, mayoritariamente e datos experimentales obtenidos a partir de las llamadas correlaciones, puesto que si bien existen casos que permiten una resolución analítica empleando el método citado, este procedimiento no es practico desde el punto de vista de ingeniería.

### 2.4.3 RADIACIÓN

Es la energía térmica emitida por un cuerpo, que posee una determinada temperatura, esta clase de energía se asocia a los cambios que sufre la configuración electrónica de los átomos. La energía térmica de radiación<sup>10</sup> es transmitida a partir de ondas electromagnéticas, y a diferencia de la transferencia de calor por conducción y convección, no requiere de un medio material para producirse.

El proceso de transferencia de radiación, se inicia por la cantidad de energía térmica que una superficie emite y la velocidad a la que libera energía por unidad de área. Mediante un desarrollo de la ley de Stefan-Boltzman, Se puede establecer el calor emitido por una superficie real y esta dado por:

$$E = \epsilon \sigma T_s^4 \quad (2.33)$$

Donde: **E** potencia emisiva superficial en  $W/m^2$ , **T<sub>s</sub>** temperatura absoluta en K; **σ** constante de Stefan-Boltzman, igual a  $5.67 \times 10^{-8}$  en  $W/m^2.K^4$ , **ε** emisividad.

---

<sup>10</sup> INCROPERA, Frank, Fundamentos de Transferencia de Calor, Edit. Prentice Hall, Págs. 8-10.

La radiación incide sobre las superficies que se encuentran próximas a su fuente. La velocidad con la que una superficie absorbe esta energía se puede expresar mediante la siguiente expresión:

$$G_{abs} = \alpha G \quad (2.34)$$

Donde: **G** velocidad de incidencia de la radiación sobre una superficie en W/m<sup>2</sup>; **G<sub>abs</sub>** velocidad de absorción de radiación por unidad de superficie en W/m<sup>2</sup>; **α** absorptividad.

El intercambio de energía producto de la radiación, se puede encontrar mediante la siguiente expresión:

$$q_{rad} = \epsilon \sigma A (T_s^4 - T_{air}^4) \quad (2.35)$$

Donde: **q<sub>rad</sub>** calor transferido por radiación en W/m<sup>2</sup>, **A** área de absorción en m<sup>2</sup>, **σ** constante de Stefan-Boltzman, igual a 5.67x10<sup>-8</sup> en W/m<sup>2</sup>.K<sup>4</sup>, **ε** emisividad; **T<sub>s</sub>** temperatura superficial en K; **T<sub>air</sub>** temperatura alrededores, distinta a T<sub>s</sub> en K.

## 2.5 EVACUACIÓN DE GASES

### 2.5.1 EFLUENTES GASEOSOS

#### a) Control de los efluentes Gaseosos

Una norma<sup>11</sup> sancionada por la experiencia es que toda materia prima debe conocerse a fondo antes de utilizarla, por tanto habrá que aplicar este criterio a la contaminación, ya que la materia prima que la provoca son los productos de combustión que, por tanto, se deben conocer perfectamente.

Se vio que uno de los factores o parámetros que inciden sobre la contaminación gaseosa detectable en un punto cualquiera es la sobre elevación del penacho de

---

<sup>11</sup> Web: [www.textoscientificos.com/residuos](http://www.textoscientificos.com/residuos)

humos, que a su vez depende de las energías térmicas y cinética que se le comuniquen. Por tanto, es preciso determinar la velocidad y temperaturas de los humos.

Como por otro lado se sabe que en el combustible hay una cierta cantidad de azufre, como impureza, aunque también la proporción del mismo es muy variable, será preciso determinar las cantidades reales de anhídrido sulfúrico y sulfuroso emitidas.

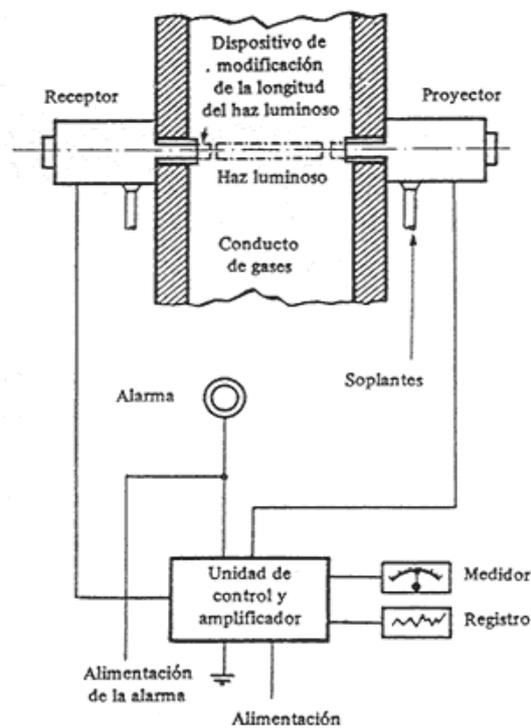
Aunque la eficacia de los precipitadores electrostáticos y mecánicos utilizados en la eliminación de polvo de los gases de combustión es de sobra conocida, también se sabe que la resistividad y abrasividad de las cenizas volantes es variable, como consecuencia de las diversas procedencias del carbón que alimenta a la central, el rendimiento de los precipitadores varía. En consecuencia, otro dato que hay que determinar en el efluente será el contenido de polvo de los gases de combustión y el rendimiento de la precipitación.

Por último, si la combustión de la caldera no tiene la eficacia deseable, probable que se alcance un valor de la escala Ringelmann superior a 2, lo que plantea la necesidad de medir la densidad óptica de los humos emitidos.

A continuación se examinarán los diversos sistemas de control utilizados, en los que únicamente se estudia el principio físico en que se basan pues se prescinde de cualquier tipo concreto de aparato.

El control continuo de la opacidad de los gases de la combustión se efectúa de la forma siguiente: en un tramo recto de la tubería de conducción de humos, ver figura 2.19, se coloca el sistema fotoeléctrico de control, que consta, por una parte, de un dispositivo de proyección luminosa de intensidad constante y, por otra, y exactamente en frente de esta, el sistema receptor, constituido por una célula fotoeléctrica que mide la intensidad luminosa recibida y a continuación la registra en un dispositivo de control.

Si se considerase deseable, se puede acoplar a este equipo una unidad de control remoto y un sistema de alarma calibrado de acuerdo con la legislación vigente o bien de tal modo que permita determinar la eficacia de la combustión, pues cuanto mayor sea la intensidad luminosa tanto mas eficaz será la combustión.



**Figura 2.19** Esquema de dispositivo fotoeléctrico de medida de opacidad de los gases

Por regla general, los sistemas emisor y receptor de estos equipos van provistos de unos dispositivos que tienen acortar o alargar el recorrido del haz luminoso por el humo, si ello es preciso. Además, para evitar los atascos producidos por la acumulación de polvo y hollín en la conducción del equipo, el aparato dispone de un aparato de limpieza automática.

Con estos sistemas de medida el encargado de la caldera esta siempre al corriente de la marcha de la combustión y, por lo tanto, cuando sea preciso, puede

adoptar las medidas necesarias para que aquella pueda mantenerse en todo momento en condiciones optimas de régimen.

Por regla general, aun cuando funcionen bien, las centrales térmicas emiten humos de opacidad superior a la normal durante periodos cortos de tiempo que se corresponden con el encendido a partir de la caldera fría hasta alcanzar el mínimo técnico de carga.

#### **b) Determinación del dióxido de azufre**

El método de valoración más usado para este compuesto es el que utiliza iodo como reactivo. Para ello se prepara una disolución del elemento de normalidad adecuada, (generalmente N/100) que se valora convenientemente.

Un pequeño volumen de esta disolución (10-40 ml) se coloca en un frasco lavador con placa perforada, adicionándole almidón como indicador.

Se disponen adecuadamente los aparatos medidores de temperatura y presión, tanto en el conducto efluente, como en el conducto analizador, así como un medidor de caudal, según se indico con anterioridad.

La corriente gaseosa se hace pasar a través de un frasco lavador, interrumpiéndose la operación en el momento justo en que la coloración del reactivo absorbente desaparece.

Conocida la concentración de iodo en la disolución, unos sencillos cálculos permiten determinar cuantitativamente el dióxido de azufre que ha reaccionado en el frasco lavador. El volumen de corriente gaseosa se corrige si es necesario en función de la presión y temperatura medidos, y los resultados pueden expresarse en p.p.m. o bien en porcentaje.

### c) Compuestos de azufre

El azufre es un elemento que se encuentra presente en diversas proporciones en gran parte de los combustibles. Durante el proceso de combustión se combina con el oxígeno para formar los correspondientes óxidos, de los cuales los más importantes son el dióxido y el trióxido.

Las cantidades de estos compuestos que se vierten a la atmósfera son extraordinariamente elevadas, alcanzando cifras de millones de toneladas al año.

A temperatura ambiente, el dióxido de azufre es un gas que condensa con facilidad. Es incoloro, de olor picante e irritante y más pesado que el aire, poseyendo un elevado poder de corrosión. Químicamente puede actuar como oxidante (por ejemplo frente al sulfuro de hidrógeno), o como reductor (con los halógenos).

El trióxido de azufre es un líquido incoloro de elevada afinidad por el agua, con la que forma ácido sulfúrico, y de propiedades oxidantes. La aparición de este compuesto en la atmósfera se puede deber a tres causas:

- Oxidación directa del  $\text{SO}_2$
- Oxidación catalítica del  $\text{SO}_2$
- Descomposición de los sulfatos presentes en los combustibles

De las tres formas posibles, parece ser la segunda la que interviene en mayor escala, actuando como catalizadores diversos compuestos metálicos existentes en las porciones inorgánicas de los combustibles.

La concentración de dióxido de azufre en la atmósfera presenta variaciones típicamente estacionales debido al mayor empleo de combustibles las épocas frías del invierno.

## 2.5.2 EFECTO SOBRE LAS PLANTAS

La contaminación atmosférica afecta a los vegetales de diferentes maneras. A grandes rasgos los daños ocasionados pueden agruparse en los tres siguientes grupos:

- Afecciones de los tejidos de las hojas con necrosis parciales.
- Clorosis y otros cambios de color.
- Alteraciones en el crecimiento.

Estas afecciones obedecen a dos causas diferentes:

- Penetración directa de los contaminantes en los vegetales a través de los estomas de las hojas
- Deposición sobre las diferentes partes de la planta, influyendo la fotosíntesis.

Las afecciones en los tejidos de las hojas provocan la plasmólisis de las células vegetales que puede ser parcial si el causante es el nitrato de peracetililo (PAN) o el ozono, o total en los compuestos fluorados y del dióxido de azufre. Las hojas afectadas presentan primeramente un suave aspecto de estar empapadas en agua y algunas magulladuras pequeñas.

La clorolisis es la pérdida de clorofila, pigmento natural de las plantas, y puede ser comparada con la anemia de los animales. La desaparición de la clorofila da lugar a nuevos colores a partir de otros pigmentos presentes. Por regla general, la coloración es característica del contaminante que está causando el fenómeno. Así, por ejemplo, una coloración blanquecina es producida por el dióxido de azufre y una marrón por el flúor.

Lógicamente, las afecciones de las hojas de los vegetales, donde se produce la transformación de numerosas sustancias inorgánicas en otras nutritivas para la planta, puede afectar seriamente el crecimiento de ella.

En la práctica, han sido observadas numerosas deficiencias con ciertas plantas situadas en ambientes muy contaminados, tales como, pérdida precoz de las hojas, disminución del tamaño del fruto, crecimiento inferior al normal y prematuro envejecimiento general.

El crecimiento de la planta, concretamente, se ve seriamente afectado por la contaminación atmosférica, pues esta tiene una influencia muy fuerte sobre la auxina, hormona vegetal muy importante en la regulación de la evolución general de la planta, y cuya acción es afectada por cantidades de contaminantes sumamente débiles.

#### **a) Dióxido de azufre**

Las lesiones que produce en las plantas son normalmente de origen local. Las células admiten cierta concentración máxima del compuesto, que cuando es superada provoca el fin de su actividad y la muerte posterior.

Esta toxicidad se atribuye generalmente a las propiedades reductoras del dióxido, y la coloración característica que comunica a las zonas afectadas es de tonos amarillentos y rojizos.

La sensibilidad de las diferentes plantas a este contaminante es muy variedad. Experimentalmente ha podido ser determinada la resistencia relativa de numerosas especies y que se atribuye a la alfalfa el valor unidad.

## **2.6 RESIDUOS SÓLIDOS**

### **2.6.1 RESIDUOS SÓLIDOS Y CLASIFICACIÓN**

Material que no representa una utilidad o un valor económico para el dueño, el dueño se convierte por ende en generador de residuos. Desde el punto de vista legislativo lo más complicado respecto a la gestión de residuos, es que se trata

intrínsecamente de un término subjetivo, que depende del punto de vista de los actores involucrados (esencialmente generador y fiscalizador).

El residuo se puede clasificar de varias formas, tanto por estado, origen o característica.

#### **a) CLASIFICACIÓN POR EL ESTADO**

Un residuo es definido por estado según el estado físico en que se encuentre. Existe por lo tanto tres tipos de residuos desde este punto de vista sólidos, líquidos y gaseosos, es importante notar que el alcance real de esta clasificación puede fijarse en términos puramente descriptivos o, como es realizado en la práctica, según la forma de manejo asociado : por ejemplo un tambor con aceite usado y que es considerado residuo, es intrínsecamente un líquido, pero su manejo va a ser como un sólido pues es transportado en camiones y no por un sistema de conducción hidráulica.

En general un residuo también puede ser caracterizado por sus características de composición y generación.

#### **b) CLASIFICACIÓN POR EL ORIGEN**

Se puede definir el residuo por la actividad que lo origine, esencialmente es una clasificación sectorial.

Esta definición no tiene en la práctica límites en cuanto al nivel de detalle en que se puede llegar en ella.

#### **c) TIPOS DE RESIDUOS MAS IMPORTANTES**

##### **Residuos municipales:**

La generación de residuos municipales varía en función de factores culturales asociados a los niveles de ingreso, hábitos de consumo, desarrollo tecnológico y

estándares de calidad de vida de la población. En la década de los 60, la generación de residuos domiciliarios alcanzaba los 0,2 a 0,5 Kg/habitante/día; hoy en cambio, esta cifra se sitúa entre los 0,8 y 1,4 Kg/habitante/día.

Los sectores de más altos ingresos generan mayores volúmenes per cápita de los residuos, y estos residuos tienen un mayor valor incorporado que los provenientes de sectores más pobres de la población.

#### **Residuos industriales:**

La cantidad de residuos que genera una industria es función de la tecnología del proceso productivo, calidad de las materias primas o productos intermedios, propiedades físicas y químicas de las materias auxiliares empleadas, combustibles utilizados y los envases y embalajes del proceso.

#### **Residuos mineros:**

Los residuos mineros incluyen los materiales que son removidos para ganar acceso a los minerales y todos los residuos provenientes de los procesos mineros, en el mundo las estadísticas de producción son bastante limitadas. Actualmente la industria del cobre se encuentra empeñada en la implementación de un manejo apropiado de estos residuos, por lo cual se espera en un futuro próximo contar con estadísticas apropiadas.

#### **Residuos hospitalarios:**

Actualmente el manejo de los residuos hospitalarios no es el más apropiado, al no existir un reglamento claro al respecto. El manejo de estos residuos es realizado a nivel de generador y no bajo un sistema descentralizado. A nivel de hospital los residuos son generalmente esterilizados.

Según el Integrated Waste Management Board de California USA se entiende por residuo médico como aquel que está compuesto por residuos que es generado como resultado de:

- a) Tratamiento, diagnóstico o inmunización de humanos o animales
- b) Investigación conducente a la producción o prueba de preparaciones medicas hechas de organismos vivos y sus productos

## **2.6.2 SISTEMA DE MANEJO DE RESIDUOS**

Es el conjunto de procedimientos y políticas que conforman el sistema de manejo de los residuos sólidos. La meta es realizar una gestión que sea ambiental y económicamente adecuada.

Básicamente el sistema de manejo de los residuos se compone de cuatro sub sistemas:

**a) Generación:** Cualquier persona u organización cuya acción cause la transformación de un material en un residuo. Una organización usualmente se vuelve generadora cuando su proceso genera un residuo, o cuando lo derrama o cuando no utiliza más un material.

**b) Transporte:** Es aquel que lleva el residuo. El transportista puede transformarse en generador si el vehículo que transporta derrama su carga, o si cruza los límites internacionales (en el caso de residuos peligrosos), o si acumula lodos u otros residuos del material transportado.

**c) Tratamiento y disposición:** El tratamiento incluye la selección y aplicación de tecnologías apropiadas para el control y tratamiento de los residuos peligrosos o de sus constituyentes. Respecto a la disposición la alternativa comúnmente más utilizada es el relleno sanitario.

**d) Control y supervisión:** Este sub sistema se relaciona fundamentalmente con el control efectivo de los otros tres sub sistemas.

### **2.6.3 COMPOSICIÓN DE RESIDUOS**

Básicamente trata de identificar en una base másica o volumétrica los distintos componentes de los residuos.

Usualmente los valores de composición de residuos sólidos municipales o domésticos se describen en términos de porcentaje en masa, también usualmente en base húmeda y contenidos ítems como materia orgánica, papales y cartones, escombros, plásticos, textiles, metales, vidrios, huesos, etc.

La utilidad de conocer la composición de residuos sirve para una serie de fines, entre los que se pueden destacar estudios de factibilidad de reciclaje, factibilidad de tratamiento, investigación, identificación de residuos, estudio de políticas de gestión de manejo.

Es necesario distinguir claramente en que etapa de la gestión de residuos corresponden los valores de composición. Los factores de que depende la composición de los residuos son relativamente similares a los que definen el nivel de generación de los mismos.

Un estudio presentado en 1995 dentro del contexto de la presentación de política para el manejo de los residuos sólidos domiciliarios (CONAMA), realizado en lo Errázuriz presenta la siguiente tabla 2.6 de valores de composición:

**Tabla 2.6** Valores de composición de residuos

Componente	Valor Promedio %	Alto (20,5%) %	Medio Alto (34,1%) %	Medio Bajo (31,6%) %	Bajo (13,7%) %
Materia Orgánica	49.3	48.8	41.8	54.7	56.4
Papeles y cartones	18.8	20.4	22.0	17.0	12.9
Escoria, cenizas y lozas	6.0	4.9	5.8	6.1	7.6
Plásticos	10.2	12.1	11.5	8.6	8.1
Textiles	4.3	2.3	5.5	3.5	6.0
Metales	2.3	2.4	2.5	2.1	1.8
Vidrios	1.6	2.5	1.7	1.3	1.0
Huesos	0.5	0.5	0.4	0.6	0.4
Otros	6.9	6.1	8.7	6.1	5.8
PPC (Kg/hab/día)	0.77	1.07	0.85	0.65	0.57

## 2.6.4 CARACTERÍSTICAS DE LOS RESIDUOS

### Humedad

Es una característica importante para los procesos a que puede ser sometida la basura. Se determina generalmente de la siguiente forma: Tomar una muestra representativa, de 1 a 2 Kg, se calienta a 80°C durante 24 horas, se pesa y se expresa en base seca o húmeda en la tabla 2.7.

$$Humedad = \frac{Peso_{inicial} - Peso_{Final}}{Peso_{inicial}} \cdot 100$$

Se expresa en porcentaje

Si el denominador es  $Peso_{inicial}$ , se habla de humedad en base húmeda

Si el denominador es  $Peso_{Final}$ , se habla de humedad en base seca

### **Densidad**

La densidad de los sólidos rellenos depende de su constitución y humedad, por que este valor se debe medir para tener un valor más real. Se deben distinguir valores en distintas etapas del manejo.

Densidad suelta: Generalmente se asocia con la densidad en el origen. Depende de la composición de los residuos. En Chile fluctúa entre 0.2 a 0.4 Kg/l o Ton/m<sup>3</sup>.

Densidad transporte: Depende de si el camión es compactador o no y del tipo de residuos transportados. El valor típico es del orden de 0.6 Kg/l.

Densidad residuo dispuesto en relleno: Se debe distinguir entre la densidad recién dispuesta la basura y la densidad después de asentado y estabilizado el sitio. En Chile la densidad recién dispuesta fluctúa entre 0.5 a 0.7 Kg/l y la densidad de la basura estabilizada fluctúa entre 0.7 a 0.9 Kg/l

### **Poder calorífico**

Se define como la cantidad de calor que puede entregar un cuerpo. Se debe diferenciar entre poder calorífico inferior y superior. El Poder Calorífico Superior (PCS) no considera corrección por humedad y el inferior (PCI) en cambio si. Se mide en unidades de energía por masa, [cal/gr], [Kcal/kg], [BTU/lb]. Se mide utilizando un calorímetro.

También se puede conocer a través de un cálculo teórico, el cual busca en la bibliografía valores típicos de PC por componentes y se combina con el conocimiento de la composición de los residuos en la tabla 2.8.

$$PC = n_0PC_0 + n_1PC_1 + \dots + n_nPC_n$$

En donde

$n_i$ =Porcentaje en peso del componente

$PC_i$ =Poder calorífico de i

Ejemplo: PC plásticos es de 9000 (cal/gr), madera 5000-6000 (cal/gr)

Esta tabla 2.7 presenta un resumen de valores de caracterización física de los residuos tomada de diferentes estudios y memorias de tesis:

**Tabla 2.7** Resumen de valores de caracterización

<b>Características</b>	<b>Comuna de Santiago</b>	<b>Provincia de Quillota</b>	<b>USA</b>	<b>Argentina</b>
Humedad (%)	66.0	50.7	30.1	51.4
Sólidos volátiles (%)	93.94	80.0	84.77	80.0
Cenizas (%)	6.06	20.0	15.23	20.0
PCS (cal/gr)	1820	3306	4020	3966
Carbono (%)	-	40.60	43.19	48.6
Nitrógeno (%)	-	1.16	1.14	1.50
Densidad suelta (ton/m <sup>3</sup> )	0.216	0.260	-	0.250

## 2.6.5 RECICLAJE DE LOS RESIDUOS

El mundo entero moderno se enfrenta a un problema cada vez más importante y grave: cómo deshacerse del volumen creciente de los residuos que genera.

La mayoría de los residuos terminan convirtiéndose en basura cuyo destino final es el vertedero o los rellenos sanitarios. Los vertederos y rellenos sanitarios son cada vez más escasos y plantean una serie de desventajas y problemas. En ello el reciclaje se convierte en una buena alternativa, ya que reduce los residuos, ahorra energía y protege el medio ambiente.

La meta de cualquier proceso de reciclaje es el uso o re uso de materiales provenientes de residuos. De importancia en el proceso de reciclaje es que el procedimiento comienza con una separación. Desde un punto de vista de eficiencia del rendimiento de estos sistemas de separación favorece que se haga una separación en el origen.

Existen tres actividades principales en el proceso del reciclaje:

**Recolección:** Se deben de juntar cantidades considerables de materiales reciclables, separar elementos contaminantes o no reciclables y clasificar los materiales de acuerdo a su tipo específico.

**Manufactura:** los materiales clasificados se utilizan como nuevos productos o como materias primas para algún proceso.

**Consumo:** Los materiales de desperdicio deben ser consumidos. Los compradores deben demandar productos con el mayor porcentaje de materiales reciclados en ellos. Sin demanda, el proceso de reciclaje se detiene.



## CAPÍTULO 3

### LEVANTAMIENTO TÉCNICO

#### 3.1 DIMENSIONAMIENTO DEL SISTEMA

Para la elaboración del dimensionamiento del sistema se inició con la realización de una lista de los componentes que forman el sistema de combustión de biomasa residual los cuales se muestran en la tabla 3.1.

**Tabla 3.1** Lista de elementos del sistema de combustión de biomasa residual.

<b>No</b>	<b>ELEMENTO</b>	<b>CANTIDAD</b>
1	Tolva de carga	1
2	Tornillo sin fin	1
3	Canal del tornillo sin fin	1
4	Base	1
5	Motor reductor	1
6	Rodamiento	2
7	Base cámara de combustión	1
8	Cámara de combustión	1
9	Parrilla	1
10	Tapa aislamiento térmico cámara de combustión	4
11	Ladrillos refractarios	30
12	Ventilador 1	1
13	Intercambiador de calor tubos acero al carbono	1
14	Intercambiador de calor tubos acero inoxidable	1

**Tabla 3.1** Continuación...

<b>No</b>	<b>ELEMENTO</b>	<b>CANTIDAD</b>
15	Intercambiador de calor tubos de cobre	1
16	Separador intercambiador de calor	2
17	Ducto rotación de aire	2
18	Tapa aislamiento térmico ducto rotación de aire	2
19	Tapa aislamiento térmico intercambiadores de calor	2
20	Ducto entrada de aire	1
21	Ducto salida de aire	1
22	Ventilador 2	1
23	Soporte ventilador 1	1
24	Chimenea	1
25	Ducto de escape	1

Se levantaron planos de cada una de las partes que conforman el sistema exceptuando los elementos que se encuentran normalizados como rodamientos, pernos, arandelas, tuercas, motor eléctrico, ventiladores, lana de vidrio.

Los elementos de los cuales se hizo el levantamiento de planos se especifican en la tabla 3.2 y en el anexo H (planos).

**Tabla 3.2** Lista de elementos para el levantamiento de planos

<b>#</b>	<b>ELEMENTO</b>	<b>CODIGO</b>
1	Tolva de carga	ER-TC
2	Tornillo sin fin	ER-TSF
3	Canal del tornillo sin fin	ER-CTSF
4	Base	ER-B
5	Base cámara de combustión	ER-BCC
6	Cámara de combustión	ER-CC
7	Parrilla	ER-P
8	Tapa aislamiento térmico cámara de combustión	ER-TACC
9	Intercambiador de calor tubos acero al carbono	ER-ICTAC
10	Intercambiador de calor tubos acero inoxidable	ER-ICTAI
11	Intercambiador de calor tubos de cobre	ER-ICTC
12	Separador intercambiador de calor	ER-SIC
13	Ducto rotación de aire	ER-DRA
14	Tapa aislamiento térmico ducto rotación de aire	ER-TADRA

**Tabla 3.2** Continuación...

15	Tapa aislamiento térmico intercambiadores de calor	ER-TAIC
16	Ducto entrada de aire	ER-DEA
17	Ducto salida de aire	ER-DSA
18	Soporte ventilador 1	ER-SV
19	Chimenea	ER-CH

Para la obtención correcta de las longitudes de los diferentes elementos del sistema se usaron los equipos especificados en la tabla 3.3.

**Tabla 3.3** Equipos de medición

<i>Equipo</i>	<i>Marca</i>	<i>Apreciación</i>
		<i>Mm</i>
Flexómetro	American Builder	1
Pie de Rey	Mitutoyo	0.1
Micrómetro de Interiores	Mitutoyo	0.01
Galgas	s/n	0.01

### 3.2 MATERIALES E INSUMOS

Durante el transcurso de la verificación de los estados actuales de las diferentes partes que componen el equipo de combustión de biomasa residual se realizó una lista de materiales e insumos, donde se consideraron aspectos como descripción de elementos y cantidad.

A continuación se presenta la lista de materiales con los que se construyeron los elementos del equipo en las tablas 3.4 y 3.5.

**Tabla 3.4** Lista de materiales del sistema por elementos

<b>Base Cámara de Combustión</b>		
Material	Cantidad	Unidad
Tubo Cuadrado 7x7 e = 5mm	15,26	M
Plancha de acero e = 2mm	3,32	m2
<b>Cámara de Combustión</b>		
Material	Cantidad	Unidad
Perfil en L 6x6 e = 5 mm	8,88	M
Plancha de acero e = 5 mm	1,24	m2
Ladrillo refractario	30	u
Masilla refractaria	5	Kg
<b>Tapas de Aislamiento Térmico Cámara de Combustión</b>		
Material	Cantidad	Unidad
Perfil en L 4x4 e = 2 mm	20,35	M
Plancha de acero e = 1 mm	5,16	m2
<b>Tornillo Sin Fin</b>		
Material	Cantidad	Unidad
Eje de acero $\square$ = 90 mm	1,83	M
Plancha de acero e = 5 mm	0,184	m2
<b>Canal Tornillo Sin Fin</b>		
Material	Cantidad	Unidad
Plancha de acero e = 10 mm	0,762	m2
Plancha de acero e = 3 mm	0,14	m2
Acero e = 20 mm	0,03	m2
<b>Base</b>		
Material	Cantidad	Unidad
Tubo Cuadrado 7x7 e = 5 mm	7,64	M
Perfil en L 6x6 e = 5 mm	2,61	M
Plancha de acero e = 2 mm	0,52	m2
Acero e = 15 mm	0,03	m2
Acero e = 5 mm	0,12	m2
<b>Intercambiador de Calor de Tubos de Acero al Carbono</b>		
Material	Cantidad	Unidad
Perfil en L 4x4 e = 2 mm	8,44	M
Plancha de acero e = 2 mm	1,29	m2

**Tabla 3.4** Continuación...

Tubo de Acero al Carbono	114,83	M
<b>Intercambiador de Calor de Tubos de Acero Inoxidable</b>		
Material	Cantidad	Unidad
Perfil en L 4x4 e = 2 mm	8,44	M
Plancha de acero e = 2 mm	1,29	m2
Tubo de Acero Inoxidable	114,83	M
<b>Intercambiador de Calor de Tubos de Cobre</b>		
Material	Cantidad	Unidad
Perfil en L 4x4 e = 2 mm	8,44	M
Plancha de acero e = 2 mm	1,29	m2
Tubo de Cobre	114,83	M
<b>Tolva de Carga</b>		
Material	Cantidad	Unidad
Plancha de Acero e = 3 mm	3,1	m2
<b>Ducto de Entrada de Aire</b>		
Material	Cantidad	Unidad
Plancha de Acero e = 2 mm	1,54	m2
<b>Ducto de Salida de Aire</b>		
Material	Cantidad	Unidad
Plancha de Acero e = 2 mm	1,272	m2
<b>Soporte Ventilador</b>		
Material	Cantidad	Unidad
Plancha de Acero e = 3 mm	1,04	m2
<b>Ductos de Rotación de Aire</b>		
Material	Cantidad	Unidad
Plancha de Acero e = 2 mm	4,54	m2
<b>Tapas de Aislamiento Térmico Intercambiadores de Calor</b>		
Material	Cantidad	Unidad
Perfil en L 4x4 e = 2 mm	10,12	M
Plancha de acero e = 1 mm	2,98	m2
<b>Tapas de Aislamiento Térmico Ductos de Rotación de Aire</b>		
Material	Cantidad	Unidad
Plancha de Acero e = 1 mm	5,34	m2

**Tabla 3.4** Continuación...

<b>Chimenea</b>		
Material	Cantidad	Unidad
Perfil en L 4x4 e = 2 mm	10,3	M
Plancha de Acero e = 2 mm	1,41	m2

**Tabla 3.5** Lista general de materiales del sistema

<b>Tabla General de Materiales</b>		
Material	Cantidad	Unidad
Tubo Cuadrado 7x7 e = 5mm	22,9	M
Plancha de acero e = 2mm	16,472	m2
Perfil en L 6x6 e = 5 mm	11,49	M
Plancha de acero e = 5 mm	1,43	m2
Ladrillo refractario	30	u
Masilla refractaria	5	Kg
Perfil en L 4x4 e = 2 mm	66,09	M
Plancha de acero e = 1 mm	13,48	m2
Eje de acero $\square$ = 90 mm	1,83	M
Plancha de acero e = 10 mm	0,762	m2
Plancha de acero e = 3 mm	4,28	m2
Acero e = 20 mm	0,03	m2
Acero e = 15 mm	0,03	m2
Acero e = 5 mm	0,12	m2
Tubo de Acero al Carbono	114,83	M
Tubo de Acero Inoxidable	114,83	M
Tubo de Cobre	114,83	M
Rodamiento de Piso	1	U
Rodamiento de Pared	1	U
Ventilador 1	1	U
Ventilador 2	1	U

**Tabla 3.6** Lista General de Insumos

<b>Tabla de Insumos</b>		
<b>Insumo</b>	<b>Cantidad</b>	<b>Unidad</b>
Masilla Refractaria	15	kg
Perno M8 x 25	108	u
Perno M8 x 50	35	u
Perno M12 x 70	6	u
Perno M16 x 40	4	u
Perno M18 x 100	12	u
Tuerca M8	36	u
Tuerca M12	6	u
Tuerca M16	4	u
Tuerca M18	12	u
Arandelas	50	u
Silicona de Alta Temperatura	4	u
Pernos Autoajustables	12	u

### **3.3 ANÁLISIS DE PARTES Y PIEZAS**

Se procedió a realizar fichas de análisis para todos los elementos del sistema de combustión de biomasa, donde se hace un estudio del estado en el que se encontraban los componentes, previo al presente trabajo y una descripción de su estado después de haber hecho un trabajo de recuperación y mantenimiento de los mismos.

Las fichas de análisis, donde se detalla toda la información correspondiente se encuentran en el anexo A.

### 3.4 EVALUACIÓN DE SUBSISTEMAS DE TRANSFERENCIA DE ENERGÍA

Una de las múltiples alternativas de calentamiento de aire más eficientes para la industria es el sistema de intercambiadores de calor de múltiples pasos, el cual permite una mejor transferencia de calor.

En ingeniería existe una gran variedad de sistemas, los cuales están conformados por sub-sistemas que hacen posible su funcionamiento y análisis.

En este proyecto se realizó un análisis de los subsistemas de transferencia de energía que se indican en la tabla 3.7.

**Tabla 3.7** Sub-sistemas de transferencia de energía

No.	Sub-sistemas
1	Alimentación
2	Combustión
3	Transferencia de energía
4	Escape de gases

#### 3.4.1 SUBSISTEMA DE ALIMENTACIÓN

El sistema de alimentación está compuesto por todos los elementos móviles que tienen por misión transportar el combustible, para este caso, el combustible base es la biomasa residual (cascarilla de arroz, bagazo de la caña de azúcar, hojas secas) acompañada con el aire para la combustión.

Los elementos para la alimentación son:

- **Tolva de carga:** sirve para depositar la biomasa en su interior para posteriormente alimentar la cámara de combustión.



**Figura 3.1** Tolva de carga

- **Tornillo sin fin y canal:** es la tubería que se encarga de transportar el combustible a su destino, en la figura 3.2 se muestra el canal del tornillo sin fin.



**Figura 3.2** Canal tornillo sin fin

- **Motoreductor:** es el mecanismo que pone en funcionamiento el tornillo sin fin para poder llevar a cabo la alimentación de biomasa a la cámara de combustión como se muestra en la figura 3.3.



**Figura 3.3** Motor-reductor

### **3.4.2 SUBSISTEMA DE COMBUSTIÓN.**

El sistema de combustión está compuesto por todos los elementos que hacen posible la acción y reacción de los combustibles, para este caso la biomasa como comburente.

Los elementos para la combustión son:

- **Cámara de combustión**, donde ingresa el combustible y se produce la combustión, en la figura 3.4 se indica la cámara de combustión.



**Figura 3.4** Cámara de combustión

- **Ladrillo refractario y ventilador**, su función principal es conservar el calor en el área de la cámara de combustión
- **Aislamiento térmico**, que sirve para conservar el mayor calor posible, para este caso el aislamiento térmico que se utilizará es lana de vidrio, que es un aislamiento muy efectivo para la cámara de combustión conjuntamente con unas tapas de aislamiento térmico que se observan en la figura 3.5.



**Figura 3.5** Tapas de aislamiento térmico

### **3.4.3 SUBSISTEMA DE TRANSFERENCIA DE ENERGÍA**

El sistema de transferencia de energía, está compuesto por todos los elementos que transfieren energía calorífica de un sistema a otro debido a una diferencia de temperatura, para este proyecto se utilizó intercambiadores de calor de tubos de diferentes materiales.

Los elementos para la transferencia de energía son:

- **Intercambiadores de calor multitubos**, su función principal es transferir calor mediante diferencia de temperaturas, en las figuras 3.6 y 3.7 se muestran intercambiadores de calor de diferente material.



**Figura 3.6** Intercambiador de calor de tubos de acero inoxidable



**Figura 3.7** Intercambiadores de calor

- **Ductos de rotación de aire**, por donde circula el aire que se transfiere por el interior de los tubos de los intercambiadores de calor, en la figura 3.6 se muestran los ductos de rotación de aire.



**Figura 3.8** Ductos de rotación de aire

- **Tapas de aislamiento térmico**, donde se conserva la mayor cantidad de calor posible, para este proyecto el aislamiento térmico que se utilizó es la lana de vidrio. En la figura 3.9 se observan las tapas de aislamiento térmico de los intercambiadores de calor.



**Figura 3.9** Tapas aislamiento intercambiadores

- **Ventilador**, su función principal es enviar aire a través de los intercambiadores de calor en un sistema abierto, manteniendo así una transferencia de calor adecuada.

#### **3.4.4 SUBSISTEMA DE ESCAPE DE GASES**

Este sistema conduce los gases de la combustión al exterior, es importante porque ayuda a la expulsión de los gases y a mejorar la combustión y la eficiencia final obtenida de todo el sistema.

Los elementos para el escape de gases son:

- **Chimenea**, su función principal es dirigir los gases de escape a un solo lado, evitando así la expansión incorrecta, en la figura 3.10 se observa su forma.



**Figura 3.10** Chimenea

- **Ducto de escape**, su función principal es enviar los gases que salen de la chimenea a través de ductos que pueden ser circulares o rectos al medio ambiente.

### **3.5 ALTERNATIVAS DE MONTAJE**

El principal punto dentro del desarrollo del proyecto, es encontrar el lugar adecuado para el montaje e implementación del sistema de combustión de biomasa residual, para lo cual se debe tener en cuenta varios aspectos, enumerados a continuación:

- Disponibilidad de espacio físico
- Concesión de permisos por parte del departamento de Energía y Mecánica
- Apoyo del personal del DECEM
- Seguridad
- Accesibilidad

En busca del espacio físico para el montaje de la maquina, la primera opción fue el laboratorio de energías renovables que se encuentra ubicado en la terraza del edificio de los laboratorios de mecánica ( termodinámica, mecánica de fluidos, maquinas herramientas, motores) pero debido al gran tamaño y peso de sus componentes esta opción quedo descartada, debido a la gran dificultad que suponía trasladar sus elementos a este laboratorio lo cual hubiera implicado un mayor costo económico, mayor tiempo y sobre todo un riesgo más significativo.

Otro de los lugares que mayor disponibilidad tiene el DECEM es el patio que comprende el área de motores, por lo tanto se analizó la posibilidad de realizar el montaje en uno de estos sitios en esta facilidad.

La disponibilidad que tiene este lugar con respecto al espacio físico es muy buena, ya que brinda todas las ventajas y comodidades para el montaje del sistema de combustión, con respecto a los permisos para la implementación del equipo no existiría ningún contra tiempo puesto que la ubicación del equipo seria de manera temporal hasta realizar las pruebas y el análisis correspondiente del equipo.

Este sitio tiene la ventaja de estar cerca de algunos laboratorios del DECEM por lo cual se podrá contar con todo el apoyo del personal de estos laboratorios (Máquinas Herramientas, Termodinámica, Motores).

Viendo los aspectos de seguridad que se debe tomar para el montaje e implementación del sistema de combustión de biomasa residual, se decidió

realizar el montaje en el patio de motores, debajo de la visera del primer piso junto a la entrada del laboratorio de máquinas y herramientas, lugar donde no hay mucho tránsito de personal y no implica mayor riesgo a la seguridad del personal de dichos laboratorios.

## **CAPÍTULO 4**

### **FABRICACIÓN DE COMPONENTES Y MONTAJE DEL SISTEMA**

#### **4.1 DIAGRAMAS DE PROCESOS**

En el proyecto del montaje del sistema de combustión de biomasa se realizaron cinco diagramas de proceso, en los cuales se detalla la cronología que se siguió para proceder a la implementación, montaje y correcto funcionamiento.

A continuación los diagramas son:

<b>DIAGRAMA DE PROCESOS No.1</b>							
<b>Tipo de Proceso:</b> MONTAJE MECÁNICO					<b>Fecha:</b> 2010-01-25		
<b>Nombre:</b> ENSAMBLE SISTEMA DE COMBUSTIÓN							
<b>Subsistema:</b> Combustión				<b>Elementos:</b> Base, cámara, ladrillo refractario, parilla, tapas de aislamiento, lana de vidrio, ventilador 2			
No.	Detalle	Método	Operación	Transporte	Inspección	Retraso	Almacén
1	Inspección y verificación de los elementos del sistema de combustión	Visual					
2	Elaboración de fichas de análisis para cada elemento	Manual					
3	Transporte de los elementos al taller	Visual					
4	Mantenimiento correctivo de los elementos	Manual					
5	Pintado de los elementos	Manual					
6	Almacenamiento de elementos para el secado	Manual					
7	Transporte de elementos al lugar de montaje	Manual					
8	Montaje de la cámara a la base	Manual					
9	Colocación de los ladrillos en la cámara de combustión	Manual					
10	Colocación de lana de vidrio en contra tapas	Manual					
11	Montaje de ventilador 2 en tapa de aislamiento	Manual					
12	Montaje tapas de aislamiento térmico	Manual					

13	Colocación de parrilla dentro de cámara	Manual					
14	Verificación de todos los componentes	Visual					
<b>Elaborado por:</b> Mayorga A./ Vaca J.					<b>Página 1</b>		
<b>Revisado por:</b> Guasumba J. / Suntaxi C.							

<b>DIAGRAMA DE PROCESOS No.2</b>							
<b>Tipo de Proceso:</b> MONTAJE MECÁNICO						<b>Fecha:</b> 2010-01-25	
<b>Nombre:</b> ENSAMBLE SISTEMA DE TRANSFERENCIA DE CALOR							
<b>Subsistema:</b> Transferencia de energía				<b>Elementos:</b> Intercambiadores: cobre, acero Inoxidable, acero al carbono, tapas de aislamiento térmico, ductos de rotación de aire, lana de vidrio, ducto de entrada, soporte, ventilador 1, ducto de salida			
No.	Detalle	Método	Operación	Transporte	Inspección	Retraso	Almacén
1	Inspección y verificación de los elementos del sistema de energía	Visual					
2	Elaboración de fichas de análisis para cada elemento	Manual					
3	Transporte de los elementos al taller	Visual					
4	Mantenimiento correctivo de los elementos	Manual					
5	Pintado de los elementos	Manual					
6	Almacenamiento de elementos para el secado	Manual					
7	Transporte de elementos al lugar de	Manual					

	montaje						
8	Montaje de intercambiador de acero al carbono	Manual					
9	Montaje del separador de intercambiadores	Manual					
10	Montaje de intercambiador de acero inoxidable	Manual					
11	Montaje del separador de intercambiadores	Manual					
12	Montaje de intercambiador de cobre	Manual					
13	Sellado de los intercambiadores de calor	Manual					
14	Colocación del soporte de entrada	Manual					
15	Montaje del ventilador 1 en soporte de entrada de aire	Manual					
16	Colocación de lana de vidrio en contra tapas	Manual					
17	Montaje tapas de aislamiento térmico	Manual					
18	Colocación del ducto de salida de aire	Manual					
18	Verificación de elementos colocados	Visual					
20	Montaje de los ductos de rotación	Manual					
21	Colocación de los ductos de aislamiento térmico	Manual					
22	Verificación de elementos colocados	Visual					
<b>Elaborado por:</b> Mayorga A./ Vaca J.						<b>Página 2</b>	
<b>Revisado por:</b> Guasumba J. / Suntaxi C.							

<b>DIAGRAMA DE PROCESOS No.3</b>							
<b>Tipo de Proceso:</b> MONTAJE MECÁNICO					<b>Fecha:</b> 2010-01-25		
<b>Nombre:</b> ENSAMBLE SISTEMA DE ALIMENTACIÓN							
<b>Subsistema:</b> Alimentación				<b>Elementos:</b> Base, tolva de carga, canal tornillo sin fin, tornillo sin fin, motor-reductor, rodamientos.			
No.	Detalle	Método	Operación	Transporte	Inspección	Retraso	Almacén
1	Inspección y verificación de los elementos del sistema de alimentación	Visual					
2	Elaboración de fichas de análisis para cada elemento	Manual					
3	Transporte de los elementos al taller	Visual					
4	Mantenimiento correctivo de los elementos	Manual					
5	Pintado de los elementos	Manual					
6	Almacenamiento de elementos para el secado	Manual					
7	Transporte de elementos al lugar de montaje	Manual					
8	Colocación de la base en el lugar preciso	Manual					
9	Montaje del tornillo sin fin en su canal	Manual					
10	Colocación de canal con su respectivo tornillo	Manual					
11	Montaje de la tolva de carga	Manual					
12	Montaje de motor-reductor	Manual					

13	Colocación de los rodamientos	Manual					
14	Verificación de elementos colocados	Visual					
<b>Elaborado por:</b> Mayorga A./ Vaca J.					<b>Página 3</b>		
<b>Revisado por:</b> Guasumba J. / Suntaxi C.							

<b>DIAGRAMA DE PROCESOS No.4</b>							
<b>Tipo de Proceso:</b> MONTAJE MECÁNICO						<b>Fecha:</b> 2010-01-25	
<b>Nombre:</b> ENSAMBLE SISTEMA DE ESCAPE DE GASES							
<b>Subsistema:</b> Escape de Gases				<b>Elementos:</b> Chimenea, ducto de escape			
No.	Detalle	Método	Operación	Transporte	Inspección	Retraso	Almacén
1	Inspección y verificación de los elementos del sistema de alimentación	Visual					
2	Elaboración de fichas de análisis para cada elemento	Manual					
3	Transporte de los elementos al taller	Visual					
4	Mantenimiento correctivo de los elementos	Manual					
5	Pintado de los elementos	Manual					
6	Almacenamiento de elementos para el secado	Manual					
7	Transporte de elementos al lugar de montaje	Manual					
8	Montaje de la chimenea	Manual					

9	Sellado de chimenea	Manual	●	→	□	◐	▽
10	Colocación del ducto de escape	Manual	●	→	□	◐	▽
11	Verificación de elementos colocados	Manual	○	→	□	◐	▽
<b>Elaborado por:</b> Mayorga A./ Vaca J.						<b>Página 4</b>	
<b>Revisado por:</b> Guasumba J. / Suntaxi C.							

<b>DIAGRAMA DE PROCESOS No.5</b>							
<b>Tipo de Proceso:</b> MONTAJE ELÉCTRICO						<b>Fecha:</b> 2010-01-25	
<b>Nombre:</b> ENSAMBLE SISTEMA ELÉCTRICO							
<b>Subsistema:</b> Instalación Eléctrica				<b>Elementos:</b> Caja de control, cableado, breakers			
No.	Detalle	Método	Operación	Transporte	Inspección	Retraso	Almacén
1	Elaboración de lista de materiales e insumos	Manual	○	→	■	◐	▽
2	Fondos para adquisición de materiales	Visual	○	→	□	◑	▽
3	Adquisición y verificación de los elementos eléctricos	Visual	○	→	■	◐	▽
4	Transporte de los elementos eléctricos al taller	Manual	○	→	□	◐	▽
5	Almacenamiento de elementos eléctricos	Visual	○	→	□	◐	▽
6	Instalación eléctrica del ventilador 1	Manual	●	→	□	◐	▽
7	Verificación del funcionamiento ventilador 1	Visual	○	→	■	◐	▽

8	Continuación para instalación	Visual					
9	Instalación eléctrica del ventilador 2	Manual					
10	Verificación del funcionamiento ventilador 2	Visual					
11	Instalación eléctrica del motor-reductor	Manual					
12	Verificación del funcionamiento del motor-reductor	Visual					
13	Montaje de la caja de breakers	Manual					
14	Montaje de la caja de control	Manual					
15	Verificación e inspección de la instalación	Visual					
<b>Elaborado por:</b> Mayorga A./ Vaca J.						<b>Página 5</b>	
<b>Revisado por:</b> Guasumba J. / Suntaxi C.							

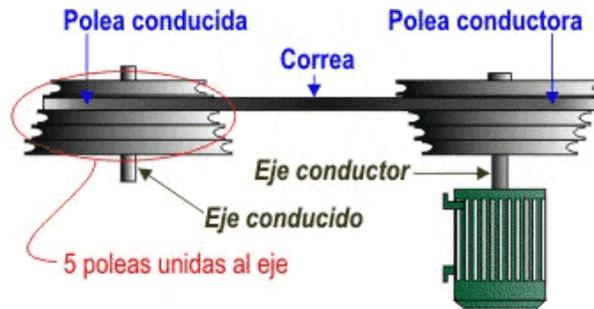
## 4.2 MECANISMOS DE MOVIMIENTO

En ingeniería mecánica, los mecanismos de movimiento son el pilar fundamental donde se apoya totalmente la actividad industrial del hombre, las máquinas y sus mecanismos son necesidades extendidas e inevitables de la ingeniería sea cual sea su rama.

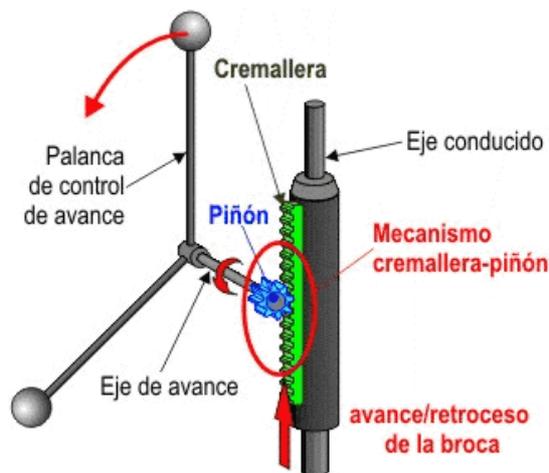
Existen dos tipos<sup>12</sup> de movimientos; de movimiento rotatorio a rotatorio y de movimiento rotatorio a rectilíneo (o viceversa), por ejemplo un sistema de poleas realiza el movimiento de rotatorio a rotatorio ya que al rotar una (motriz) traduce el movimiento a la otra (conducida) y hace que rote, y un ejemplo de movimiento

<sup>12</sup> Pagina web\Mecanismos.htm

rotatorio a rectilíneo es un sistema de cremallera y piñón ya que el piñón rota y la cremallera transforma su rotación en un movimiento rectilíneo.



**Figura 4.1** Movimiento rotatorio - rotatorio



**Figura 4.2** Movimiento rotatorio - rectilíneo

En base a lo expuesto anteriormente el sistema de combustión de biomasa residual posee un mecanismo de movimiento importante, se lo llama sistema de alimentación el cual está conformado por un tornillo sin fin dentro de una cavidad cilíndrica cuyas dimensiones se aprecian en los planos adjuntos al proyecto en el anexo H, cuyo movimiento es generado en matrimonio con un motor-reductor eléctrico que tiene como función principal hacer girar al tornillo sin fin a revoluciones muy bajas, pero a un alto torque, para transportar la biomasa

(cascarilla de arroz, bagazo de la caña de azúcar, hojas secas, etc.) a la cámara de combustión para su respectiva combustión como fuente de alimentación.

### **4.3 ALIMENTACIÓN DE COMBUSTIBLE**

La alimentación de combustible es una instalación que adecúa la provisión de biomasa residual (cascarilla de arroz, bagazo de la caña de azúcar, hojas secas) a las necesidades y especificaciones del sistema de combustión del sistema.

Para el sistema de combustión de biomasa residual el carburante que es introducido en la cámara de combustión sea cual sea la materia a combustionar cumple con unos parámetros básicos para la combustión, a continuación se detalla los que entre estos se tienen:

- Una cantidad de producto comburente adecuado para que se produzca la acción y reacción de incineración.
- La biomasa (cascarilla de arroz, vagazo de la caña de azúcar, hojas secas), debe tener un mínimo grado de humedad.
- El proceso de evacuación de cenizas debe ser progresivo y rápido.
- La alimentación de aire debe ser constante durante el proceso de combustión en la cámara.
- La seguridad en el manejo de combustión.

Todos estos parámetros tomados en cuenta se los realiza con el fin de obtener un calor constante sin variaciones excesivas ni bruscas previo a la toma de datos en los intercambiadores de calor.

### **4.4 SOPORTES PARA AISLAMIENTOS TÉRMICOS**

El aislamiento térmico se utiliza en la industria desde los inicios de la era industrial, aunque el desarrollo se produjo a partir de la segunda década del siglo XX.

Para el sistema de combustión de biomasa residual de este proyecto se utilizará lana de vidrio, fundamentalmente por:

- Necesidades de proceso, ya que deben evitarse transferencias térmicas que disfuncionen el proceso por diferencias de temperaturas no admisibles.
- Seguridad de las personas y bienes, las temperaturas superficiales externas pueden ser elevadas y provocar quemaduras y accidentes en las personas.
- El aislamiento térmico reduce las pérdidas energéticas, de tal modo que éstas pueden llegar a ser un 2-3% de las pérdidas energéticas sin aislamiento.
- La reducción de la contaminación ambiental, la mayor parte de la energía que se utiliza en los procesos térmicos procede de la transformación de un combustible por reacción exotérmica del mismo con el oxígeno ambiental.

Incluso se usó este tipo de aislamiento térmico por sus propiedades térmicas que lo conforman. Estas propiedades son:

- Los productos fabricados son ligeros (de 10 a 110 kg/m<sup>3</sup>) y fáciles de cortar y de manejar.
- La lana de vidrio es incombustible, inatacable por los agentes exteriores: aire, vapor de agua, ácidos (excepto de fluorhídrico) y bases no concentradas.
- El pH de la composición, 7 aproximadamente, asegura a la fibra una estabilidad total, incluso en medio húmedo y garantiza al usuario la no existencia de corrosión de los metales en contacto con ella

- La lucha contra el ruido ha puesto de manifiesto las cualidades acústicas de la lana de vidrio.

Este material de aislamiento es el más común utilizado en procesos termodinámicos, para el sistema de combustión de biomasa es suficiente este tipo de aislamiento ya que posee propiedades dentro de lo necesario y su adquisición en el mercado es de fácil obtención y costo moderado.

#### **4.5 ESTRUCTURA DE SUJECIÓN DEL SISTEMA**

La estructura de sujeción de este proyecto es simple debido a que cada componente del sistema se une al siguiente en su gran mayoría por medio de pernos, arandelas, tuercas y arandelas de presión.

En los elementos de mayor volumen por razones de diseño se utilizan pernos de mayor tamaño que van sujetos por medio de tuercas debido a que resulta adecuado el ensamble de esta manera. No se utiliza el ensamble por medio de soldadura debido a que resulta muy complicado trasladar el equipo de suelda hacia el lugar de montaje del sistema.

Otra característica del sistema de sujeción es que posee un eje vertical compuesto por: base de la cámara de combustión, cámara de combustión y los intercambiadores de calor que hablando de una manera estructural son la columna vertebral de la estructura, pues al ser de gran tamaño y peso aportan una gran rigidez a la estructura sirviendo como una base sólida para que el resto de componentes se acoplen de una manera adecuada a esta columna vertebral por medio de pernos en agujeros roscados que se encuentran en estos elementos principales.

Con respecto al sistema de alimentación este tiene su propio sistema de sujeción que es completamente independiente del sistema principal, puesto que tiene una base propia en la cual se asientan sus diferentes elementos para luego acoplarse al sistema de combustión de biomasa.

## **4.6 CIMENTACIÓN**

Las cimentaciones son las bases que sirven de sustentación de estructuras o elementos, se calculan y proyectan teniendo en consideración varios factores tales como la composición y resistencia del terreno, las cargas propias de las estructuras, elementos y otras cargas que inciden, tales como el efecto del viento o el peso de la nieve sobre las superficies expuestas a los mismos. Todas las edificaciones (maquinaria, postes, torres) poseen un peso propio dado por:

- La estructura
- Elementos constructivos: paredes, techos, carpinterías.
- Todo aquello que se coloca al momento de habitarlo, es decir: mobiliario, electrodomésticos.
- Otras cargas: del mismo modo, influyen en los edificios cargas importantes como el peso de la nieve sobre las cubiertas o la incidencia de los vientos en fachadas o sobre superficies expuestas a los mismos.

La edificación debe estar proyectada contemplándose en estas variables para evitar agrietarse, hundirse, inclinarse o colapsarse.

Para el sistema de combustión de biomasa residual la cimentación recomendada y utilizada fue la de máquinas, debido a que sus componentes que lo conforman son de gran peso haciendo que su edificación sea muy rígida y estable, no olvidemos también uno de los factores que se considera son las cargas cíclicas que obligan a considerar el estado límite de servicio de vibraciones y el estado límite último de fatiga, para el caso del sistema de combustión este factor es mínimo.

## 4.7 MONTAJE DEL SISTEMA

### 4.7.1 MAQUINARIAS Y HERRAMIENTAS UTILIZADAS

Las máquinas y herramientas empleadas para la implementación, montaje y/o mantenimiento del sistema de combustión de biomasa residual fueron seleccionadas en función a los procesos de montaje requeridos para el ensamble del equipo escogiendo principalmente las máquinas que prestan un menor tiempo y costo de trabajo. Las máquinas y herramientas seleccionadas se muestran en la tabla 4.1.

**Tabla 4.1** Máquinas y aparatos utilizados

<b>Montacargas Hidráulicas</b>	
Características: <ul style="list-style-type: none"><li>- Plataforma Hidráulica</li><li>- Levanta grandes pesos</li><li>- Funciona a gas</li><li>- Fácil maniobra</li></ul>	
<b>Compresor</b>	
Características: <ul style="list-style-type: none"><li>- Corriente 110 v</li><li>- Potencia</li><li>- Presión Max.</li></ul>	
<b>Taladro de Pedestal</b>	
Características: <ul style="list-style-type: none"><li>- Potencia 620 W</li><li>- Velocidad 1725 RPM</li><li>- Juego de Brocas máx. 22 mm</li></ul>	

**Tabla 4.1** Continuación...

<p align="center"><b>Amoladora Manual</b></p>	
<p>Características:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Potencia 2000 W</li> <li>- Frecuencia 60Hz</li> <li>- Disco hasta 18 cm de diámetro</li> <li>- Permite corte y desbaste</li> </ul>	
<p align="center"><b>Soldadora</b></p>	
<p>Características:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Voltaje: Bivoltaje 220V-110V</li> <li>- Potencia 14000 W Peso 24 Kg</li> <li>- Capacidad electrodo 2,0 – 5mm</li> <li>- Amperaje 65-250 A</li> </ul>	
<p align="center"><b>Dobladora Manual</b></p>	
<p>Características:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- 18 dados desplazables con pernos</li> <li>- Contrapesos en dos palancas</li> <li>- Luz de 2 m</li> </ul>	
<p align="center"><b>Torno</b></p>	
<p>Características:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Ancho bancada 206 mm</li> <li>- Distancia entre puntas 10000 mm</li> <li>- Número de velocidades 16</li> <li>- Recorrido contrapunta 120 mm</li> </ul>	

Durante el proceso de implementación y habilitación de ciertos elementos que conforman el sistema de combustión de biomasa residual previo al montaje, se emplearon varias herramientas e instrumentos que permiten restaurar dichas partes, para lo cual se utiliza la fuerza física, las herramientas e instrumentos utilizados se presentan en la tabla 4.2.

**Tabla 4.2** Herramientas e instrumentos utilizados

<b>ORD.</b>	<b>HERRAMIENTA/INSTRUMENTO</b>	<b>CARACTERISTICAS</b>
1	Destornilladores	Varios
2	Flexómetro	5m longitud
3	Soplete	¼ galón
4	Martillo Goma	20 lb
5	Calibrador	0,01 mm
6	Llaves	Varios
7	Rayador	Para tool
8	Lima Circular	Para chaflán
9	Escuadra	30 cm
10	Playo	De presión
11	Tijeras	Para tool

#### **4.7.2 MONTAJE MECÁNICO**

El montaje de los diferentes elementos que conforman el sistema de combustión se lo realizó de una manera secuencial colocando las piezas inferiores primero, puesto que su diseño está organizado de una forma vertical.

La secuencia que se siguió es la siguiente:

1. Base de cámara de combustión
2. Cámara de combustión
3. Intercambiadores de calor
4. Chimenea

La tolva de alimentación por tratarse de una estructura adicional se ensambló al final.

A continuación se muestra una secuencia de fotos del montaje de las diferentes partes que componen el sistema de combustión de biomasa residual.

En la figura 4.3 se observa claramente el ensamble de la base con la cámara de combustión donde se observa una estructura con un recubrimiento de planchas a su alrededor, esta debe estar en una superficie nivelada para la estabilidad del equipo para esto se utilizó un montacargas.



**Figura 4.3** Ensamble base - cámara de combustión

De igual forma, para el montaje de los intercambiadores de calor se utilizó un montacargas y se procedió de la misma manera al igual como se hizo con la cámara de combustión, es decir, se elevó cada intercambiador de calor uno por uno y se deslizó su peso sobre la cámara de combustión como se indica la figura 4.4.



**Figura 4.4** Ensamble intercambiadores de calor

Luego de ensamblar los intercambiadores de calor se ensambló el ducto de salida de uno de los intercambiadores de calor según los planos como se indica en la figura 4.5.



**Figura 4.5** Ensamble ducto de salida de aire

Se procedió a colocar el aislamiento térmico (lana de vidrio) en las tapas laterales que corresponde a los intercambiadores de calor como se indica en la figura 4.6.



**Figura 4.6** Aislamiento térmico

Una vez colocada la lana de vidrio en las tapas de aislamiento térmico, se procede a montar las mismas en los alrededores de los intercambiadores de calor y la cámara de combustión como se indica en la figura 4.7.



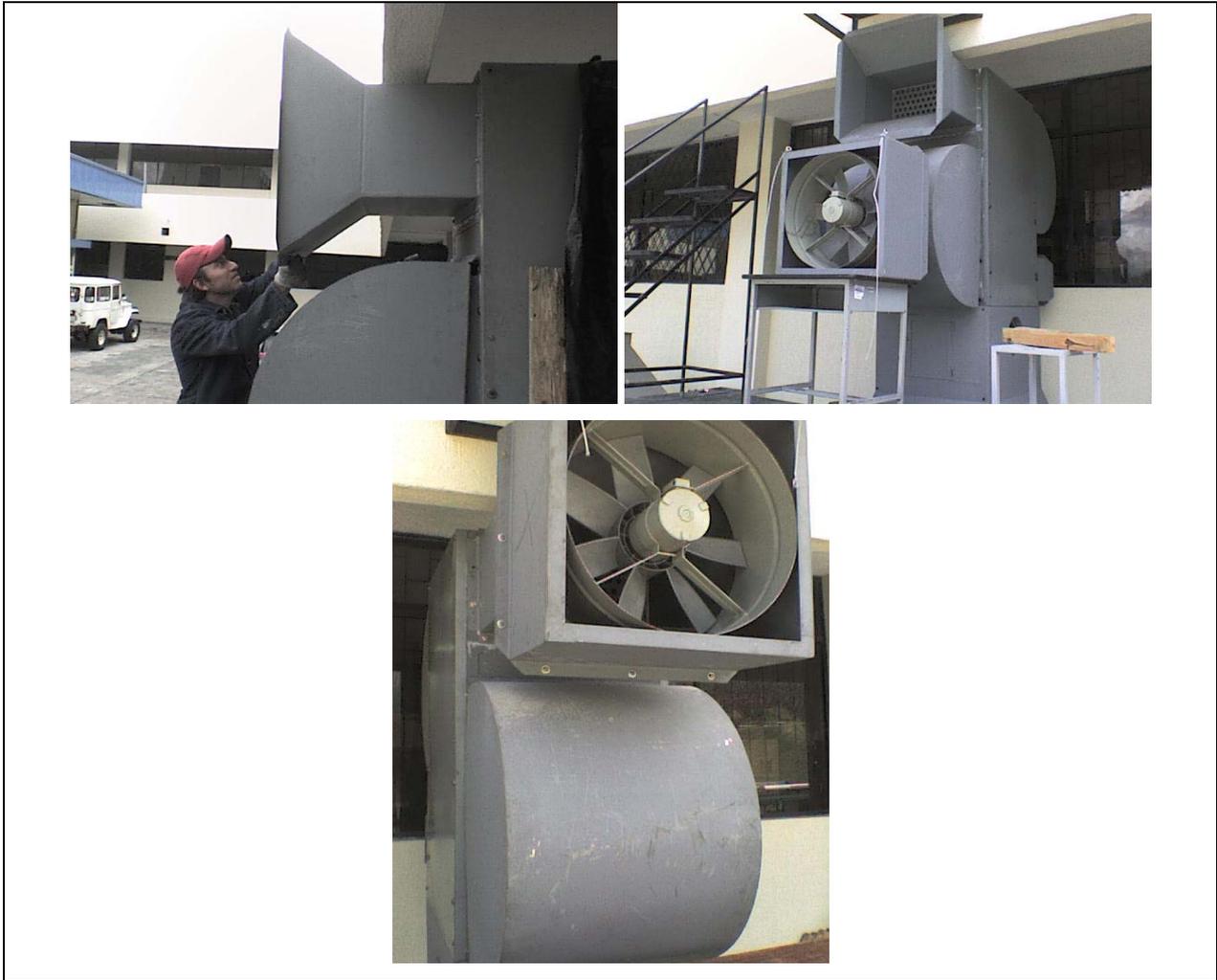
**Figura 4.7** Montaje tapas de aislamiento térmico

Se procedió también al montaje de los ductos circulares de ventilación con sus respectivos ductos de aislamiento térmico, como se indica en la figura 4.8.



**Figura 4.8** Ensamble de ductos de aire

Luego de colocar todo lo que tiene que ver con las tapas y su respectivo aislamiento térmico (lana de vidrio) se procedió a ensamblar el soporte del ventilador 1 con su respectivo ventilador axial como se muestra en la figura 4.9.



**Figura 4.9** Montaje ventilador 1

En La figura 4.10 se observa claramente el ensamble del ventilador 2.



**Figura 4.10** Ensamble ventilador 2

Para terminar el montaje de todos los elementos del equipo se acopla como estructura anexa la tolva de alimentación de biomasa montaje en el que también se empleo un montacargas para facilitar el ensamble.

El tornillo sin fin encargado de transportar la biomasa fue acoplado con anterioridad al sistema de alimentación, pero el moto-reductor que gobierna el movimiento del tornillo se instaló al último para prevenir cualquier robo o percance.



**Figura 4.11** Ensamble sistema de alimentación

### **4.7.3 MONTAJE ELÉCTRICO**

El sistema eléctrico comprende todos los materiales que se necesitó para realizar la instalación eléctrica respectiva de tipo industrial para el funcionamiento del sistema de combustión de biomasa residual, para lo cual, se la realizó el siguiente proceso:

- Adquisición del material eléctrico.
- Instalación eléctrica.
- Montaje eléctrico.
- Funcionamiento.

El primer paso del montaje eléctrico fue la adquisición del material eléctrico en las empresas proveedoras, en la tabla 4.3 se detallan los materiales utilizados en la instalación.

**Tabla 4.3** Lista de materiales eléctricos

<b>No.</b>	<b>Descripción</b>	<b>Cantidad</b>
1	Tablero SQD trifásica 12P	1
2	Breaker QO 3P-32 <sup>a</sup>	3
3	Arrancador LG 7-10 A /con botonera	1
4	Arrancador LG 12-18 A/con botonera	1
5	Arrancador LG 2.5-4 A/con botonera	1
6	Cable concéntrico 3*10	24
7	Enchufe 3P-50 A / Eagle	2
8	Toma S/P 3P-50 A / Eagle	2
9	Cable concéntrico 3*12	2
10	Cable concéntrico 3*14	6
11	Pernos Auto ajustables	8
12	Cinta de aislamiento negro	2

A continuación se muestra una secuencia de fotos del montaje eléctrico que compone el sistema de combustión de biomasa residual.



**Figura 4.12** Toma principal de energía

En la figura 4.12 se observa claramente la toma principal de energía que fue obtenida del laboratorio de máquinas y herramientas del DECEM.

Posteriormente luego de obtener la toma principal se procedió a extender esta toma hasta la máquina de combustión la cual será utilizada para distribuir 3 tomas más a partir de esta.

Las 3 tomas a utilizar son para:

- El motor reductor
- El ventilador 1
- El ventilador 2

Luego de extender la toma principal se armó la caja que contiene los breakers respectivos para cada toma como se indica en la figura 4.13, posterior a esto se instaló la caja de control, la cual está comprendida por 3 botoneras, cada una de estas sirve para el encendido de los componentes del sistema.



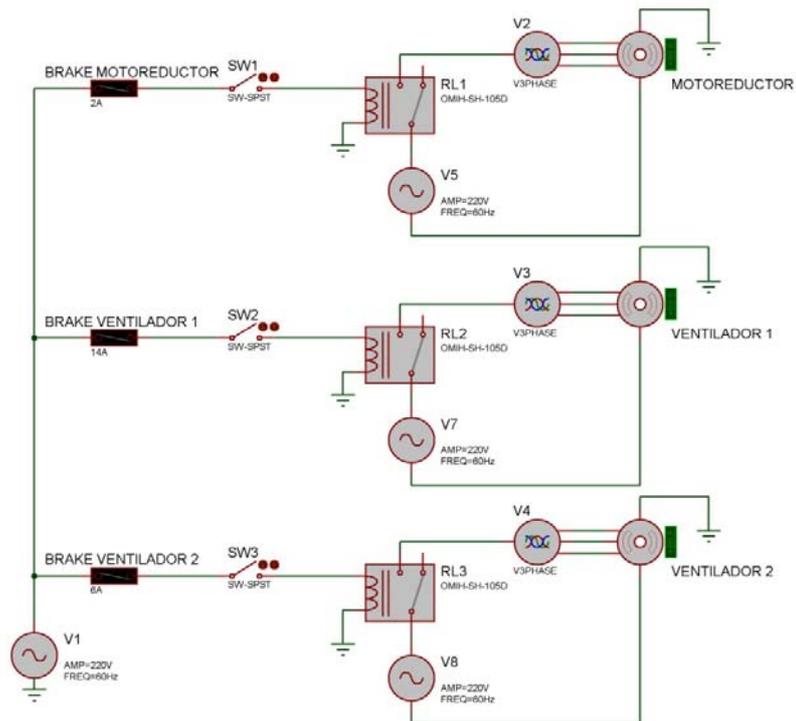
**Figura 4.13** Instalación caja de control

A partir de esta caja el cableado eléctrico es simple y va dirigido a cada elemento eléctrico como indica la figura 4.14.



**Figura 4.14** Instalación eléctrica.

A continuación se presenta un diagrama eléctrico general para saber cómo está conformada la instalación desde el punto de vista técnico-eléctrico.



**Figura 4.15** Diagrama eléctrico.

## 4.8 CRITERIOS DE SEGURIDAD INDUSTRIAL

Las instalaciones de trabajo con las que cuenta la Carrera de Ingeniería Mecánica de la Escuela Politécnica del Ejército para la construcción, montaje y mantenimiento de máquinas, se encuentran divididas por áreas de proceso según el tipo de trabajo que se desee realizar.

Las áreas disponibles son:

- Área de tornos



**Figura 4.16** Área de tornos

- Área de Fresas



**Figura 4.17** Área de fresas

- Área de soldadura



**Figura 4.18** Área de soldadura

- Área de Ajuste



**Figura 4.19** Área de ajuste

Las respectivas áreas constan de iluminación, ventilación, instalación neumática y eléctrica de acuerdo con la maquinaria utilizada.

La prevención de los riesgos laborales son técnicas que se aplican para determinar los peligros relacionados con tareas, el personal que las ejecuta, personas involucradas, equipos y materiales que se utilizan y el ambiente donde se ejecuta el trabajo.

Entre los criterios de seguridad industrial que la mayoría de países industrializados aplican para la prevención de riesgos laborales se encuentran los siguientes:

- Atender a las señales de prevención.
- Evitar el acceso de visitantes al área laboral sin el uso de los implementos de seguridad.
- Uso permanente de implementos de seguridad tales como: zapatos de seguridad, casco de seguridad, faja, entre otros requeridos para cada tarea según normas.
- Mantener el orden en el área de trabajo.

El equipo de seguridad industrial que se utiliza en el área de máquinas-herramientas del DECEM donde se realizó la implementación, montaje y mantenimiento del sistema de biomasa residual es el siguiente:

- Protección para la cabeza: casco de seguridad, con características que cumplan con lo establecido en las normas, bien ajustado y de material de fácil aseo.
- Protección para los oídos: tapones de goma o conchas acústicas.
- Protección para la cara y los ojos: caretas, pantallas o cualquier otro equipo de protección contra radiaciones luminosas más intensas de lo normal, infrarrojas y ultravioletas, así como contra cualquier agente mecánico, químico o biológico.



**Figura 4.20** Equipo de seguridad industrial

- Protección de las vías de respiración: mascarillas individuales de diversos tipos y equipos de protección respiratoria.
- Protección del cuerpo y los miembros: guantes, mangas o cualquier otro equipo semejante, calzado de seguridad, mandiles y delantales diseñados y contruidos con materiales adecuados al trabajo y tipo de riesgo que se trate.

## **CAPÍTULO 5**

### **PLAN DE MANEJO AMBIENTAL**

El plan de manejo ambiental detalla y establece las acciones que se requieren para prevenir, mitigar, controlar, compensar y corregir los posibles efectos o impactos ambientales negativos causados en el desarrollo de un proyecto, obra o actividad dentro del país.

#### **5.1 TÉRMINOS DE REFERENCIA**

##### **5.1.1 INTRODUCCIÓN**

La ESPE es una institución educativa legalmente reconocida en el país, actualmente está conformada por un grupo de investigadores especializados en energías renovables o limpias, la cual está acoplándose a las licencias y permisos ambientales establecidos en la ley mediante la realización de estudios ambientales de sus proyectos realizados.

La Ley de Gestión Ambiental, en su artículo 21 establece lo siguiente: “Los sistemas de manejo ambiental incluirán estudios de línea base; evaluación del impacto ambiental, evaluación de riesgos; planes de manejo; planes de manejo de riesgo; sistemas de monitoreo; planes de contingencia y mitigación; auditorías

ambientales y planes de abandono. Una vez cumplidos estos requisitos y de conformidad con la calificación de los mismos. El Ministerio del ramo podrá otorgar o negar la licencia correspondiente”.

Por su parte, el Texto Unificado de Legislación Ambiental Secundaria del Ministerio del Ambiente (TULAS), en su Artículo 24 del Libro VI – De la Calidad Ambiental, establece lo siguiente: “El estudio de impacto ambiental se realizará bajo responsabilidad del promotor y conforme al artículo 17 de este Título y las regulaciones específicas del correspondiente sub-sistema de evaluación de impactos ambientales sectorial o seccional acreditado”.

Bajo estos antecedentes se presentan a continuación los términos de referencia para la elaboración del estudio de impacto ambiental del mencionado proyecto.

### **5.1.2 FICHA TÉCNICA**

La ficha técnica del estudio deberá contener información acerca del proyecto (nombre, ubicación, auspiciador, tipo de proyecto, descripción resumida, estudio técnico, categoría) información acerca del contratante (razón social, representante legal, dirección, teléfono, fax, correo electrónico) e información acerca del contratista (razón social, representante legal, dirección, teléfono, fax, correo electrónico, y equipo técnico con nombres y profesiones de los responsables de la elaboración del estudio).

En el caso de este proyecto al tratarse de un proyecto universitario se elaboró una ficha técnica más simple para un plan de manejo ambiental más adecuado.

La ficha se presenta a continuación en las tablas 5.1 y 5.2.

**Tabla 5.1** Ficha de identificación del proyecto

<b>Nombre del Proyecto:</b>		
Montaje, implementación y balance energético del sistema de combustión de biomasa residual con capacidad de 250.000 Btu/hr para el laboratorio de Energías Renovables del DECEM.		
<b>Localización del Proyecto:</b>	Provincia:	Pichincha
	Cantón:	Quito
	Parroquia:	Sangolquí
	Comunidad:	
<b>Auspiciado por:</b>	<input type="checkbox"/> Ministerio de:	
	<input type="checkbox"/> Gobierno Provincial:	
	<input type="checkbox"/> Gobierno Municipal:	
	<input type="checkbox"/> Org. de inversión/desarrollo:	(especificar)
	<input checked="" type="checkbox"/> <b>Otro:</b>	ESPE, CICTE,
<b>Tipo del Proyecto:</b>	<input type="checkbox"/> Abastecimiento de agua	
	<input type="checkbox"/> Agricultura y ganadería	
	<input type="checkbox"/> Amparo y bienestar social	
	<input type="checkbox"/> Protección áreas naturales	
	<input type="checkbox"/> Educación	
	<input type="checkbox"/> Electrificación	
	<input type="checkbox"/> Hidrocarburos	
	<input type="checkbox"/> Industria y comercio	
	<input type="checkbox"/> Minería	
	<input type="checkbox"/> Pesca	
	<input type="checkbox"/> Salud	
	<input type="checkbox"/> Saneamiento ambiental	
	<input type="checkbox"/> Turismo	
<input type="checkbox"/> Vialidad y transporte		
	<input checked="" type="checkbox"/> <b>Otros:</b>	Energías Alternativas

**Tabla 5.2** Características del área de influencia

<b>Localización</b>		
<b>Región geográfica:</b>	<input type="checkbox"/> Costa <input checked="" type="checkbox"/> Sierra <input type="checkbox"/> Oriente <input type="checkbox"/> Insular	
<b>Altitud:</b>	<input type="checkbox"/> A nivel del mar <input type="checkbox"/> Entre 0 y 500 msnm <input type="checkbox"/> Entre 501 y 2.300 msnm <input checked="" type="checkbox"/> Entre 2.301 y 3.000 msnm <input type="checkbox"/> Entre 3.001 y 4.000 msnm <input type="checkbox"/> Más de 4000 msnm	
<b>Clima</b>		
<b>Temperatura</b>	<input type="checkbox"/> Cálido-seco <input type="checkbox"/> Cálido-húmedo <input type="checkbox"/> Subtropical <input checked="" type="checkbox"/> Templado <input type="checkbox"/> Frío <input type="checkbox"/> Glacial	Cálido-seco (0-500 msnm) Cálido-húmedo (0-500 msnm) Subtropical (500-2.300 msnm) Templado (2.300-3.000 msnm) Frío (3.000-4.500 msnm) Menor a 0 °C en altitud (>4.500 msnm)
<b>Aire</b>		
<b>Calidad del aire</b>	<input checked="" type="checkbox"/> Pura <input type="checkbox"/> Buena  <input type="checkbox"/> Mala	No existen fuentes contaminantes que lo alteren El aire es respirable, presenta malos olores en forma esporádica o en alguna época del año. Se presentan irritaciones leves en ojos y garganta. El aire ha sido poluído. Se presentan constantes enfermedades bronquio-respiratorias. Se verifica irritación en ojos, mucosas y garganta.
<b>Recirculación de aire:</b>		
	<input checked="" type="checkbox"/> Muy Buena  <input type="checkbox"/> Buena  <input type="checkbox"/> Mala	Brisas ligeras y constantes Existen frecuentes vientos que renuevan la capa de aire Los vientos se presentan sólo en ciertas épocas y por lo general son escasos.

**Tabla 5.2** Continuación...

<b>Ruido</b>	<input checked="" type="checkbox"/>	Bajo	No existen molestias y la zona transmite calma.
	<input type="checkbox"/>	Tolerable	Ruidos admisibles o esporádicos. No hay mayores molestias para la población y fauna existente.
	<input type="checkbox"/>	Ruidoso	Ruidos constantes y altos. Molestia en los habitantes debido a intensidad o por su frecuencia. Aparecen síntomas de sordera o de irritabilidad.
<b>Organización social</b>	<input checked="" type="checkbox"/>	Primer grado	Comunal, barrial
	<input type="checkbox"/>	Segundo grado	Pre-cooperativas, cooperativas
	<input type="checkbox"/>	Tercer grado	Asociaciones, federaciones, unión de organizaciones
	<input type="checkbox"/>	Otra	

### 5.1.3 OBJETIVOS

#### a) Objetivo general

Elaborar un estudio de impacto ambiental para el proyecto cuyo tema es “Montaje, implementación y balance energético del sistema de combustión de biomasa residual con capacidad de 250.000 Btu/hr para el laboratorio de energías renovables del DECEM” en base a los términos de referencia establecidos en el presente documento.

#### b) Objetivos Específicos

- Efectuar una descripción de los medios físico, biótico y socioeconómico del área de influencia del proyecto
- Identificar, evaluar y describir los impactos ambientales generados en la rehabilitación, montaje, instalación, operación, mantenimiento del proyecto.

- Elaborar el plan de manejo ambiental con medidas que permitan prevenir, controlar y mitigar los impactos socio-ambientales generados por el proyecto.

#### **5.1.4 ALCANCE Y ÁMBITO TÉCNICO DEL ESTUDIO**

El Estudio de Impacto Ambiental se regirá a lo establecido según la Ley de Gestión Ambiental Registro Oficial No. 245 del 30 de julio de 1999 y la Ley de Prevención y Control de la contaminación Ambiental Decreto Supremo No. 374, RO No.97 del 31 de mayo de 1976.

Adicionalmente se efectuará una descripción detallada de cada instalación y su área de influencia o de entorno, la cual, deberá contener información relevante acerca de las condiciones técnicas y ambientales existentes en el lugar montaje.

Por otra parte, el estudio contemplará la identificación, evaluación y descripción de los impactos ambientales considerando las actividades del proyecto y los componentes ambientales con el fin de establecer las medida necesarias que estarán contempladas en el respectivo plan de manejo ambiental.

#### **5.1.5 DESCRIPCIÓN GENERAL DE LOS COMPONENTES AMBIENTALES**

##### **a) Componente Físico**

- Manejo de la calidad del aire: está encaminado a prevenir, controlar y minimizar la alteración de la calidad del aire por emisión de material particulado, gases y ruido.
- Manejo de gestión integral de residuos sólidos: su propósito es dar a las basuras y residuos sólidos producidos en el proyecto el tratamiento más adecuado desde el punto de vista ambiental de acuerdo con sus características, volumen, procedencia, costos de tratamiento, posibilidades de recuperación, aprovechamiento, comercialización y disposición final.

## **b) Componente Biótico.**

Para la descripción del componente biótico se tomara en cuenta las zonas de vida, flora, fauna y ecosistemas frágiles, también esta diseñado para mitigar y compensar los impactos que se originen sobre el área vegetal principalmente.

## **c) Componente socio-económico y cultural.**

Los aspectos socioeconómicos y culturales a considerarse serán: aspectos demográficos, la infraestructura física, condiciones de vida (salud, educación, vivienda, servicios básicos), actividades productivas, para la cual el proyecto no tiene mucha influencia la infraestructura, ya que su lugar es adecuado para su operación, y con respecto a condiciones de vida no es muy crítica.

### **5.1.6 DESCRIPCION AMBIENTAL DEL SITIO DE MONTAJE DEL PROYECTO**

El desarrollo de este proyecto de combustión contempla información relevante acerca de las condiciones técnicas y ambientales existentes del sitio donde se encuentra situado, se efectuará una descripción ambiental del lugar, mediciones de ruido ambiente y control de desechos sólidos en función de lo establecido según reglamentos de protección de medio ambiente vigentes en el país, también se describirá la conflictividad social en el lugar, un croquis de ubicación y el respectivo respaldo fotográfico.

### **5.1.7 DESCRIPCIÓN DEL PROYECTO Y ANÁLISIS DE ALTERNATIVAS**

La descripción del proyecto y el análisis de alternativas se efectuará en base a la información proporcionada en el capítulo II “Marco Teórico” y Capitulo III “Levantamiento Técnico” de dicho documento, se describirá las características técnicas de implementación, montaje y análisis así como también todos los criterios de ingeniería (operación, mantenimiento y funcionamiento) así como los requerimientos físicos y humanos (operadores, personal técnico).

El análisis de alternativas tomará en cuenta aspectos técnicos, económicos y ambientales para considerar la viabilidad del proyecto.

### **5.1.8 IDENTIFICACIÓN Y EVALUACIÓN DE IMPACTOS**

La identificación de los diferentes impactos ambientales se efectuará mediante matrices de interacción causa-efecto las mismas que considerarán las actividades del proyecto enmarcadas en las fases de instalación, operación, mantenimiento y abandono así como los factores ambientales que pueden verse afectados por estas actividades.

La evaluación de los impactos previamente identificados se realizará mediante una metodología que permita determinar los tipos de impactos, la tendencia y magnitud de los mismos en base a criterios de carácter, magnitud, importancia y reversibilidad.

Una vez identificados y evaluados los respectivos impactos será necesario describirlos con el fin de justificar la clasificación y valoración asignada.

### **5.1.9 PLAN DE MAEJO AMBIENTAL**

El plan de manejo ambiental deberá contener una descripción de todas y cada una de las medidas necesarias para prevenir, controlar y mitigar los impactos significativos así como el desarrollo de programas de manejo ambiental que permitan a la ESPE dar cumplimiento a la normativa ambiental vigente en el país.

El Plan de Manejo Ambiental deberá estructurarse de la siguiente manera:

- Plan de prevención y mitigación de impactos.
- Plan de contingencias y riesgos.
- Plan de capacitación y entrenamiento.
- Plan de salud ocupacional y seguridad industrial.
- Plan de manejo de desechos.

- Plan de relaciones comunitarias.
- Plan de rehabilitación de áreas afectadas.
- Plan de abandono y entrega del área.
- Plan de monitoreo.

## 5.2 NORMATIVAS DEL TULAS

Según el Texto Unificado de la Legislación Ambiental Secundaria (TULAS) indica de manera correcta y eficiente la realización de un plan de manejo según normativas acordes al control ambiental en este país.

Por lo tanto, según los artículos del 13 al 17<sup>13</sup> principalmente del capítulo III Del Objetivo y los elementos principales del sub-sistema de evaluación del impacto ambiental perteneciente al Libro VI de la calidad ambiental nos indica:

**Art. 13.- Objetivo General de la evaluación de impactos ambientales.** El objetivo general de la evaluación de impactos ambientales dentro del Sistema Único de Manejo Ambiental (SUMA) es garantizar el acceso de funcionarios públicos y la sociedad en general a la información ambiental relevante de una actividad o proyecto propuesto previo a la decisión sobre la implementación o ejecución de la actividad o proyecto.

Para tal efecto, en el proceso de evaluación de impactos ambientales se determinan, describen y evalúan los potenciales impactos de una actividad o proyecto propuesto con respecto a las variables ambientales relevantes de los medios:

- a) físico (agua, aire, suelo y clima);
- b) biótico (flora, fauna y sus hábitat);

---

<sup>13</sup> Texto Unificado de la Ley Ambiental Secundaria (TULAS), Libro VI, Año 2008

- c) socio-cultural (arqueología, organización socio-económica, entre otros); y,
- d) salud pública.

**Art. 14.- Elementos principales.-** Los elementos que debe contener un sub-sistema de evaluación de impactos ambientales, para que una institución integrante del Sistema Nacional Descentralizado de Gestión Ambiental pueda acreditarse ante el Sistema Único de Manejo Ambiental son:

- a) Metodología y/o procedimiento para determinar la necesidad o no de un estudio de impacto ambiental para una actividad propuesta determinada, paso denominado también como *tamizado*;
- b) Procedimientos para la elaboración de los términos de referencia de un estudio de impacto ambiental que permita definir el alcance de dicho estudio;
- c) Definición clara de los actores y responsables que intervienen en el proceso de elaboración, revisión de un estudio de impacto ambiental y licenciamiento ambiental, incluyendo los mecanismos de coordinación interinstitucional;
- d) Definición clara de los tiempos relativos a la elaboración y presentación de un estudio de impacto ambiental así como los periodos del ciclo de vida de una actividad que debe cubrir dicho estudio;
- e) Definición de los mecanismos de seguimiento ambiental para la(s) fase(s) de ejecución o implementación de la actividad o proyecto propuesto; y,
- f) Mecanismos de participación ciudadana dentro del proceso de evaluación de impactos ambientales en etapas previamente definidas y con objetivos claros.

**Art. 15.- Determinación de la necesidad de una evaluación de impactos ambientales (tamizado).**- La institución integrante del Sistema Nacional Descentralizado de Gestión Ambiental en su calidad de autoridad ambiental de aplicación debe disponer de métodos y procedimientos adecuados para determinar la necesidad (o no) de un proceso de evaluación de impactos ambientales en función de las características de una actividad o un proyecto propuesto. Estos métodos pueden consistir en:

- a) lista taxativa y umbrales que determinen las actividades y/o proyectos sujetos a un proceso de evaluación de impactos ambientales, incluyendo criterios complementarios para la determinación de la necesidad de una evaluación de impactos ambientales; o,
- b) criterios y método de calificación para determinar en cada caso la necesidad (o no) de un proceso de evaluación de impactos ambientales; entre estos métodos pueden incluirse fichas ambientales y/o estudios preliminares de impacto ambiental; o,
- c) cualquier tipo de combinación de las dos alternativas mencionadas; y,
- d) tomarán en cuenta los criterios priorizados en la Estrategia Ambiental para el Desarrollo Sustentable, así como las correspondientes políticas sectoriales y/o seccionales.

Además y de conformidad con la Ley Especial para la Región Insular de Galápagos, todas las acciones que se propongan para su realización o ejecución en esa jurisdicción territorial, deberán estar sujetas al proceso de evaluación de impacto ambiental. Así mismo, se someterán obligatoriamente al proceso de evaluación de impacto ambiental establecido en este Título, todas las actividades de riesgos y/o impactos ambientales que se propongan realizar en las áreas protegidas del Estado.

**Art. 16.- Alcance o términos de referencia.-** Los términos de referencia para un estudio de impacto ambiental determinarán el alcance, la focalización y los métodos y técnicas a aplicarse en la elaboración de dicho estudio en cuanto a la profundidad y nivel de detalle de los estudios para las variables ambientales relevantes de los diferentes aspectos ambientales: medio físico, medio biótico, medio socio-cultural y salud pública. En ningún momento es suficiente presentar como términos de referencia el contenido proyectado del estudio de impacto ambiental.

Debe señalar por lo tanto y en función de la descripción de la actividad o proyecto propuesto, las técnicas, métodos, fuentes de información (primaria y secundaria) y demás herramientas que se emplearán para describir, estudiar y analizar:

- a) línea base (diagnóstico ambiental), focalizada en las variables ambientales relevantes;
- b) descripción del proyecto y análisis de alternativas;
- c) identificación y evaluación de impactos ambientales; y,
- d) definición del plan de manejo ambiental y su composición (sub-planes y/o capítulos).

Además, se debe incluir un breve análisis del marco legal e institucional en el que se inscribirá el estudio de impacto ambiental y se especificará la composición del equipo multidisciplinario que responderá técnicamente al alcance y profundidad del estudio determinado.

Los términos de referencia deben incorporar en la priorización de los estudios los criterios y observaciones de la comunidad, para lo cual el promotor en coordinación con la autoridad ambiental de aplicación responsable empleará los mecanismos de participación adecuados, de conformidad con lo establecido en el artículo 20 de este Título.

El alcance del respectivo estudio de impacto ambiental deberá cubrir todas las fases del ciclo de vida de una actividad o proyecto propuesto, excepto cuando por la naturaleza y características de la actividad y en base de la respectiva normativa sectorial se puedan prever diferentes fases y dentro de éstas diferentes etapas de ejecución de la actividad.

**Art. 17.- Realización de un estudio de impacto ambiental.-** Para garantizar una adecuada y fundada predicción, identificación e interpretación de los impactos ambientales de la actividad o proyecto propuesto, así como la idoneidad técnica de las medidas de control para la gestión de sus impactos ambientales y riesgos, el estudio de impacto ambiental debe ser realizado por un equipo multidisciplinario que responda técnicamente al alcance y la profundidad del estudio en función de los términos de referencia previamente aprobados. El promotor y/o el consultor que presenten los Estudios de Impacto Ambiental a los que hace referencia este Título son responsables por la veracidad y exactitud de sus contenidos.

Un estudio de impacto ambiental deberá contener como mínimo lo siguiente, sin perjuicio de que la autoridad ambiental de aplicación establezca normas más detalladas mediante guías u otros instrumentos:

- a) Resumen ejecutivo en un lenguaje sencillo y adecuado tanto para los funcionarios responsables de la toma de decisiones como para el público en general;
- b) Descripción del entorno ambiental (línea base o diagnóstico ambiental) de la actividad o proyecto propuesto con énfasis en las variables ambientales priorizadas en los respectivos términos de referencia (focalización);
- c) Descripción detallada de la actividad o proyecto propuesto;
- d) Análisis de alternativas para la actividad o proyecto propuesto;
- e) Identificación y evaluación de los impactos ambientales de la actividad o proyecto propuesto;

- f) Plan de manejo ambiental que contiene las medidas de mitigación, control y compensación de los impactos identificados, así como el monitoreo ambiental respectivo de acuerdo a las disposiciones del artículo 19 de este Título; y,
- g) Lista de los profesionales que participaron en la elaboración del estudio, incluyendo una breve descripción de su especialidad y experiencia (máximo un párrafo por profesional).

### **5.3 MITIGACIÓN DE RIESGOS AMBIENTALES**

La mitigación de riesgos ambientales se la define como la implementación o aplicación de cualquier política estratégica, obra y/o acción tendiente a eliminar o minimizar los impactos adversos que pueden presentarse durante las etapas de ejecución de un proyecto (construcción, operación y terminación) y mejorar la calidad ambiental aprovechando las oportunidades existentes.

Las medidas de mitigación se enfocan únicamente a hacer disminuir la severidad de los impactos adversos, pueden incluir una o varias de las siguientes acciones:

#### **a) Evitar**

Evitar proyectos o actividades que puedan resultar en impacto adverso y ciertos tipos de recursos o áreas consideradas como ambientalmente sensibles.

Este enfoque, que es el más apropiado en las fases iniciales de la planeación del proyecto, es considerado en general como el más importante de las medidas de mitigación.

#### **b) Preservar**

Para preservar se debe prevenir cualquier acción que puede afectar adversamente un recurso o atributo ambiental esta meta se logra extendiendo la jurisdicción legal mas allá de las necesidades del proyecto.

### **c) Minimizar**

Implica limitar el grado, la extensión, magnitud o duración del impacto adverso, este enfoque es probablemente el más común y requiere consideraciones cuidadosas de una amplia gama de técnicas y métodos de ingeniería y administración del proyecto.

### **d) Rehabilitar**

Rectifica los impactos adversos a través de la reparación o mejoramiento del recurso afectado.

Muchos ecosistemas pueden ser rehabilitados para mejorar atributos selectos, como son productividad biológica y hábitat de la vida silvestre.

### **e) Reemplazar**

Esto se realiza compensando la pérdida de un recurso ambiental en un lugar con la creación o protección de este mismo tipo de recurso en otro lugar.

## **5.4 PROCEDIMIENTOS PARA REDUCCIONES DE CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>S**

### **5.4.1 MÉTODOS DE REDUCCIÓN DE CO<sub>2</sub>**

Para reducir la creciente concentración de GEI en la atmósfera hay dos posibilidades: disminuir hacia el futuro las emisiones antropogénicas, y capturar y secuestrar estos gases de la atmósfera durante periodos de tiempo prolongados. En este último caso se trata principalmente de secuestrar CO<sub>2</sub> empleando procesos como la fotosíntesis. El presente estudio está enfocado a la reducción de emisiones antropogénicas de GEI en el sector energía.

En este sector se considerará tanto la oferta como la demanda de energía. Existe en la actualidad una gran variedad de tecnologías eficientes tanto para la generación de energía eléctrica / mecánica como térmica. Estas nuevas tecnologías basadas en combustibles fósiles ofrecen mayores eficiencias y

por lo tanto, menor consumo de combustibles o emplean combustibles que tienen menores emisiones de GEI por unidad de energía. Además, las energías renovables ofrecen la posibilidad de generar energía con cero emisiones ya que éstas no emplean combustibles fósiles. De esta manera es entonces posible reducir las emisiones de GEI del lado de la oferta.

Del lado de la demanda hay tecnologías actualmente disponibles que reducen el consumo final de la energía y con ello, las emisiones provenientes de los combustibles fósiles.

Para seleccionar una tecnología desde el punto de vista de las emisiones de GEI, el parámetro principal a considerar es la reducción de las mismas. Sin embargo, es evidente que es necesario considerar otros factores que inciden en la evaluación y selección de una tecnología para un proyecto específico, como son, entre otros:

- Costos
- Madurez tecnológica
- Disponibilidad de combustibles
- Disponibilidad de información
- Impacto socio-económico

Además, es necesario conocer las características del consumo de energía por parte del usuario, y la oferta y demanda de energía en el país, así como los planes de desarrollo del sector.

Por lo tanto, la evaluación de las nuevas tecnologías conlleva un análisis técnico, económico y ambiental. La comparación técnica debe asegurar al usuario que la nueva tecnología le ofrece el mismo servicio que la tecnología convencional actual y con el mismo o mayor grado de confiabilidad. A continuación se debe realizar la comparación económica y ambiental. Esta

última debe asegurar que las emisiones de la nueva tecnología sean inferiores a las de la tecnología actual. Este aspecto es el que se denomina *adicionalidad ambiental*.

Como resultado de la evaluación económica de la nueva tecnología propuesta y de su comparación con la del proyecto actual, puede ocurrir que el nuevo proyecto sea desventajoso o ventajoso en términos económicos para el inversionista. En el primer caso se trata de una opción que requiere de un incentivo económico para su realización. Este tipo de proyectos se denomina *adicional económicamente*. En el segundo caso se trata de proyectos denominados *non regret*. La apreciación inicial es que este último tipo de proyectos, como son viables económicamente, deberían ser de inmediata implementación, sin que hubiera lugar a estímulos económicos adicionales. Tienen además la característica de que son ventajosos para el medio ambiente. La discusión internacional sobre este tipo proyectos va desde la apreciación de que deberían ser incluidos en la línea base de emisiones de un país.

La viabilidad económica de un proyecto a nivel micro no garantiza su implementación. Alrededor del proyecto surgen una serie de barreras necesarias de superar para la ejecución del mismo, como son por ejemplo, la disponibilidad de crédito o el desconocimiento de la tecnología, entre otras. Pero la que parece ser la principal dificultad es con frecuencia el hecho de que el nuevo proyecto tiene que competir con los demás proyectos del portafolio de la empresa, los cuales son la mayoría de las veces más atractivos desde el punto de vista económico. Por esta razón, no solamente los proyectos que resultan desventajosos económicamente (costo positivo por tonelada reducida) son adicionales sino que un grupo de proyectos *non regret* a partir de cierto umbral deberían también ser considerados como adicionales a fin de garantizar su real implementación.

### a) Tecnologías energéticas y su selección

En estudios previos se ha encontrado un total de veinticuatro opciones para la reducción y captura de emisiones. De estas, veinte son de reducción de emisiones en el sector energía. Estas opciones se pueden clasificar como opciones del lado de la oferta (doce) y del lado de la demanda (ocho).

**Tabla 5.3** Opciones de reducción de emisiones

LADO DE LA OFERTA	LADO DE LA DEMANDA
Cogeneración	Temporizadores para calentadores de agua
Mezcla de etanol y gasolina	Iluminación eficiente
Biogas de rellenos sanitarios	Motores eficientes
Energía eólica	Calderas eficientes
Minihidro	Gas para camiones
Microhidro	Gas para omnibuses
Hidroelectricidad vs. CC	Gas para taxis
Biogas para hogares rurales	Calentadores solares
Ciclos cerrados	
Ciclos combinados (CC)	
Energía solar fotovoltaica	
Metaño de aguas residuales	

Fuente: Rodríguez, H. y F. González. 2000: **Opciones para la reducción de emisiones de gases de efecto invernadero en Colombia**. ACCEFYN. Bogotá

A partir de la evaluación técnico-económica realizada anteriormente y teniendo en cuenta el impacto en la reducción de emisiones que se lograría con ellas, así como los criterios de adicionalidad ambiental y económica, y otra serie de factores como la disponibilidad de información, costos, viabilidad de implementación, etc., se seleccionaron finalmente las siguientes cuatro tecnologías para su evaluación más detallada<sup>14</sup>:

<sup>14</sup> [http://www.accefyn.org.co/Web\\_GEI\(actualizada\)/Archivos\\_gei/P\\_Cap03\\_Opciones.pdf](http://www.accefyn.org.co/Web_GEI(actualizada)/Archivos_gei/P_Cap03_Opciones.pdf)

**Tabla 5.4** Tecnologías seleccionadas en este estudio

LADO DE LA OFERTA	LADO DE LA DEMANDA
Energía eólica	Sustitución de combustibles en la industria
Cogeneración	
Energía solar fotovoltaica	

**b) Conseguir que la eficiencia sea rentable**

- Conseguir más electricidad, medios de transporte y producción industrial con menos carbón, petróleo o gasolina es una solución que **sólo presenta ventajas**: más beneficios, menos contaminación, menos calentamiento atmosférico... aunque los gastos iniciales para mejorar el equipo y la tecnología pueden ser elevados.

- La mayor parte del progreso inmediato que se puede conseguir para reducir las emisiones de gases de efecto invernadero consiste en **utilizar los combustibles fósiles de manera más eficiente**. Los ahorros conseguidos de esta manera permitirán ganar tiempo para el sistema climático mundial mientras se desarrollan tecnologías alternativas y se consigue hacerlas rentables. Se espera que las fuentes libres de emisiones sustituyan con el tiempo a los combustibles fósiles como categoría principal de suministro de energía.

- Las turbinas de "ciclo combinado" –en las que el calor resultante de la quema de combustible impulsa las turbinas de vapor al mismo tiempo que la expansión térmica de los gases de escape mueve las turbinas de gas –pueden aumentar la eficiencia de la generación de electricidad un 70%. A más largo plazo, las nuevas tecnologías podrían duplicar la eficiencia de las centrales eléctricas.

- Las pilas de combustible de gasolina y otras tecnologías avanzadas en el sector del automóvil pueden reducir casi a la mitad las emisiones de dióxido de carbono resultantes del transporte, y lo mismo cabría decir de los vehículos "híbridos" de gas/electricidad, algunos de los cuales se encuentran ya en el mercado.

- El gas natural libera menos dióxido de carbono por unidad de energía que el carbón o el petróleo. Por ello, el cambio al gas natural es una forma rápida de reducir las emisiones.

- La industria, que produce más del 40% de las emisiones mundiales de dióxido de carbono, puede beneficiarse de la cogeneración combinada de calor y electricidad así como de otros usos del calor residual, la mejor gestión de la energía y una mayor eficiencia en los procesos de manufactura.

- La instalación de sistemas de iluminación y electrodomésticos más eficientes en los edificios puede reducir significativamente el consumo de electricidad. El mejor aislamiento de las construcciones puede representar una enorme reducción de la cantidad de combustible necesario para la calefacción o el aire acondicionado

La reducción del consumo de combustibles fósiles al mismo tiempo que se mantiene el crecimiento económico representará un gran desafío.

### **c) Aprovechar las tecnologías de energía renovable existentes**

- La energía solar y la electricidad generada por el viento –con los niveles actuales de eficiencia y costo– pueden sustituir en parte a los combustibles fósiles, y se utilizan cada vez más. Un mayor empleo de tales tecnologías puede incrementar sus eficiencias de escala y reducir sus costos. La contribución actual de estos métodos de producción de energía a los suministros mundiales representa menos del 2%.

- La expansión de la energía hidroeléctrica, cuando convenga, podría representar una importante contribución a la reducción de las emisiones de gases de efecto invernadero... pero el uso de la energía hidroeléctrica se ve limitado necesariamente por su repercusión en los asentamientos humanos y los sistemas fluviales.

- Las turbinas eólicas pueden sustituir en parte la generación de electricidad basada en los combustibles.

- El uso de la biomasa como fuente de energía –por ejemplo, la leña, el alcohol fermentado del azúcar, los aceites combustibles extraídos de la soja y el gas metano emitido por los vertederos– puede ayudar a recortar las emisiones de gases de efecto invernadero, pero sólo si la vegetación utilizada con ese fin se sustituye por una cantidad equivalente de nuevas plantas (para que el dióxido de carbono liberado por la combustión de biomasa sea capturado de nuevo mediante la fotosíntesis).

- La energía nuclear no produce prácticamente ningún gas de efecto invernadero, pero, debido a la preocupación pública por los problemas de seguridad, transporte y eliminación de los residuos radioactivos –por no mencionar la proliferación de armas–, el empleo responsable de la energía nuclear continuará siendo, probablemente, limitado. Ahora representa en torno al 6,8% de los suministros mundiales de energía<sup>15</sup>.

- Existen ya nuevas tecnologías que permiten "captar" el dióxido de carbono emitido por las centrales eléctricas basadas en el uso de combustibles fósiles, y hacerlo antes de que llegue a la atmósfera. Luego, el dióxido de carbono se almacena en depósitos subterráneos y vacíos de petróleo o de gas, en yacimientos de carbón abandonados o en las profundidades del océano. Este

---

<sup>15</sup> [http://unfccc.int/portal\\_espanol/essential\\_background/feeling\\_the\\_heat/items/3377.php](http://unfccc.int/portal_espanol/essential_background/feeling_the_heat/items/3377.php)

planteamiento, que se utiliza ya en forma limitada, no es exactamente "renovable", y se está estudiando cuáles son los posibles riesgos y efectos ambientales.

#### **5.4.2 MÉTODOS DE REDUCCIÓN DE H<sub>2</sub>S**

Estudios termodinámicos demuestran que utilizando diversos óxidos metálicos como adsorbentes, a temperatura 500-700 oC, se pueden reducir los niveles de H<sub>2</sub>S en gases que simulan la composición de los gases de gasificación del carbón, desde 0.5-1 vol% hasta 1-5 ppmv en los gases de salida de un reactor de lecho fijo.

Adicionalmente, estos óxidos pueden ser fácilmente regenerados en atmósfera oxidativa en un reactor aparte, con lo cual pueden ser utilizados en numerosos y sucesivos ciclos sulfuración-regeneración.

Los primeros estudios llevados a cabo con ferritas de zinc, generalmente en reactores de lecho fijo, demostraron que estos compuestos son altamente reactivos en los primeros ciclos, pero su eficiencia y las resistencias mecánicas disminuían progresivamente hasta alcanzar niveles intolerables después de, tan sólo, una decena de ciclos.

Antes de que este tipo de sorbentes pueda alcanzar un nivel de desarrollo comercial el período de utilización debería de extenderse hasta, al menos, 100 ciclos.

Para su desarrollo se ha propuesto la adición de:

a) Nuevos óxidos metálicos que incrementen la estabilidad frente la fuerte acción reductora de los gases procedentes del carbón, o incrementen la reactividad intrínseca de sulfuración.

b) Otros aditivos que modifiquen las propiedades texturales del sorbente en la fabricación.

c) Diferentes tipos de morfologías de sorbentes (extruidos cilíndricos, esféricos, monolitos, etc.).

Sin embargo, para que este tipo de sorbentes alcance el grado de desarrollo necesario para aplicaciones industriales aún queda un largo camino por recorrer.

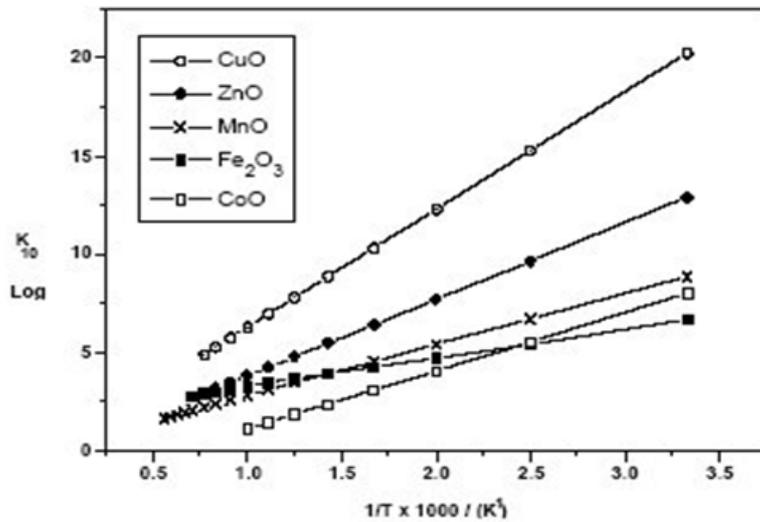
### **a) FUNDAMENTOS TEÓRICOS Y EXPERIMENTALES**

El proceso de sulfuración tiene lugar a través de la reacción:

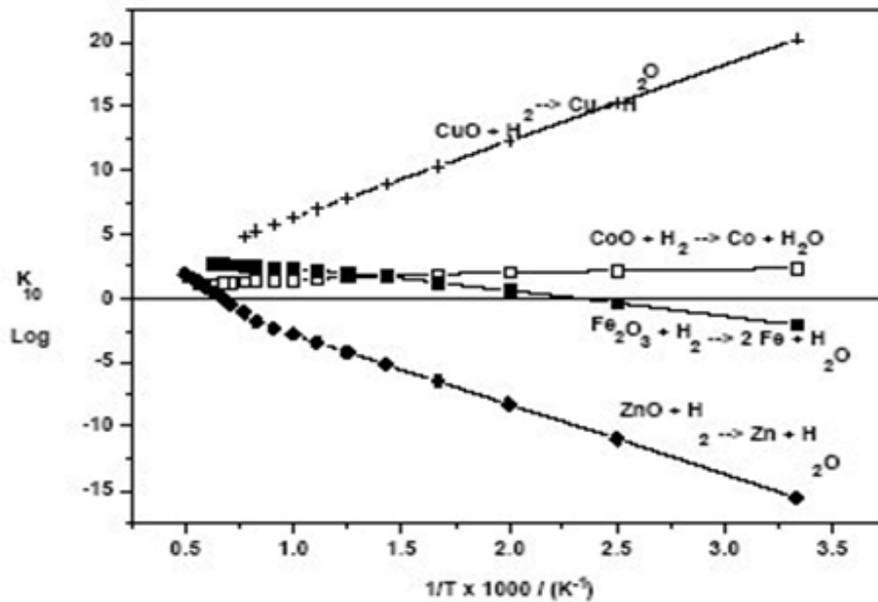


En consecuencia, la primera propiedad que debe de poseer un buen sorbente es una elevada constante de equilibrio que permita alcanzar bajas concentraciones de H<sub>2</sub>S en los gases de salida.

Los óxidos más eficaces son CuO, ZnO, MnO, Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> y CoO. (Figura 5.1).



**Figura 5.1** Constantes de equilibrio de los óxidos más comunes.



**Figura 5.2** Estabilidad frente a los óxidos más comunes.

La siguiente propiedad que debe de poseer un sorbente debe ser su estabilidad frente a la acción reductora del H<sub>2</sub> y del CO.

De acuerdo con la Figura 5.2 los óxidos CuO, CoO y Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> no son estables y el

material situado en las capas altas del reactor de lecho fijo serían reducidos a estados de oxidación más bajos antes de que tenga lugar la sulfuración. La reacción de sulfuración de los óxidos en estado de oxidación menor ya no está tan desplazada hacia la derecha y las conversiones de equilibrio ya no son tan altas.

La tercera condición es que la fase sulfato en condiciones oxidantes no debería ser estable puesto que invalidaría el proceso de regeneración.

Por ejemplo, para evitar la formación de  $ZnSO_4$ , el proceso de regeneración de sorbentes basados en  $ZnO$  debería de realizarse a temperatura sensiblemente más alta que la sulfuración.

Otra propiedad muy importante que debería poseer un sorbente es una elevada reactividad de sulfuración.

Dado que se trata de una reacción gas-sólido la reactividad global puede ser directamente estudiada en una termo-balanza a través de la ganancia de peso.

Para la determinación de los pasos que controlan la velocidad de reacción global es necesaria la utilización de modelos que describan:

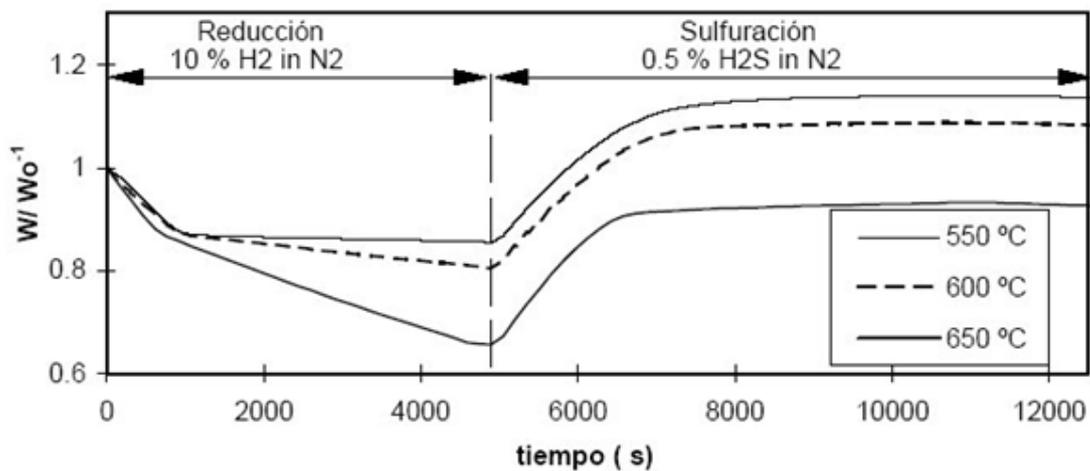
- a) la transferencia de masa a través de la capa gaseosa que rodea una partícula,
- b) la difusión de los gases a través de los poros intraparticulares
- c) la difusión de los gases a través de la capa sulfuro formado
- d) la reactividad intrínseca en la interfase sulfuro-sorbente fresco.

Los modelos más comúnmente utilizados son los de grano con propiedades variables que permiten calcular la velocidad global de reacción en razonable acuerdo con los resultados experimentales obtenidos en termo-balanza.

Dichos modelos predicen que los pasos determinantes de la reactividad global de

los sorbentes suelen ser la reactividad intrínseca y la difusión de los gases a través de la capa sulfuro.

El desarrollo de nuevos sorbentes para la desulfuración de gases a alta temperatura debe, en consecuencia, ir dirigido a incrementar la reactividad intrínseca y a la modificación de las propiedades texturales del sorbente, especialmente si éste se fabrica en forma de extruido



**Figura 5.3** Curvas de reducción y sulfuración de un sorbete ZFT a diferentes temperaturas

Como ejemplo, en la figura 5.3 se muestran las correspondientes curvas de reducción y sulfuración del sorbente ZFT(1:0.5:0.5) a diferentes temperaturas.

A 550 oC el sorbente no es estable y se descompone en sus componentes óxidos.

El Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> a su vez se reduce hasta Fe<sub>0</sub> mientras que el TiO<sub>2</sub> y el ZnO son estables.

A temperatura más alta, sin embargo, el ZnO también resulta inestable y se

incrementan las pérdidas de peso como consecuencia de la parcial evaporación del Zn metálico.

En el proceso de sulfuración la velocidad de reacción transcurre hasta la conversión total de la fase activa del sorbente (el  $\text{TiO}_2$  en este sorbente es una fase pasiva que no se sulfura), con un cambio muy pequeño de la pendiente de las curvas que implica que la energía de activación es muy pequeña y que la etapa determinante del proceso es la difusión del reactante a través de la capa sulfuro.

Los efectos cinéticos también se muestran en el comportamiento de los sorbentes en un reactor de lecho fijo a través de las curvas de ruptura (figura 5.4). Para el sorbente ideal la concentración de  $\text{H}_2\text{S}$  en los gases de salida antes de la ruptura es la correspondiente al equilibrio termodinámico.

La ruptura ocurre con la conversión total del sorbente en un tiempo  $t/t_o=1$ , en el cual la concentración incrementa repentinamente hasta la concentración en los gases de entrada.  $t_o$  se define como el tiempo teóricamente necesario para alcanzar la completa conversión del sorbente deducido de un simple balance de masa de azufre.

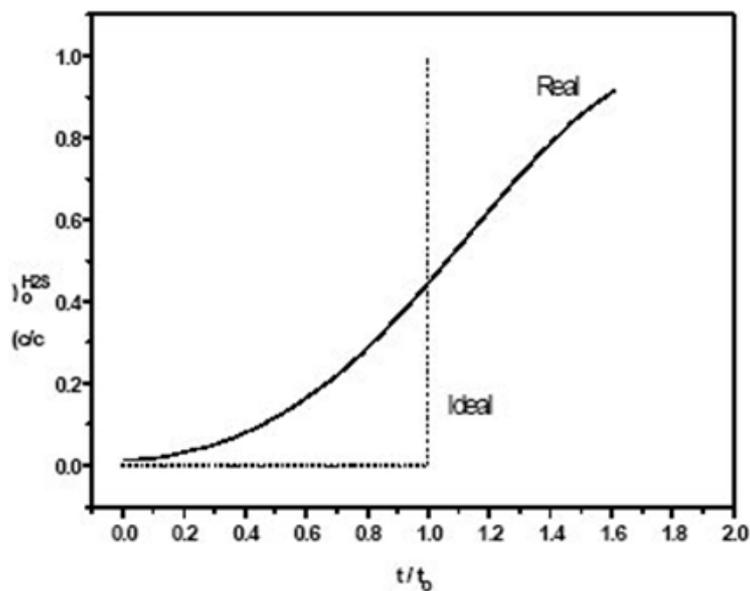
En este caso, el frente de sulfuración en el interior del lecho del reactor es un plano horizontal que separa la región con el sorbente completamente convertido de la región con el sorbente fresco. La velocidad de desplazamiento a lo largo del lecho del reactor depende de las condiciones de flujo utilizadas.

Para un sorbente real, sin embargo, la menor reactividad se pone de manifiesto en la mayor o menor pendiente de la correspondiente curva de ruptura (figura 5.4).

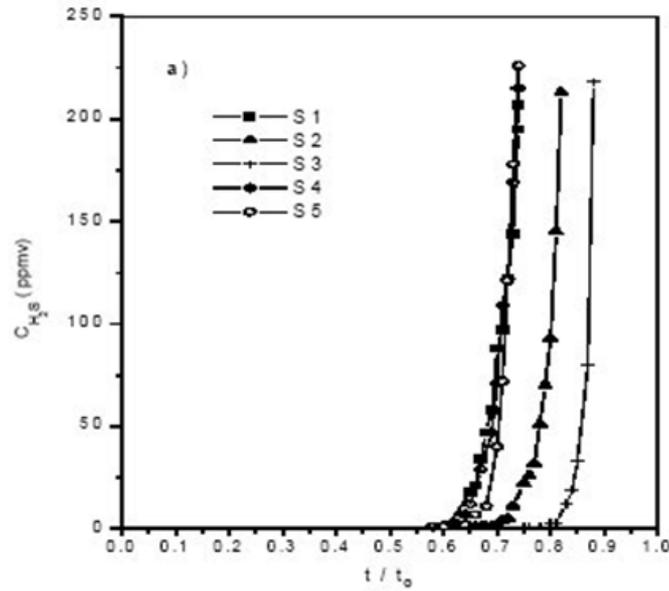
Incluso mucho antes de la ruptura, tiempo  $t/t_o < 1$ , la concentración de  $\text{H}_2\text{S}$  en los gases de salida es superior a la correspondiente al equilibrio.

Por otra parte, en  $t/t_0 = 1$  todavía no se ha alcanzado la completa conversión del sorbente real y el sorbente debe de ser retirado del reactor para iniciar el proceso de regeneración, cuando la conversión del sorbente aún no es completa, que se manifiesta por una menor eficiencia en comparación con el sorbente ideal.

En este caso, el frente de sulfuración es una banda más o menos difusa que, dependiendo de la relación tiempo de semirreacción-tiempo de residencia, puede extenderse, incluso, a lo largo de todo el lecho, en cuyo interior la conversión del sorbente y la concentración de  $H_2S$  varía de forma continua.



**Figura 5.4** Curvas de ruptura en un reactor de lecho fijo

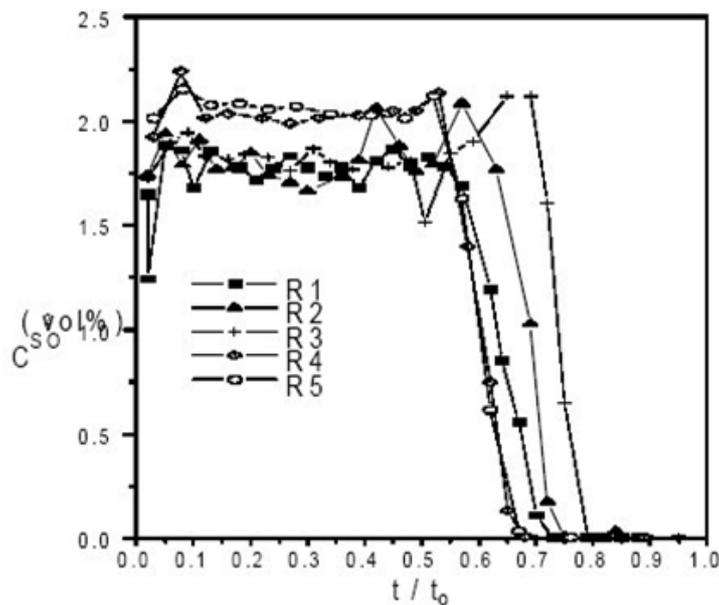


**Figura 5.5** Curvas de ruptura de sulfuración.

En las Figuras 5.4 y 5.5 se muestran curvas típicas de sulfuración y regeneración de un determinado sorbente, respectivamente.

En la sulfuración (Figura 5.5) antes de la ruptura la concentración de H<sub>2</sub>S alcanza niveles casi indetectables mientras que en la ruptura las curvas se elevan casi verticalmente, es decir, en las condiciones ensayadas el sorbente presenta un comportamiento de sorbente casi ideal sin que se revelen efectos cinéticos.

Sin embargo, la ruptura ocurre en un tiempo  $t/t_0 < 1$  que implica que la conversión del sorbente no es completa y que la eficiencia es del 90 %.



**Figura 5.6** Curvas de ruptura de regeneración

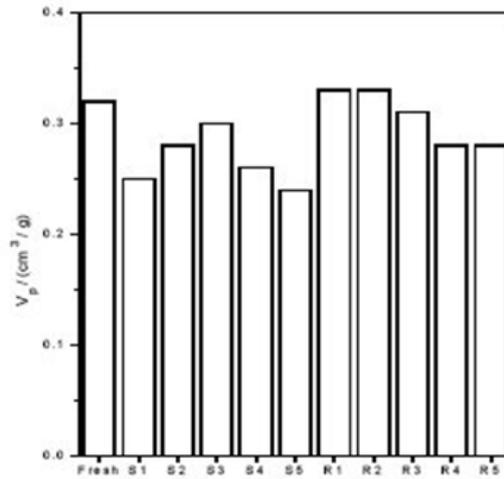
En la regeneración en atmósfera oxidativa (figura 5.6) la concentración de SO<sub>2</sub> es la esperada a partir de la concentración de O<sub>2</sub> utilizada y ocurre en los t/t<sub>0</sub> esperados para la completa regeneración del sorbente.

La última propiedad que debe exigirse a un sorbente regenerable es que a lo largo de, al menos, 100 ciclos sucesivos de sulfuración-regeneración la disminución de la eficiencia y la progresiva degradación de sus propiedades mecánicas no sean excesivas.

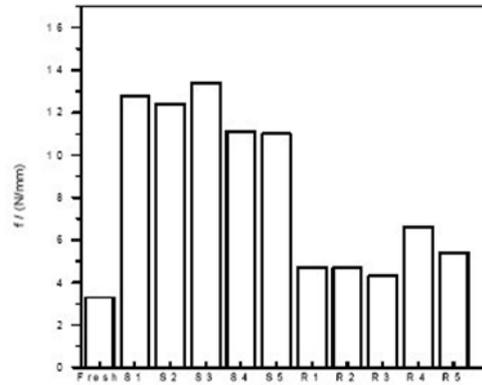
En la Figura 5.5 se muestra que la eficiencia del sorbente disminuye progresivamente, aún cuando en los dos primeros ciclos los resultados son un poco imprevisibles porque el material fresco se obtiene de forma distinta al regenerado, y la formación de SO<sub>2</sub> en la regeneración disminuye en ciclos sucesivos como consecuencia del incremento de la formación de azufre elemental.

En las Figuras 5.7 y 5.8 se muestra la evolución de las propiedades texturales y de

la resistencia mecánica de los extruidos en sucesivos ensayos multiciclo en donde se observa el progresivo decaimiento del comportamiento como consecuencia de la sinterización y el estrés térmico.



**Figura 5.7** Evolución del volumen del poro.



**Figura 5.8** Evolución de la resistencia mecánica.



## **CAPÍTULO 6**

### **PRUEBAS**

#### **6.1 PARÁMETROS DE PROCESO**

Dentro del proceso de combustión y transferencia de energía del sistema existen varios factores a ser considerados, pero dentro de los parámetros de mayor importancia para el estudio y análisis energético del sistema se destacan los siguientes:

- Velocidad de entrada de aire al subsistema de transferencia de energía.
- Velocidad de salida de aire del subsistema de transferencia de energía.
- Temperatura de entrada de aire de aire al subsistema de transferencia de energía.
- Temperatura de salida de aire de aire del subsistema de transferencia de energía.
- Temperatura promedio en las tapas laterales de aislamiento térmico.
- Temperatura promedio de la cámara de combustión.
- Velocidad de entrada del aire de combustión.
- Velocidad de salida de los gases de combustión.

- Temperatura de entrada del aire de combustión.
- Temperatura de salida de los gases de combustión.
- Temperatura de entrada de los gases de combustión al subsistema de transferencia de energía.
- Flujo másico de la biomasa.
- Composición de los gases de combustión.

Para poder medir los parámetros de proceso anteriormente enlistados se van a usar los siguientes equipos:

- Anemómetro
- Termómetro laser

## **6.2 PROCEDIMIENTO**

A continuación se explica un procedimiento detallado paso a paso para realizar las pruebas de combustión de biomasa.

- Medir con el anemómetro las velocidades del aire que ingresa al subsistema de transferencia de energía y del aire que entra a la cámara de combustión.
- Medir el flujo másico de la biomasa pesando la cantidad de biomasa que entra en la cámara de combustión en un período determinado de tiempo.
- Determinar la temperatura ambiente a la cual se realizan las pruebas de combustión.
- Colocar una cantidad suficiente de biomasa dentro de la cámara de combustión para empezar la combustión tratando de acumular una buena cantidad de biomasa en el centro de la cámara de combustión.

- Encender la biomasa que se colocó en la cámara de combustión y controlar que el fuego se encienda de una manera adecuada y alcance óptimas condiciones.
- Establecer los lapsos de tiempo en los cuales se van a realizar las diferentes mediciones de los parámetros de proceso tomando en cuenta que los equipos de medición necesitan un cierto tiempo para que se estabilicen y puedan marcar valores exactos en todas las mediciones.
- Encender el venterol de la cámara de combustión para que se produzca una combustión completa y controlar que el fuego siga encendido de manera adecuada.
- Encender el motor-reductor para empezar la alimentación constante de biomasa al sistema.
- Encender el ventilador de alimentación de aire del subsistema de transferencia de energía.
- Tomar los datos de temperatura necesarios en todo el sistema de combustión de biomasa.
- Medir las velocidades de salida del aire del subsistema de transferencia de energía y la de los gases de combustión.
- Por medio del analizador de gases de combustión medimos la composición de estos en la salida por la chimenea.

### **6.3 GUÍA DE PRUEBAS**

En esta guía de pruebas del sistema de combustión, se va a explicar la forma y los puntos en los que se debe realizar la adquisición de datos y se va a elaborar un formato de toma de datos del equipo.

Primero se establece el lapso de tiempo en el que se van a tomar los datos, en este caso presentamos el lapso de tiempo en el que se cogieron los datos de la primera prueba.

t = 15 min.

Antes de proceder a prender fuego a la biomasa en la cámara de combustión, prendemos los ventiladores del sistema y procedemos a tomar datos de velocidad y temperatura de entrada de aire en ambos ventiladores, que se indican en la figura 6.1. Los datos que se toman son los siguientes:

**Vea:** Velocidad de entrada de aire al subsistema de transferencia de energía.

**Tea:** Temperatura de entrada del aire al subsistema de transferencia de energía (Temperatura ambiente)

**Vac:** Velocidad de entrada del aire a la cámara de combustión.

**Tac:** Temperatura de entrada del aire a la cámara de combustión (Temperatura ambiente)

Una vez transcurrido el lapso de 15 minutos se procede a tomar los datos de velocidad y temperatura de salida del aire del subsistema de transferencia de energía y de la salida de los gases de combustión y la temperatura de entrada de los mismos a los intercambiadores de calor como se muestra en la figura 6.1. Los datos que se toman son los siguientes:

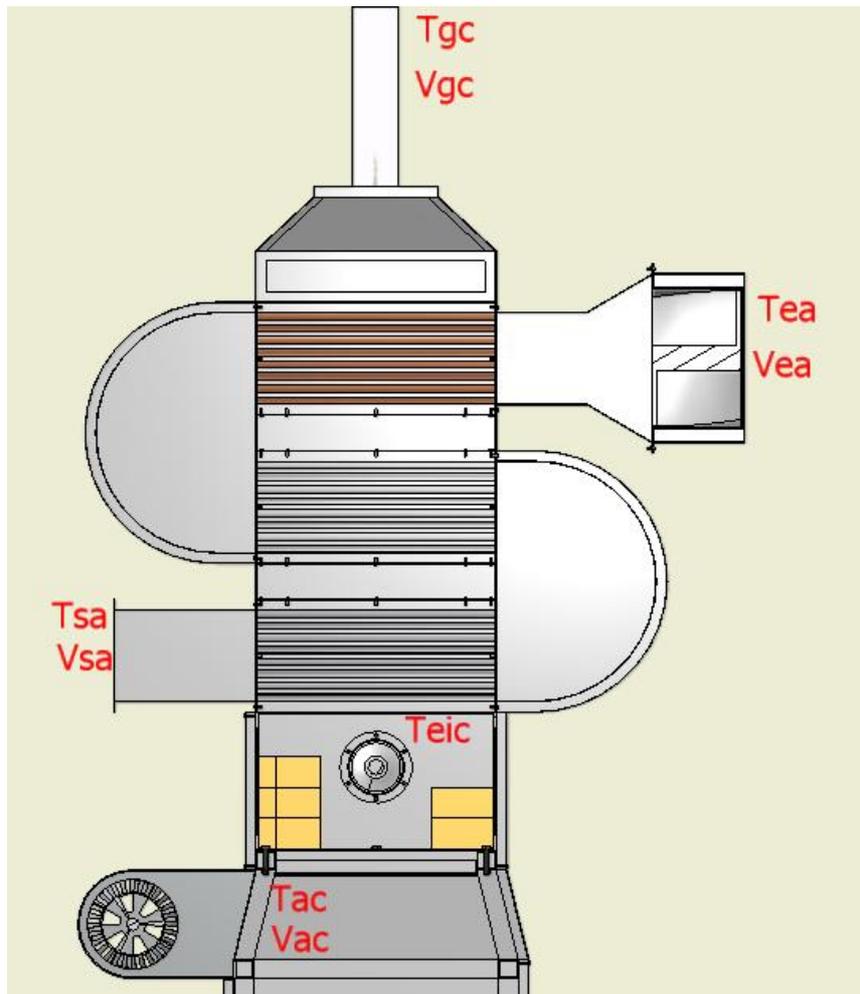
**Vsa:** Velocidad de salida del aire del subsistema de transferencia de energía.

**Tsa:** Temperatura de salida del aire del subsistema de transferencia de energía.

**Vgc:** Velocidad de salida de los gases de combustión.

**Tgc:** Temperatura de salida de los gases de combustión.

**Teic:** Temperatura de entrada de los gases de combustión a los intercambiadores de calor.

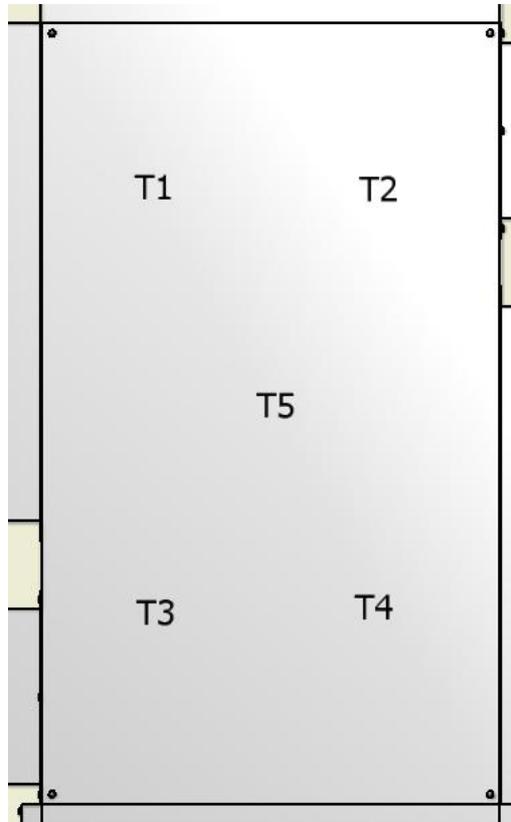


**Figura 6.1** Toma de datos de velocidades y temperaturas

Transcurrido el primer lapso de 15 minutos se toman los datos de temperatura en ambas tapas de aislamiento térmico laterales de los intercambiadores de calor.

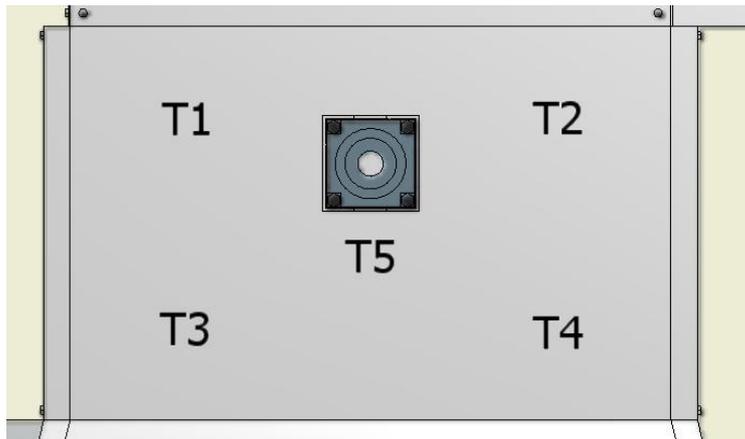
Las temperaturas se las toman en 5 puntos diferentes como se indica en la figura 6.2 para luego sacar un promedio de temperatura de cada tapa lateral.

Como las dos tapas son de la misma forma las temperaturas se toman por separado para la misma distribución de temperaturas indicadas en la figura 6.2

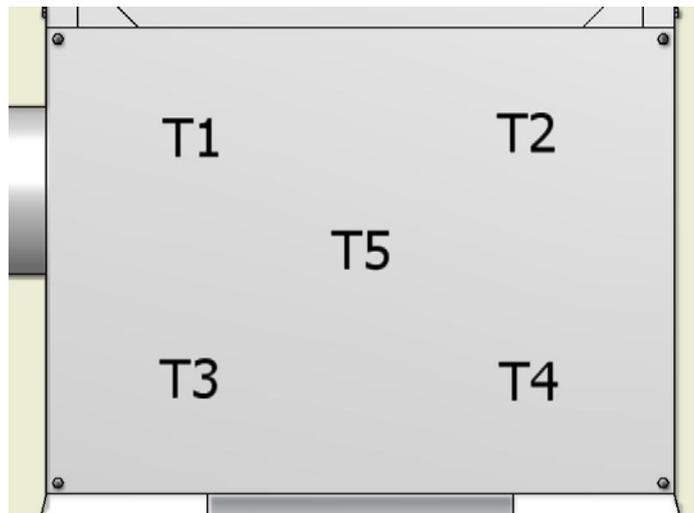


**Figura 6.2** Distribución de temperaturas para la toma de datos de las tapas de aislamiento térmico laterales.

En las pruebas también se toman los datos de las temperaturas de las paredes de la cámara de combustión para lo cual se van a tomar entre 4 y 5 datos de temperatura de cada una de las paredes de la cámara de combustión para sacar un promedio de temperatura en cada una de las paredes. La distribución de los lugares para la toma de datos de las dos primeras caras de la cámara de combustión se indican en las figuras 6.3 y 6.4.

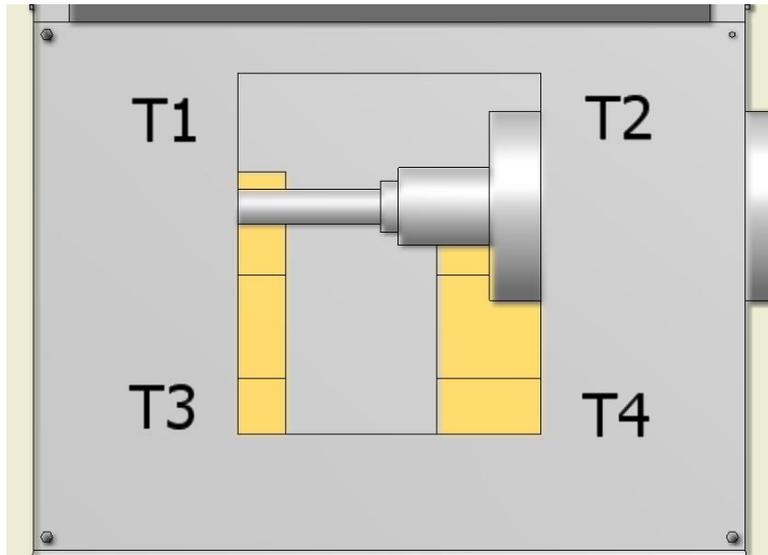


**Figura 6.3** Distribución de temperaturas para la toma de datos – cara 1 cámara de combustión.

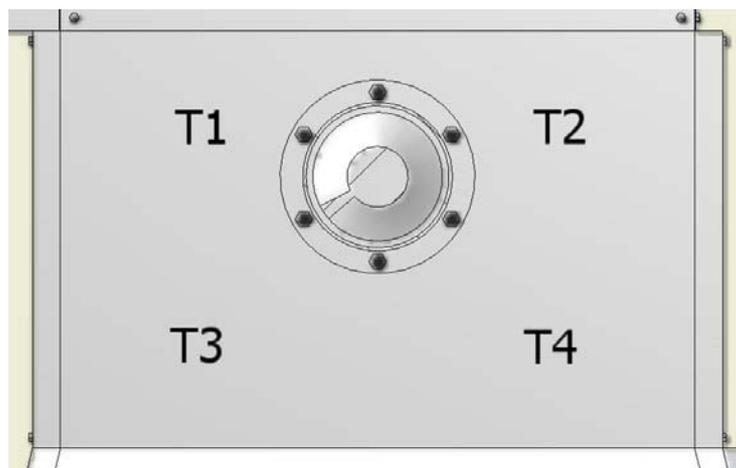


**Figura 6.4** Distribución de temperaturas para la toma de datos – cara 2 cámara de combustión.

En las caras 1(figura 6.3) y 2(figura 6.4) de la cámara de combustión se toman 5 datos de temperatura para proceder posteriormente a sacar un promedio de temperatura de cada cara y realizar el análisis correspondiente con estos datos.



**Figura 6.5** Distribución de temperaturas para la toma de datos – cara 3 cámara de combustión.



**Figura 6.6** Distribución de temperaturas para la toma de datos – cara 4 cámara de combustión.

En las caras 3(figura 6.5) y 4(figura 6.6) de la cámara de combustión se toman 4 datos de temperatura por la forma que tienen estas caras ya que tienen en su parte central diferentes elementos en los cuales no se pueden tomar datos de temperatura.

Los datos de la composición de los gases de escape se los toman en la parte superior de la chimenea que es por donde salen los gases de combustión.

A continuación se presenta una tabla donde se van a anotar los datos que se obtengan en las pruebas.

Se realizará una tabla por cada intervalo de tiempo en el que se realice la toma de datos.

**Tabla 6.1** Tabla de datos

SISTEMA DE COMBUSTION DE BIOMASA						
TABLA DE DATOS						
	min					C
Intervalo de tiempo (t)	15	Temperatura ambiente (Ta)				15
<b>Camara de Combustion</b>	<b>T1</b>	<b>T2</b>	<b>T3</b>	<b>T4</b>	<b>T5</b>	<b>Tprom</b>
	C	C	C	C	C	C
Cara 1						
Cara 2						
Cara 3					X	
Cara 4					X	
					<b>Tpt</b>	
<b>Tapas de aislamiento laterales</b>	<b>T1</b>	<b>T2</b>	<b>T3</b>	<b>T4</b>	<b>T5</b>	<b>Tprom</b>
	C	C	C	C	C	C
Cara 1						
Cara 2						
					<b>Tpt</b>	
<b>Flujo másico de biomasa</b>				<b>m</b>	kg/s	
<b>Velocidad de entrada del aire al subsistema de transferencia de energía</b>				<b>Vea</b>	m/s	
<b>Velocidad de salida del aire del subsistema de transferencia de energía</b>				<b>Vsa</b>	m/s	
<b>Velocidad de entrada del aire de combustión</b>				<b>Vac</b>	m/s	

**Tabla 6.1** Continuación...

<b>Velocidad de salida de los gases de combustión</b>	<b>Vgc</b>	m/s	
<b>Temperatura de entrada del aire al subsistema de transferencia de energía</b>	<b>Tea</b>	C	
<b>Temperatura de salida del aire del subsistema de transferencia de energía</b>	<b>Tsa</b>	C	
<b>Temperatura de entrada del aire de combustión</b>	<b>Tac</b>	C	
<b>Temperatura de salida de los gases de combustión</b>	<b>Tgc</b>	C	
<b>Temperatura de los gases de combustión al ingresar a los intercambiadores de calor</b>	<b>Teic</b>	C	

## **6.4 MATERIA PRIMA**

La cascarilla de arroz es un tejido vegetal constituido por Celulosa y Sílice, elementos que ayudan a su buen rendimiento como combustible. El uso de la cascarilla como combustible representa un aporte significativo a la preservación de los recursos naturales y un avance en el desarrollo de tecnologías limpias y económicas en la producción de arroz uno de los principales cereales de nuestra canasta familiar.

La cascarilla de arroz presenta una gran variedad de características fisicoquímicas que es preciso estudiar, según la aplicación que se desee darle. El contenido de humedad, la composición química y el poder calorífico de la cascarilla son aspectos que hay que conocer para la construcción y el funcionamiento de hornos y hogares mecánicos que son los más adecuados para la quema e incineración de este subproducto agrícola.

La composición inmediata de una sustancia es el contenido (porcentaje en masa) de carbono fijo, volátiles, humedad y cenizas, en la tabla 6.2 se muestra el análisis próximo de la cascarilla de arroz. Los volátiles tienen un papel importante durante la ignición en las etapas iniciales de la combustión de la biomasa. Tanto en el caso de la composición elemental como de la composición inmediata se debe determinar la humedad de la muestra.

**Tabla 6.2** Análisis de la cascarilla de Arroz

<b>Elemento</b>	<b>%</b>
Carbono fijo	16.67
Cenizas	17.89
Volátiles	65.47

La composición elemental de una sustancia combustible es su contenido (porcentaje en masa) de carbono (C), hidrógeno (H), azufre(S), oxígeno(O), nitrógeno(N), humedad (W) y cenizas o material residual (A). Es la característica técnica más importante del combustible y constituye la base para los análisis de los procesos de combustión, entre ellos: cálculos de volúmenes de aire, gases y entalpía.

Las siguientes composiciones elementales de la cascarilla de arroz se basan en los diferentes porcentajes de humedad analizadas en estudios previos.

La composición elemental del combustible Tabla 6.3, expresa el por ciento en masa de Carbono, Hidrógeno, Oxígeno, Nitrógeno, Cenizas y Humedad y se puede referir a:

- Masa de trabajo.
- Masa analítica (Sin humedad externa)
- Masa seca (Sin humedad)
- Masa Combustible (Sin humedad y cenizas).

**Tabla 6.3** Composición elemental de la cascarilla de arroz a diferentes % de humedad

<b>Cascarilla de arroz</b>						
<b>Humedad</b>	<b>C</b>	<b>H</b>	<b>O</b>	<b>N</b>	<b>S</b>	<b>Cenizas</b>
8.6	42.5	6.0	36.2	0.21	0.49	14.6
8.9	39.1	5.2	37.2	0.27	0.43	17.8
9.4	33.4	4.3	38.5	0.38	0.32	23.1

Los resultados obtenidos en la tabla 6.3 muestran los siguientes rangos de variabilidad para cada elemento: Carbono 37.6- 42.6 %; Hidrógeno 4.7 – 5.78; Oxígeno 31.37 – 37.62; Nitrógeno 0.38 – 1.88; Azufre 0.01 – 0.18; Cenizas 16.93 – 24.6, con un poder calórico entre 13.24 - 14.22 Mj / Kg.

El porcentaje de cenizas indica la cantidad de materia sólida no combustible por kilogramo del material. En los procesos que incluyen la combustión de la biomasa, es importante conocer el porcentaje de generación de ceniza y su composición, pues en algunos casos, esta puede ser utilizada, por ejemplo; la ceniza de la cascarilla de arroz como aditivo en la mezcla de concreto o para la fabricación de filtros de carbón activado entre otros.

El poder calorífico por unidad de masa Tabla 6.4 es el parámetro que determina la energía disponible en la biomasa. Su poder calórico está relacionado directamente con su contenido de humedad. Un elevado porcentaje de humedad reduce la eficiencia en la combustión debido a que una gran parte del calor liberado se usa para evaporar el agua y no se aprovecha en la reducción química del material.

**Tabla 6.4** Poder calorífico inferior de la cascarilla de arroz en función del contenido de humedad.

CONTENIDO DE HUMEDAD	PODER CALORÍFICO INFERIOR (PCI) kj/kg
0	19880
10	17644
20	15412
30	13180
40	10947
50	8715
60	6413

En la tabla 6.5, se hace mención a algunas características que han sido obtenidas mediante investigaciones previas de fuentes fiables, obteniendo parámetros comunes para la evaluación de la cascarilla de arroz,. El alto contenido de sílice demostrado hace que su uso alimenticio en harinas para animales sea limitado. Uno de los elementos que apropia la combustión de cascarilla de arroz es la celulosa ( $C_6H_{10}O_5$ )<sub>n</sub> siendo el componente principal de las fibras de este subproducto agrícola.

Los rangos obtenidos para el análisis químico a nivel mundial corresponden a los siguientes: La celulosa 25.89 – 35.5 %; Hemicelulosa 18.1 – 21.35 % y la Lignina 18.20 – 24.6 %.

La lignina cuando es sometida a altas temperaturas desarrolla una propiedad aglomerante en la cascarilla de arroz, transformándola en una pasta sólida "Grumo de cascarilla al rojo vivo" difícil de romper.

**Tabla 6.5** Análisis Químico de la composición de la cascarilla de arroz

<b>ELEMENTO</b>	<b>PORCENTAJE (%)</b>
Fibra (Celulosa)	39.05
Lignina	22.80
Proteínas	3.56
Extracto no Nitrogenado	6.60
Extracto con éter	0.93

Entre los porcentajes más relevantes de la composición química de la cascarilla de arroz se encuentran las cenizas, siendo la sílice la principal composición que no sufre disociación al quemarse, esto hace que se presente una difícil combustión continua y completa.

Aunque la cascarilla es muy utilizada hoy en día como fuente calorífica, requiere de mecanismos de aceleración para que se lleve a cabo una óptima combustión, entre ellos se cuenta los medios mecánicos que permiten obtener un bajo porcentaje de inquemados, en la tabla 6.6 observamos la composición mineral de la de cascarilla de arroz.

**Tabla 6.6** Composición mineral de ceniza en la cascarilla de arroz

<b>ELEMENTO</b>	<b>COMPOSICIÓN %</b>
(K <sub>2</sub> O) Óxido de Potasio	1.10
(Na <sub>2</sub> O) Óxido de Sodio	0.78
(CaO) Óxido de Calcio	0.25
(MgO) Óxido de Magnesio	0.23
(SO <sub>4</sub> ) Sulfatos	1.13
(SiO <sub>2</sub> ) Sílice	96.51
Total	100

En cualquiera de las formas en que se encuentran los residuos agrícolas (pacas, briquetas) se requiere tener un profundo conocimiento de los mecanismos de la combustión.

- Alta eficiencia de la combustión.
- Diseño efectivo del sistema.
- Operación efectiva.

Una partícula simple de un combustible sólido durante su combustión está sometida a diferentes eventos interrelacionados entre sí, los cuales son:

- Calentamiento.
- Secado.
- Desvolatilización.
- Combustión de los volátiles y el char.

La información fundamental que se necesita saber acerca de las características de la combustión de los residuos agrícolas son:

- Temperatura a la cual comienza la desvolatilización.
- Temperatura de inicio de la combustión del char.
- Influencia del secado sobre el proceso de desvolatilización.
- La composición de los productos de la desvolatilización.
- El efecto de la liberación y combustión de los volátiles sobre el proceso de combustión total (global).

La cascarilla de arroz tiene un elevado contenido de materia volátil, en comparación con los carbones, como se puede observar en su análisis aproximado. Por otro lado, los resultados de los Análisis Termo gravimétricos, al estudiar la cinética de la combustión de la cáscara de arroz revelan que, en el intervalo de temperatura entre los 200 y 300 C las partículas sufren una considerable pérdida en masa correspondiéndose con la liberación y combustión de los compuestos volátiles<sup>16</sup>.

---

<sup>16</sup> VALVERDE, Agustín, Comparative analysis of the Physicochemicals Characteristics of the rice husk.

Entre los 300 y 530 oC se produce la combustión del char, sin observarse cambios apreciables en la pérdida de peso de las partículas.

**Tabla 6.7** Variación de los volátiles de la cáscara de arroz, con la temperatura

Temperatura C	Compuesto %			
	H2	CO	CO2	CH4
400	1	38	47	14
500	4	33	46	17
600	13	37	25	25
700	20	38	20	25

Durante el Proceso de Desvolatilización las partículas están sometidas a la descomposición térmica con la subsiguiente liberación de los compuestos volátiles y a la formación de los alquitranes y el char. La cantidad de estos compuestos depende de la composición y de las condiciones de operación. Se ha observado que con el aumento de la temperatura, el contenido de CO<sub>2</sub> decrece incrementando los valores de H<sub>2</sub>, CO y CH<sub>4</sub>, presentes en los compuestos volátiles. En la tabla 10 se muestra la evolución de estos compuestos gaseosos de la cascarilla de arroz, al variar la temperatura Los constituyentes gaseosos combustibles (H<sub>2</sub>, CO, CH<sub>4</sub>) pueden llegar a representar más del 70 – 80 % en volumen, a altas temperaturas.

## 6.5 EQUIPO UTILIZADO

Como se mencionó en el literal 6.1 los equipos que se utilizaron son los siguientes:

- Anemómetro
- Termómetro laser

A continuación se da una explicación de las propiedades de cada uno de los equipos para realizar la toma de datos.

## 6.5.1 ANEMÓMETRO

### TERMO ANEMÓMETRO PCM DE SERVICIO PESADO

Marca: Extech Instruments

Modelo: 407113

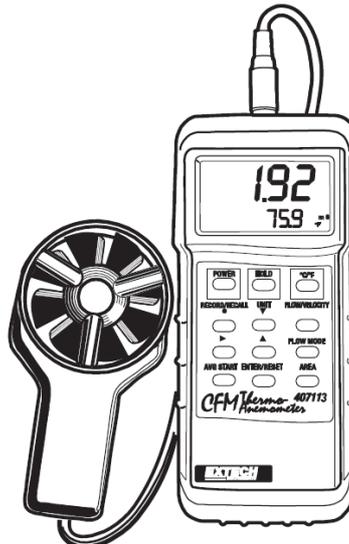


Figura 6.7 Anemómetro

Tabla 6.7 Tabla de especificaciones del anemómetro

#### Especificaciones

Indicador	Doble indicador LCD multifunción de 10.000 cuentas (0 a 9999)
Medidas	Velocidad del aire: m/s, km/h, ft/min, nudos, mph;
Flujo de aire:	MCM (m <sup>3</sup> /min) y PCM (ft <sup>3</sup> /min); Temperatura: °C y °F
Retención de datos	Congela la lectura indicada
Tasa de muestreo	Una (1) lectura por segundo
Sensores	Sensor de velocidad/flujo del aire: Brazos metálicos de veleta en ángulo con rodamiento de baja fricción. Temp. Sensor: Termistor de precisión
MIN/MÁX	Registra/Recupera la lectura más alta y más baja
Apagado automático	Apagado automático después de 15 minutos
Interfase para PC	Comunicación RS-232 Serial (flujo de datos de 16 bits)
Indicación de sobre escala	<b>1__</b> aparece en la LCD
Indicación de batería débil	<b>LBT</b> aparece en la LCD
Fuente de energía	Batería 9V (consumo 8,3mA aprox.)
Condiciones de operación	Medidor: 0 a 50°C (32 a 122°F); 80% RH máx. Sensor: 0 a 80°C (32 a 175°F)
Dimensiones / Peso	Instrumento principal: 180 x 72 x 32mm (7,1 x 2,8 x 1,3")
Cabeza del sensor	72mm (2,8") diámetro
Peso	(0.84 lbs.) (381g) para medidor y sensor

**Tabla 6.8** Tabla de especificaciones de escalas del anemómetro

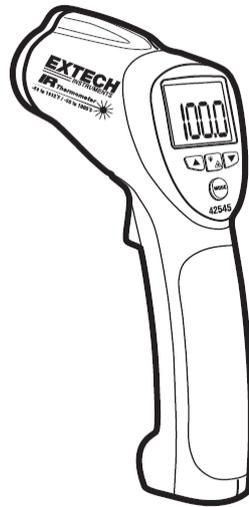
<b>Mediciones de velocidad del aire</b>	<b>Escala</b>	<b>Resolución</b>	<b>Precisión (% lectura)</b>
m/s (metros por segundo)	0,50 – 35,0 m/s	0.01 m/s < 10 0.1 m/s > 10	± (2% + 0.2m/s)
km/h (kilómetros por hora)	1,8 – 126,0 km/h	0,1 km/h	± (2% + 0.8km/h)
ft/min (pies por minuto)	100 - 6890 ft/min	ft/min	± (2% + 40ft/min)
mph (millas por hora)	1,1 – 78,3 mph	0,1 mph	± (2% + 0.4m/h)
nudos (millas náuticas por hora)	1,0 a 68,0 nudos	0,1 nudos	± (2% + 0.4nudos)
<b>Medición del flujo del aire</b>	<b>Escala</b>	<b>Resolución</b>	<b>Área</b>
MCM (metros cúbicos por minuto)	0-999.900 m <sup>3</sup> /min	0,001 a 100	0 a 9.999m <sup>2</sup>
PCM (pies cúbicos por minuto)	0-999.900 ft <sup>3</sup> /min	0,001 a 100	0 a 9.999ft <sup>2</sup>
<b>Temperatura del aire</b>	<b>Escala</b>	<b>Resolución</b>	<b>Precisión</b>
	0 a 80°C (32 a 175°F)	0,1° F/C	0,8°C (1,5°F)

## 6.5.2 TERMÓMETRO LASER

### TERMÓMETRO INFRAROJO PARA ALTAS TEMPERATURAS CON PUNTERO LASER

Marca: Extech Instruments

Modelo: 42545A



**Figura 6.8** Termómetro láser.

**Tabla 6.9** Tabla de especificaciones del termómetro.

**Especificaciones del termómetro infrarrojo**

Escala / resolución	-50 a 1000°C (-58 a 1832°F)	0.1°C/F sobre toda la escala
Precisión (de lectura)	$\pm$ (2% de la lectura + 9°F/4°C) <30°F (-1°C) $\pm$ (2% de la lectura + 4°F/2°C) 30°F to 800°F (-1°C to 426°C) $\pm$ (2.5% de la lectura + 6°F/3°C) 800 to 1000°F(426 to 537°C) $\pm$ (3% de la lectura + 9°F/4°C) >1000°F/537°C Nota: La precisión está especificada para la siguiente escala de temperaturas ambientales: 18 a 28°C (64 a 82°F)	
Emisividad	Ajustable de 0.1 a 1.00 (0.95 valor predefinido)	
Campo de visión	D/S = Aprox. Relación de 50:1 (D = distancia, S = punto)	
Potencia Láser	Menor a 1 Mw (Class II)	
Respuesta al espectro	8 a 14 $\mu$ m (longitud de onda)	

**Especificaciones generales**

Pantalla	4½ dígitos LCD retroiluminada, e indicadores de función
Tasa del indicador	1 segundo aprox.
Temperatura de operación	0°C a 50°C (32°F a 122°F)
Humedad de operación	Max. 90% RH.
Fuente de tensión	Batería de 9V
Apagado automático	Aprox. 6 segundos después de soltar el gatillo
Cumplimiento de seguridad	CE
Peso	10.2 oz. / 290g
Dimensiones	100 x 56 x 230mm (3.9 x 2.2 x 9.0")

**Tabla 6.10** Factores de emisividad para materiales comunes

<b>Materiales a prueba</b>	<b>Emisividad</b>	<b>Materiales a prueba</b>	<b>Emisividad</b>
Asfalto	0.90 a 0.98	Tela (negro)	0.98
Concreto/Hormigón	0.94	Piel (humana)	0.98
Cemento	0.96	Cuero	0.75 a 0.80
Arena	0.90	Carbón vegetal (polvo)	0.96
Tierra	0.92 a 0.96	Laca	0.80 a 0.95
Agua	0.92 a 0.96	Laca (mate)	0.97
Hielo	0.96 a 0.98	Hule (negro)	0.94
Nieve	0.83	Plástico	0.85 a 0.95
Vidrio	0.90 a 0.95	Madera	0.90
Cerámica	0.90 a 0.94	Papel	0.70 a 0.94
Mármol	0.94	Óxidos de cromo	0.81
Yeso	0.80 a 0.90	Óxidos de cobre	0.78
Mortero	0.89 a 0.91	Óxidos de fierro	0.78 a 0.82
Ladrillo	0.93 a 0.96	Textiles	0.90

## 6.6 TOMA DE DATOS

A continuación se presentan los datos tomados de la primera prueba realizada en el sistema de combustión, los datos de la demás pruebas efectuadas se encuentran en el anexo C.

**Tabla 6.11** Tabla de datos primera prueba, tiempo 0 min.

<b>SISTEMA DE COMBUSTIÓN DE BIOMASA</b>						
<b>TABLA DE DATOS</b>						
	<b>min</b>					<b>C</b>
<b>Intervalo de tiempo (t)</b>	0	<b>Temperatura ambiente (Ta)</b>				20
<b>Cámara de Combustión</b>	<b>T1</b>	<b>T2</b>	<b>T3</b>	<b>T4</b>	<b>T5</b>	<b>Tprom</b>
	<b>C</b>	<b>C</b>	<b>C</b>	<b>C</b>	<b>C</b>	<b>C</b>
<b>Cara 1</b>	29,1	31,1	31,2	29,5	29,6	30,1
<b>Cara 2</b>	27,1	27	26,8	27	27,2	27,02
<b>Cara 3</b>	32,5	32,2	32,8	33,3	X	32,7
<b>Cara 4</b>	31	31,1	28,1	28,5	X	29,675
					<b>Tpt</b>	29,87375
<b>Tapas de aislamiento laterales</b>	<b>T1</b>	<b>T2</b>	<b>T3</b>	<b>T4</b>	<b>T5</b>	<b>Tprom</b>
	<b>C</b>	<b>C</b>	<b>C</b>	<b>C</b>	<b>C</b>	<b>C</b>
<b>Cara 1</b>	28,2	30,5	27,5	27,8	28,5	28,5
<b>Cara 2</b>	29,3	28,6	28,8	28	28,5	28,64
					<b>Tpt</b>	28,57
<b>Flujo másico de biomasa</b>				<b>m</b>	kg/s	0.016
<b>Velocidad de entrada del aire al subsistema de transferencia de energía</b>				<b>Vea</b>	m/s	9,5
<b>Velocidad de salida del aire del subsistema de transferencia de energía</b>				<b>Vsa</b>	m/s	2,95
<b>Velocidad de entrada del aire de combustión</b>				<b>Vac</b>	m/s	5,4
<b>Velocidad de salida de los gases de combustión</b>				<b>Vgc</b>	m/s	4,1
<b>Temperatura de entrada del aire al subsistema de transferencia de energía</b>				<b>Tea</b>	C	20
<b>Temperatura de salida del aire del subsistema de transferencia de energía</b>				<b>Tsa</b>	C	20
<b>Temperatura de entrada del aire de combustión</b>				<b>Tac</b>	C	20
<b>Temperatura de salida de los gases de combustión</b>				<b>Tgc</b>	C	20
<b>Temperatura de los gases de combustión al ingresar a los intercambiadores de calor</b>				<b>Teic</b>	C	20

**Tabla 6.12** Tabla de datos primera prueba, tiempo 15 min.

SISTEMA DE COMBUSTIÓN DE BIOMASA						
TABLA DE DATOS						
	min					C
Intervalo de tiempo (t)	15	Temperatura ambiente (Ta)				20
<b>Cámara de Combustión</b>	<b>T1</b>	<b>T2</b>	<b>T3</b>	<b>T4</b>	<b>T5</b>	<b>Tprom</b>
	C	C	C	C	C	C
<b>Cara 1</b>	32	31	30	32	30	31
<b>Cara 2</b>	32,5	30,5	33,7	30,5	33,1	32,06
<b>Cara 3</b>	37,5	35,8	39	40	X	38,075
<b>Cara 4</b>	38,5	36	37	34	X	36,375
					<b>Tpt</b>	34,3775
<b>Tapas de aislamiento laterales</b>	<b>T1</b>	<b>T2</b>	<b>T3</b>	<b>T4</b>	<b>T5</b>	<b>Tprom</b>
	C	C	C	C	C	C
<b>Cara 1</b>	32	31	31,8	35,7	35	33,1
<b>Cara 2</b>	31,9	30	34	36	30,8	32,54
					<b>Tpt</b>	32,82
<b>Flujo másico de biomasa</b>				m	kg/s	0.016
<b>Velocidad de entrada del aire al subsistema de transferencia de energía</b>				Vea	m/s	9,5
<b>Velocidad de salida del aire del subsistema de transferencia de energía</b>				Vsa	m/s	2,9
<b>Velocidad de entrada del aire de combustión</b>				Vac	m/s	5,5
<b>Velocidad de salida de los gases de combustión</b>				Vgc	m/s	4,4
<b>Temperatura de entrada del aire al subsistema de transferencia de energía</b>				Tea	C	20
<b>Temperatura de salida del aire del subsistema de transferencia de energía</b>				Tsa	C	65,2
<b>Temperatura de entrada del aire de combustión</b>				Tac	C	20
<b>Temperatura de salida de los gases de combustión</b>				Tgc	C	45,4
<b>Temperatura de los gases de combustión al ingresar a los intercambiadores de calor</b>				Teic	C	91

**Tabla 6.13** Tabla de datos primera prueba, tiempo 30 min.

SISTEMA DE COMBUSTIÓN DE BIOMASA						
TABLA DE DATOS						
	min					C
Intervalo de tiempo (t)	30	Temperatura ambiente (Ta)				20
<b>Cámara de Combustión</b>	<b>T1</b>	<b>T2</b>	<b>T3</b>	<b>T4</b>	<b>T5</b>	<b>Tprom</b>
	C	C	C	C	C	C
<b>Cara 1</b>	32,5	34,3	32,8	30,5	30,3	32,08
<b>Cara 2</b>	32,4	34,9	33,3	33,1	33,9	33,52
<b>Cara 3</b>	35,2	36,7	36,1	37,5	X	36,375
<b>Cara 4</b>	37,1	36,2	38,3	34,3	X	36,475
					<b>Tpt</b>	34,6125
<b>Tapas de aislamiento laterales</b>	<b>T1</b>	<b>T2</b>	<b>T3</b>	<b>T4</b>	<b>T5</b>	<b>Tprom</b>
	C	C	C	C	C	C
<b>Cara 1</b>	33,4	34,8	34	35,1	34,6	34,38
<b>Cara 2</b>	34,1	34,8	34,9	34,2	34,6	34,52
					<b>Tpt</b>	34,45
<b>Flujo másico de biomasa</b>				<b>m</b>	kg/s	0.016
<b>Velocidad de entrada del aire al subsistema de transferencia de energía</b>				<b>Vea</b>	m/s	9,47
<b>Velocidad de salida del aire del subsistema de transferencia de energía</b>				<b>Vsa</b>	m/s	2,97
<b>Velocidad de entrada del aire de combustión</b>				<b>Vac</b>	m/s	5,3
<b>Velocidad de salida de los gases de combustión</b>				<b>Vgc</b>	m/s	4,6
<b>Temperatura de entrada del aire al subsistema de transferencia de energía</b>				<b>Tea</b>	C	20
<b>Temperatura de salida del aire del subsistema de transferencia de energía</b>				<b>Tsa</b>	C	73,1
<b>Temperatura de entrada del aire de combustión</b>				<b>Tac</b>	C	20
<b>Temperatura de salida de los gases de combustión</b>				<b>Tgc</b>	C	48,6
<b>Temperatura de los gases de combustión al ingresar a los intercambiadores de calor</b>				<b>Teic</b>	C	101,8

**Tabla 6.14** Tabla de datos primera prueba, tiempo 45 min.

SISTEMA DE COMBUSTIÓN DE BIOMASA						
TABLA DE DATOS						
	min					C
Intervalo de tiempo (t)	45	Temperatura ambiente (Ta)				20
<b>Cámara de Combustión</b>	<b>T1</b>	<b>T2</b>	<b>T3</b>	<b>T4</b>	<b>T5</b>	<b>Tprom</b>
	<b>C</b>	<b>C</b>	<b>C</b>	<b>C</b>	<b>C</b>	<b>C</b>
<b>Cara 1</b>	34,9	33,4	35,8	34,7	35	34,76
<b>Cara 2</b>	35,6	35,7	37,2	34	35,6	35,62
<b>Cara 3</b>	34	34,3	34,7	36,8	X	34,95
<b>Cara 4</b>	35,5	35,3	34,9	35,2	X	35,225
					<b>Tpt</b>	35,13875
<b>Tapas de aislamiento laterales</b>	<b>T1</b>	<b>T2</b>	<b>T3</b>	<b>T4</b>	<b>T5</b>	<b>Tprom</b>
	<b>C</b>	<b>C</b>	<b>C</b>	<b>C</b>	<b>C</b>	<b>C</b>
<b>Cara 1</b>	34,2	35,1	36,9	34,7	34	34,98
<b>Cara 2</b>	35,7	33,7	33,9	34,2	34,3	34,36
					<b>Tpt</b>	34,67
<b>Flujo másico de biomasa</b>				<b>m</b>	kg/s	0.016
<b>Velocidad de entrada del aire al subsistema de transferencia de energía</b>				<b>Vea</b>	m/s	9,77
<b>Velocidad de salida del aire del subsistema de transferencia de energía</b>				<b>Vsa</b>	m/s	2,98
<b>Velocidad de entrada del aire de combustión</b>				<b>Vac</b>	m/s	5,47
<b>Velocidad de salida de los gases de combustión</b>				<b>Vgc</b>	m/s	4,65
<b>Temperatura de entrada del aire al subsistema de transferencia de energía</b>				<b>Tea</b>	C	20
<b>Temperatura de salida del aire del subsistema de transferencia de energía</b>				<b>Tsa</b>	C	77,2
<b>Temperatura de entrada del aire de combustión</b>				<b>Tac</b>	C	20
<b>Temperatura de salida de los gases de combustión</b>				<b>Tgc</b>	C	49,3
<b>Temperatura de los gases de combustión al ingresar a los intercambiadores de calor</b>				<b>Teic</b>	C	114,7

**Tabla 6.15** Tabla de datos primera prueba, tiempo 60 min.

SISTEMA DE COMBUSTIÓN DE BIOMASA						
TABLA DE DATOS						
	min					C
Intervalo de tiempo (t)	60	Temperatura ambiente (Ta)				20
<b>Cámara de Combustión</b>	<b>T1</b>	<b>T2</b>	<b>T3</b>	<b>T4</b>	<b>T5</b>	<b>Tprom</b>
	C	C	C	C	C	C
<b>Cara 1</b>	35,8	36,8	34,9	35,7	36	35,84
<b>Cara 2</b>	35,5	37,7	34,6	35,7	35	35,7
<b>Cara 3</b>	37,9	35,7	35	35,2	X	35,95
<b>Cara 4</b>	35,2	38	37,3	36,9	X	36,85
					<b>Tpt</b>	36,085
<b>Tapas de aislamiento laterales</b>	<b>T1</b>	<b>T2</b>	<b>T3</b>	<b>T4</b>	<b>T5</b>	<b>Tprom</b>
	C	C	C	C	C	C
<b>Cara 1</b>	36,5	33,1	37,9	33,5	36,2	35,44
<b>Cara 2</b>	36,5	34,6	34,5	35	34,9	35,1
					<b>Tpt</b>	35,27
<b>Flujo másico de biomasa</b>				<b>m</b>	kg/s	0.016
<b>Velocidad de entrada del aire al subsistema de transferencia de energía</b>				<b>Vea</b>	m/s	9,83
<b>Velocidad de salida del aire del subsistema de transferencia de energía</b>				<b>Vsa</b>	m/s	2,91
<b>Velocidad de entrada del aire de combustión</b>				<b>Vac</b>	m/s	5,3
<b>Velocidad de salida de los gases de combustión</b>				<b>Vgc</b>	m/s	4,77
<b>Temperatura de entrada del aire al subsistema de transferencia de energía</b>				<b>Tea</b>	C	20
<b>Temperatura de salida del aire del subsistema de transferencia de energía</b>				<b>Tsa</b>	C	82,6
<b>Temperatura de entrada del aire de combustión</b>				<b>Tac</b>	C	20
<b>Temperatura de salida de los gases de combustión</b>				<b>Tgc</b>	C	50,2
<b>Temperatura de los gases de combustión al ingresar a los intercambiadores de calor</b>				<b>Teic</b>	C	128,6

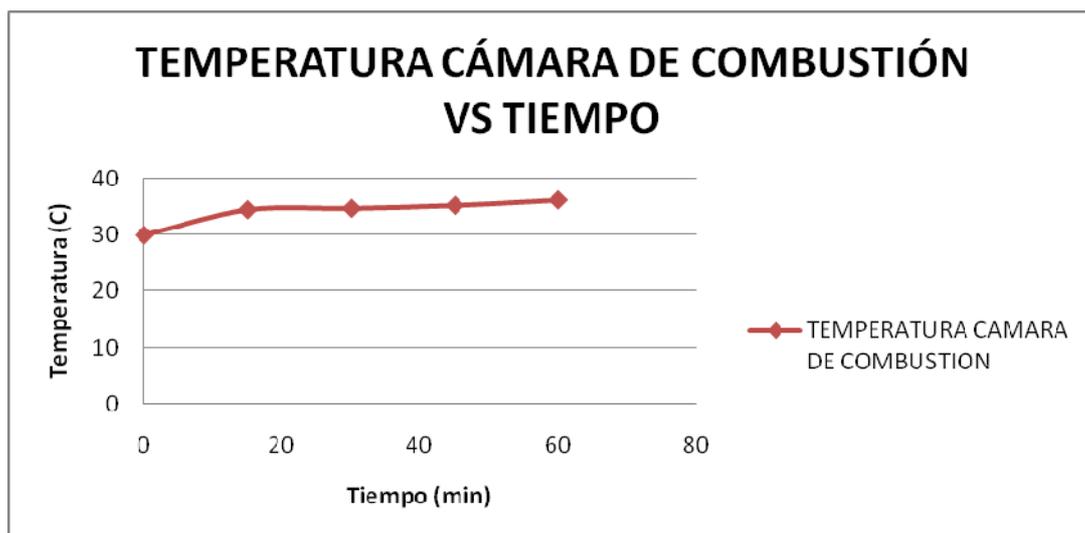
## 6.7 ANALISIS ESTADÍSTICO DE DATOS

Para el análisis estadístico de datos se tomaron en consideración realizar algunas gráficas relacionando los datos de los parámetros que se obtuvieron en las distintas pruebas.

En estos gráficos se muestra el comportamiento de los distintos parámetros de proceso en relación al tiempo en su gran mayoría o en relación entre parámetros de proceso entre sí.

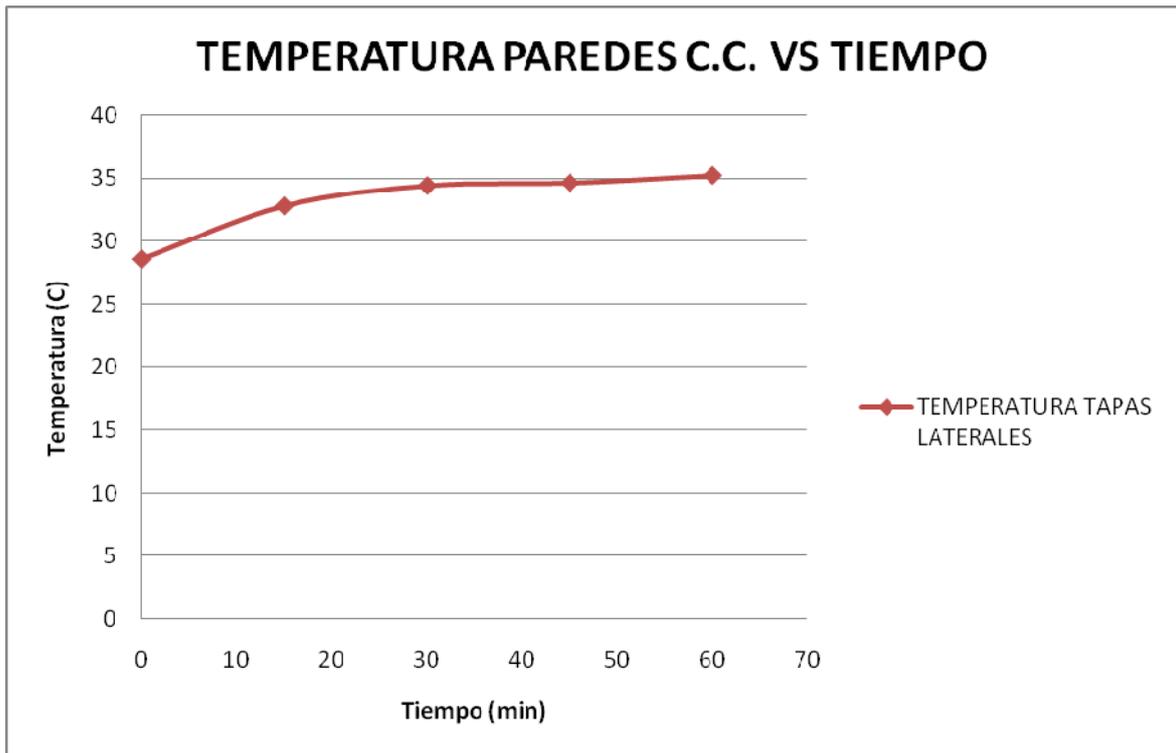
Los gráficos que se muestran a continuación corresponden a la primera prueba realizada, los gráficos correspondientes a las demás pruebas se encuentran en el anexo D.

En la figura 6.9 se muestra el gráfico de temperatura de la cámara de combustión en función del tiempo donde se puede observar que al iniciar el proceso de combustión y transcurrir un período de tiempo, el proceso de combustión tiende a estabilizarse y mantener estable su temperatura.



**Figura 6.9** Temperatura de la cámara de combustión vs tiempo

De la misma manera se puede observar en la figura 6.10 como la temperatura de las tapas laterales de la cámara de combustión tiende a estabilizarse después de un período de tiempo de iniciado el proceso de combustión de la biomasa.



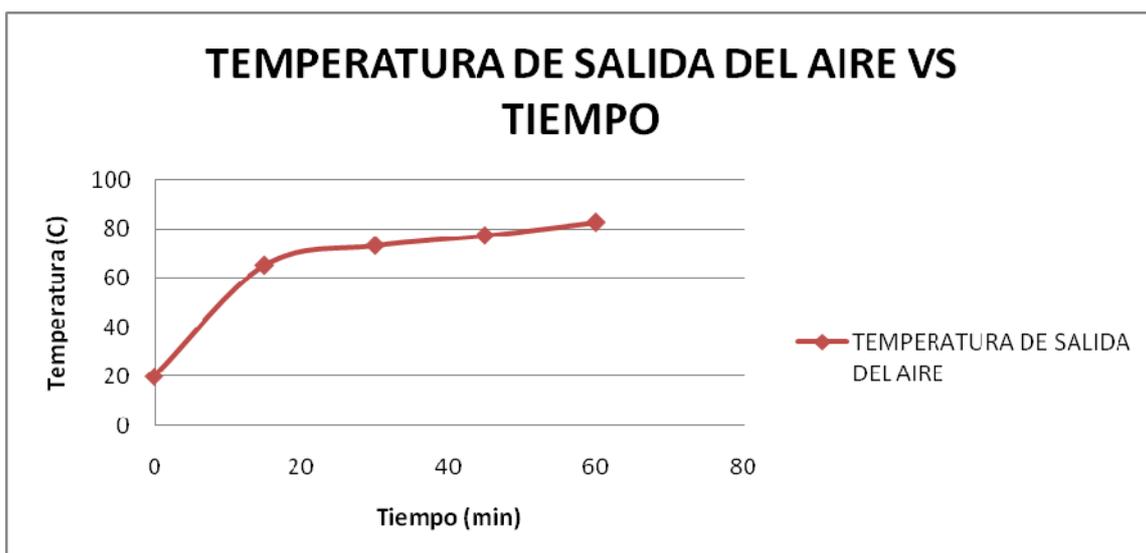
**Figura 6.10** Temperatura paredes vs tiempo

De una manera muy distinta a los análisis anteriores, se puede observar en la figura 6.11 que la velocidad de salida del aire del sistema de transferencia de energía no tiene ninguna relación con el tiempo transcurrido durante el proceso, lo que da a entender que la velocidad de salida es un parámetro independiente y que su variación se debe a las pérdidas dentro del subsistema de transferencia de energía.



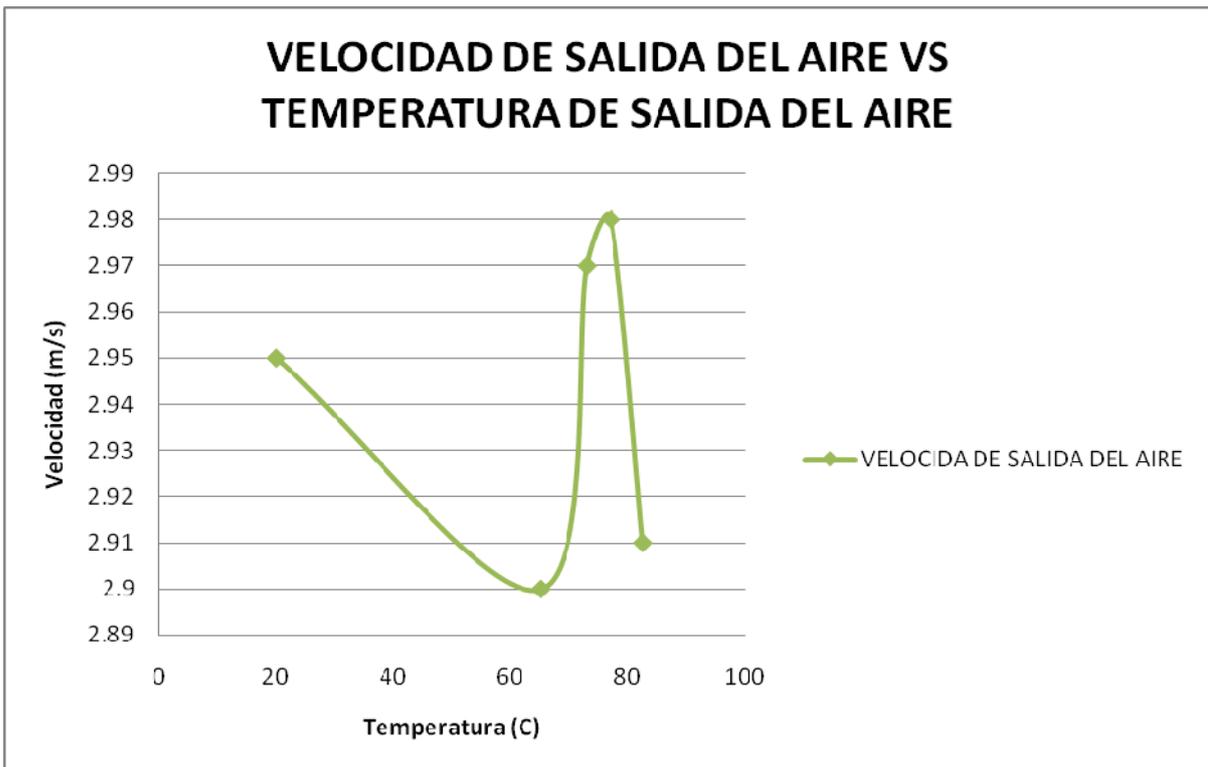
**Figura 6.11** Velocidad de salida del aire vs tiempo

Se observa en la figura 6.12 que la temperatura de salida del aire aumenta de una manera significativa en el período inicial de tiempo cuando se inicia el proceso de combustión, la misma que sigue en aumento conforme avanza el tiempo pero dichos aumentos son cada vez más pequeños hasta llegar al punto de estabilizarse.



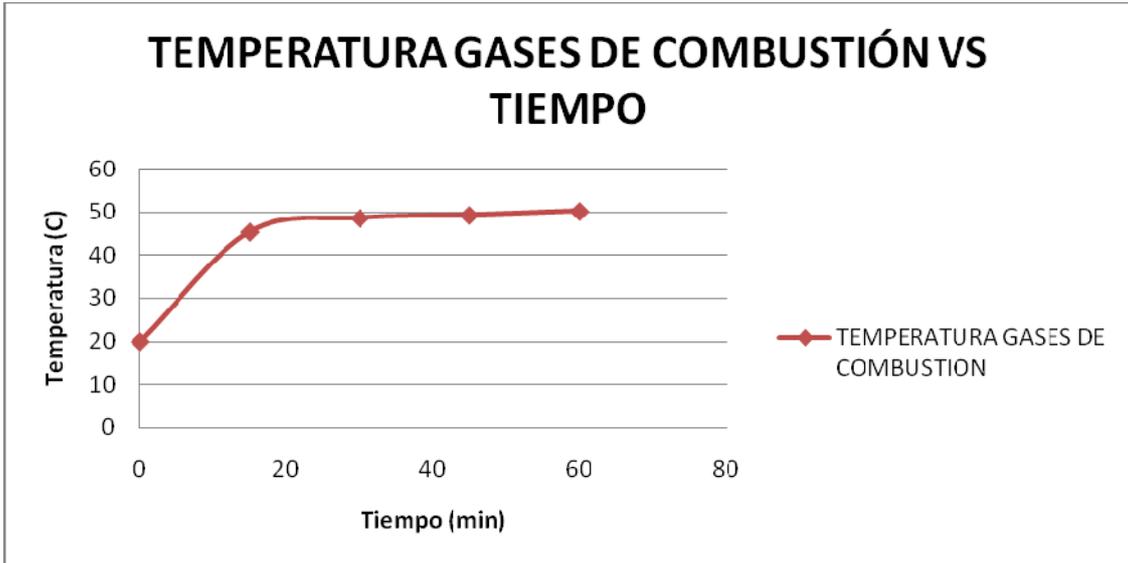
**Figura 6.12** Temperatura de salida del aire vs tiempo

La velocidad de salida del aire, como se observa en la figura 6.13, tampoco tiene ninguna relación con la temperatura de salida del aire del subsistema de transferencia de energía, aunque como se puede observar el rango de variación es muy pequeño por lo que se puede decir que la velocidad de salida es casi constante.



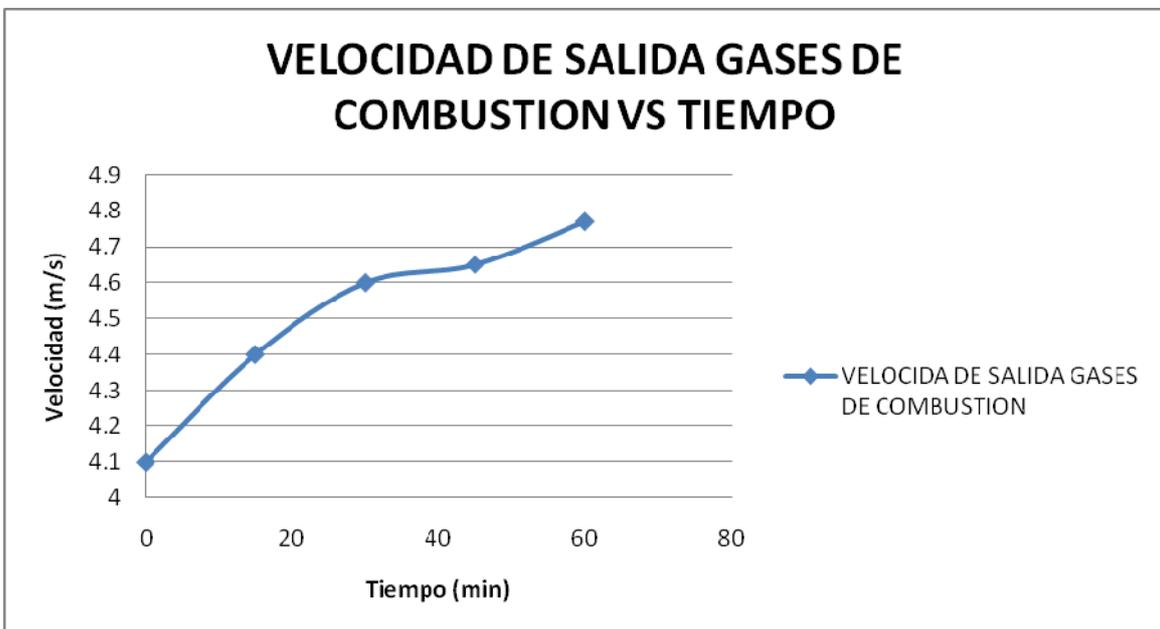
**Figura 6.13** Velocidad de salida del aire vs temperatura de salida del aire

En la figura 6.14 se observa como la temperatura de salida de los gases de combustión tiende a aumentar en el primer período de tiempo luego de iniciado el proceso de combustión y tiende a alcanzar un nivel estable una vez transcurrido un cierto período de tiempo.



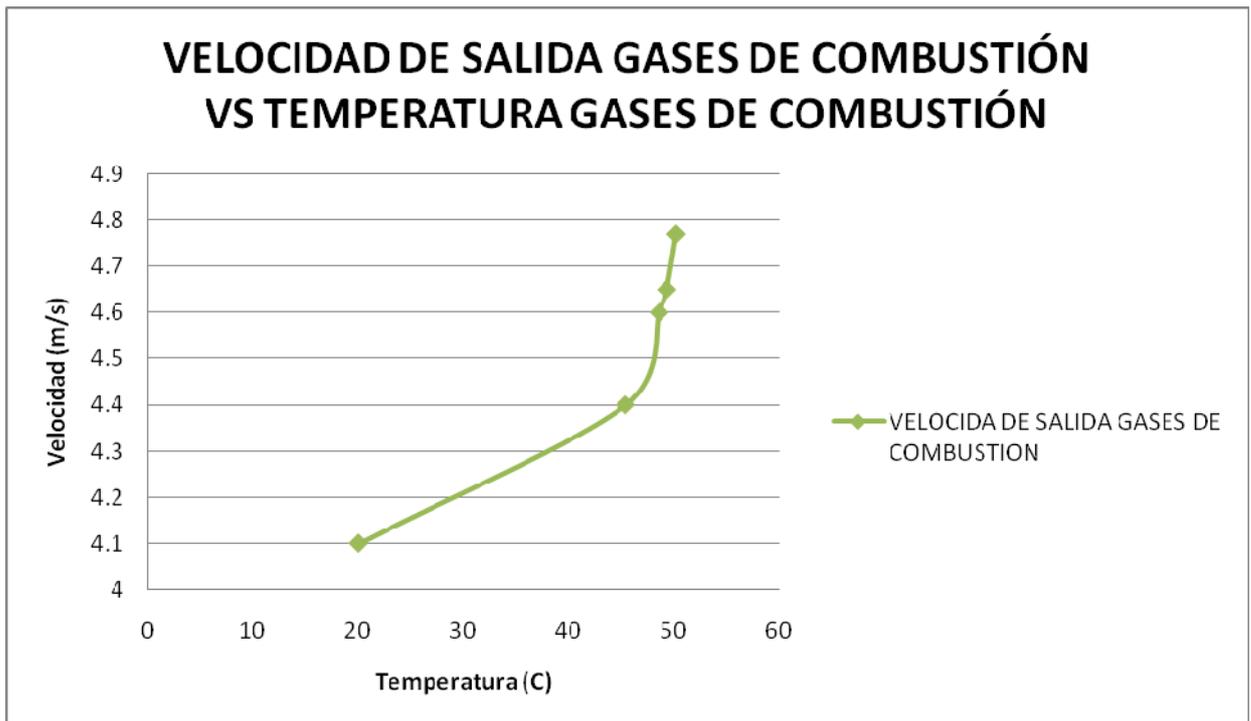
**Figura 6.14** Temperatura de salida de gases de combustión vs tiempo

Se puede observar que la velocidad de salida de los gases de combustión tiende a aumentar conforme aumenta el tiempo, como se puede observar en la figura 6.15.



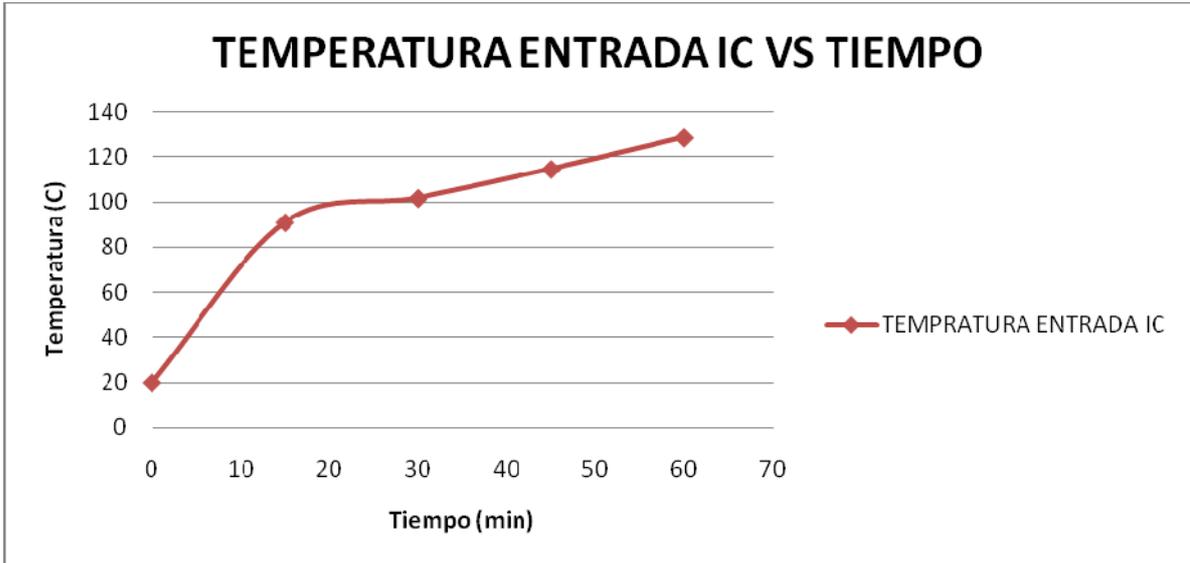
**Figura 6.15** Velocidad de salida de gases de combustión vs tiempo

Como se observa en la figura 6.16 se observa que la velocidad de salida de los gases de combustión tiene una relación proporcional a la temperatura de salida de los mismos, por lo que se puede decir que a medida de que aumente la temperatura de salida de los gases de combustión, también aumentará la velocidad de salida de los mismos.



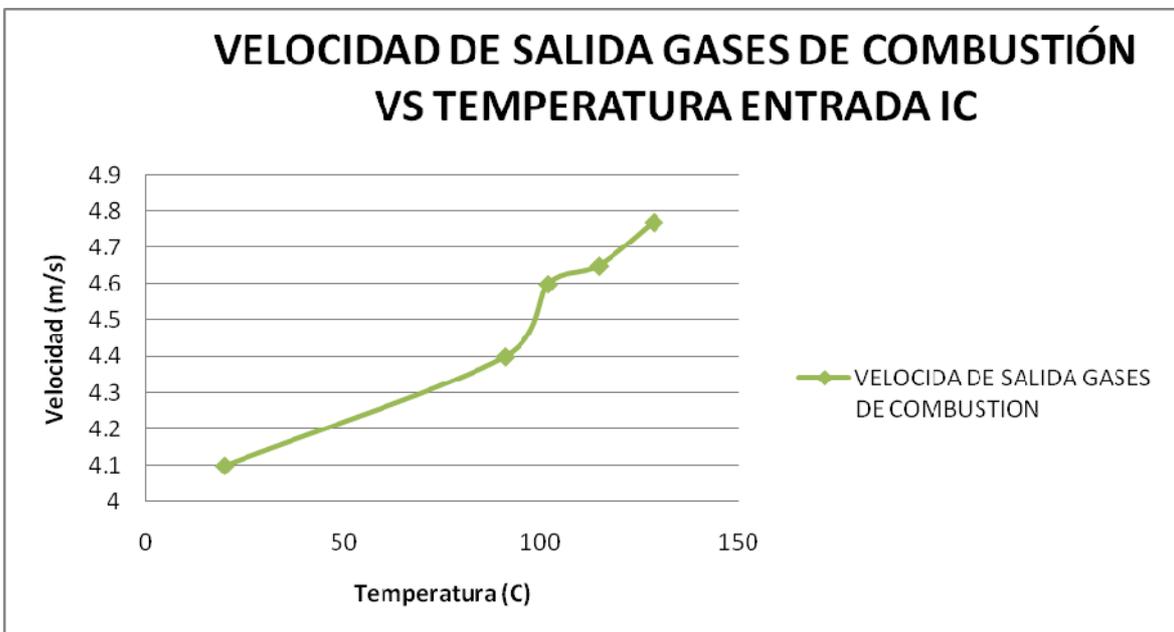
**Figura 6.16** Velocidad de salida gases de combustión vs Temperatura de gases de combustión

La temperatura de entrada a los intercambiadores de calor, como se observa en la figura 6.17, es proporcional al tiempo de combustión del proceso por lo que a medida que aumente el tiempo de combustión, la transferencia de calor del sistema de combustión tenderá a ir en aumento.



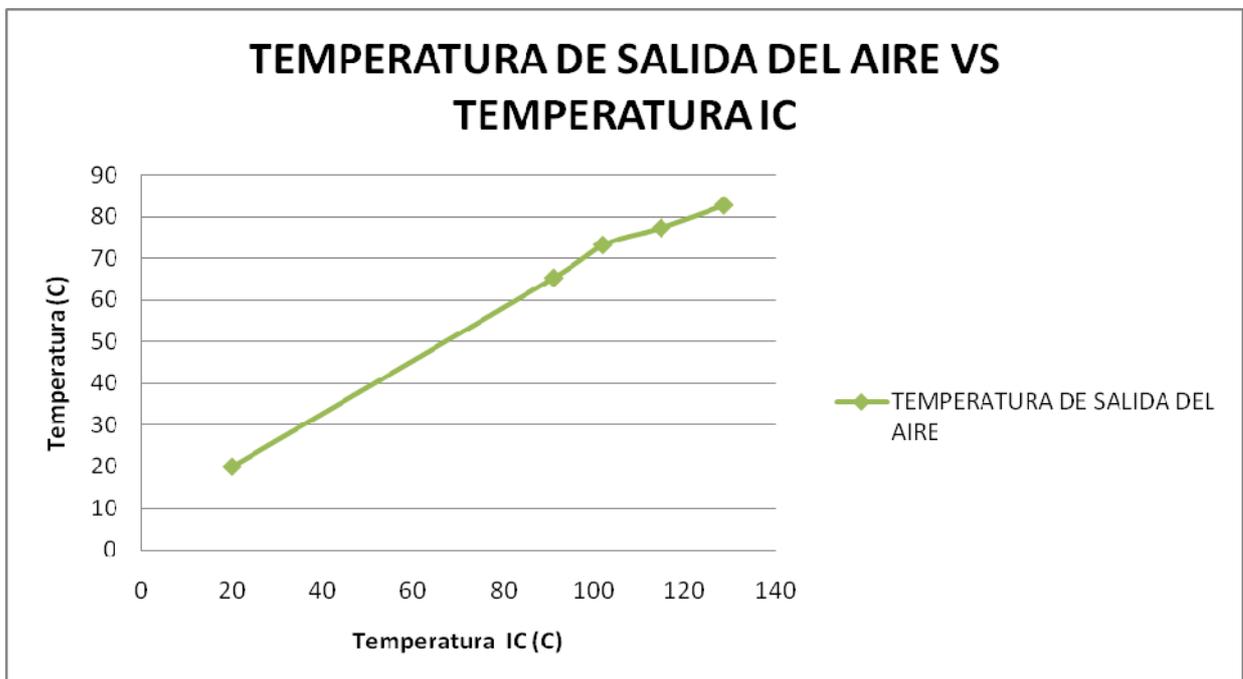
**Figura 6.17** Temperatura de entrada al intercambiador de calor vs tiempo

En la figura 6.18 se observa que la velocidad de salida de los gases de combustión, también es proporcional a la temperatura de entrada de los gases de combustión al sistema de intercambiadores de calor.



**Figura 6.18** Velocidad de salida gases de combustión vs temperatura de entrada al intercambiador de calor.

De la misma manera se puede observar en la figura 6.19 la proporcionalidad que existe entre la temperatura de salida del aire del subsistema de transferencia de energía con la temperatura de entrada de los gases de combustión al subsistema de transferencia de energía, lo cual es algo lógico que se dé ya que a mayor temperatura que ingrese al sistema de transferencia de energía, mayor será la tasa de transferencia de calor del equipo.



**Figura 6.19** Temperatura de salida del aire vs temperatura intercambiadores de calor



## CAPÍTULO 7

### ANÁLISIS EXERGÉTICO

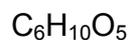
#### 7.1 DETERMINACIÓN DEL RENDIMIENTO ENERGÉTICO DEL EQUIPO

##### 7.1.1 BALANCE DE MASA

Para determinar el rendimiento energético del sistema de combustión de biomasa se debe empezar determinando el balance de masa en la combustión del sistema.

##### a) Balance de masa teórico.

Al realizar en el capítulo 6 el estudio de la materia prima que se usa en el sistema de combustión que en este caso se trata de cascarilla de arroz de determino que su fórmula es la siguiente:



El análisis se lo realiza primero de una manera teórica suponiendo que se realiza una combustión completa, donde no interviene ningún exceso de aire y los productos que se producen en la reacción son los que se esperan se produzcan en una reacción de manera teórica por lo que la ecuación balanceada queda de la siguiente manera:



Con la ecuación una vez balanceada se calcula los pesos molares de la biomasa y del aire para de la siguiente forma sacar la relación aire combustible.

$$PM_{O_2} := 32$$

$$PM_{C_6H_{10}O_5} := 162$$

$$PM_{N_2} := 28$$

$$KG_{aire} := 6 \cdot (PM_{O_2} + 3.76 \cdot PM_{N_2})$$

$$KG_{aire} = 823.68$$

$$KG_{biomasa} := 1 \cdot PM_{C_6H_{10}O_5}$$

$$KG_{biomasa} = 162 \quad \frac{Kg}{mol}$$

RELACION AIRE - COMBUSTIBLE

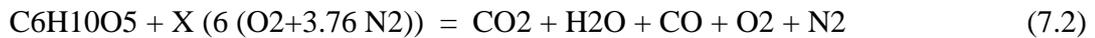
$$AC := \frac{KG_{aire}}{KG_{biomasa}}$$

$$AC = 5.08444$$

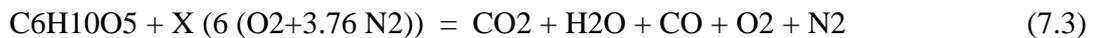
**b) Balance de masa real.**

El balance de masa teórico está basado en la composición de los gases de combustión la cual se obtuvo por medio del analizador de gases.

Con estos resultados se tiene que la combustión real presenta un 15% de exceso de aire, es una combustión completa pero por este exceso los resultados en el balance de la ecuación van a ser diferentes por lo que se tiene lo siguiente:



Se tiene como variables desconocidas el exceso de aire y la cantidad exacta de los productos:



De aquí se procede a calcular el exceso de aire X igualando la ecuación en ambos lados por lo que tenemos la ecuación igualada y el exceso de aire:



$$X := 1.15$$

Como se hizo en el balance de masa teórico se procede a calcular la relación aire combustible real por medio de los pesos moleculares de la ecuación balanceada.

$$\text{KGairereal} := 6 \cdot X \cdot (\text{PMO2} + 3.76 \cdot \text{PMN2})$$

$$\text{KGairereal} = 947.232$$

$$\text{KGbiomasareal} := 1 \cdot \text{PMC6H10O5}$$

$$\text{KGbiomasareal} = 162$$

## RELACION AIRE - COMBUSTIBLE REAL

$$\text{ACreal} := \frac{\text{KGairereal}}{\text{KGbiomasareal}}$$

$$\text{ACreal} = 5.84711$$

### 7.1.2 TEMPERATURA DE LLAMA ADIABÁTICA

Una vez realizado el balance de masa, se procede a calcular la temperatura de flama adiabática que es la temperatura en la que los productos alcanzan su máximo, es decir, que no existen pérdidas de calor en la cámara de combustión.<sup>17</sup>

Se calcula el calor máximo generado por unidad de mol proceso en el cual intervienen el peso molecular de la biomasa y su poder calórico<sup>18</sup>

$$\text{Pc} = 15412 \text{ KJ/Kg}$$

---

<sup>17</sup> YUNUS A. CENGEL, Termodinámica, Cuarta Edición, pág. 699.

<sup>18</sup> VALVERDE, Agustín, Comparative analysis of the Physicochemicals Characteristics of the rice husk.

Se calcula el calor adiabático multiplicando el poder calorífico de la cascarilla de arroz con el peso molecular teórico de la ecuación del balance de masa teórico de la siguiente manera:

$$Q_{ad} = P_c * P_{molecular} \quad (7.5)$$

$$Q_{ad} := P_c \cdot K G_{biomasa}$$

$$Q_{ad} = 2.49674 \times 10^9 \quad \frac{J}{mol}$$

$$T_{ad} := 15000 \quad K$$

Para el caso de la cascarilla de arroz la temperatura de flama adiabática es de 1440 K pero por un efecto de ayuda en los cálculos se asume como que la temperatura de flama adiabática es de 1500 K<sup>19</sup>.

$$T_{ad} = 1500 \quad K$$

### 7.1.3 CÁLCULO DEL CALOR GENERADO POR LA COMBUSTIÓN

El calor total generado por el sistema es el calor que se produce por la combustión de la biomasa. Para calcular el calor total del equipo de usa la siguiente expresión:

$$Q_{Tc} = P_c * \dot{m} \quad (7.6)$$

Donde:  $P_c$  = poder calorífico de la biomasa en J/Kg  
 $\dot{m}$  = flujo másico de la biomasa en Kg/s

---

<sup>19</sup> YUNUS A. CENGEL, Termodinámica, Cuarta Edición, pág. 195.

$$m_b := 0.016 \quad \frac{\text{kg}}{\text{s}}$$

$$Q_{Tc} := P_c \cdot m_b$$

$$Q_{Tc} = 2.46592 \times 10^5 \quad \text{W}$$

## 7.1.4 CÁLCULO DEL CALOR PERDIDO EN LA CÁMARA DE COMBUSTIÓN

### a) Coeficiente de convección externa

Primero proceder a calcular el coeficiente de convección de calor externo de la cámara de combustión para lo cual se usó la siguiente fórmula que relaciona el coeficiente de convección con la velocidad del aire en los alrededores<sup>20</sup>

$$h_c = 2.8 + 3 V_v \quad (7.7)$$

donde:  $h_c$  = coeficiente de convección de calor externo en  $\text{W}/\text{m}^2\text{K}$

$V_v$  = velocidad del viento en los alrededores en  $\text{m}/\text{s}$

$$V_{ve} := 0.81 \quad \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

$$h_{cce} := 2.8 + 3V_{ve}$$

$$h_{cce} = 5.23 \quad \frac{\text{W}}{\text{m}^2\text{K}}$$

---

<sup>20</sup> YUNUS A. CENGEL, Transferencia de Calor y Masa, Tercera Edición, pág. 357.

## b) Coeficiente de convección interna

Para el cálculo del coeficiente de convección interna de la cámara de combustión se empezó calculando el número de Reynolds mediante la siguiente expresión<sup>21</sup>:

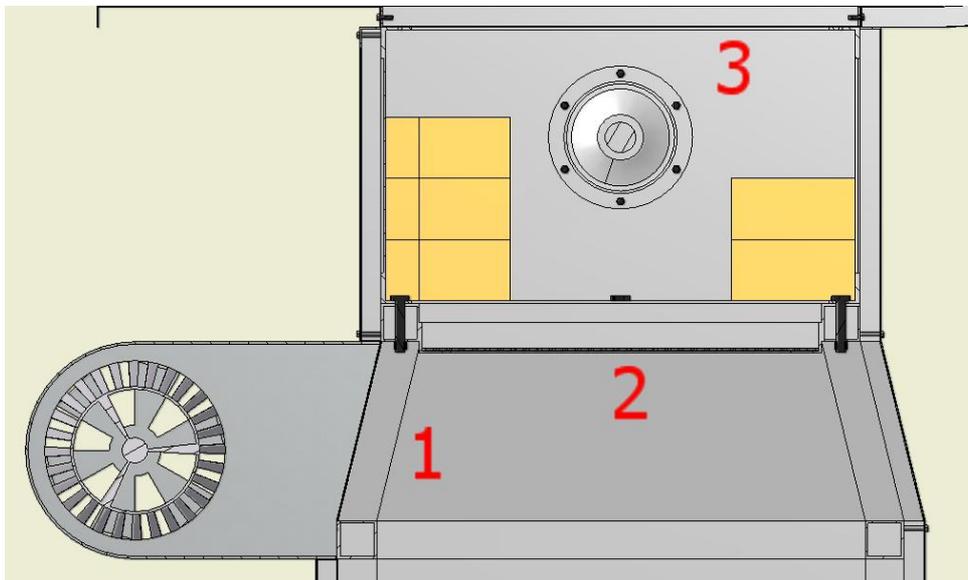
$$Re = \frac{V_g * L_c}{\nu_{cc}} \quad (7.8)$$

Donde:  $V_g$  = velocidad de los gases en la cámara de combustión en m/s.

$L_c$  = altura de la cámara de combustión en m.

$\nu_{cc}$  = viscosidad cinemática en m<sup>2</sup>/s.

Para el cálculo de la velocidad de los gases en la cámara de combustión se hace un análisis de mecánica de fluidos dentro del sistema de combustión en los puntos que se muestran en la figura 7.1.



**Figura 7.1** Análisis de mecánica de fluidos en la cámara de combustión.

<sup>21</sup> YUNUS A. CENGEL, Transferencia de Calor y Masa, Tercera Edición, pág. 366.

Se calcula la presión que existe en el punto 1 causada por la velocidad de entrada de aire por medio de la siguiente expresión:<sup>22</sup>

$$Hv = \frac{\gamma \cdot V^2}{2g} \quad (7.9)$$

Donde:  $\gamma$  = densidad específica del aire en Kg/m<sup>3</sup>.  
 Hv = presión producida por la velocidad del aire en Pa.  
 g = gravedad en m/s<sup>2</sup>.  
 V = velocidad del aire en m/s

$$\gamma_a := 0.97 \quad \frac{\text{Kg}}{\text{m}^3} \quad \text{densidad específica del aire a T ambiente}$$

$$g_r := 9.81 \quad \frac{\text{m}}{\text{s}^2}$$

$$V_{ac} := 5.3 \quad \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

$$Hv1 := \frac{\gamma_a \cdot V_{ac}^2}{2g_r}$$

$$Hv1 = 1.38875 \quad \text{Pa}$$

Entre los puntos 1 y 2 de la figura 7.1 existe una pérdida de presión que se calcula por medio de la siguiente expresión<sup>23</sup>.

$$Hl = C * Hv \quad (7.10)$$

<sup>22</sup> MOTT, Robert, Mecánica de Fluidos Aplicada, Cuarta Edición, Pág. 524.

<sup>23</sup> MOTT, Robert, Mecánica de Fluidos Aplicada, Cuarta Edición, Pág. 523.

Donde:  $H_L$  = Pérdida de presión en Pa  
 $C$  = coeficiente de pérdidas dinámicas.

En el caso de la entrada de aire a la cámara de combustión el coeficiente de pérdidas dinámicas  $C$  es igual a 0.18 debido a que se asimila a un codo liso rectangular de  $90^\circ$ . Este coeficiente se lo puede encontrar en el anexo B donde se encuentra varias tablas de propiedades y coeficientes.

$$C1 := 0.18$$

$$HL1 := C1 \cdot Hv1$$

$$HL1 = 0.24998 \quad \text{Pa}$$

Esta pérdida de presión la restamos a la presión en el punto uno y de esta manera se obtiene la presión en el punto 2 de la figura 7.1

$$Hv2 := Hv1 - HL1$$

$$Hv2 = 1.13878 \quad \text{Pa}$$

De la ecuación 7.9 se despeja la velocidad y con esta fórmula se calcula la velocidad en el punto 2 de la figura 7.1.

$$V = \sqrt{\frac{2 \cdot Hv + 2g}{\gamma}} \quad (7.11)$$

Donde:  $\gamma$  = densidad específica del aire en  $\text{Kg/m}^3$ .  
 $Hv$  = presión producida por la velocidad del aire en Pa.

$g$  = gravedad en  $\text{m/s}^2$ .

$V$  = velocidad del aire en  $\text{m/s}$

$$V2 := \sqrt{\frac{Hv2 \cdot 2 \cdot g}{\gamma_a}}$$

$$V2 = 4.79935 \quad \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

Proceder a calcular la pérdida de presión en la sección 2 – 3 de la figura 7.1 de la misma forma en que se calculó la pérdida de presión entre los puntos 1 y 2. En este caso el coeficiente de pérdidas dinámicas  $C$  va a tomar el valor de 0.52 ya que la rejilla de la cámara de combustión y la biomasa que está siendo quemada se asemejan a una estructura de amortiguación abierta  $10^0$  propiedad que se la puede comprobar en el anexo B.

$$C2 := 0.52$$

$$HL2 := C2 \cdot Hv2$$

$$HL2 = 0.59216 \quad \text{Pa}$$

Esta pérdida de presión se la resta a la presión en el punto 2 y de esta manera se obtiene la presión en el punto 3.

$$Hv3 := Hv2 - HL2$$

$$Hv3 = 0.54661 \quad \text{Pa}$$

Con esta presión ya se puede calcular la velocidad de los gases de combustión por medio de la ecuación 7.11.

$$V3 := \sqrt{\frac{Hv3 \cdot 2 \cdot gr}{\gamma a}}$$

$$V3 = 3.32509 \quad \frac{m}{s}$$

$$V_{egc} := V3$$

$$V_{egc} = 3.32509 \quad \frac{m}{s}$$

Como ya tenemos la velocidad de los gases de combustión se procede a calcular el número de Reynolds. Para esto mediante tablas de propiedades del anexo B se calculan las constantes de viscosidad cinemática y número de Prandtl a la temperatura de llama adiabática que es de 1500 K.

$$v_{cad} := 240 \quad \frac{m^2}{s}$$

$$Pr_{ad} := 0.685$$

viscosidad cinemática y número de Prandtl  
a la temperatura de llama adiabática  
1500 K

$$L_{cc} := 0.54 \quad m$$

$$Re_{cc} := \frac{V_{egc} \cdot L_{cc}}{v_{cad}}$$

$$Re_{cc} = 7.48145 \times 10^{-3}$$

Una vez calculado el número de Reynolds se procede a calcular el número de Nusselt por medio de la siguiente expresión.<sup>24</sup>

$$Nu = 0.664 Re^{1/2} Pr^{1/3} \quad (7.12)$$

Donde: Nu = número de Nusselt  
Re = número de Reynolds  
Pr = número de Prandtl

$$Nuc := 0.664 \cdot Recc^{\frac{1}{2}} \cdot Prad^{\frac{1}{3}}$$

$$Nuc = 0.05063$$

Con la siguiente expresión se realiza el cálculo del coeficiente de convección de calor interna<sup>25</sup>

$$h_{ci} = \frac{Nu \cdot K_{gc}}{L_c} \quad (7.13)$$

donde: h<sub>ci</sub> = coeficiente de convección interna en W/m<sup>2</sup>K  
K<sub>gc</sub> = coeficiente de conductividad térmica del aire en W/mK  
L<sub>c</sub> = altura de la cámara de combustión en m

---

<sup>24</sup> YUNUS A. CENGEL, Transferencia de Calor y Masa, Tercera Edición, pág. 366

<sup>25</sup> IBID 8ant.

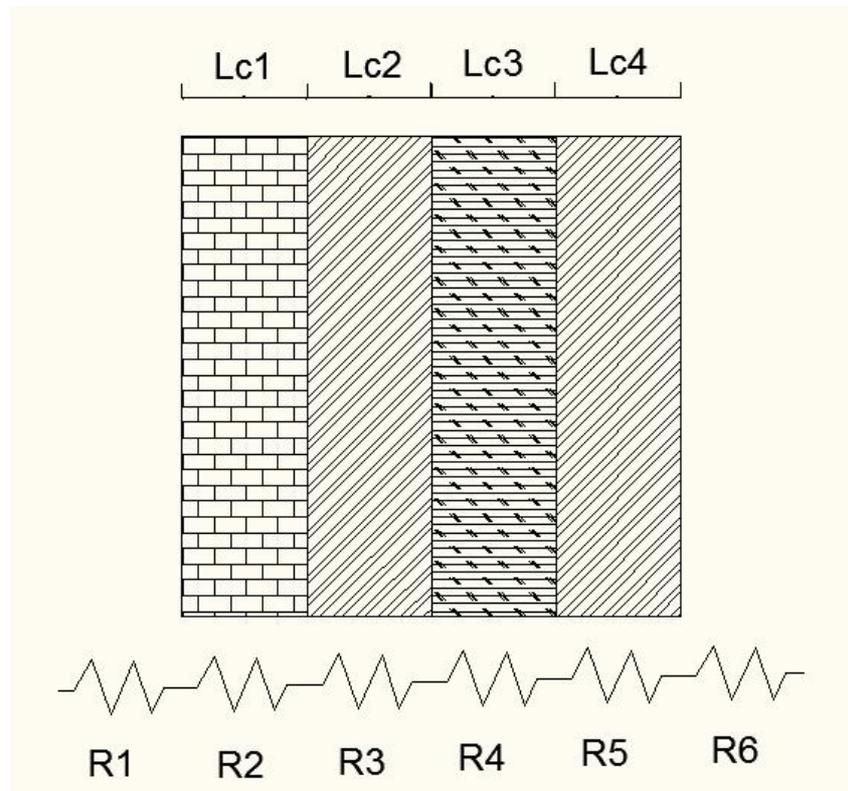
$$K_{gcad} := 100 \cdot 10^3 \quad \frac{W}{mK}$$

$$h_{cci} := \frac{Nuc \cdot K_{gcad}}{L_{cc}}$$

$$h_{cci} = 9.37557 \times 10^3 \quad \frac{W}{m^2K}$$

### c) Coeficiente global de transferencia de calor

Se hace la analogía eléctrica en las paredes de la cámara de combustión la cual queda de la siguiente manera.



**Figura 7.2** Analogía eléctrica de la transferencia de calor en la cámara de combustión.

R1 = resistencia por convección interna.

R2 = resistencia por conducción de calor del ladrillo refractario.

R3 = resistencia por conducción de calor del acero.

R4 = resistencia por conducción de calor de la lana de vidrio.

R5 = resistencia por conducción de calor del acero.

R6 = resistencia por convección externa.

Lc1 = espesor ladrillo refractario.

Lc2 = espesor tapa de acero de la cámara de combustión.

Lc3 = espesor de la lana de vidrio.

Lc4 = espesor de acero de la tapa de aislamiento térmico de la cámara de combustión.

En función de la analogía eléctrica el coeficiente global de transferencia de calor queda expresado de la siguiente manera<sup>26</sup>.

$$U = \frac{1}{\left(\frac{1}{h_{cci}}\right) + \left(\frac{Lc1}{K_{lr}}\right) + \left(\frac{Lc2}{K_{ac}}\right) + \left(\frac{Lc3}{K_{lv}}\right) + \left(\frac{Lc4}{K_{ac}}\right) + \left(\frac{1}{h_{cce}}\right)} \quad (7.14)$$

Donde: K<sub>lr</sub> = coeficiente de conductividad térmica del ladrillo refractario

K<sub>lv</sub> = coeficiente de conductividad térmica de la lana de vidrio.

K<sub>ac</sub> = coeficiente de conductividad térmica del acero.

Cada uno de estos coeficientes de conductividad térmica se los encuentra en el anexo B en las tablas de propiedades de los distintos materiales.

---

<sup>26</sup> YUNUS A. CENGEL, Transferencia de Calor y Masa, Tercera Edición, pág. 136

$$L_{c1} := 0.07 \quad \text{m}$$

$$L_{c2} := 0.005 \quad \text{m}$$

$$L_{c3} := 0.04 \quad \text{m}$$

$$L_{c4} := 0.001 \quad \text{m}$$

$$K_{ac} := 30 \quad \frac{\text{W}}{\text{mK}}$$

$$K_{lv} := 0.058 \quad \frac{\text{W}}{\text{mK}}$$

$$K_{lr} := 1.8 \quad \frac{\text{W}}{\text{mK}}$$

$$U_{cc} := \frac{1}{\frac{1}{h_{cci}} + \frac{L_{c1}}{K_{lr}} + \frac{L_{c2}}{K_{ac}} + \frac{L_{c3}}{K_{lv}} + \frac{L_{c4}}{K_{ac}} + \frac{1}{h_{cce}}}$$

$$U_{cc} = 1.08689 \quad \frac{\text{W}}{\text{m}^2\text{K}}$$

#### d) Pérdidas de calor en la cámara de combustión.

Una vez calculado el coeficiente global de transferencia de calor se calcula el calor que se pierde en la cámara de combustión.

$$Q = U * A * \Delta T \quad (7.15)$$

Donde: U = coeficiente global de transferencia de calor en W/m<sup>2</sup>K  
 A = área total de transferencia de calor en m<sup>2</sup>  
 $\Delta T$  = diferencia de la temperatura de la cámara de combustión y la temperatura ambiente en K.  
 Q = calor transferido al ambiente en W.

$$Acc := 1.24 \quad m^2$$

$$Ta := 293 \quad K$$

$$Tcc := 309 \quad K$$

$$Qpcc := Ucc \cdot Acc \cdot (Tcc - Ta)$$

$$Qpcc = 21.56392 \quad W$$

### 7.1.5 CÁLCULO DE LA TEMPERATURA TEÓRICA DE SALIDA DEL AIRE DEL SUBSISTEMA DE TRANSFERENCIA DE ENERGÍA.

Como está enunciado en el tema del proyecto, la capacidad del sistema de combustión de biomasa residual es de 250.000 Btu/h. Con esta capacidad podemos determinar la temperatura de salida de aire por medio de la siguiente expresión:<sup>27</sup>

$$Q = \dot{m}a(h2a - h1a) \quad (7.16)$$

Donde: Q = calor del sistema  
 $\dot{m}a$  = flujo másico de aire en el subsistema de transferencia de

---

<sup>27</sup> YUNUS A. CENGEL, Termodinámica, Cuarta Edición, pág. 122

energía

$h_{2a}$  = entalpía a la temperatura de salida del aire

$h_{1a}$  = entalpía a la temperatura de entrada del aire

Para calcular el flujo másico del aire se lo determina por medio de la siguiente fórmula:<sup>28</sup>

$$\dot{m} = \rho * A * V \quad (7.17)$$

Donde:  $\dot{m}$  = flujo másico de aire en el subsistema de transferencia de

Energía en kg/s

$\rho$  = densidad del aire en kg/m<sup>3</sup>

A = área por la cual ingresa el aire al subsistema de transferencia de energía en m<sup>2</sup>

V = velocidad de entrada del aire al subsistema de transferencia de Energía en m/s

$$A_{dea} := 0.234 \quad m^2$$

$$V_{ea} := 9.83 \quad \frac{m}{s}$$

$$\rho_{ae} := 1.2 \quad \frac{Kg}{m^3}$$

$$m_{ae} := \rho_{ae} \cdot A_{dea} \cdot V_{ea}$$

$$m_{ae} = 2.76026 \quad \frac{Kg}{s}$$

---

<sup>28</sup> MOTT, Robert, Mecánica de Fluidos Aplicada, Cuarta Edición, Pág. 498

Ya calculado el flujo másico de aire de subsistema de transferencia de energía se puede de la ecuación 7.16 despejar la entalpía de salida del aire del subsistema. Del anexo B se obtienen las propiedades del aire a las temperaturas que se necesitan para poder realizar el cálculo de la entalpía del aire de salida y con esta entalpía en las tablas del anexo B se determina la temperatura de salida del aire.

$$Q_{btu} := 250000 \quad \frac{\text{Btu}}{\text{h}}$$

$$Q_w := Q_{btu} \cdot 0.293071$$

$$Q_w = 7.32677 \times 10^4 \quad \text{W}$$

$$h_{1a} := 290160 \quad \frac{\text{J}}{\text{kg}} \quad \text{Entalpía del aire a temperatura ambiente}$$

$$h_{2a} := \frac{Q_{btu}}{m_{ae}} + h_{1a}$$

$$h_{2a} = 3.80731 \times 10^5 \quad \frac{\text{J}}{\text{Kg}}$$

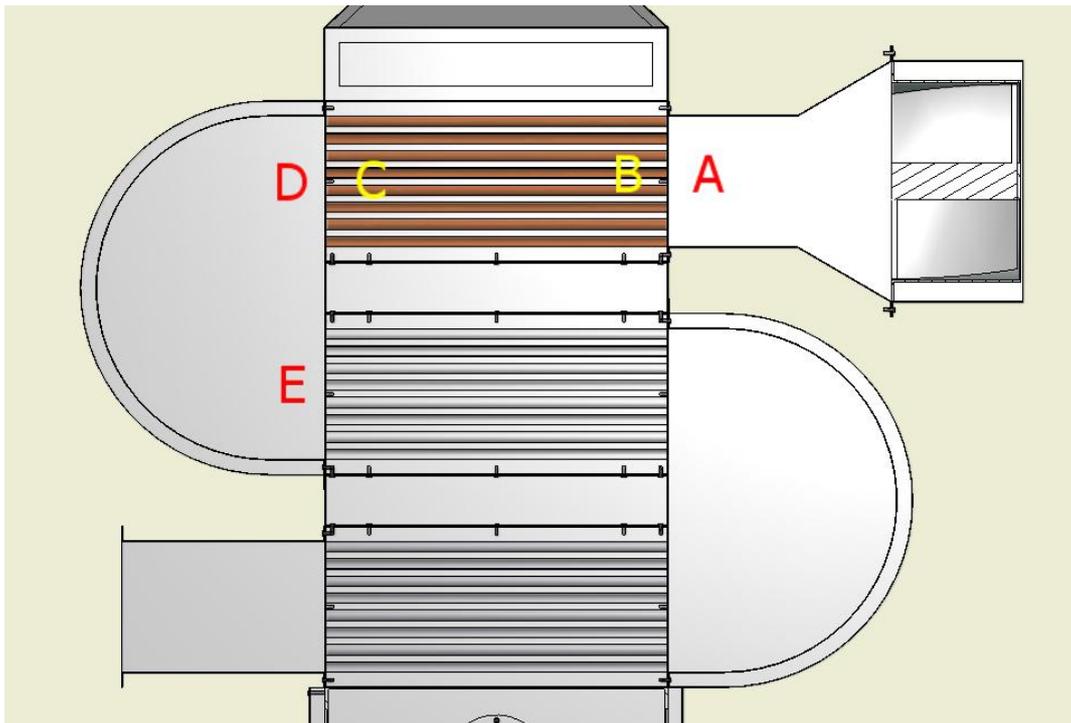
$$h_{2at} := \frac{h_{2a}}{1000}$$

$$h_{2at} = 380.73105 \quad \frac{\text{KJ}}{\text{Kg}}$$

$$T_{satr} := 380 \quad \text{K} \quad \text{Temperatura a la que le corresponde la entalpía de salida}$$

### 7.1.6 PÉRDIDAS DE PRESIÓN EN EL SUBSISTEMA DE TRANSFERENCIA DE ENERGÍA.

Por un análisis de mecánica de fluidos se determina las diferentes pérdidas de presión en el subsistema de transferencia de energía. Los diferentes tipos de pérdidas y los lugares para su análisis se indican a continuación en la figura 7.3.



**Figura 7.3** Análisis de pérdidas de presión en el subsistema de transferencia de energía

$H_{L\ A-B}$  = pérdidas de presión por contracción súbita.

$H_{L\ B-C}$  = pérdidas de presión por fricción en tuberías.

$H_{L\ C-D}$  = pérdidas de presión por expansión súbita

$H_{L\ D-E}$  = pérdidas de presión por ductos de rotación de aire.

### a) Pérdidas de presión por contracción súbita.

Al analizar los puntos A y B de la figura 7.3 se determina la primera caída de presión. Se asume que la entrada de aire a los intercambiadores de calor es una rejilla de alimentación de aire y se obtiene que la pérdida total de presión por contracción súbita sea de 17 Pa<sup>29</sup>

$$HL_{ab} := 17 \quad \text{Pa}$$

Como se trata de un sistema de intercambiadores de calor de 3 pasos, existen 3 pérdidas de este tipo por lo que la pérdida de presión total por contracciones súbitas son:

$$HL_{cs} := HL_{ab} \cdot 3$$

$$HL_{cs} = 51 \quad \text{Pa}$$

### b) Pérdidas de presión por fricción en tuberías.

Se determinan algunas propiedades de los tubos de los intercambiadores de calor como su diámetro interno y su longitud.

$$D_{it} := 0.026575 \quad \text{m}$$

$$L_t := 0.926 \quad \text{m}$$

---

<sup>29</sup> MOTT, Robert, Mecánica de Fluidos Aplicada, Cuarta Edición, Pág. 523

Se procede a realizar el cálculo del número de Reynolds por medio de la ecuación:

$$Re = \frac{V \cdot D_{it}}{\nu c} \quad (7.18)$$

Donde:  $V$  = velocidad del aire en el intercambiador de calor en m/s.

$D_{it}$  = diámetro interior del tubo en m.

$\nu c$  = viscosidad cinemática del aire en  $m^2/s$

$$V_{egc} = 3.32509 \quad \frac{m}{s}$$

$$\nu := 15.89 \cdot 10^{-6} \quad \frac{m^2}{s} \quad \text{viscosidad cinemática a temperatura de entrada del aire}$$

$$Re_t := \frac{V_{egc} \cdot D_{it}}{\nu}$$

$$Re_t = 5.561 \times 10^3$$

De acuerdo al anexo B donde se encuentran las tablas de propiedades, se puede observar la rugosidad del cobre y del acero, siendo la rugosidad para el acero, el carbono y para el acero inoxidable la misma, por lo que se tiene<sup>30</sup>:

$$\varepsilon_{cobre} := 1.5 \cdot 10^{-6} \quad m$$

$$\varepsilon_{acero} := 4.6 \cdot 10^{-5} \quad m$$

<sup>30</sup> MOTT, Robert, Mecánica de Fluidos Aplicada, Cuarta Edición, Pág. 240

Se hace el cálculo de los factores de fricción para la tubería de cobre y para el acero por medio de la siguiente expresión<sup>31</sup>:

$$f = \frac{0.25}{\left[ \log \left( \frac{1}{3.7 \left( \frac{D_i}{\varepsilon} \right)} + \frac{5.74}{Re^{0.9}} \right) \right]^2} \quad (7.19)$$

Donde:  $D_i$  = diámetro interior del tubo en m.

$\varepsilon$  = rugosidad del material en m.

Re = número de Reynolds.

$$f_{\text{cobre}} := \frac{0.25}{\left[ \log \left[ \frac{1}{3.7 \cdot \left( \frac{D_{it}}{\varepsilon_{\text{cobre}}} \right)} + \frac{5.74}{Re^{0.9}} \right] \right]^2}$$

$$f_{\text{cobre}} = 0.03673$$

$$f_{\text{acero}} := \frac{0.25}{\left[ \log \left[ \frac{1}{3.7 \cdot \left( \frac{D_{it}}{\varepsilon_{\text{acero}}} \right)} + \frac{5.74}{Re^{0.9}} \right] \right]^2}$$

$$f_{\text{acero}} = 0.03888$$

---

<sup>31</sup> MOTT, Robert, Mecánica de Fluidos Aplicada, Cuarta Edición, Pág. 238

Una vez calculados los factores de fricción, por medio de la siguiente fórmula<sup>32</sup> se calculan las pérdidas de presión provocadas por fricción en las tuberías:

$$HL = f * \frac{L * V^2}{Di * 2g} \quad (7.20)$$

Donde: L = longitud del tubo en m.  
V = velocidad del aire en las tuberías en m/s  
Di = Diámetro interno del tubo en m.  
g = gravedad.

$$H_{\text{cobre}} := f_{\text{cobre}} \frac{L_t \cdot V_{\text{ea}}^2}{D_{\text{it}} \cdot 2g}$$

$$H_{\text{cobre}} = 6.30274 \quad \text{m}$$

$$H_{\text{lacero}} := f_{\text{lacero}} \frac{L_t \cdot V_{\text{ea}}^2}{D_{\text{it}} \cdot 2g}$$

$$H_{\text{lacero}} = 6.67258 \quad \text{m}$$

Estos factores de pérdida de presión se los relaciona con la siguiente expresión para determinar la pérdida de presión por la fricción en las tuberías de los intercambiadores de calor.

$$HL = H_L * \rho * g \quad (7.21)$$

---

<sup>32</sup> MOTT, Robert, Mecánica de Fluidos Aplicada, Cuarta Edición, Pág. 239

Donde:  $Hl$  = factor de pérdidas de presión en m.

$\rho$  = densidad específica del aire a temperatura promedio en  $\text{Kg/m}^3$

$g$  = gravedad en  $\text{m/s}^2$

La densidad específica del aire se la calcula a una temperatura promedio a la que va a circular dentro de los intercambiadores de calor.

Como es un sistema de intercambiadores de calor de tres pasos, se calcula las pérdidas totales para el intercambiador de calor de cobre y para los intercambiadores de calor de acero.

$$H_{\text{tub}} := H_{\text{cobre}} + 2H_{\text{acero}}$$

$$H_{\text{tub}} = 19.6479 \quad \text{m}$$

$$\rho_{\text{atp}} := 0.995 \quad \frac{\text{Kg}}{\text{m}^3} \quad \text{densidad específica del aire a T promedio}$$

$$HL_{bc} := H_{\text{tub}} \cdot \rho_{\text{atp}} \cdot g$$

$$HL_{bc} = 191.78214 \quad \text{Pa}$$

### c) Pérdidas de presión por expansión súbita.

De acuerdo a la tabla<sup>33</sup> que se encuentra en el anexo B, se puede considerar la salida del aire del intercambiador de calor como una rejilla de salida de aire por lo que las pérdidas de presión por expansión son de 15 Pa.

---

<sup>33</sup> MOTT, Robert, Mecánica de Fluidos Aplicada, Cuarta Edición, Pág. 523

Así mismo como existen tres intercambiadores de calor, existen tres pérdidas de presión por expansión por lo que las pérdidas totales en el sistema por expansión súbita son:

$$HL_{cd} := 15 \quad Pa$$

$$HL_{es} := HL_{cd} \cdot 3$$

$$HL_{es} = 45 \quad Pa$$

#### **d) Pérdidas de presión por ductos de rotación de aire.**

Los ductos de rotación de aire se asemejan a una disposición de dos codos lisos redondos, por lo que se puede calcular el coeficiente de pérdidas dinámicas mediante las tablas del anexo B, obteniendo como resultado un coeficiente de pérdidas dinámicas de 0.22.

$$C_{dr} := 0.22$$

Se calcula la velocidad del viento que ingresa a los ductos circulares, para esto se calcula la presión de entrada del aire y se le resta a las pérdidas que existen hasta llegar al ducto de rotación de aire.

$$V_{ea1} := 30$$

$$H_{vea} := \frac{\rho_{ae} \cdot V_{ea1}^2}{2}$$

$$H_{vea} = 540 \quad Pa$$

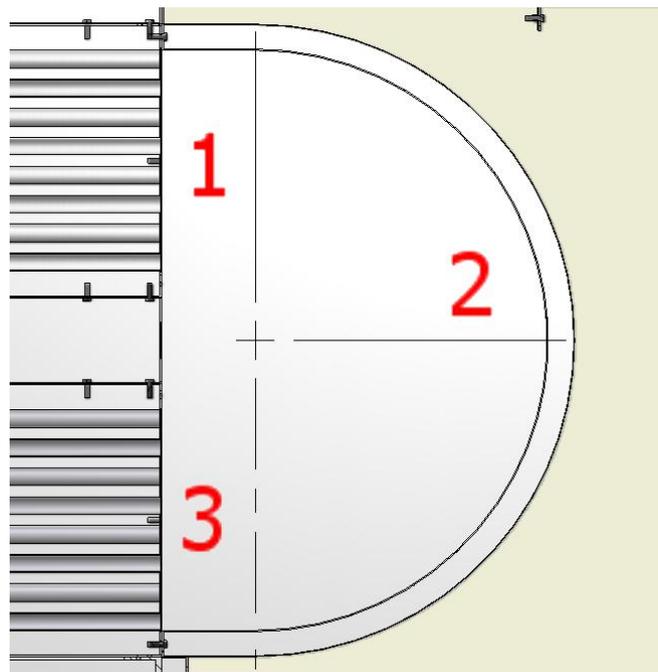
$$HL1t := \frac{HLbc}{3}$$

$$HL1t = 63.92738 \quad Pa$$

$$Hvdr := Hvea - HLab - HL1t - HLcd$$

$$Hvdr = 444.07262 \quad Pa$$

Una vez calculada la presión de entrada del aire al ducto de rotación, se calcula la pérdida de presión entre los puntos 1 y 3 de la figura 7.4 donde se indica la analogía de los ductos con los codos lisos de 90°.



**Figura 7.4** Analogía de un ducto de rotación de aire con dos codos circulares lisos de 90°.

Para calcular la pérdida de presión entre los puntos 1 y 3 se lo hace por medio de la expresión 7.10 anteriormente mencionada.

$$HL_{dr1} := H_{vdr} \cdot C_{dr}$$

$$HL_{dr1} = 97.69598 \quad Pa$$

$$HL_{dr2} := HL_{dr1} \cdot C_{dr}$$

$$HL_{dr2} = 21.49311 \quad Pa$$

$$HL_{dr3} := HL_{dr1} + HL_{dr2}$$

$$HL_{dr3} = 119.18909 \quad Pa$$

$$HL_{dr} := 2 \cdot HL_{dr3}$$

$$HL_{dr} = 238.37818 \quad Pa$$

#### e) Pérdidas de presión totales en el subsistema de transferencia de energía

Las pérdidas totales de presión en el subsistema de transferencia de energía vienen dadas por todas las pérdidas anteriormente analizadas por lo que se tiene:

$$HLT := HL_{cs} + HL_{bc} + HL_{es} + HL_{dr}$$

$$HLT = 526.16032 \quad Pa$$

### 7.1.7 CÁLCULO DE LA PRESIÓN Y VELOCIDAD TEÓRICA DE SALIDA DEL AIRE DEL SUBSISTEMA DE TRANSFERENCIA DE ENERGÍA

Como se tienen calculadas la presión de entrada y las pérdidas de presión producidas en el subsistema de transferencia de energía, la presión de salida resulta de restarle a la presión de entrada al subsistema todas las pérdidas de presión que se dan dentro del subsistema por lo que se tiene:

$$H_{sal} := H_{vea} - HLT$$

$$H_{sal} = 13.83968 \quad Pa$$

Una vez calculada esta presión, por medio de la expresión 7.11 se procede a calcular la velocidad de salida del subsistema de transferencia de energía.

$$V_{sal} := \sqrt{\frac{H_{sal} \cdot 2}{\rho_{ae}}}$$

$$V_{sal} = 4.80272 \quad \frac{m}{s}$$

### 7.1.8 CÁLCULO DE LA PRESIÓN Y VELOCIDAD REAL DE SALIDA DEL AIRE DEL SUBSISTEMA DE TRANSFERENCIA DE ENERGÍA

El cálculo de la velocidad real de salida del subsistema de transferencia de energía se la hace midiendo con un anemómetro la velocidad de salida, para lo cual realizamos 10 tomas de la velocidad de salida dentro del sistema, sin que se

realice ninguna combustión de biomasa en el equipo, y se saca un promedio de velocidades para obtener la velocidad de salida del aire.

**Tabla 7.1** Promedio de velocidad de salida

#	Velocidad de salida
	m/s
1	2,88
2	2,99
3	2,89
4	2,91
5	2,83
6	3,2
7	2,96
8	2,87
9	2,98
10	2,90
<b>Velocidad promedio</b>	2,91

Una vez obtenida la velocidad de salida real, por medio de la ecuación 7.9 se realiza el cálculo de la presión de salida real.

$$V_{\text{salr}} := 2.91 \quad \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

$$H_{\text{salr}} := \frac{\rho_{\text{ae}} \cdot V_{\text{salr}}^2}{2}$$

$$H_{\text{salr}} = 5.08086 \quad \text{Pa}$$

## 7.1.9 TRANSFERENCIA DE CALOR EN EL SUBSISTEMA DE TRANSFERENCIA DE ENERGÍA

Como se trata de un sistema con tres tipos distintos de intercambiadores de calor con respecto a su material de fabricación, el análisis que se realizará a continuación se lo va a hacer para cada intercambiador de calor por separado.

### a) Coeficiente de convección interna del tubo.

Primero se calcula la velocidad del aire dentro de cada uno de los intercambiadores de calor por medio de las pérdidas de presión dentro del subsistema de transferencia de energía y la ecuación 7.11 que relaciona presión del aire con la velocidad de flujo dentro de la tubería.

$$P_{\text{cobre}} := H_{\text{vea}} - H_{\text{Lab}}$$

$$P_{\text{cobre}} = 523 \quad \text{Pa}$$

$$V_{\text{cobre}} := \sqrt{\frac{P_{\text{cobre}} \cdot 2}{\rho_{\text{ae}}}}$$

$$V_{\text{cobre}} = 29.524 \quad \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

$$P_{\text{inox}} := P_{\text{cobre}} - HL_{1t} - HL_{cd} - HL_{dr3} - HL_{ab}$$

$$P_{\text{inox}} = 307.88353 \quad \text{Pa}$$

$$V_{\text{inox}} := \sqrt{\frac{P_{\text{inox}} \cdot 2}{\rho_{\text{ae}}}}$$

$$V_{\text{inox}} = 22.65258 \quad \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

$$P_{\text{carb}} := P_{\text{inox}} - HL_{1t} - HL_{cd} - HL_{dr3} - HL_{ab}$$

$$P_{\text{carb}} = 92.76706 \quad \text{Pa}$$

$$V_{\text{carb}} := \sqrt{\frac{P_{\text{carb}} \cdot 2}{\rho_{\text{ae}}}}$$

$$V_{\text{carb}} = 12.4343 \quad \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

Se procede a calcular el número de Reynolds por medio de la expresión 7.18 para a cada uno de los tres intercambiadores de calor.

$$\text{Recobre} := \frac{V_{\text{cobre}} \cdot D_{\text{it}}}{\nu}$$

$$\text{Recobre} = 4.9377 \times 10^4$$

$$\text{Reinox} := \frac{V_{\text{inox}} \cdot D_{\text{it}}}{\nu}$$

$$\text{Reinox} = 3.7885 \times 10^4$$

$$\text{Recarb} := \frac{V_{\text{carb}} \cdot D_{\text{it}}}{\nu}$$

$$\text{Recarb} = 2.07956 \times 10^4$$

Una vez calculados los diferentes números de Reynolds, se determina el número de Prandtl a una temperatura promedio por medio de las tablas del anexo B y se calcula el número de Nusselt por medio de la siguiente expresión<sup>34</sup>:

$$Nu = 0.027 * Re^{4/5} * Pr^{1/3} * \left( \frac{\mu}{\mu_s} \right)^{0.4} \quad (7.22)$$

Donde: Re = número de Reynolds de los intercambiadores de calor.

Pr = número de Prandtl a temperatura promedio.

$\mu$  = viscosidad cinemática a temperatura ambiente.

$\mu_s$  = viscosidad cinemática a la máxima temperatura.

Nu = número de Nusselt.

---

<sup>34</sup> YUNUS A. CENGEL, Transferencia de Calor y Masa, Tercera Edición, pág. 470

$$\text{Pratp} := 0.7$$

numero de Prandtl del aire a T promedio

$$u := 20.92 \cdot 10^6 \quad \frac{\text{m}^2}{\text{s}}$$

$$u_s := 32.39 \cdot 10^6 \quad \frac{\text{m}^2}{\text{s}}$$

$$\text{Nucobre} := 0.027 \cdot \text{Recobre}^{\frac{4}{5}} \cdot \text{Pratp}^{\frac{1}{3}} \cdot \left( \frac{u}{u_s} \right)^{0.4}$$

$$\text{Nucobre} = 114.44841$$

$$\text{Nuinox} := 0.027 \cdot \text{Reinox}^{\frac{4}{5}} \cdot \text{Pratp}^{\frac{1}{3}} \cdot \left( \frac{u}{u_s} \right)^{0.4}$$

$$\text{Nuinox} = 92.58991$$

$$\text{Nucarb} := 0.027 \cdot \text{Recarb}^{\frac{4}{5}} \cdot \text{Pratp}^{\frac{1}{3}} \cdot \left( \frac{u}{u_s} \right)^{0.4}$$

$$\text{Nucarb} = 57.30158$$

Una vez calculados los números de Nusselt se procede a calcular los coeficientes de convección interna de los diferentes intercambiadores de calor por medio de la ecuación 7.13.

$$K_{atp} := 30 \cdot 10^3 \frac{W}{mK} \quad \text{coeficiente de conductividad del aire a T promedio}$$

$$h_{cobre} := \frac{Nu_{cobre} \cdot K_{atp}}{D_{it}}$$

$$h_{cobre} = 1.29199 \times 10^8 \frac{W}{m^2 K}$$

$$h_{inox} := \frac{Nu_{inox} \cdot K_{atp}}{D_{it}}$$

$$h_{inox} = 1.04523 \times 10^8 \frac{W}{m^2 K}$$

$$h_{carb} := \frac{Nu_{carb} \cdot K_{atp}}{D_{it}}$$

$$h_{carb} = 6.46866 \times 10^7 \frac{W}{m^2 K}$$

## b) Coeficiente de convección externa

Para realizar el cálculo del coeficiente de convección externa del subsistema de transferencia de energía primero se tiene que analizar los gases de combustión que pasan entre los intercambiadores de calor.

Primero se calcula la velocidad promedio de los gases de combustión a través de los tubos de los intercambiadores de calor.

Se parte de la velocidad de salida de los gases de la cámara de combustión que se calculó anteriormente  $V_{gc}$  y se calcula la velocidad con la que los gases pasan por el espacio libre entre los tubos.

Por medio de la siguiente expresión<sup>35</sup> se calcula la velocidad entre tubos para la primera fila de tubos.

$$\bar{V} = \frac{V_{gc} \cdot St}{St - \frac{\pi}{4} \cdot Det} \quad (7.23)$$

Donde:  $\bar{V}$  = velocidad promedio de los gases de combustión.

$St$  = distancia entre centros de los tubos en m.

$Det$  = diámetro externo de los tubos en m.

$$St := 0.042 \quad \text{m}$$

$$\pi = 3.14159$$

$$Det := 0.028575 \quad \text{m}$$

$$V_{pgc} := \frac{V_{gc} \cdot St}{St - \frac{\pi}{4} \cdot Det}$$

$$V_{pgc} = 7.14077 \quad \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

---

<sup>35</sup> MILLS, Anthony, Transferencia de Calor, Editorial McGraw Hill, pág. 238.

Se determina a continuación la viscosidad cinemática y el número de Prandtl para la temperatura de los gases de combustión en la primera fila de tubos por medio de las tablas del anexo B.

$$Pr_{gc} := 0.69$$

$$\nu_{gc} := 31.40 \cdot 10^{-6} \frac{\text{m}^2}{\text{s}}$$

Se calcula el número de Reynolds para la primera fila de tubos por medio de la ecuación 7.18.

$$Re_1 := \frac{V_{pgc} \cdot D_{et}}{\nu_{gc}}$$

$$Re_1 = 6.49833 \times 10^3$$

A continuación se calcula el número de Nusselt por medio de la siguiente expresión<sup>36</sup> para una disposición de tubos como la de los intercambiadores de calor:

$$Nu = 0.3 + \frac{0.62 \cdot Re^{1/2} \cdot Pr^{1/2}}{\left[1 + \left(\frac{0.4}{Pr}\right)^{2/3}\right]^{1/4}} * \left[1 + \left(\frac{Re}{282000}\right)^{1/2}\right] \quad (7.24)$$

---

<sup>36</sup> MILLS, Anthony, Transferencia de Calor, Editorial McGraw Hill, pág. 298.

$$N_{ugc} := 0.3 + \frac{0.62 \operatorname{Re}_1^{\frac{1}{2}} \cdot \operatorname{Pr}_{gc}^{\frac{1}{3}}}{1} \left[ 1 + \left( \frac{\operatorname{Re}_1}{282000} \right)^{\frac{1}{2}} \right] \left[ 1 + \left( \frac{0.4}{\operatorname{Pr}_{gc}} \right)^{\frac{2}{3}} \right]^{\frac{1}{4}}$$

$$N_{ugc} = 44.88048$$

Este número de Nusselt se aplica solamente para la primera fila de tubos y el subsistema de transferencia de energía posee 3 intercambiadores de calor con 8 filas de tubos por intercambiador en una disposición alternada por lo que para determinar el número de Nusselt para todo el sistema se debe calcular un factor de corrección que se lo obtiene de la siguiente manera:

$$FC = 1 + \frac{2}{3Pt} \quad (7.25)$$

Donde: FC = factor de corrección

$$Pt = St / Det$$

$$Pt := \frac{St}{Det}$$

$$Pt = 1.46982$$

$$FC := 1 + \frac{2}{3Pt}$$

$$FC = 1.45357$$

$$\text{NuT} := \text{Nugc} \cdot \text{FC}$$

$$\text{NuT} = 65.23699$$

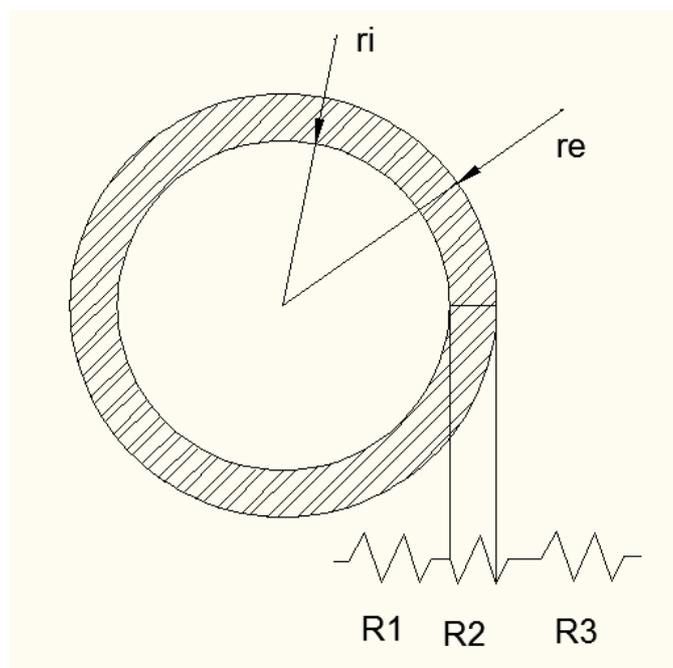
Se procede a calcular el coeficiente de convección externo con este número de Nusselt corregido por medio de la expresión 7.13.

$$\text{hex} := \frac{\text{NuT} \cdot \text{Katp}}{\text{Det}}$$

$$\text{hex} = 6.84903 \times 10^7 \quad \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \text{K}}$$

### c) Coeficiente global de transferencia de calor

Para el cálculo del coeficiente global de transferencia de calor, se hace la analogía eléctrica de transferencia de calor como se muestra en la figura 7.5



**Figura 7.5** Analogía eléctrica en los intercambiadores de calor

R1 = resistencia por convección interna.

R2 = resistencia por conducción de calor. (Cobre, acero inoxidable y acero al carbono.)

R3 = resistencia por convección externa.

ri = radio interno del tubo en m.

re = radio externo del tubo en m.

Para calcular el coeficiente global de transferencia de calor en tubos, se usa la siguiente ecuación<sup>37</sup>:

$$U = \frac{1}{\frac{r_e}{r_i h_i} + \frac{r_e \ln(r_e/r_i)}{K} + \frac{1}{h_e}} \quad (7.26)$$

Donde: hi = coeficiente de convección interna.

he = coeficiente de convección externa.

K = coeficiente de conductividad térmica de cada material.

Se calcula el coeficiente global de transferencia de calor para cada intercambiador.

$$r_i := \frac{D_{it}}{2}$$

$$r_i = 0.01329 \text{ m}$$

$$r_e := \frac{D_{et}}{2}$$

$$r_e = 0.01429 \text{ m}$$

---

<sup>37</sup> INCROPERA, Frank, Fundamentos de Transferencia de Calor, pág. 93.

$$K_{\text{carb}} := 56.7 \quad \frac{\text{W}}{\text{mK}}$$

$$K_{\text{inox}} := 15.2 \quad \frac{\text{W}}{\text{mK}}$$

$$K_{\text{cobre}} := 393 \quad \frac{\text{W}}{\text{mK}}$$

$$U_{\text{cobre}} := \frac{1}{\frac{r_e}{r_i \cdot h_{\text{cobre}}} + \frac{r_e \cdot \ln\left(\frac{r_e}{r_i}\right)}{K_{\text{cobre}}} + \frac{1}{h_{\text{ext}}}}$$

$$U_{\text{cobre}} = 3.75815 \times 10^5 \quad \frac{\text{W}}{\text{m}^2\text{K}}$$

$$U_{\text{inox}} := \frac{1}{\frac{r_e}{r_i \cdot h_{\text{inox}}} + \frac{r_e \cdot \ln\left(\frac{r_e}{r_i}\right)}{K_{\text{inox}}} + \frac{1}{h_{\text{ext}}}}$$

$$U_{\text{inox}} = 1.46563 \times 10^4 \quad \frac{\text{W}}{\text{m}^2\text{K}}$$

$$U_{\text{carb}} := \frac{1}{\frac{r_e}{r_i \cdot h_{\text{carb}}} + \frac{r_e \cdot \ln\left(\frac{r_e}{r_i}\right)}{K_{\text{carb}}} + \frac{1}{h_{\text{ex}}}}$$

$$U_{\text{carb}} = 5.45985 \times 10^4 \quad \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \text{K}}$$

**d) Calor transferido en el subsistema de transferencia de energía.**

Para calcular el calor transferido se parte de la siguiente expresión<sup>38</sup>:

$$Q = F * U * A * \Delta T_m \quad (7.27)$$

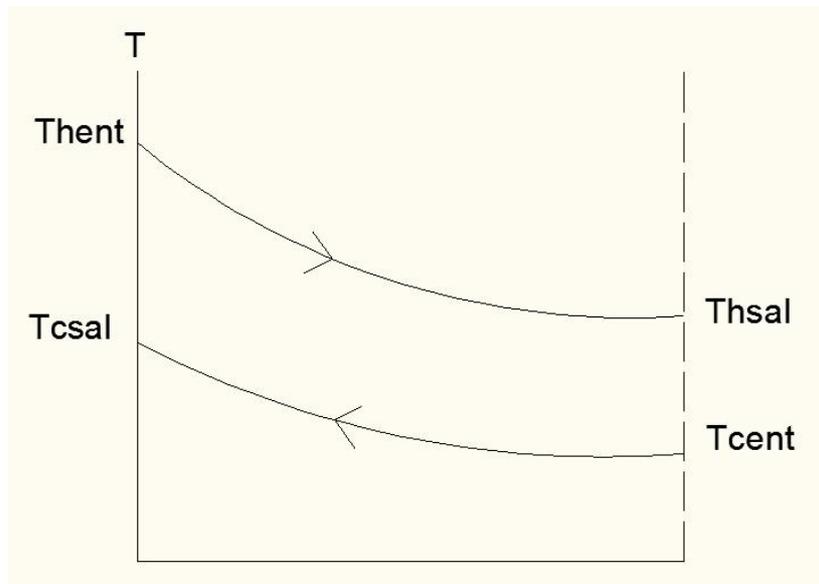
Donde: Q = calor transferido  
A = área de transferencia de calor en m<sup>2</sup>.  
 $\Delta T_m$  = Temperatura media logarítmica.  
F = factor de corrección.

Como se trata de un sistema de intercambiadores de calor de tres pasos el factor de corrección es igual a 0.95<sup>39</sup>.

Se realiza a continuación el análisis de la temperatura media logarítmica para un sistema a contra-flujo como se indica en la figura 7.6.

<sup>38</sup> YUNUS A. CENGEL, Transferencia de Calor y Masa, Tercera Edición, pág. 622

<sup>39</sup> YUNUS A. CENGEL, Transferencia de Calor y Masa, Tercera Edición, pág. 626



**Figura 7.6** Temperatura media logarítmica para un sistema a contra-flujo

$T_{hent}$  = temperatura gases de combustión de entrada.

$T_{hsal}$  = temperatura de gases de combustión de salida.

$T_{cent}$  = temperatura de aire de entrada.

$T_{csal}$  = temperatura de aire de salida.

A continuación se calculan los diferenciales de temperatura para un sistema a contra-flujo y se proceden a calcular la temperatura media logarítmica:<sup>40</sup>

$$T_{hent} := 402 \quad \text{K}$$

$$T_{hsal} := 323.2 \quad \text{K}$$

$$T_{cent} := 293 \quad \text{K}$$

$$T_{csal} := 355.6 \quad \text{K}$$

<sup>40</sup> YUNUS A. CENGEL, Transferencia de Calor y Masa, Tercera Edición, pág. 625.

$$\Delta T1 := T_{\text{hent}} - T_{\text{csal}}$$

$$\Delta T1 = 46.4 \quad \text{K}$$

$$\Delta T2 := T_{\text{hsal}} - T_{\text{cent}}$$

$$\Delta T2 = 30.2 \quad \text{K}$$

$$\Delta T_m := \frac{\Delta T1 - \Delta T2}{\ln\left(\frac{\Delta T1}{\Delta T2}\right)}$$

$$\Delta T_m = 37.72201 \quad \text{K}$$

El área de transferencia de calor queda determinada por el número de tubos de la siguiente manera:

$$A = Nt * Lt * \pi * Det \quad (7.28)$$

Donde:  $Nt$  = número de tubos.  
 $Lt$  = longitud del tubo en m.  
 $Det$  = diámetro exterior del tubo en m.

$$Lt = 0.926 \quad \text{m}$$

$$Det = 0.02857 \quad \text{m}$$

$$Nt := 124$$

$$\text{Area} := Nt \cdot Lt \cdot \pi \cdot Det$$

$$\text{Area} = 10.30787 \quad \text{m}^2$$

Se calcula el calor transferido para cada uno de los intercambiadores de calor.

$$FCq := 0.95$$

$$Q_{\text{cobre}} := FCq \cdot U_{\text{cobre}} \cdot \text{Area} \cdot \Delta Tm$$

$$Q_{\text{cobre}} = 1.38823 \times 10^8 \quad \text{W}$$

$$Q_{\text{inox}} := FCq \cdot U_{\text{inox}} \cdot \text{Area} \cdot \Delta Tm$$

$$Q_{\text{inox}} = 5.41391 \times 10^6 \quad \text{W}$$

$$Q_{\text{carb}} := FCq \cdot U_{\text{carb}} \cdot \text{Area} \cdot \Delta Tm$$

$$Q_{\text{carb}} = 2.01682 \times 10^7 \quad \text{W}$$

Se obtiene el calor total transferido sumando los calores de cada uno de los intercambiadores de calor.

$$QT := Q_{\text{cobre}} + Q_{\text{inox}} + Q_{\text{carb}}$$

$$QT = 1.64405 \times 10^8 \quad \text{W}$$

## 7.1.10 PÉRDIDAS DE CALOR EN LAS PAREDES DEL SUBSISTEMA DE TRANSFERENCIA DE ENERGÍA.

### a) Coeficiente de convección externa.

Al tratarse del aire externo al sistema de combustión, el coeficiente de convección externo será el mismo que se calculó para la cámara de combustión.

$$h_{cce} = 5.23 \quad \frac{\text{W}}{\text{m}^2\text{K}}$$

### b) Coeficiente de convección interna.

El proceso de cálculo para el coeficiente de convección interna es el mismo que se aplicó para la cámara de combustión. Se empieza calculando el número de Reynolds por medio de la ecuación 7.8

$$L_p := 1.6 \quad \text{m}$$

$$v_{gc} = 3.14 \times 10^{-5}$$

$$\text{Retl} := \frac{v_{pgc} \cdot L_p}{v_{gc}}$$

$$\text{Retl} = 3.63861 \times 10^5$$

Por medio de las tablas el anexo B, se determina el número de Prandtl a una temperatura promedio y se procede a calcular el número de Nusselt por medio de la siguiente expresión<sup>41</sup>:

$$Nu = (0.037 * Re^{4/5} - 871) * Pr^{1/3} \quad (7.29)$$

$$Pr_t := 0.686$$

$$Nu_t := \left( 0.037 \cdot Re_t^{\frac{4}{5}} - 871 \right) \cdot Pr_t^{\frac{1}{3}}$$

$$Nu_t = 148.8726$$

Una vez calculado el número de Nusselt, se calcula el coeficiente de convección interno.

$$K_{gc} := 0.037$$

$$h_{c,i} := \frac{Nu_t \cdot K_{gc}}{L_p}$$

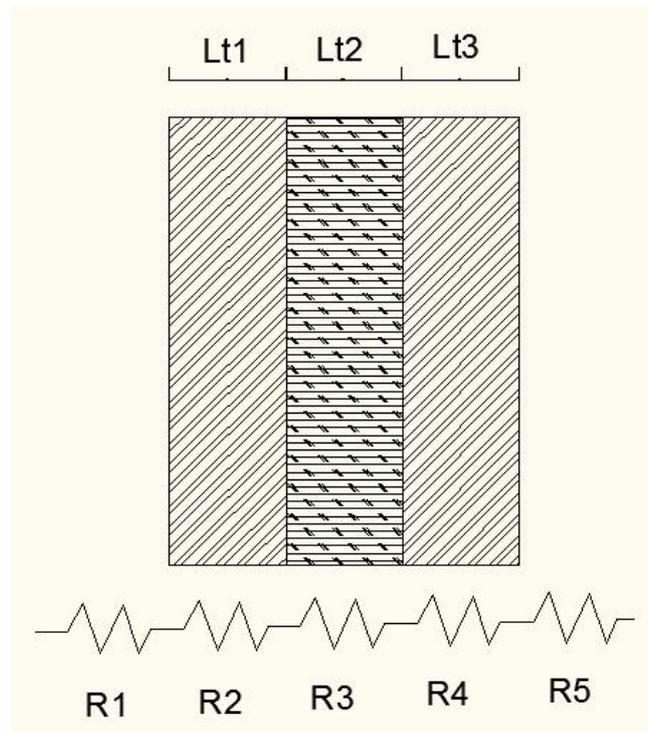
$$h_{c,i} = 3.44268 \quad \frac{W}{m^2 K}$$

---

<sup>41</sup> INCROPERA, Frank, Fundamentos de Transferencia de Calor, pág. 394 – 395.

**c) Coeficiente global de transferencia de calor.**

Se realiza la analogía eléctrica como se presenta en la figura 7.7.



**Figura 7.7** Analogía eléctrica de las tapas laterales de aislamiento térmico

R1 = resistencia por convección interna.

R2 = resistencia por conducción de calor del acero.

R3 = resistencia por conducción de calor de la lana de vidrio.

R4 = resistencia por conducción de calor del acero.

R5 = resistencia por convección externa.

Lt1 = espesor tapa de acero del intercambiador de calor.

Lt2 = espesor de la lana de vidrio.

Lt3 = espesor de acero de la tapa de aislamiento térmico lateral.

$$Lt1 := 0.005 \quad \text{m}$$

$$Lt2 := 0.04 \quad \text{m}$$

$$Lt3 := 0.001 \quad \text{m}$$

$$Utl := \frac{1}{\frac{1}{hcitl} + \frac{Lt1}{Kac} + \frac{Lt2}{Klv} + \frac{Lt3}{Kac} + \frac{1}{hcce}}$$

$$Utl = 0.85358 \quad \frac{\text{W}}{\text{m}^2\text{K}}$$

**d) Calor perdido por las tapas de aislamiento térmico laterales.**

Por medio de la ecuación 7.15 se determina el calor perdido en las tapas de aislamiento térmico laterales.

$$Atls := 2.98 \quad \text{m}^2$$

$$Ta = 293 \quad \text{K}$$

$$Ttl := 308 \quad \text{K}$$

$$Qtl := Utl \cdot Atls \cdot (Ttl - Ta)$$

$$Qtl = 38.15519 \quad \text{W}$$

## 7.2 BALANCE EXERGÉTICO

Dentro del proyecto lo que se va a analizar mediante el balance exergético es conocer el potencial de trabajo real del sistema de combustión de biomasa residual, por ello es deseable tener una propiedad que determine el potencial de trabajo útil y en este caso esta propiedad es la exergía también denominada disponibilidad o energía disponible<sup>42</sup>.

Es importante darse cuenta que la exergía no representa la cantidad de trabajo que un dispositivo que lo produce entregará realmente después de ser instalado, representa el límite superior de la cantidad de trabajo que un dispositivo puede entregar sin violar ninguna de las leyes termodinámicas.<sup>43</sup>

Siempre habrá una diferencia, sea grande o pequeña, entre exergía y el trabajo real entregado por un dispositivo ya que la exergía es una propiedad de la combinación sistema – alrededores y no solo del sistema.

La exergía de un sistema que está en equilibrio con su ambiente es cero. El estado ambiente se lo conoce como “el estado muerto” ya que el sistema está prácticamente “muerto” (no puede haber ningún trabajo) desde el punto de vista termodinámico<sup>44</sup>.

El sistema de combustión de biomasa residual trabaja a base de aire – aire y el análisis y el análisis que se va a realizar es el de un fluido en movimiento (en este caso el aire) y tiene una energía adicional llamada energía de flujo que es la energía necesaria para mantener el flujo en una tubería o ducto, por lo que el cambio de exergía cuando pasa del estado inicial o estado uno al estado dos es<sup>45</sup>:

---

<sup>42</sup> YUNUS A. CENGEL, Termodinámica, Cuarta Edición, pág. 384.

<sup>43</sup> YUNUS A. CENGEL, Termodinámica, Cuarta Edición, pág. 385.

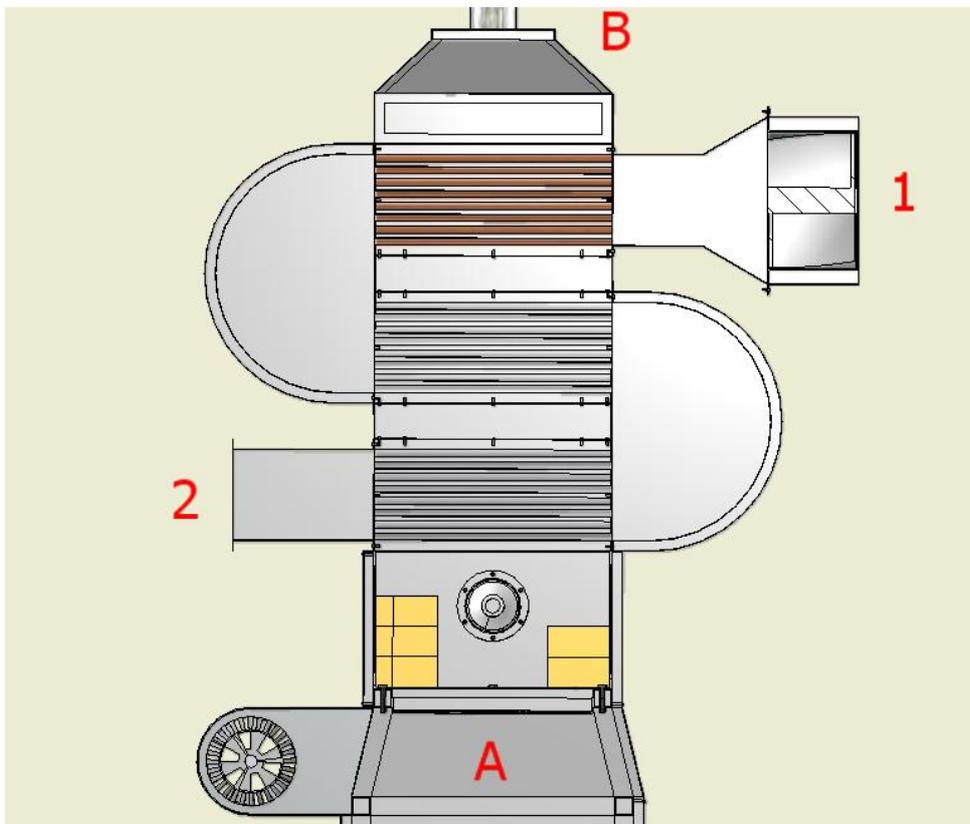
<sup>44</sup> YUNUS A. CENGEL, Termodinámica, Cuarta Edición, pág. 394.

<sup>45</sup> YUNUS A. CENGEL, Termodinámica, Cuarta Edición, pág. 396, 397.

$$\Delta\phi = (h_2 - h_1) - T_o(S_2 - S_1) + \frac{v_2^2 - v_1^2}{2} \quad (7.30)$$

- Donde:
- h<sub>2</sub> = entalpía del aire a la temperatura del estado 2.
  - h<sub>1</sub> = entalpía del aire a la temperatura del estado 1.
  - S<sub>2</sub> = entropía del aire a la temperatura en el estado 2.
  - S<sub>1</sub> = entropía del aire a la temperatura en el estado 1.
  - T<sub>o</sub> = temperatura ambiente.
  - V<sub>2</sub> = velocidad del aire en el estado 2.
  - V<sub>1</sub> = velocidad del aire en el estado 1.

Dentro del sistema de combustión de biomasa residual se analiza la exergía de flujo tanto en el subsistema de combustión como en el subsistema de transferencia de energía como se muestra en la figura 7.8



**Figura 7.8** Análisis de exergía de flujo en el sistema

A continuación se calcula la exergía de flujo para el subsistema de combustión y el subsistema de transferencia de energía.

$$h_a := 400.98 \quad \frac{\text{KJ}}{\text{kg}}$$

$$h_b := 325.31 \quad \frac{\text{KJ}}{\text{kg}}$$

$$h_1 := 290.16 \quad \frac{\text{KJ}}{\text{kg}}$$

$$h_2 := 350.49 \quad \frac{\text{KJ}}{\text{kg}}$$

$$S_a := 1.99194 \quad \frac{\text{KJ}}{\text{kg}}\text{K}$$

$$S_b := 1.78249 \quad \frac{\text{KJ}}{\text{kg}}\text{K}$$

$$S_1 := 1.66802 \quad \frac{\text{KJ}}{\text{kg}}\text{K}$$

$$S_2 := 1.85708 \quad \frac{\text{KJ}}{\text{kg}}\text{K}$$

$$T_o := 293 \quad \text{K}$$

$$v_{e1} := 9.83 \quad \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

$$v_{e2} := 2.91 \quad \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

$$v_a := 5.3 \quad \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

$$v_b := 4.77 \quad \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

$$\Delta\psi_c := (h_a - h_b) - T_o \cdot (S_a - S_b) + \frac{v_a^2 - v_b^2}{2}$$

$$\Delta\psi_c = 16.9697 \quad \frac{\text{KJ}}{\text{Kg}}$$

$$\Delta\psi_{st} := (h_2 - h_1) - T_o \cdot (S_2 - S_1) + \frac{v_{e1}^2 - v_{e2}^2}{2}$$

$$\Delta\psi_{st} = 49.01582 \quad \frac{\text{KJ}}{\text{KG}}$$

Conociendo este análisis se procede a realizar el balance de exergía que viene expresado de la siguiente manera<sup>46</sup>:

$$X_{entra} - X_{sale} - X_{destr} = \Delta X_{sist} \quad (7.31)$$

Donde:  $X_{entra}$  = exergía total que entra  
 $X_{sale}$  = exergía total que sale  
 $X_{destr}$  = exergía total destruida  
 $\Delta X_{sist}$  = cambio en la exergía total del sistema.

---

<sup>46</sup> YUNUS A. CENGEL, Termodinámica, Cuarta Edición, pág. 403.

Como la exergía puede transformarse desde o hacia un sistema por calor, trabajo y transferencia de masa, la expresión puede expresarse en forma de tasa de la siguiente manera:

$$X_{entra} - X_{sale} - X_{destr} = \Delta X_{sist} \quad (7.32)$$

Donde:  $X_{entra} - X_{sale}$  = Tasa de transferencia de exergía por calor y masa.

$X_{destr}$  = Tasa de destrucción de exergía.

$\Delta X_{sist}$  = Tasa de cambio de exergía

Las tasas de cambio de exergía por calor y masa vienen dadas por las siguientes expresiones:

$$X_{calor} = \left(1 - \frac{T_o}{T}\right) \dot{Q} \quad (7.33)$$

$$X_{masa} = \dot{m} * \varphi \quad (7.34)$$

Como no existe ninguna clase de generación de trabajo, la tasa de transferencia de exergía por trabajo no se toma en cuenta.

Se puede hacer el análisis de la destrucción de exergía por la conducción de calor a través de las paredes del sistema de energía de la siguiente manera:

- Se supone que el proceso de transferencia de calor es estable y la tasa de transferencia a través de las paredes es constante.
- Como el estado de las paredes no cambia durante el proceso y es una transferencia unidimensional el cambio de exergía en el muro es cero.

Se procede a realizar el cálculo de la exergía destruida con la ecuación reducida de la siguiente manera:

$$\dot{Q} \left(1 - \frac{T_o}{T}\right)_{entra} - \dot{Q} \left(1 - \frac{T_o}{T}\right)_{sale} = X_{destr} \quad (7.35)$$

Donde: Q = calor perdido en la cámara de combustión.

To = temperatura ambiente

Tentra = temperatura en el muro interno

Tsale = temperatura en el muro externo

$$Q_{pcc} = 21.56392 \quad \text{W}$$

$$T_o = 293 \quad \text{K}$$

$$T_{ent} := 402 \quad \text{K}$$

$$T_{sal} := 309 \quad \text{K}$$

$$X_{dest} := Q_{pcc} \cdot \left(1 - \frac{T_o}{T_{ent}}\right) - Q_{pcc} \cdot \left(1 - \frac{T_o}{T_{sal}}\right)$$

$$X_{dest} = 4.73036 \quad \text{W}$$

Para realizar el balance exergético en el sistema de combustión se debe tener presente la siguiente consideración:

La tasa de cambio de exergía dentro del volumen de control durante el proceso es igual a la tasa neta de transferencia de energía a través de la frontera del volumen

de control por calor, trabajo y flujo másico menos la tasa de destrucción de exergía dentro de las fronteras del volumen de control<sup>47</sup>.

Como se tiene un sistema de intercambiadores de calor, estos no presentan variación en sus contenidos de masa, energía, entropía y exergía ni en sus volúmenes por lo cual la ecuación del balance exergético se reduce a una ecuación de proceso de flujo estable de la siguiente manera:

$$\sum \left(1 - \frac{T_0}{T_k}\right) * \dot{Q}_k + \sum \dot{m}_i * \varphi_i - \sum \dot{m}_e * \varphi_e - X_{dest} = \Delta X_{sist} \quad (7.36)$$

- Donde:
- To = temperatura ambiente.
  - Tk = temperatura promedio en el subsistema de transferencia de energía.
  - Qk = calor transferido al subsistema de transferencia de energía.
  - me = flujo másico de salida de aire.
  - mi = flujo másico de ingreso de aire.
  - $\varphi_e$  = exergía de flujo de salida.
  - $\varphi_i$  = exergía de flujo de entrada.
  - Xdest = exergía destruida.
  - $\Delta X_{sist}$  = tasa de variación total de exergía del sistema.

$$T_0 = 293 \quad K$$

$$T_k := 325 \quad K$$

$$A_{ea} := 0.3 \quad m^2$$

$$d_a := 0.9950 \quad \frac{kg}{m^3}$$

---

<sup>47</sup> YUNUS A. CENGEL, Termodinámica, Cuarta Edición, pág. 414.

$$f_{mi} := v_{e1} \cdot d_a \cdot A_{ea}$$

$$f_{mi} = 2.93425 \quad \frac{\text{Kg}}{\text{s}}$$

$$f_{me} := v_{e2} \cdot d_a \cdot A_{ea}$$

$$f_{me} = 0.86864 \quad \frac{\text{Kg}}{\text{s}}$$

$$\psi_i := (-h_1 + T_o \cdot S_1) + \frac{v_{e1}^2}{2}$$

$$\psi_i = 246.88431 \quad \frac{\text{KJ}}{\text{kg}}$$

$$\psi_e := (-h_2 + T_o \cdot S_2) + \frac{v_{e2}^2}{2}$$

$$\psi_e = 197.86849$$

$$Q_T = 1.64405 \times 10^8 \text{ W}$$

$$\Delta X_{sist} := Q_T \cdot \left( 1 - \frac{T_o}{T_k} \right) + f_{mi} \cdot \psi_i - f_{me} \cdot \psi_e - X_{dest}$$

$$\Delta X_{sist} = 1.61881 \times 10^7 \text{ W}$$

A continuación se procede a calcular la variación máxima de exergía que se da cuando se tiene un proceso sin destrucción de exergía (exergía destruida es igual a cero), por lo que la expresión queda determinada de la siguiente manera:

$$\sum \left(1 - \frac{T_o}{T_k}\right) * \dot{Q}_k + \sum \dot{m}_i * \varphi_i - \sum \dot{m}_e * \varphi_e = \Delta X_{\max} \quad (7.37)$$

$$\Delta X_{\max} := QT \cdot \left(1 - \frac{T_o}{T_k}\right) + \dot{m}_i \cdot \varphi_i - \dot{m}_e \cdot \varphi_e$$

$$\Delta X_{\max} = 1.61881 \times 10^7 \text{ W}$$

Finamente se procede a realizar el cálculo de la eficiencia de la segunda ley para dispositivos de flujo estable por medio de la siguiente expresión<sup>48</sup>:

$$n_{II} = \frac{\Delta X_{\text{sist}}}{\Delta X_{\text{max}}} \quad (7.38)$$

$$N_{ii} := \frac{\Delta X_{\text{sist}}}{\Delta X_{\text{max}}}$$

$$N_i := 0.43895$$

$$\text{eficienciaII} := N_i \cdot 100$$

$$\text{eficienciaII} = 43.895 \quad \%$$

Para el caso de intercambiadores de calor la eficiencia también se puede determinar por medio de la siguiente expresión:

$$n_{IIIC} = \frac{\dot{m}_s t * \Delta \varphi_{st}}{\dot{m}_c * \Delta \varphi_c} \quad (7.39)$$

<sup>48</sup> YUNUS A. CENGEL, Termodinámica, Cuarta Edición, pág. 416.

$$A_c := 0.63 \quad \text{m}^2$$

$$f_{mc} := v_a \cdot d_a \cdot A_c$$

$$f_{mc} = 3.3223 \quad \frac{\text{Kg}}{\text{s}}$$

$$N_{ic} := \frac{f_{mi} \cdot \Delta\psi_{st}}{f_{mc} \cdot \Delta\psi_c}$$

$$N_{ic} := 14.88$$

### 7.3 RESULTADOS

A continuación se presentan los resultados del análisis energético y exergético del sistema de combustión de biomasa para la primera prueba. El resto de resultados se presentan en el anexo E.

**Tabla 7.2** Tabla de resultados del análisis energético y exergético

TABLA DE RESULTADOS			
Símbolo	Denominación	Unidad	Valor
QTc	Calor generado por la combustión	W	2,47E+05
Qpcc	Calor perdido en la cámara de combustión	W	21,56392
Tsatr	Temperatura de salida del aire teórica	K	380
HLT	Perdidas de presión totales	Pa	526,16032
Vsal	Velocidad de salida del aire teórica	m/s	4,80272
QTf	Calor transferido al subsistema de t.e.	W	1,64E+04
Qtl	Calor perdido en las tapas laterales	W	38,15519
Qpt	Calor total perdido	W	59,71911
Xdest	Exergía destruida	W	4,73036
$\Delta X_{sist}$	Tasa de variación de exergía del sistema	W	1,62E+07
nii	Eficiencia segunda ley	%	43,895
nic	Eficiencia intercambiadores de calor	%	14,88

**Tabla 7.3** Tabla de resultados del análisis energético y exergético (otras unidades)

<b>TABLA DE RESULTADOS</b>			
<b>Símbolo</b>	<b>Denominación</b>	<b>Unidad</b>	<b>Valor</b>
QTc	Calor generado por la combustión	BTU/hr	8,41E+04
Qpcc	Calor perdido en la cámara de combustión	BTU/hr	7,36E+00
Tsatr	Temperatura de salida del aire teórica	C	107
HLT	Perdidas de presión totales	mmHg	3,9462024
Vsal	Velocidad de salida del aire teórica	m/s	4,80272
QTf	Calor transferido al subsistema de t.e.	BTU/hr	5,61E+04
Qtl	Calor perdido en las tapas laterales	BTU/hr	1,30E+01
Xdest	Exergía destruida	BTU/hr	1,61E+00
$\Delta X_{sist}$	Tasa de variación de exergía del sistema	BTU/hr	5,52E+06
nii	Eficiencia segunda ley	%	43,895
nic	Eficiencia intercambiadores de calor	%	14,88

## 7.4 ANÁLISIS ENERGÉTICO Y EXERGÉTICO DEL EXPERIMENTO

Con los resultados obtenidos del experimento del sistema de combustión de biomasa se puede hacer un análisis del proyecto.

Para empezar se puede hacer una comparación entre el calor total entregado al subsistema de transferencia de energía con respecto al calor total perdido por el sistema con lo que tenemos lo siguiente:

$$n1 = \frac{Q_{tp}}{Q_{rf}} * 100 \quad (7.40)$$

$$n1 = \frac{59,72}{1,64 * 10^4} * 100$$

$$n1 = 36.4 \%$$

Como conclusión se puede decir que la pérdida de calor es significativa con respecto al calor que se transfiere al subsistema de transferencia de energía, por lo que se puede decir que el sistema es poco eficiente en mantener el calor dentro del equipo y no transferirlo al ambiente, de esta manera las pérdidas de calor a los alrededores del sistema se van a tener que considerar de una manera significativa.

Se compara también el calor transferido al subsistema de transferencia de energía en relación al calor que se genera en la cámara de combustión al quemar la biomasa (cascarilla de arroz con un 20% de humedad), con lo que se tiene lo siguiente:

$$n2 = \frac{Q_{rf}}{Q_{Tc}} * 100 \quad (7.41)$$

$$n2 = \frac{1,64 * 10^4}{2,47 * 10^4} * 100$$

$$n2 = 66.39 \%$$

Esta relación indica que existe una pérdida del 66.39 % por lo que la eficiencia térmica queda determinada por:

$$nT = 100 - n2$$

$$n2 = 100 - 66.39$$

$$n2 = 33.61 \%$$

Se tiene que esta relación es muy baja, demasiado baja para lo que se tenía esperado, lo que nos quiere decir que solamente un 33 % del calor generado por

la combustión es transferido al subsistema de transferencia de energía para calentar el aire y existe una gran pérdida de calor.

Como se analizó anteriormente, las pérdidas a los alrededores del sistema son significativas por lo que se puede deducir que la poca eficiencia en transferir la energía se debe al diseño mismo del equipo y a la forma en que este transfiere energía por lo que en este punto es donde se puede realizar un estudio a futuro para poder aumentar la eficiencia del equipo.

Otro aspecto muy importante en el análisis es verificar si los datos del estudio previo del proyecto son acordes a los datos obtenidos en el experimento del sistema de combustión de biomasa residual, es decir si los 250.000 Btu/hr con los que se realizó el análisis previo del proyecto corresponden a los obtenidos con el experimento por lo que tenemos:

$$\eta_3 = \frac{Q_{Tcr}}{Q_{Tct}} * 100 \quad (7.42)$$

$$\eta_3 = \frac{2,47 * 10^5}{2,5 * 10^5} * 100$$

$$\eta_3 = 98.8 \%$$

Con este resultado se puede quedar muy conforme pues va de acorde con el resultado que se obtuvo al realizar el análisis previo del sistema por lo que se puede decir que en este punto el sistema de combustión de biomasa residual cumple con los parámetros esperados.

También es importante analizar la velocidad de salida del aire del subsistema de transferencia de energía por lo que se tiene:

$$n4 = \frac{V_{sr}}{V_{st}} * 100 \quad (7.43)$$

$$n4 = \frac{2,92}{4,8} * 100$$

$$n4 = 65.32 \%$$

De esto se puede analizar que la velocidad que se esperaba obtener a la salida del subsistema de transferencia de energía una vez realizado el análisis de pérdidas correspondientes es mucho menor del esperado, lo que indica que existen otro tipo de pérdidas además de las ya analizadas que no entran dentro de lo que se tenía previsto.

Las pérdidas que se presume que se pudieron producir podrían ser pérdidas producidas por un mal sellado dentro del sistema de intercambiadores de calor con sus soportes y una falta de aislamiento entre la estructura de los intercambiadores de calor con toda la tubería que estos contienen lo que provocaría las pérdidas que no se consideraron en el análisis.

También se podría analizar escapes por lugares que no se tuvieron en cuenta dentro del análisis como una pérdida de presión que se puede dar por el ducto de alimentación de la biomasa, los agujeros de los rodamientos o de los pernos que se encuentran dentro de la estructura.

Por último para concluir con este análisis se hace una comparación de la temperatura de salida del aire real con respecto a la temperatura de salida teórica por lo que se tiene:

$$n5 = \frac{T_{sr}}{T_{st}} * 100 \quad (7.44)$$

$$n1 = \frac{82,6}{107} * 100$$

$$n1 = 77.19 \%$$

Como se analizó anteriormente, no todo el calor producido por la combustión de la biomasa es transferido al sistema por lo que es razonable que no se alcance la temperatura esperada y se tenga una temperatura inferior a lo que se quería alcanzar en el sistema, por lo que es posible seguir mejorando el sistema.

Con respecto al balance exergético que se realizó, como conclusión se puede obtener que el equipo todavía pueda alcanzar un mejor desempeño y que las eficiencias que se obtuvieron al realizar el análisis estén dentro de los parámetros que se esperaban.

## **7.5 ELABORACIÓN DEL PROGRAMA DE CÁLCULO EN MATHCAD**

El programa de cálculo realizado en Mathcad debido a su extensión se lo presenta al final del documento en el anexo F.

Los cálculos presentados en el programa de cálculo así como los coeficientes respectivos hacen referencia a los datos de la primera prueba realizada.



## **CAPÍTULO 8**

### **ANÁLISIS ECONÓMICO FINANCIERO**

#### **8.1 ANÁLISIS ECONÓMICO**

Se ve la necesidad de realizar una evaluación económica del proyecto para obtener información y determinar si su ejecución es viable y rentable.

La evaluación económica requiere de un análisis del costo total que implica el montaje, implementación del proyecto, con lo cual se mostrará los costos que intervienen en la culminación del proyecto, siendo estos costos directos o indirectos.

Fueron de gran ayuda proformas, recibos de materiales e insumos que se utilizaron previos para el montaje, implementación del sistema de combustión de biomasa residual de casas comerciales y demás proveedores de materiales, equipos y servicios similares.

Para una mejor descripción de los costos del proyecto se los ha dividido en dos tipos de costos:

- Costos Directos
- Costos Indirectos

### 8.1.1 COSTOS DIRECTOS

Los costos directos son los que física y económicamente pueden identificarse con algún trabajo o centro de costos en este caso son los costos de materiales, mano de obra, consumidos para la realización del proyecto.

Para el proyecto sobre montaje, implementación de un sistema de biomasa residual se contabilizó y se hizo una aproximación en lo que tiene que ver con costo de materiales que se utilizó para la construcción debido a que el equipo ya se encontró edificado pero no ensamblado, la mano de obra igualmente se contabiliza como mano de obra de montaje y mantenimiento, todos estos datos son actualizados de acuerdo a los precios vigentes que existen en los centros de adquisición de materiales.

**Tabla 8.1** Lista de materiales y costos del proyecto

<b>MATERIALES MECÁNICOS</b>				
<b>No.</b>	<b>CANT.</b>	<b>DESCRIPCIÓN</b>	<b>PRECIO UNITARIO</b>	<b>PRECIO TOTAL</b>
1	7	Tubo Cuadrado 7x7 e=5 mm	22,28	155,96
2	6	Plancha de acero e = 2mm	21,4	128,4
3	4	Perfil en L 6x6 e = 5 mm	9,1	36,4
4	0,5	Plancha de acero e = 5 mm	24,54	12,27
5	30	Ladrillo refractario	5,13	153,9
6	15	Masilla refractaria	0,5	7,5
7	22	Perfil en L 4x4 e = 2 mm	12,45	273,9
8	5	Plancha de acero e = 1 mm	15,16	75,8
9	2	Eje de acero diametro = 90 mm	65	130
10	0,3	Plancha de acero e = 10 mm	35,69	10,707
11	1,5	Plancha de acero e = 3 mm	21,4	32,1
12	0,01	Acero e = 20 mm	25,7	0,257
13	0,01	Acero e = 15 mm	24,5	0,245
14	0,05	Acero e = 5 mm	22,75	1,1375
15	38	Tubo de Acero al Carbono	15,85	602,3
16	38	Tubo de Acero Inoxidable	21,66	823,08
17	33	Tubo de Cobre	25,78	850,74

**Tabla 8.1** Continuación...

<b>MATERIALES ELÉCTRICOS</b>				
18	1	Arrancador LG 2.5-4 A/ con botonera	54,11	54,11
19	1	Arrancador LG 12-18 A/ con botonera	56,25	56,25
20	1	Arrancador LG 7.10 A/ con botonera	53,57	53,57
21	13	Cable Concentrico 3*12	2,16	28,08
22	1	Tablero SQD Trifasica 12P	82,5	82,5
23	3	Breaker QO 3P-32 A	30,76	92,28
24	24	Cable Concentrico 3*10	3,21	77,04
25	2	Enchufe 3P-50 A /Eagle	7,72	15,44
26	2	Toma S/P 3P-50 A Eagle	5,36	10,72
27	1	Caja Metalica 40*30*20	34,82	34,82
28	1	Ventilador 1	300	300
29	1	Ventilador 2	300	300
30	1	Motor Reductor	400	400
<b>INSUMOS</b>				
31	108	Perno M8 x 25	0,15	16,2
32	35	Perno M8 x 50	0,25	8,75
33	6	Perno M12 x 70	0,4	2,4
34	4	Perno M16 x 40	0,4	1,6
35	12	Perno M18 x 100	0,5	6
36	36	Tuerca M8	0,1	3,6
37	6	Tuerca M12	0,1	0,6
38	4	Tuerca M16	0,15	0,6
39	12	Tuerca M18	0,15	1,8
40	1	Rodamiento de Piso	13,31	13,31
41	1	Rodamiento de Pared	13,31	13,31
42	1	Arandelas	0,1	0,1
43	4	Silicona de Alta Temperatura	6,24	24,96
44	12	Pernos Autoajustables	0,25	3
45	2	Anticorrosivo Cris	12,13	24,26
46	1	Tubo de Aluminio diametro 7"	43	43
47	1	Abrazadera	3,1	3,1
<b>Costos Directos</b>				<b>4966,1</b>

Los costos directos de mano de obra para el proyecto se refiere a la mano de obra que se utilizo para la construcción, para el proyecto se investigo el valor, el cual es un valor estimado basándonos en proyectos semejantes, el valor es de \$1500

USD para el personal metalmecánico y para el montaje, el valor es de \$500 USD para el personal encargado del proyecto, por lo tanto tenemos un total de \$2000 USD.

### 8.1.2 COSTOS INDIRECTOS

Desembolsos que no pueden identificarse con la producción de mercancías o servicios específicos, pero que sí constituyen un costo aplicable a la producción en general. Se conocen generalmente como gastos indirectos de manufactura.

Los equipos y maquinaria que se utilizó fueron los siguiente:

- Fresa
- Torno
- Sierra vaivén
- Arco de sierra
- Soldadora
- Moladora
- Plasma
- Taladros
- Esmeriles

### GASTOS DE DIRECCIÓN DE LA TESIS

**Tabla 8.2** Gastos de dirección de tesis

<b>Dirección de Tesis</b>				
<b>No.</b>	<b>Descripción</b>	<b>Cant.</b>	<b>V. unit. \$</b>	<b>V. total \$</b>
1	Derechos de grado	2	470	940
2	Título	2	60	120
3	Certificado de graduación	2	6	12
4	Dirección del Proyecto de Grado (Créditos)	24	20	480
5	Multas (Créditos)	0	0	0
<b>Subtotal de dirección de tesis</b>				<b>1452</b>

## MISCELÁNEOS

Tabla 8.3 Misceláneos

Misceláneos						
No.	Elemento	Descripción	Cant.	Unidad	V. unit. \$	V. total \$
1	Transporte	Movilización	----	----	200	200
2	Computador	Horas	650	hr	0,5	325
4	Hojas	Resmas	4	und	5	20
5	Cartucho	Tinta negro	2	und	25	50
6	Cartucho	Tinta color	2	und	25	50
7	Internet	Horas	70	hr	1	70
8	Ploteado	De Planos	100	und	0,35	35
9	Empastados	De tesis	5	und	10	50
10	CD's	Caja de 50 CD's	1	c	0,50	0,50
11	Copias	Xérox	800	h	0,20	160
12	Escáner	Fotos	40	u	0,35	14
13	Libro	Donación a la FIME	1	u	50	50
Subtotal						1024
Imprevistos 10 %						102,45
<b>Subtotal misceláneo</b>						<b>1126,95</b>

## MAQUINARIAS

Tabla 8.4 Maquinaria utilizada

Maquinaria				
No.	Descripción	Horas maquina	Valor \$ (hr.*h/maq)	V. total \$
1	Montacargas	3	8	24
2	Torno	8	5	40
3	Soldadora	3	4	12
4	Taladro de banco	1	4	4
6	Moladora	5	1,5	7,5
7	Sierra eléctrica	0,50	1	0,50
8	Compresor	5	3	15
<b>Subtotal maquinarias</b>				<b>103,00</b>

### 8.1.3 COSTO TOTAL DEL PROYECTO

El costo total es la suma de todos los costos directos y costos indirectos que se realizaron en el desarrollo del proyecto.

**Tabla 8.5** Costos directos

<b>COSTOS DIRECTOS</b>		
<b>No.</b>	<b>Materiales y equipos</b>	<b>USD</b>
1	Materiales Mecánicos	3294,7
2	Materiales Eléctrico	1504,81
3	Insumos	166,59
4	Mano de Obra Directa	2000
<b>Total Costos Directos</b>		<b>6966,1</b>

**Tabla 8.6** Costos indirectos

<b>No.</b>	<b>COSTOS INDIRECTOS</b>	
1	Dirección de tesis	1452
2	Misceláneos	1126,95
3	Maquinaria	103,00
<b>Total Costos Indirectos</b>		<b>2681,95</b>

El costo total es la suma de todos los costos directos y costos indirectos que se realizaron en el desarrollo del proyecto.

**Tabla 8.7** Costo total

<b>No.</b>	<b>COSTO TOTAL</b>	
1	Costo Directos	6966,1
2	Costos Indirectos	2681,95
<b>Total Costos Total del Proyecto</b>		<b>9648,05</b>

La cifra que se obtiene como costo total del proyecto, comprende el costo que implica la fabricación de los componentes o elementos que conforman el sistema

de combustión de biomasa residual, más el costo de implementación, montaje y mantenimiento de la misma.

## 8.2 ANÁLISIS FINANCIERO

Se ha hecho un análisis del proyecto, para conocer si el proyecto es rentable, se realizó el análisis de la tasa interna de retorno (TIR), el valor actual neto (VAN) y la depreciación del mismo.

La rentabilidad y vigencia del proyecto se ha estimado en un período de 10 años. Este concepto está basado en el concepto del valor tiempo dinero, el cual considera que existe un costo asociado a los recursos del proyecto.

Además se ha tomado en cuenta que los laboratorios del DECEM (MMHH, termodinámica, metrología, motores, fluidos, renovables), ya no tendrán que ocupar al laboratorista a cargo en las prácticas de laboratorio durante todo el tiempo, ya que bastará con una explicación para que los estudiantes realicen correctamente la práctica.

El valor de ingreso que percibirá el laboratorio, se calcula por las prácticas que realizan los estudiantes de la carrera obteniendo el siguiente resultado:

$$\text{Ingreso}_{\text{laboratorio}} = 20 \frac{\text{USD}}{\text{credito}} * 3 \frac{\text{creditos}}{\text{periodo}} * 1 \frac{\text{periodo}}{20 \text{semanas}} * 5 \frac{\text{semana}_{\text{uso}}}{\text{alumno}} * 60 \frac{\text{alumnos}}{\text{semestre}} * 2 \frac{\text{semestre}}{\text{año}}$$

$$\text{Ingreso}_{\text{laboratorio}} = 1800 \frac{\text{USD}}{\text{año}}$$

Las ecuaciones para el valor actual neto y la tasa interna de retorno se describen a continuación para una proyección de 10 años. La fórmula para calcular el VAN se muestra a continuación:<sup>49</sup>

$$VAN = -Inversión + \frac{FNC1}{(1+i)^1} + \frac{FNC2}{(1+i)^2} + \dots + \frac{FNC}{(1+i)^n} \quad (8.1)$$

Donde:

FNC es el flujo neto de caja.

i es igual a la tasa mínima aceptable de rendimiento (TMAR).

$$TMAR = i_1 + f \quad (8.2)$$

Donde:

$i_1$  es el premio al riesgo

f es la inflación.

El premio al riesgo, significa a que no se realicen prácticas de laboratorio por parte de los estudiantes mucho menos sin supervisión de un laboratorista o en último de los casos a que se dañe el sistema de combustión de biomasa residual por causas fuera de lo normal, por lo que se considerará el premio al riesgo con un valor del 2%.

La inflación que se ha tomado aproximadamente es 13%, dando como resultado.

TMAR = 15%

Para el cálculo del TIR se despeja el valor de i en la siguiente ecuación:

---

<sup>49</sup> <sup>49</sup> Córdoba Marcial, Formulación y evaluación de proyectos, Edit Coe, Pág. 369

$$Inversión = \frac{FNC1}{(1+i)^1} + \frac{FNC2}{(1+i)^2} + \dots + \frac{FNCn + VS}{(1+i)^n} \quad (8.3)$$

Donde:

FNC es el flujo neto de caja

VS es el valor de salvamento.

Para el cálculo de la depreciación se ha tomado en cuenta la depreciación solamente del material que se utilizo puesto que comprende el mayor valor del proyecto, el cual se ha estimado en un valor de USD. 4.500,00, lo que a lo largo de los 10 años se estima en USD. 450,00

Los cálculos del TIR y VAN se realizaron en el programa excel, siendo los siguientes valores los mostrados en dicho programa:

**Tabla 8.8** Ingresos proyectados a 10 años

<b>PERÍODOS EN AÑOS</b>	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>4</b>	<b>5</b>
<b>INGRESOS</b>	1800	1980	2178	2395,8	2635,38
<b>PERÍODOS EN AÑOS</b>	<b>6</b>	<b>7</b>	<b>8</b>	<b>9</b>	<b>10</b>
<b>INGRESOS</b>	2898,92	3188,81	3507,69	3858,46	4244,31

**Tabla 8.9** Costos proyectados a 10 años

PERÍODOS EN AÑOS	1	2	3	4	5
COMBUSTIBLES E INSUMOS	100	100	100	100	100
MANTENIMIENTO	150	150	150	150	150
DEPRECIACIÓN	450	450	450	450	450
TOTAL	700	700	700	700	700
SUB TOTAL = INGRESOS - COSTOS	1100	1280	1478	1695,8	1935,38
PERÍODOS EN AÑOS	6	7	8	9	10
COMBUSTIBLES E INSUMOS	100	100	100	100	100
MANTENIMIENTO	150	150	150	150	150
DEPRECIACIÓN	450	450	450	450	450
TOTAL	700	700	700	700	700
SUB TOTAL = INGRESOS - COSTOS	2198,92	2488,81	2807,69	3158,46	3544,31

**Tabla 8.10** Calculo de ingresos y egresos para el TIR, VAN

PERÍODOS EN AÑOS	1	2	3	4	5
INGRESOS	1800	1980	2178	2395,8	2635,38
EGRESOS	1100	1280	1478	1695,8	1935,38
PERÍODOS EN AÑOS	6	7	8	9	10
INGRESOS	2998,92	3188,81	3507,69	3858,46	4244,31
EGRESOS	2198,92	2488,81	2807,69	3158,46	3544,31

**Tabla 8.11** Calculo TIR VAN

TIR	34%
VAN	\$ 4266,14

Con lo que se puede concluir que el proyecto es completamente viable, debido a que el TIR es mayor al 15% de inflación que se proyectó anteriormente.

## **CAPÍTULO 9**

### **CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES**

#### **9.1 CONCLUSIONES**

1. La biomasa como fuente de energía renovable puede llegar a ser muy útil en un futuro cuando se lleguen a perfeccionar los procesos para poder utilizarla ya que con el estudio de este proyecto se llega a la conclusión de que todavía falta mucho por mejorar en este tipo de sistemas que aprovechan energía de recursos alternativos como en este caso la cascarilla de arroz puesto que la eficiencia que tienen estos equipos es muy baja, entre un 33% y llegando a un máximo de un 41% de eficiencia y no se logra aprovechar todo el potencial que tienen este tipo de recursos.
2. Al obtener una eficiencia de un 34%, se puede comprobar que el análisis energético realizado se encuentra dentro de los parámetros esperados para máquinas térmicas, ya que estas por su naturaleza tienden a tener eficiencias bajas.
3. La cascarilla de arroz como fuente de energía alternativa es muy complicada usarla en un proceso a nivel de gran escala puesto que se debe

tener un especial cuidado en el proceso de combustión ya que se comprobó que se quema rápidamente (aproximadamente en 10 minutos de combustión se queman entre 5 a 7 Kg de cascarilla de arroz) y para poder mantener una buena llama de combustión es necesario tener un especial cuidado en los tiempos de alimentación de la biomasa en la cámara de combustión.

4. En el balance de energía que se realizó se llega a la conclusión de que las pérdidas a los alrededores son considerables (alrededor de un 63% de la energía generada se pierde) pero además no existe una buena tasa de transferencia de calor puesto que el calor que se produce por la combustión de la biomasa no se transfiere de una manera eficiente al subsistema de transferencia de energía, lo cual impide alcanzar todo el potencial que tiene el sistema de combustión.
5. Como la pérdida de calor es considerable (63 % de pérdida de calor) la tasa de exergía destruida es proporcional a esta pérdida puesto que también es muy baja por lo que se puede decir que la tasa de variación de exergía casi se asemeja a la exergía máxima que puede alcanzar el sistema de combustión.
6. La tasa de variación de exergía es mucho más alta que el calor total que genera el equipo por lo que se puede decir que mucha de esa energía de flujo que existe en el sistema de combustión se pierde (por eso la eficiencia de segunda ley de exergía es de 43.8%), especialmente por los gases de escape que son los que se llevan la energía hacia los alrededores del sistema.
7. Los datos del rendimiento del equipo al final dejan un grado alto de conformidad, obteniendo una eficiencia del equipo de un 34% y una eficiencia exergética del 44%, que quiere decir que el análisis de este proyecto puede ser aplicado a sistemas similares y puede ser aprovechado para estudios de investigación futuros.

## 9.2 RECOMENDACIONES

1. Incentivar a los estudiantes con proyectos del futuro relacionados con energías renovables que pueden ser Eólica, Mareo Motriz, Fotovoltaica, Biomasa, para ser aplicados en el área industrial a nivel nacional e internacional.
2. El montaje de cualquier equipo industrial se debe tomar mucho en cuenta las normas de seguridad industrial, para evitar cualquier accidente y pérdidas catastróficas.
3. Tener cuidado con la manipulación de flamas incandescentes en la cámara de combustión, debido a que generan grandes cantidades de calor y puede producir quemaduras de tercer grado.
4. En la toma de datos se recomienda esperar un tiempo prudencial entre la toma de los diferentes datos para que los equipos con los que se realiza la toma de los mismos puedan llegar a estabilizarse y marcar una lectura adecuada.
5. Tener una especial precaución en la medición de datos en la parte superior del equipo puesto que esto implica estar a una altura considerable y maniobrar con equipos de medición complejos y esto puede hacer que se pierda la perspectiva de donde se encuentra y causar un accidente.
6. Tener un especial cuidado con los distintos coeficientes de cálculo, tales como densidad del aire, densidad de los gases de combustión, viscosidad cinemática del aire, temperaturas, entalpías y entropías puesto que tienen que estar de acuerdo con los datos que se tomen y estos varían de acuerdo a las condiciones donde se realicen las pruebas tales como altura y temperatura.



## BIBLIOGRAFÍA

- LÓPEZ, Darío D, Energía de biomasa.
- BRIUELA E., ROMANO S. D., Combustion
- RODRÍGUEZ , Jorge A., Introducción a la termodinámica con algunas aplicaciones de ingeniería
- INCROPERA, Frank, Fundamentos de Transferencia de Calor, Edit. Prentice Hall
- Texto Unificado de la Ley Ambiental Secundaria (TULAS), Libro VI, Año 2008
- VALVERDE, Agustín, Comparative analysis of the Physicochemicals Characteristics of the rice husk.
- YUNUS A., CENGEL, Termodinámica, Cuarta Edición,
- YUNUS A., CENGEL, Transferencia de Calor y Masa, Tercera Edición
- MOTT, Robert, Mecánica de Fluidos Aplicada, Cuarta Edición
- MILLS, Anthony, Transferencia de Calor, Editorial McGraw Hill
- CÓRDOBA, Marcial, Formulación y evaluación de proyectos, Edit. Coe.

## DIRECCIONES DE INTERNET

- Soluciones de Ingeniería SOLVENTA, S. L., Web: [www.solventa.com.es](http://www.solventa.com.es)
- Biomasa Textos Científicos.htm.
- [www.textoscientificos.com/residuos](http://www.textoscientificos.com/residuos)
- web\Mecanismos.htm
- [http://www.accefyn.org.co/Web\\_GEI\(actualizada\)/Archivos\\_gei/P\\_Cap03\\_Opciones.pdf](http://www.accefyn.org.co/Web_GEI(actualizada)/Archivos_gei/P_Cap03_Opciones.pdf)
- [http://unfccc.int/portal\\_espanol/essential\\_background/feeling\\_the\\_heat/items/3377.php](http://unfccc.int/portal_espanol/essential_background/feeling_the_heat/items/3377.php)
- <http://www.ibramnvent.com.br/homeh.htm>
- <http://www.educa.madrid.org/web/ies.satafi.getafe/comenius/documentos/espanol/biomasa.pdf>
- <http://www.miliarum.com/monografias/energias/e-renovable.pdf>

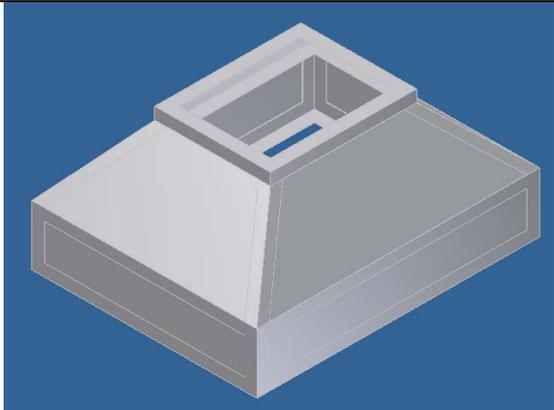
# **ANEXOS**



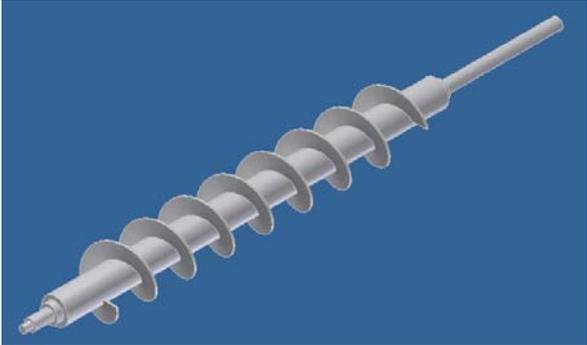
## **ANEXO A: TABLAS DE ANÁLISIS DE PARTES Y PIEZAS**



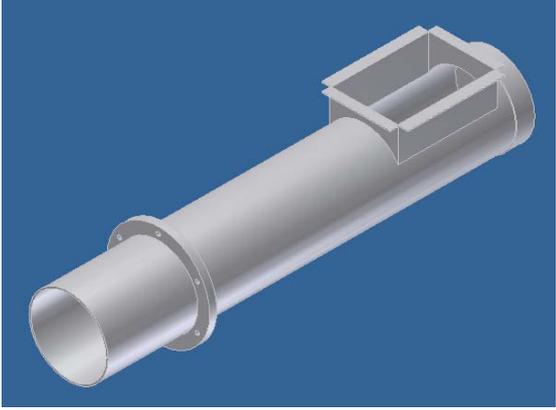
## Tolva de Carga

<b>DECEM</b>	<b>LABORATORIO ENERGIAS RENOVABLES</b>		<b>Código: ESPE-FA01</b>
	<b>FICHA DE ANÁLISIS</b>		
<b>Realizado:</b> Mayorga R/Vaca M	<b>Revisado:</b> Ing. Suntaxi Carlos	<b>Aprobado:</b> Ing. Guasumba José	
<b>DATOS GENERALES</b>			
<b>Elemento</b>	Tolva de Carga		
<b>Código</b>	ER-TC		
<b>Cantidad</b>	1		
<b>Material(es)</b>	Acero		
<b>Subsistema</b>	Alimentación		
<b>Otros</b>	n/a		
<b>ANÁLISIS DEL ESTADO PREVIO</b>			
<b>DESCRIPCIÓN DEL DAÑO O FALLA:</b>			
El estado actual del componente es muy bueno			
Poca oxidación, poco polvo			
<b>POSIBLES SOLUCIONES:</b>			
Realizar la habilitación que comprende:			
Procedimiento de Lijado			
Procedimiento de Pintura			
<b>OBSERVACIONES:</b>			
Lo que comprende a calidad de soldadura en la estructura esta en buen estado			
<b>ANÁLISIS DEL ESTADO ACTUAL</b>			
<b>DESCRIPCIÓN</b>			
Elemento que va ensamblado conjuntamente al sistema de alimentación de combustible			

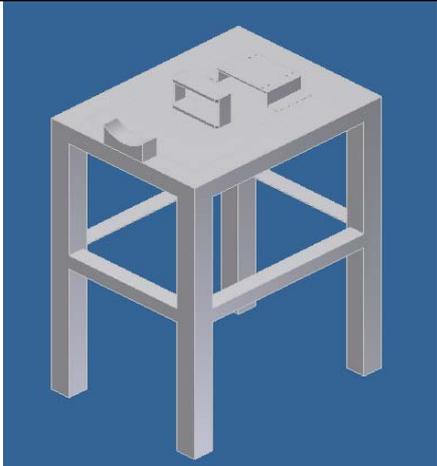
## Tornillo sin fin

<b>DECEM</b>	<b>LABORATORIO ENERGIAS RENOVABLES</b>		<b>Código:</b> ESPE-FA02
	<b>FICHA DE ANÁLISIS</b>		
<b>Realizado:</b> Mayorga R/Vaca M	<b>Revisado:</b> Ing. Sntaxi Carlos	<b>Aprobado:</b> Ing. Guasumba José	
<b>DATOS GENERALES</b>			
<b>Elemento</b>	Tornillo sin fin		
<b>Código</b>	ER-TSF		
<b>Cantidad</b>	1		
<b>Material(es)</b>	Acero		
<b>Subsistema</b>	Alimentación		
<b>Otros</b>	n/a		
<b>ANÁLISIS DEL ESTADO PREVIO</b>			
<b>DESCRIPCIÓN DEL DAÑO O FALLA:</b>			
El estado actual del componente es muy bueno			
Poca oxidación, poco polvo			
<b>POSIBLES SOLUCIONES:</b>			
Realizar la habilitación que comprende:			
Procedimiento de Lijado			
Procedimiento de Pintura			
<b>OBSERVACIONES:</b>			
Lo que comprende a calidad de soldadura esta en buen estado			
<b>ANÁLISIS DEL ESTADO ACTUAL</b>			
<b>DESCRIPCIÓN</b>			
Elemento que va ensamblado conjuntamente al sistema de alimentación de combustible			

## Canal tornillo sin fin

<b>DECEM</b>	<b>LABORATORIO ENERGIAS RENOVABLES</b>		<b>Código: ESPE-FA03</b>
	<b>FICHA DE ANÁLISIS</b>		
<b>Realizado:</b> Mayorga R/Vaca M	<b>Revisado:</b> Ing. Sntaxi Carlos	<b>Aprobado:</b> Ing. Guasumba José	
<b>DATOS GENERALES</b>			
<b>Elemento</b>	Canal tornillo sin fin		
<b>Código</b>	ER-CTSF		
<b>Cantidad</b>	1		
<b>Material(es)</b>	Acero		
<b>Subsistema</b>	Alimentación		
<b>Otros</b>	n/a		
<b>ANÁLISIS DEL ESTADO PREVIO</b>			
<b>DESCRIPCIÓN DEL DAÑO O FALLA:</b>			
El estado actual del componente es muy bueno			
Poca oxidación, poco polvo			
<b>POSIBLES SOLUCIONES:</b>			
Realizar la habilitación que comprende:			
Procedimiento de Lijado			
Procedimiento de Pintura			
<b>OBSERVACIONES:</b>			
Lo que comprende a calidad de soldadura esta en buen estado y no necesita reparación alguna			
<b>ANÁLISIS DEL ESTADO ACTUAL</b>			
<b>DESCRIPCIÓN</b>			
Elemento que va ensamblado conjuntamente al sistema de alimentación de combustible			

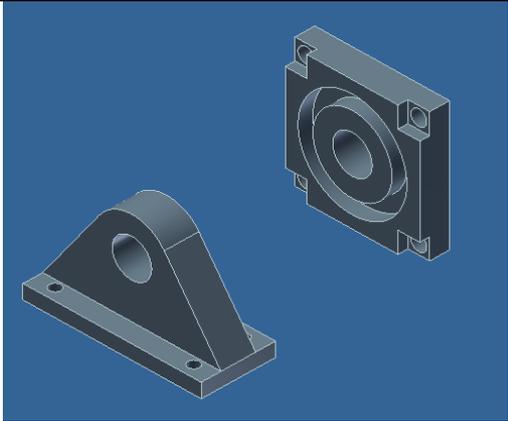
## Base

<b>DECEM</b>	<b>LABORATORIO ENERGIAS RENOVABLES</b>		<b>Código: ESPE-FA04</b>
	<b>FICHA DE ANÁLISIS</b>		
<b>Realizado:</b> Mayorga R/Vaca M	<b>Revisado:</b> Ing. Suntaxi Carlos	<b>Aprobado:</b> Ing. Guasumba José	
<b>DATOS GENERALES</b>			
<b>Elemento</b>	Base		
<b>Código</b>	ER-B		
<b>Cantidad</b>	1		
<b>Material(es)</b>	Acero estructural		
<b>Subsistema</b>	Alimentación		
<b>Otros</b>	n/a		
<b>ANÁLISIS DEL ESTADO PREVIO</b>			
<b>DESCRIPCIÓN DEL DAÑO O FALLA:</b>			
El estado actual del componente es muy bueno			
Poca oxidación			
En la parte inferior de la estructura, lo que comprende el soporte esta con daños leves			
<b>POSIBLES SOLUCIONES:</b>			
Realizar la habilitación que comprende:			
Procedimiento de Lijado			
Procedimiento de Pintura			
Reparación de la base de la estructura base			
<b>OBSERVACIONES:</b>			
Lo que comprende a calidad de soldadura esta en buen estado y no necesita reparación alguna			
<b>ANÁLISIS DEL ESTADO ACTUAL</b>			
<b>DESCRIPCIÓN</b>			
Elemento que sostiene al sistema de alimentación de combustible y al Motor reductor			

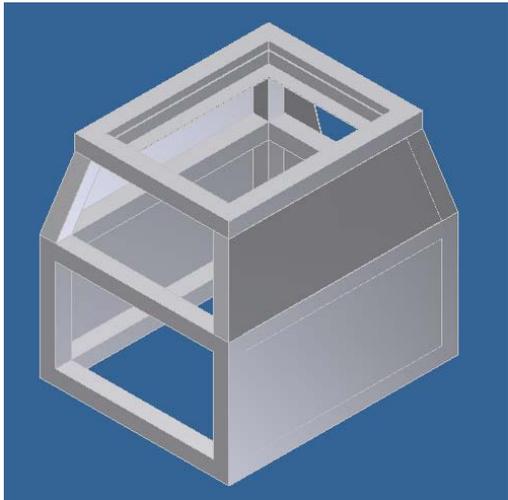
## Motor reductor

<b>DECEM</b>	<b>LABORATORIO ENERGIAS RENOVABLES</b>		<b>Código: ESPE-FA05</b>
	<b>FICHA DE ANÁLISIS</b>		
<b>Realizado:</b> Mayorga R/Vaca M	<b>Revisado:</b> Ing. Suntaxi Carlos	<b>Aprobado:</b> Ing. Guasumba José	
<b>DATOS GENERALES</b>			
<b>Elemento</b>	Motor reductor		
<b>Código</b>	ER-MR		
<b>Cantidad</b>	1		
<b>Material(es)</b>	n/a		
<b>Subsistema</b>	Alimentación		
<b>Otros</b>	Amperaje: s/n Potencia: 1 HP Voltaje: 220 v Rev: 20 a 30 r/min.		
<b>ANÁLISIS DEL ESTADO PREVIO</b>			
<b>DESCRIPCIÓN DE DAÑO O FALLA</b>			
n/a			
<b>POSIBLES SOLUCIONES</b>			
Verificación del funcionamiento			
<b>OBSERVACIONES</b>			
Se encuentra en funcionamiento			
<b>ANÁLISIS DEL ESTADO ACTUAL</b>			
<b>DESCRIPCIÓN</b>			
Es un motor reductor que gira a bajas revoluciones por minuto y esta acoplado al tornillo sin fin del sistema de alimentación de combustible.			

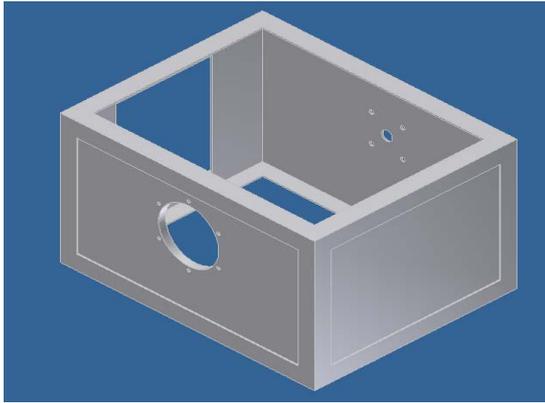
## Rodamientos

<b>DECEM</b>	<b>LABORATORIO ENERGIAS RENOVABLES</b>		<b>Código: ESPE-FA06</b>
	<b>FICHA DE ANÁLISIS</b>		
<b>Realizado:</b> Mayorga R/Vaca M	<b>Revisado:</b> Ing. Sntaxi Carlos	<b>Aprobado:</b> Ing. Guasumba José	
<b>DATOS GENERALES</b>			
<b>Elemento</b>	Rodamiento		
<b>Código</b>	ER-RD		
<b>Cantidad</b>	2		
<b>Material(es)</b>	n/a		
<b>Subsistema</b>	Alimentación		
<b>Otros</b>	Características		
<b>ANÁLISIS DEL ESTADO PREVIO</b>			
<b>DESCRIPCIÓN DE DAÑO O FALLA</b>			
Estado bueno			
<b>POSIBLES SOLUCIONES</b>			
Mantenimiento de rodamiento			
<b>OBSERVACIONES</b>			
Son rodamientos que se utiliza para altas revoluciones, para el proyecto son factibles			
<b>ANÁLISIS DEL ESTADO ACTUAL</b>			
<b>DESCRIPCIÓN</b>			
Son rodamientos de bancada y de pared de bolas, para altas revoluciones con fines de proyecto si es correcto su utilización			

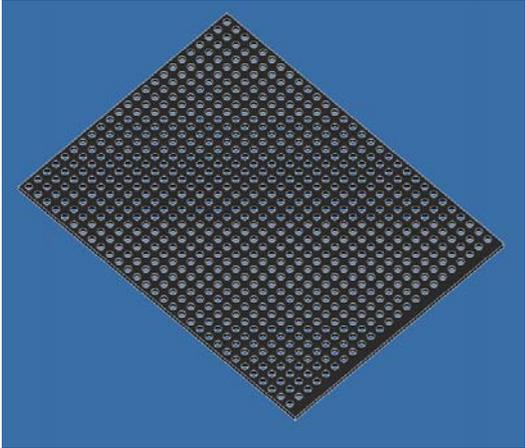
## Base cámara de combustión

<b>DECEM</b>	<b>LABORATORIO ENERGIAS RENOVABLES</b>		<b>Código: ESPE-FA07</b>
	<b>FICHA DE ANÁLISIS</b>		
<b>Realizado:</b> Mayorga R/Vaca M	<b>Revisado:</b> Ing. Suntaxi Carlos	<b>Aprobado:</b> Ing. Guasumba José	
<b>DATOS GENERALES</b>			
<b>Elemento</b>	Base cámara de combustión		
<b>Código</b>	ER-BCC		
<b>Cantidad</b>	1		
<b>Material(es)</b>	Acero		
<b>Subsistema</b>	Combustión		
<b>Otros</b>	n/a		
<b>ANÁLISIS DEL ESTADO PREVIO</b>			
<b>DESCRIPCIÓN DE DAÑO O FALLA</b>			
El estado del componente es muy bueno Poca oxidación. Poco polvo			
<b>POSIBLES SOLUCIONES</b>			
Realizar la habilitación del componente: <div style="text-align: right;">                     Procedimiento de lijado                      Procedimiento de pintado                 </div>			
<b>OBSERVACIONES</b>			
n/a			
<b>ANÁLISIS DEL ESTADO ACTUAL</b>			
<b>DESCRIPCIÓN</b>			
Es el pilar principal del sistema, donde se ensambla con la cámara de combustión y posee el área de desechos o cenizas			

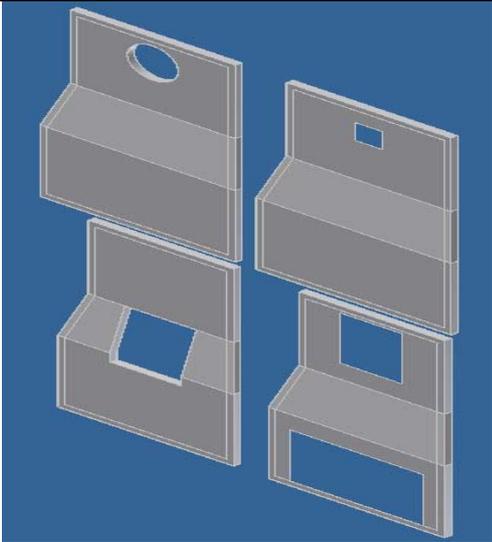
## Cámara de combustión

<b>DECEM</b>	<b>LABORATORIO ENERGIAS RENOVABLES</b>		<b>Código: ESPE-FA08</b>
	<b>FICHA DE ANÁLISIS</b>		
<b>Realizado:</b> Mayorga R/Vaca M	<b>Revisado:</b> Ing. Suntaxi Carlos	<b>Aprobado:</b> Ing. Guasumba José	
<b>DATOS GENERALES</b>			
<b>Elemento</b>	Cámara de combustión		
<b>Código</b>	ER-CC		
<b>Cantidad</b>	1		
<b>Material(es)</b>	Acero estructural		
<b>Subsistema</b>	Combustión		
<b>Otros</b>	n/a		
<b>ANÁLISIS DEL ESTADO PREVIO</b>			
<b>DESCRIPCIÓN DEL DAÑO O FALLA:</b>			
<p>El estado actual del componente es muy bueno  Poca oxidación, poco polvo  Lo que comprende las paredes de la cámara faltan ladrillos refractarios  Rodamiento de pared en estado regular.</p>			
<b>POSIBLES SOLUCIONES:</b>			
<p>Realizar la habilitación que comprende:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>Procedimiento de Lijado</li> <li>Procedimiento de Pintura</li> </ul> <p>Completar la cámara con ladrillos refractario para altas temperaturas  Revisión y mantenimiento del  rodamiento de pared</p>			
<b>OBSERVACIONES:</b>			
<p>Lo que comprende a calidad de soldadura esta en buen estado y no necesita  reparación alguna  Verificación del rodamiento de pared</p>			
<b>ANÁLISIS DEL ESTADO ACTUAL</b>			
<b>DESCRIPCIÓN</b>			
Comprende la cámara donde se combustiona la biomasa			

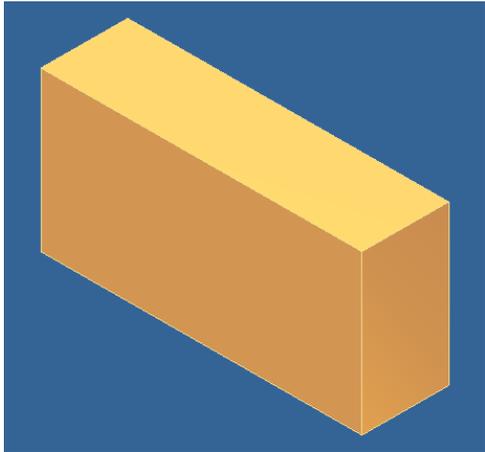
## Parrilla

<b>DECEM</b>	<b>LABORATORIO ENERGIAS RENOVABLES</b>		<b>Código:</b> ESPE- FA09
	<b>FICHA DE ANÁLISIS</b>		
<b>Realizado:</b> Mayorga R/Vaca M	<b>Revisado:</b> Ing. Suntaxi Carlos	<b>Aprobado:</b> Ing. Guasumba José	
<b>DATOS GENERALES</b>			
<b>Elemento</b>	Parrilla		
<b>Código</b>	ER-P		
<b>Cantidad</b>	1		
<b>Material(es)</b>	Acero		
<b>Subsistema</b>	Combustión		
<b>Otros</b>	n/a		
<b>ANÁLISIS DEL ESTADO PREVIO</b>			
<b>DESCRIPCIÓN DE DAÑO O FALLA</b>			
n/a			
<b>POSIBLES SOLUCIONES</b>			
Construcción de parrilla			
<b>OBSERVACIONES</b>			
n/a			
<b>ANÁLISIS DEL ESTADO ACTUAL</b>			
<b>DESCRIPCIÓN</b>			
Lugar de combustión de la biomasa			

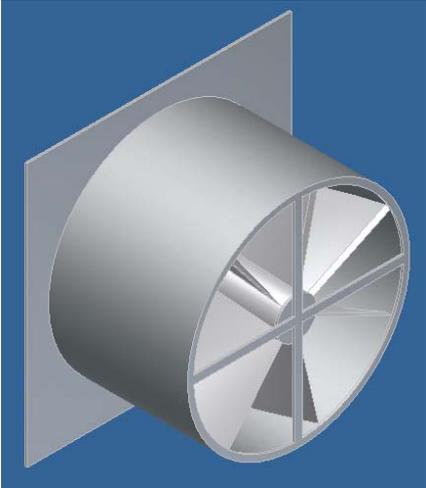
## Tapa aislamiento térmico cámara de combustión

<b>DECEM</b>	<b>LABORATORIO ENERGIAS RENOVABLES</b>		<b>Código:</b> ESPE-FA10
	<b>FICHA DE ANÁLISIS</b>		
<b>Realizado:</b> Mayorga R/Vaca M	<b>Revisado:</b> Ing. Suntaxi Carlos	<b>Aprobado:</b> Ing. Guasumba José	
<b>DATOS GENERALES</b>			
<b>Elemento</b>	Tapa aislamiento térmico cámara de combustión		
<b>Código</b>	ER-TACC		
<b>Cantidad</b>	4		
<b>Material(es)</b>	Acero		
<b>Subsistema</b>	Combustión		
<b>Otros</b>	n/a		
<b>ANÁLISIS DEL ESTADO PREVIO</b>			
<b>DESCRIPCIÓN DEL DAÑO O FALLA:</b>			
El estado actual del componente es muy bueno			
Poca oxidación, poco polvo			
<b>POSIBLES SOLUCIONES:</b>			
Realizar la habilitación que comprende:			
Procedimiento de Lijado			
Procedimiento de Pintura			
<b>OBSERVACIONES:</b>			
Lo que comprende a calidad de soldadura en la estructura esta en buen estado			
<b>ANÁLISIS DEL ESTADO ACTUAL</b>			
<b>DESCRIPCIÓN</b>			
Estas tapas están ensambladas conjuntamente y contendrán el aislamiento térmico que envuelven el sistema de combustión.			

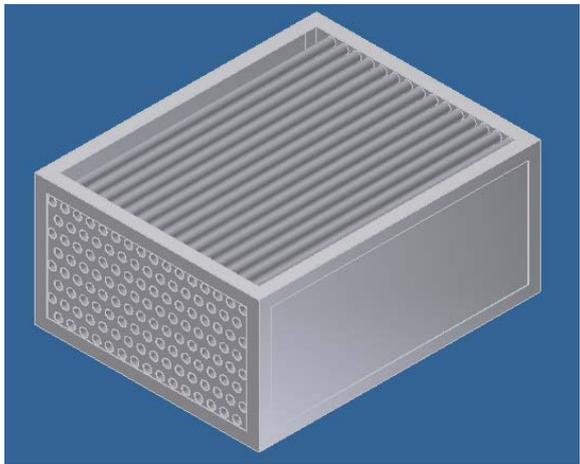
## Ladrillo refractario

<b>DECEM</b>	<b>LABORATORIO ENERGIAS RENOVABLES</b>		<b>Código: ESPE-FA11</b>
	<b>FICHA DE ANÁLISIS</b>		
<b>Realizado:</b> Mayorga R/Vaca M	<b>Revisado:</b> Ing. Sntaxi Carlos	<b>Aprobado:</b> Ing. Guasumba José	
<b>DATOS GENERALES</b>			
<b>Elemento</b>	Ladrillo refractario		
<b>Código</b>	ER-LR		
<b>Cantidad</b>	n/a		
<b>Material(es)</b>	Refractario		
<b>Subsistema</b>	Combustión		
<b>Otros</b>	dimensiones		
<b>ANÁLISIS DEL ESTADO PREVIO</b>			
<b>DESCRIPCIÓN DE DAÑO O FALLA</b>			
n/a			
<b>POSIBLES SOLUCIONES</b>			
Reparación y adquisición de nuevos elementos			
<b>OBSERVACIONES</b>			
Algunos ladrillos están en buen estado			
<b>ANÁLISIS DEL ESTADO ACTUAL</b>			
<b>DESCRIPCIÓN</b>			
Son para altas temperaturas, son las paredes de la cámara de combustión y mantendrá el calor en la misma			

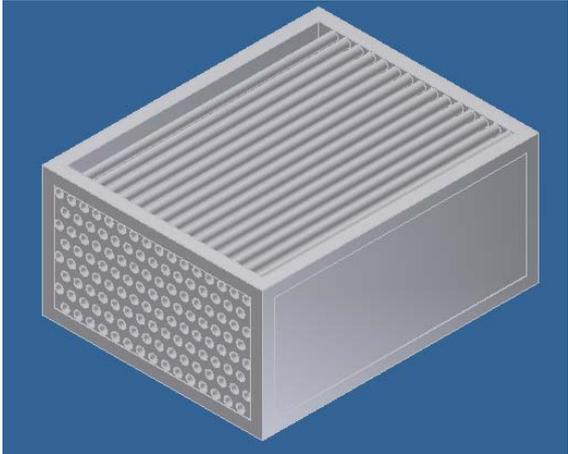
## Ventilador 1

<b>DECEM</b>	<b>LABORATORIO ENERGIAS RENOVABLES</b>		<b>Código: ESPE-FA12</b>
	<b>FICHA DE ANÁLISIS</b>		
<b>Realizado:</b> Mayorga R/Vaca M	<b>Revisado:</b> Ing. Suintaxi Carlos	<b>Aprobado:</b> Ing. Guasumba José	
<b>DATOS GENERALES</b>			
<b>Elemento</b>	Ventilador 1		
<b>Código</b>	ER-V1		
<b>Cantidad</b>	1		
<b>Material(es)</b>	n/a		
<b>Subsistema</b>	Combustión		
<b>Otros</b>	Amperaje: s/n Potencia: 1 HP Voltaje: 220 v Rev: 1000 r/min.		
<b>ANÁLISIS DEL ESTADO PREVIO</b>			
<b>DESCRIPCIÓN DE DAÑO O FALLA</b>			
n/a			
<b>POSIBLES SOLUCIONES</b>			
Verificación de su funcionalidad			
<b>OBSERVACIONES</b>			
Se encuentra en funcionamiento			
<b>ANÁLISIS DEL ESTADO ACTUAL</b>			
<b>DESCRIPCIÓN</b>			

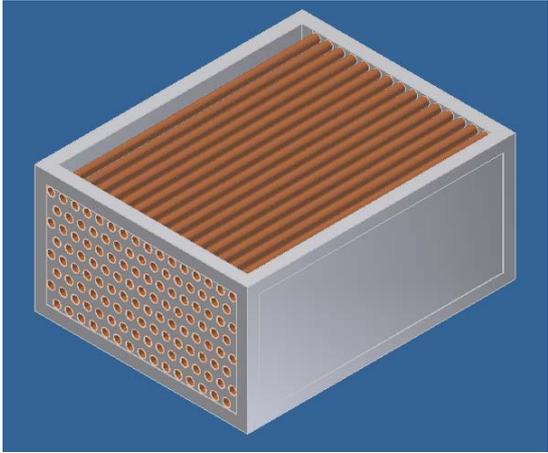
### Intercambiador de calor tubos acero al carbono

<b>DECEM</b>	<b>LABORATORIO ENERGIAS RENOVABLES</b>		<b>Código: ESPE-FA13</b>
	<b>FICHA DE ANÁLISIS</b>		
<b>Realizado:</b> Mayorga R/Vaca M	<b>Revisado:</b> Ing. Sntaxi Carlos	<b>Aprobado:</b> Ing. Guasumba José	
<b>DATOS GENERALES</b>			
<b>Elemento</b>	Intercambiador de calor tubos acero al carbono		
<b>Código</b>	ER-ICTAC		
<b>Cantidad</b>	1		
<b>Material(es)</b>	Acero Tubos de acero al carbono		
<b>Subsistema</b>	Transferencia de energía		
<b>Otros</b>	n/a		
<b>ANÁLISIS DEL ESTADO PREVIO</b>			
<b>DESCRIPCIÓN DEL DAÑO O FALLA:</b>			
El estado actual del componente es muy bueno			
Poca oxidación, poco polvo			
<b>POSIBLES SOLUCIONES:</b>			
Realizar la habilitación que comprende:			
Procedimiento de Lijado			
Procedimiento de Pintura			
<b>OBSERVACIONES:</b>			
Lo que comprende a calidad de soldadura en la estructura esta en buen estado			
El numero de tubos son completos y en buen estado			
<b>ANÁLISIS DEL ESTADO ACTUAL</b>			
<b>DESCRIPCIÓN</b>			
Son intercambiadores de calor aire-aire y son parte del sistema de transferencia de calor			

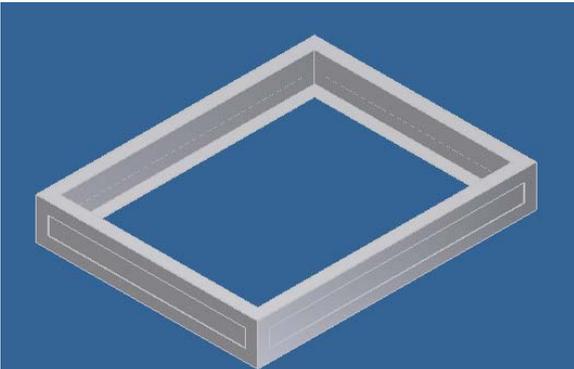
### Intercambiador de calor tubos acero inoxidable

<b>DECEM</b>	<b>LABORATORIO ENERGIAS RENOVABLES</b>		<b>Código: ESPE-FA14</b>
	<b>FICHA DE ANÁLISIS</b>		
<b>Realizado:</b> Mayorga R/Vaca M	<b>Revisado:</b> Ing. Suntaxi Carlos	<b>Aprobado:</b> Ing. Guasumba José	
<b>DATOS GENERALES</b>			
<b>Elemento</b>	Intercambiador de calor tubos acero inoxidable		
<b>Código</b>	ER-ICTAI		
<b>Cantidad</b>	1		
<b>Material(es)</b>	Acero Tubos de acero inoxidable		
<b>Subsistema</b>	Transferencia de energía		
<b>Otros</b>	n/a		
<b>ANÁLISIS DEL ESTADO PREVIO</b>			
<b>DESCRIPCIÓN DEL DAÑO O FALLA:</b>			
El estado actual del componente es muy bueno			
Poca oxidación, poco polvo			
<b>POSIBLES SOLUCIONES:</b>			
Realizar la habilitación que comprende:			
Procedimiento de Lijado			
Procedimiento de Pintura			
<b>OBSERVACIONES:</b>			
Lo que comprende a calidad de soldadura en la estructura esta en buen estado			
El numero de tubos son completos y en buen estado			
<b>ANÁLISIS DEL ESTADO ACTUAL</b>			
<b>DESCRIPCIÓN</b>			
Son intercambiadores de calor aire-aire y son parte del sistema de transferencia de calor			

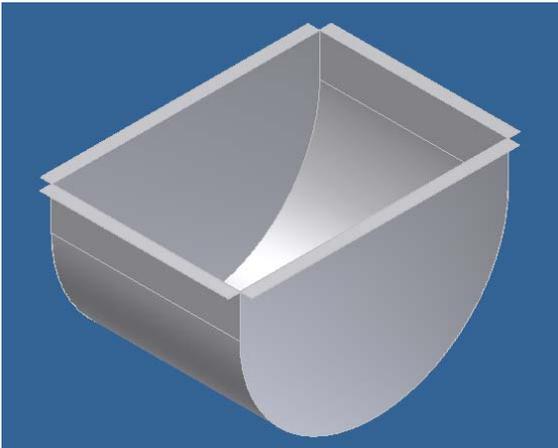
## Intercambiador de calor tubos de cobre

<b>DECEM</b>	<b>LABORATORIO ENERGIAS RENOVABLES</b>		<b>Código: ESPE-FA15</b>
	<b>FICHA DE ANÁLISIS</b>		
<b>Realizado:</b> Mayorga R/Vaca M	<b>Revisado:</b> Ing. Suntaxi Carlos	<b>Aprobado:</b> Ing. Guasumba José	
<b>DATOS GENERALES</b>			
<b>Elemento</b>	Intercambiador de calor tubos de cobre		
<b>Código</b>	ER-ICTC		
<b>Cantidad</b>	1		
<b>Material(es)</b>	Acero Tubos de cobre		
<b>Subsistema</b>	Transferencia de energía		
<b>Otros</b>	n/a		
<b>ANÁLISIS DEL ESTADO PREVIO</b>			
<b>DESCRIPCIÓN DEL DAÑO O FALLA:</b>			
El estado actual del componente es muy bueno			
Poca oxidación, poco polvo			
La manija de la compuerta en mal estado			
<b>POSIBLES SOLUCIONES:</b>			
Realizar la habilitación que comprende:			
Procedimiento de Reparación de manija			
Procedimiento de Lijado			
Procedimiento de Pintura			
<b>OBSERVACIONES:</b>			
Lo que comprende a calidad de soldadura en la estructura esta en buen estado			
El numero de tubos esta completo y el resto esta en buen estado			
<b>ANÁLISIS DEL ESTADO ACTUAL</b>			
<b>DESCRIPCIÓN</b>			
Son intercambiadores de calor aire-aire y son parte del sistema de transferencia de calor			

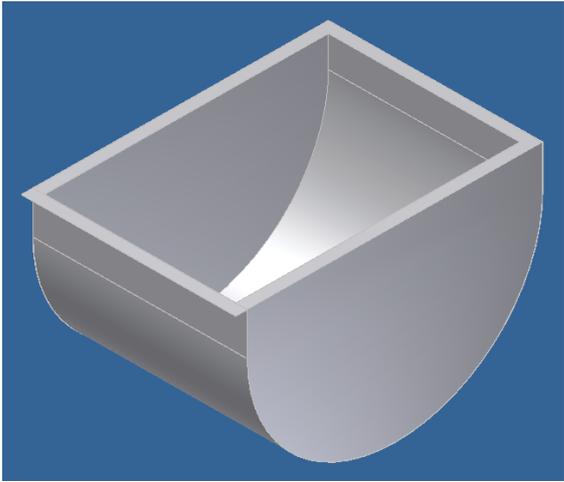
## Separador intercambiador de calor

<b>DECEM</b>	<b>LABORATORIO ENERGIAS RENOVABLES</b>		<b>Código: ESPE-FA16</b>
	<b>FICHA DE ANÁLISIS</b>		
<b>Realizado:</b> Mayorga R/Vaca M	<b>Revisado:</b> Ing. Suntaxi Carlos	<b>Aprobado:</b> Ing. Guasumba José	
<b>DATOS GENERALES</b>			
<b>Elemento</b>	Separador intercambiador de calor		
<b>Código</b>	ER-SIC		
<b>Cantidad</b>	2		
<b>Material(es)</b>	Acero		
<b>Subsistema</b>	Transferencia de energía		
<b>Otros</b>	n/a		
<b>ANÁLISIS DEL ESTADO PREVIO</b>			
<b>DESCRIPCIÓN DE DAÑO O FALLA</b>			
El estado actual del componente es muy bueno Poca oxidación, poco polvo			
<b>POSIBLES SOLUCIONES</b>			
Realizar la habilitación que comprende: Procedimiento de Lijado Procedimiento de Pintura			
<b>OBSERVACIONES</b>			
Lo que comprende a calidad de soldadura esta en buen estado y no necesita reparación alguna			
<b>ANÁLISIS DEL ESTADO ACTUAL</b>			
<b>DESCRIPCIÓN</b>			
n/a			

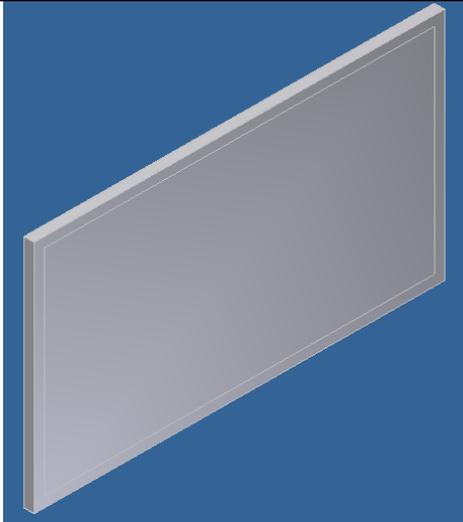
## Ducto de rotación de aire

<b>DECEM</b>	<b>LABORATORIO ENERGIAS RENOVABLES</b>		<b>Código: ESPE-FA17</b>
	<b>FICHA DE ANÁLISIS</b>		
<b>Realizado:</b> Mayorga R/Vaca M	<b>Revisado:</b> Ing. Suntaxi Carlos	<b>Aprobado:</b> Ing. Guasumba José	
<b>DATOS GENERALES</b>			
<b>Elemento</b>	Ducto de rotación de aire		
<b>Código</b>	ER-DRA		
<b>Cantidad</b>	2		
<b>Material(es)</b>	Acero		
<b>Subsistema</b>	Transferencia de energía		
<b>Otros</b>	n/a		
<b>ANÁLISIS DEL ESTADO PREVIO</b>			
<b>DESCRIPCIÓN DEL DAÑO O FALLA:</b>			
El estado actual del componente es muy bueno			
Poca oxidación, poco polvo			
<b>POSIBLES SOLUCIONES:</b>			
Realizar la habilitación que comprende:			
Procedimiento de Lijado			
Procedimiento de Pintura			
<b>OBSERVACIONES:</b>			
Lo que comprende a calidad de soldadura esta en buen estado y no necesita reparación alguna			
<b>ANÁLISIS DEL ESTADO ACTUAL</b>			
<b>DESCRIPCIÓN</b>			
Son ductos semi circulares que van ensamblados a los intercambiadores de calor aire-aire y son parte del sistema de transferencia de calor			

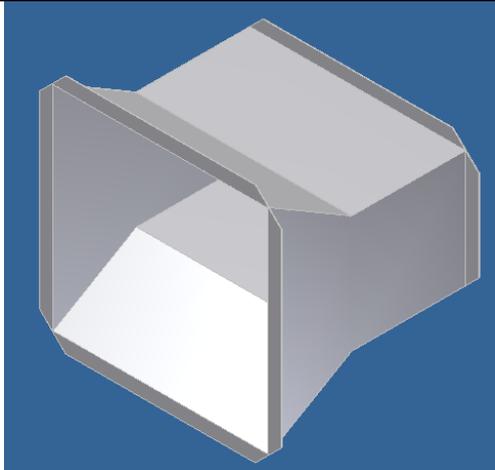
**Tapa aislamiento térmico ducto de rotación de aire**

<b>DECEM</b>	<b>LABORATORIO DE ENERGIAS RENOVABLES</b>		<b>Código: ESPE-FA18</b>
	<b>FICHA DE ANÁLISIS</b>		
<b>Realizado:</b> Mayorga R/Vaca M	<b>Revisado:</b> Ing. Suntaxi Carlos	<b>Aprobado:</b> Ing. Guasumba José	
<b>DATOS GENERALES</b>			
<b>Elemento</b>	Tapa aislamiento térmico ducto de rotación de aire		
<b>Código</b>	ER-TADRA		
<b>Cantidad</b>	2		
<b>Material(es)</b>	Acero		
<b>Subsistema</b>	Transferencia de energía		
<b>Otros</b>	n/a		
<b>ANÁLISIS DEL ESTADO PREVIO</b>			
<b>DESCRIPCIÓN DEL DAÑO O FALLA:</b>			
El estado actual del componente es muy bueno			
Poca oxidación, poco polvo			
Leves dobleces			
<b>POSIBLES SOLUCIONES:</b>			
Realizar la habilitación que comprende:			
Procedimiento de Enderezado			
Procedimiento de Lijado			
Procedimiento de Pintura			
<b>OBSERVACIONES:</b>			
Lo que comprende a calidad de soldadura esta en buen estado			
<b>ANÁLISIS DEL ESTADO ACTUAL</b>			
<b>DESCRIPCIÓN</b>			
Son tapas en forma de ductos, que van ensamblados conjuntamente con los ductos semi circulares y contienen el aislamiento térmico y forman parte del sistema de transferencia			

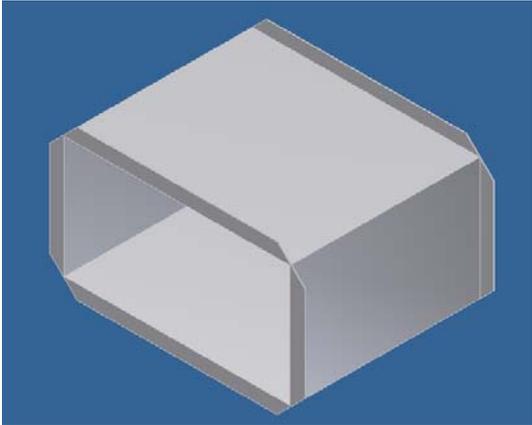
### Tapa aislamiento térmico intercambiadores de calor

<b>DECEM</b>	<b>LABORATORIO DE ENERGIAS RENOVABLES</b>		<b>Código: ESPE-FA19</b>
	<b>FICHA DE ANÁLISIS</b>		
<b>Realizado:</b> Mayorga R/Vaca M	<b>Revisado:</b> Ing. Suntaxi Carlos	<b>Aprobado:</b> Ing. Guasumba José	
<b>DATOS GENERALES</b>			
<b>Elemento</b>	Tapa aislamiento térmico intercambiador de calor		
<b>Código</b>	ER-TAIC		
<b>Cantidad</b>	2		
<b>Material(es)</b>	Acero		
<b>Subsistema</b>	Transferencia de energía		
<b>Otros</b>	n/a		
<b>ANÁLISIS DEL ESTADO PREVIO</b>			
<b>DESCRIPCIÓN DEL DAÑO O FALLA:</b>			
El estado actual del componente es muy bueno			
Poca oxidación, poco polvo			
<b>POSIBLES SOLUCIONES:</b>			
Realizar la habilitación que comprende:			
Procedimiento de Lijado			
Procedimiento de Pintura			
<b>OBSERVACIONES:</b>			
Lo que comprende a calidad de soldadura en la estructura esta en buen estado			
<b>ANÁLISIS DEL ESTADO ACTUAL</b>			
<b>DESCRIPCIÓN</b>			
Al igual que las tapas circulares estas van ensambladas en los intercambiadores de calor aire-aire y contienen el aislamiento térmico del sistema de transferencia			

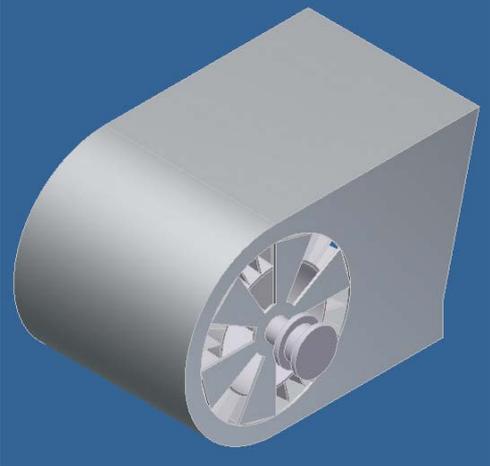
## Ducto de entrada de aire

<b>DECEM</b>	<b>LABORATORIO DE ENERGÍAS RENOVABLES</b>		<b>Código:</b> ESPE-FA20
	<b>FICHA DE ANÁLISIS</b>		
<b>Realizado:</b> Mayorga R/Vaca M	<b>Revisado:</b> Ing. Suntaxi Carlos	<b>Aprobado:</b> Ing. Guasumba José	
<b>DATOS GENERALES</b>			
<b>Elemento</b>	Ducto de entrada de aire		
<b>Código</b>	ER-DEA		
<b>Cantidad</b>	1		
<b>Material(es)</b>	Acero		
<b>Subsistema</b>	Transferencia de energía		
<b>Otros</b>	n/a		
<b>ANÁLISIS DEL ESTADO PREVIO</b>			
<b>DESCRIPCIÓN DE DAÑO O FALLA</b>			
El estado actual del componente es muy bueno Poca oxidación, poco polvo			
<b>POSIBLES SOLUCIONES</b>			
Realizar la habilitación que comprende: <div style="text-align: right;">                     Procedimiento de Lijado                      Procedimiento de Pintado                 </div>			
<b>OBSERVACIONES</b>			
Lo que comprende a calidad de soldadura en la estructura esta en buen estado			
<b>ANÁLISIS DEL ESTADO ACTUAL</b>			
<b>DESCRIPCIÓN</b>			
Es una base que va ensamblada conjuntamente a un intercambiador de calor previo para el montaje de uno de los ventiladores para el sistema de transferencia			

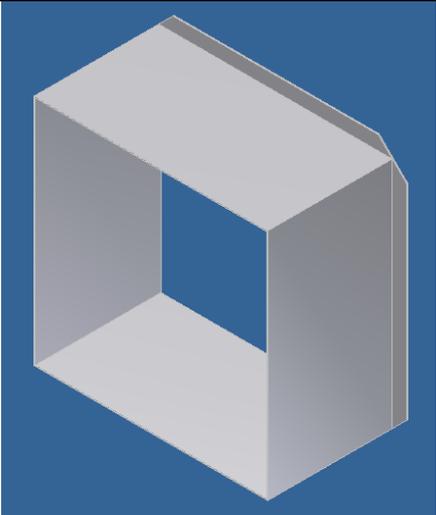
## Ducto de salida de aire

<b>DECEM</b>	<b>LABORATORIO DE ENERGIAS RENOVABLES</b>		<b>Código: ESPE-FA21</b>
	<b>FICHA DE ANÁLISIS</b>		
<b>Realizado:</b> Mayorga R/Vaca M	<b>Revisado:</b> Ing. Suntaxi Carlos	<b>Aprobado:</b> Ing. Guasumba José	
<b>DATOS GENERALES</b>			
<b>Elemento</b>	Ducto de salida de aire		
<b>Código</b>	ER-DSA		
<b>Cantidad</b>	1		
<b>Material(es)</b>	Acero		
<b>Subsistema</b>	Transferencia de energía		
<b>Otros</b>	n/a		
<b>ANÁLISIS DEL ESTADO PREVIO</b>			
<b>DESCRIPCIÓN DEL DAÑO O FALLA:</b>			
El estado actual del componente es muy bueno			
Poca oxidación, poco polvo			
<b>POSIBLES SOLUCIONES:</b>			
Realizar la habilitación que comprende:			
Procedimiento de Lijado			
Procedimiento de Pintura			
<b>OBSERVACIONES:</b>			
Lo que comprende a calidad de soldadura en la estructura esta en buen estado			
<b>ANÁLISIS DEL ESTADO ACTUAL</b>			
<b>DESCRIPCIÓN</b>			
Este elemento va ensamblado a uno del os extremos de un intercambiador de aire-aire			

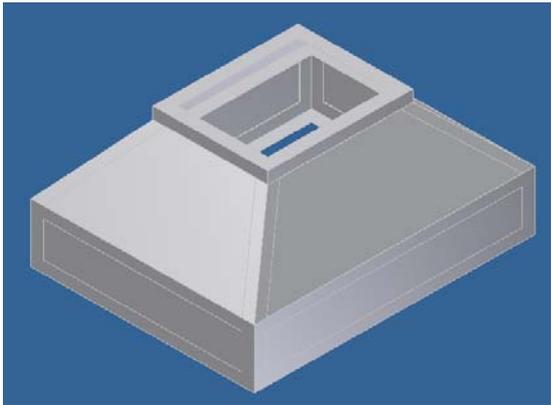
## Ventilador 2

<b>DECEM</b>	<b>LABORATORIO DE ENERGÍAS RENOVABLES</b>		<b>Código:</b> ESPE-FA22
	<b>FICHA DE ANÁLISIS</b>		
<b>Realizado:</b> Mayorga R/Vaca M	<b>Revisado:</b> Ing. Suntaxi Carlos	<b>Aprobado:</b> Ing. Guasumba José	
<b>DATOS GENERALES</b>			
<b>Elemento</b>	Ventilador 2		
<b>Código</b>	ER-V2		
<b>Cantidad</b>	1		
<b>Material(es)</b>	n/a		
<b>Subsistema</b>	Transferencia de energía		
<b>Otros</b>	Esta en matrimonio mediante banda con un motor eléctrico de 110 v, 1100 rpm		
<b>ANÁLISIS DEL ESTADO PREVIO</b>			
<b>DESCRIPCIÓN DE DAÑO O FALLA</b>			
n/a			
<b>POSIBLES SOLUCIONES</b>			
Verificación de su funcionalidad			
<b>OBSERVACIONES</b>			
En funcionamiento			
<b>ANÁLISIS DEL ESTADO ACTUAL</b>			
<b>DESCRIPCIÓN</b>			
Es un ventilador de tipo tangencial, esta acoplado mediante un sistema de bandas a un motor eléctrico			

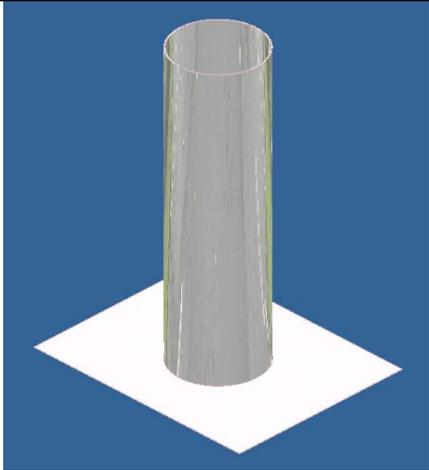
## Soporte ventilador

<b>DECEM</b>	<b>LABORATORIO DE ENERGÍAS RENOVABLES</b>		<b>Código: ESPE-FA23</b>
	<b>FICHA DE ANÁLISIS</b>		
<b>Realizado:</b> Mayorga R/Vaca M	<b>Revisado:</b> Ing. Suntaxi Carlos	<b>Aprobado:</b> Ing. Guasumba José	
<b>DATOS GENERALES</b>			
<b>Elemento</b>	Soporte ventilador 1		
<b>Código</b>	ER-SV		
<b>Cantidad</b>	1		
<b>Material(es)</b>	Acero		
<b>Subsistema</b>	Transferencia de energía		
<b>Otros</b>	n/a		
<b>ANÁLISIS DEL ESTADO PREVIO</b>			
<b>DESCRIPCIÓN DEL DAÑO O FALLA:</b>			
El estado actual del componente es muy bueno			
Poca oxidación, poco polvo			
<b>POSIBLES SOLUCIONES:</b>			
Realizar la habilitación que comprende:			
Procedimiento de Lijado			
Procedimiento de Pintura			
<b>OBSERVACIONES:</b>			
Lo que comprende a calidad de soldadura en la estructura esta en buen estado			
<b>ANÁLISIS DEL ESTADO ACTUAL</b>			
<b>DESCRIPCIÓN</b>			
Sostiene al ventilador 1 y va ensamblado al ducto de entrada de aire principal del sistema de transferencia.			

## Chimenea

<b>DECEM</b>	<b>LABORATORIO DE ENERGÍAS RENOVABLES</b>		<b>Código: ESPE-FA24</b>
	<b>FICHA DE ANÁLISIS</b>		
<b>Realizado:</b> Mayorga R/Vaca M	<b>Revisado:</b> Ing. Suntaxi Carlos	<b>Aprobado:</b> Ing. Guasumba José	
<b>DATOS GENERALES</b>			
<b>Elemento</b>	Chimenea		
<b>Código</b>	ER-CH		
<b>Cantidad</b>	1		
<b>Material(es)</b>	Acero		
<b>Subsistema</b>	Escape de gases		
<b>Otros</b>	n/a		
<b>ANÁLISIS DEL ESTADO PREVIO</b>			
<b>DESCRIPCIÓN DEL DAÑO O FALLA:</b>			
El estado actual del componente es muy bueno			
Poca oxidación, poco polvo			
<b>POSIBLES SOLUCIONES:</b>			
Realizar la habilitación que comprende:			
Procedimiento de Lijado			
Procedimiento de Pintura			
<b>OBSERVACIONES:</b>			
Lo que comprende a calidad de soldadura esta en buen estado y no necesita reparación alguna			
<b>ANÁLISIS DEL ESTADO ACTUAL</b>			
<b>DESCRIPCIÓN</b>			
Va ensamblado sobre los intercambiadores aire-aire y transportara los gases de la combustión al medio ambiente			

## Ducto de escape

<b>DECEM</b>	<b>LABORATORIO DE ENERGÍAS RENOVABLES</b>		<b>Código:</b> ESPE-FA25
	<b>FICHA DE ANÁLISIS</b>		
<b>Realizado:</b> Mayorga R/Vaca M	<b>Revisado:</b> Ing. Suntaxi Carlos	<b>Aprobado:</b> Ing. Guasumba José	
<b>DATOS GENERALES</b>			
<b>Elemento</b>	Ducto de escape		
<b>Código</b>	ER-DE		
<b>Cantidad</b>	1		
<b>Material(es)</b>	Aluminio		
<b>Subsistema</b>	Escape de gases		
<b>Otros</b>	n/a		
<b>ANÁLISIS DEL ESTADO PREVIO</b>			
<b>DESCRIPCIÓN DE DAÑO O FALLA</b>			
n/a			
<b>POSIBLES SOLUCIONES</b>			
n/a			
<b>OBSERVACIONES</b>			
Instalar el sistema de escape de gases			
<b>ANÁLISIS DEL ESTADO ACTUAL</b>			
<b>DESCRIPCIÓN</b>			
Transporta los gases de escape al medio ambiente			



## **ANEXO B: TABLAS DE PROPIEDADES**



TABLA A.4 Propiedades termofísicas de gases a presión atmosférica<sup>a</sup>

$T$ (K)	$\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )	$c_p$ (kJ/kg · K)	$\mu \cdot 10^7$ (N · s/m <sup>2</sup> )	$\nu \cdot 10^6$ (m <sup>2</sup> /s)	$k \cdot 10^3$ (W/m · K)	$\alpha \cdot 10^6$ (m <sup>2</sup> /s)	$Pr$
<b>Aire</b>							
100	3.5562	1.032	71.1	2.00	9.34	2.54	0.786
150	2.3364	1.012	103.4	4.426	13.8	5.84	0.758
200	1.7458	1.007	132.5	7.590	18.1	10.3	0.737
250	1.3947	1.006	159.6	11.44	22.3	15.9	0.720
300	1.1614	1.007	184.6	15.89	26.3	22.5	0.707
350	0.9950	1.009	208.2	20.92	30.0	29.9	0.700
400	0.8711	1.014	230.1	26.41	33.8	38.3	0.690
450	0.7740	1.021	250.7	32.39	37.3	47.2	0.686
500	0.6964	1.030	270.1	38.79	40.7	56.7	0.684
550	0.6329	1.040	288.4	45.57	43.9	66.7	0.683
600	0.5804	1.051	305.8	52.69	46.9	76.9	0.685
650	0.5356	1.063	322.5	60.21	49.7	87.3	0.690
700	0.4975	1.075	338.8	68.10	52.4	98.0	0.695
750	0.4643	1.087	354.6	76.37	54.9	109	0.702
800	0.4354	1.099	369.8	84.93	57.3	120	0.709
850	0.4097	1.110	384.3	93.80	59.6	131	0.716
900	0.3868	1.121	398.1	102.9	62.0	143	0.720
950	0.3666	1.131	411.3	112.2	64.3	155	0.723
1000	0.3482	1.141	424.4	121.9	66.7	168	0.726
1100	0.3166	1.159	449.0	141.8	71.5	195	0.728
1200	0.2902	1.175	473.0	162.9	76.3	224	0.728
1300	0.2679	1.189	496.0	185.1	82	238	0.719
1400	0.2488	1.207	530	213	91	303	0.703
1500	0.2322	1.230	557	240	100	350	0.685
1600	0.2177	1.248	584	268	106	390	0.688
1700	0.2049	1.267	611	298	113	435	0.685
1800	0.1935	1.286	637	329	120	482	0.683
1900	0.1833	1.307	663	362	128	534	0.677
2000	0.1741	1.337	689	396	137	589	0.672
2100	0.1658	1.372	715	431	147	646	0.667
2200	0.1582	1.417	740	468	160	714	0.655
2300	0.1513	1.478	766	506	175	783	0.647
2400	0.1448	1.558	792	547	196	869	0.630
2500	0.1389	1.665	818	589	222	960	0.613
3000	0.1135	2.726	955	841	486	1570	0.536
<b>Amoniaco (NH<sub>3</sub>)</b>							
300	0.6894	2.158	101.5	14.7	24.7	16.6	0.887
320	0.6448	2.170	109	16.9	27.2	19.4	0.870
340	0.6059	2.192	116.5	19.2	29.3	22.1	0.872
360	0.5716	2.221	124	21.7	31.6	24.9	0.872
380	0.5410	2.254	131	24.2	34.0	27.9	0.869

Apéndice A ■ *Propiedades termofísicas de la materia*

Tabla A.3 *Continuación*

<b>Otros materiales (Continuación)</b>				
Descripción/ composición	Temperatura (K)	Densidad $\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )	Conductividad térmica, k (W/m · K)	Calor específico, $c_p$ (J/kg · K)
Hielo	273	920	1.88	2040
	253	—	2.03	1945
Cuero (suela)	300	998	0.159	—
Papel	300	930	0.180	1340
Parafina	300	900	0.240	2890
Roca				
Granito, Barre	300	2630	2.79	775
Caliza, Salem	300	2320	2.15	810
Mármol, Halston	300	2680	2.80	830
Cuarcita, Sioux	300	2640	5.38	1105
Arenisca, Berea	300	2150	2.90	745
Caucho, vulcanizado				
Suave	300	1100	0.13	2010
Duro	300	1190	0.16	—
Arena	300	1515	0.27	800
Tierra vegetal	300	2050	0.52	1840
Nieve	273	110	0.049	—
		500	0.190	—
Teflón	300	2200	0.35	—
	400	—	0.45	—
Tejido, humano				
Piel	300	—	0.37	—
Capa de grasa, (adiposo)	300	—	0.2	—
Músculo	300	—	0.41	—
Madera, hilos cruzados				
Balsa	300	140	0.055	—
Ciprés	300	465	0.097	—
Abeto	300	415	0.11	2720
Roble	300	545	0.17	2385
Pino amarillo	300	640	0.15	2805
Pino blanco	300	435	0.11	—
Madera, radial				
Roble	300	545	0.19	2385
Ciprés	300	420	0.14	2720

<sup>a</sup> Adaptada de las referencias 1 y 8-13

Tabla A.3 Continuación

Otros materiales

Descripción/ composición	Temperatura (K)	Densidad $\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )	Conductividad térmica, k (W/m · K)	Calor específico, $c_p$ (J/kg · K)
Asfalto	300	2115	0.062	920
Baquelita	300	1300	1.4	1465
Ladrillo refractario				
Carborundo	872	—	18.5	—
	1672	—	11.0	—
Ladrillo de cromita	473	3010	2.3	835
	823		2.5	
	1173		2.0	
Óxido de silicio diatomáceo, refractario	478	—	0.25	—
	1145	—	0.30	
Arcilla refractaria, cocida a 1600 K	773	2050	1.0	960
	1073	—	1.1	
	1373	—	1.1	
Arcilla refractaria, cocida a 1725 K	773	2325	1.3	960
	1073		1.4	
	1373		1.4	
Ladrillo de arcilla refractaria	478	2645	1.0	960
	922		1.5	
	1478		1.8	
Magnesita	478	—	3.8	1130
	922	—	2.8	
	1478		1.9	
Arcilla	300	1460	1.3	880
Carbón, antracita	300	1350	0.26	1260
Concreto (piedra mezclada)	300	2300	1.4	880
Algodón	300	80	0.06	1300
Productos alimenticios				
Plátano (75.7% de contenido de agua)	300	980	0.481	3350
Manzana, roja (75% de contenido de agua)	300	840	0.513	3600
Pan, batido	300	720	0.223	—
Pan, completamente horneado	300	280	0.121	—
Carne de pollo, blanca (74.4% de contenido de agua)	198	—	1.60	—
	233	—	1.49	
	253		1.35	
	263		1.20	
	273		0.476	
	283		0.480	
	293		0.489	
Vidrio				
Plata (cal de sosa)	300	2500	1.4	750
Pyrex	300	2225	1.4	835

**TABLA A.3** Continuación

**Materiales y sistemas de aislamiento**

Descripción/composición	Propiedades típicas a 300 K		
	Densidad, $\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )	Conductividad térmica, $k$ (W/m · K)	Calor específico, $c_p$ (J/kg · K)
<b>Manta y fibra</b>			
Fibra de vidrio, revestida de papel	16	0.046	—
	28	0.038	—
	40	0.035	—
Fibra de vidrio, recubierta; forro de tubo	32	0.038	835
<b>Tablero y losa</b>			
Vidrio celular	145	0.058	1000
Fibra de vidrio, unión orgánica	105	0.036	795
<b>Poliestireno, expandido</b>			
Estirado (R-12)	55	0.027	1210
Lechos moldeados	16	0.040	1210
Lámina de fibra mineral; material de techado	265	0.049	—
Madera, triturada/encementada	350	0.087	1590
Corcho	120	0.039	1800
<b>Relleno suelto</b>			
Corcho, granulado	160	0.045	—
Óxido de silicio diatomáceo, polvo grueso	350	0.069	—
	400	0.091	—
Óxido de silicio diatomáceo, polvo fino	200	0.052	—
	275	0.061	—
Fibra de vidrio, vaciado o soplado	16	0.043	835
Vermiculita, hojuelas	80	0.068	835
	160	0.063	1000
<b>Formado/espumado de origen</b>			
Granos de lana mineral con aglomerantes de asbestos/ orgánicos, pulverizados	190	0.046	—
Mástique de corcho de acetato polivinilo; pulverizado o fratasado	—	0.100	—
Uretano, mezcla de dos partes; espuma rígida	70	0.026	1045
<b>Reflectivo</b>			
Hoja de aluminio que separa capas de vidrio harinosas; 10–12 capas, al vacío; para aplicaciones criogénicas (150 K)	40	0.00016	—
Hoja de aluminio y papel de vidrio laminado; 75–150 capas; al vacío; para aplicación criogénica (150 K)	120	0.000017	—
Polvo de óxido de silicio típico, al vacío	160	0.0017	—

Tabla A.1 Continuación

Composición	Punto de fusión (K)	Propiedades a 300 K				Propiedades a varias temperaturas (K)									
		$\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )	$c_p$ (J/kg·K)	$k$ (W/m·K)	$\alpha \cdot 10^6$ (m <sup>2</sup> /s)	100	200	400	600	800	1000	1200	1500	2000	2500
Aluminio puro	933	2702	903	237	97.1	302	237	240	231	218					
Aleación 2024-T6 (4.5% Cu, 1.5% Mg, 0.6% Mn)	775	2770	875	177	73.0	65	163	186	186	1146					
Aleación 195, vaciado (4.5% Cu)	2790	2790	883	168	68.2	473	787	925	1042	185					
Armco (99.75% puro)	7870	7870	447	72.7	20.7	95.6	80.6	65.7	53.1	42.2	32.3	28.7	31.4		
Berilio	1550	1850	1825	200	59.2	990	301	161	126	106	90.8	78.7			
Bismuto	545	9780	122	7.86	6.59	16.5	9.69	7.04							
Boro	2573	2500	1107	27.0	9.76	190	55.5	16.8	10.6	9.60	9.85				
Cadmio	594	8650	231	96.8	48.4	203	99.3	94.7							
Cinc	693	7140	389	116	41.8	117	118	111	103						
Circonio	2125	6570	278	22.7	12.4	33.2	25.2	21.6	20.7	21.6	23.7	26.0	28.8	33.0	344
Cromo	2118	7160	449	93.7	29.1	159	111	90.9	80.7	71.3	65.4	61.9	57.2	49.4	
Cobalto	1769	8862	421	99.2	26.6	167	122	85.4	67.4	58.2	52.1	49.3	42.5		
Cobre puro	1358	8933	385	401	117	482	413	393	379	366	352	339			
Bronce comercial (90% Cu, 10% Al)	1293	8800	420	52	14	252	356	397	417	433	451	480			

TABLA A.1 Propiedades termofísicas de sólidos metálicos seleccionados<sup>a</sup>

Composición	Punto de fusión (K)	Propiedades a 300 K				Propiedades a varias temperaturas (K)									
		$\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )	$c_p$ (J/kg · K)	$k$ (W/m · K)	$\alpha \cdot 10^6$ (m <sup>2</sup> /s)	100	200	400	600	800	1000	1200	1500	2000	2500
Acero puro	1810	7870	447	80.2	23.1	134	94.0	69.5	54.7	43.3	32.8	28.3	32.1		
Aceros al carbón															
Carbón ordinario (Mn $\leq$ 1%, Si $\leq$ 0.1%)		7854	434	60.5	17.7	216	384	490	574	680	975	609	654		
AISI 1010		7832	434	63.9	18.8			487	559	685	1169				
Carbón-silicio (Mn $\leq$ 1%, 0.1% < Si $\leq$ 0.6%)		7817	446	51.9	14.9			487	559	685	1168				
Carbón-manganeso-silicio		8131	434	41.0	11.6			501	582	699	971				
Aceros con cromo (bajo) (1% < Mn $\leq$ 1.65%, 0.1% < Si $\leq$ 0.6%)								42.2	39.7	35.0	27.6				
Aceros con cromo (bajo) (1% < Mn $\leq$ 1.65%, 0.1% < Si $\leq$ 0.6%)								487	559	685	1090				
Aceros con cromo (bajo) (1% Cr-1 Mo-Si)		7822	444	37.7	10.9			38.2	36.7	33.3	26.9				
(0.18% C, 0.65% Cr, 0.23% Mo, 0.6% Si)								492	575	688	969				
1 Cr-1 Mo		7858	442	42.3	12.2			42.0	39.1	34.5	27.4				
(0.16% C, 1% Cr, 0.54% Mo, 0.39% Si)								492	575	688	969				
1 Cr-V		7836	443	48.9	14.1			46.8	42.1	36.3	28.2				
(0.2% C, 1.02% Cr, 0.15% V)								492	575	688	969				
Aceros inoxidables															
AISI 302		8055	480	15.1	3.91			17.3	20.0	22.8	25.4				
(0.045% C, 18% Cr, 10% Ni)								512	559	585	606				
AISI 304	1670	7900	477	14.9	3.95	9.2	12.6	16.6	19.8	22.6	25.4	28.0	31.7		
(0.025% C, 18% Cr, 8% Ni)						272	402	515	557	582	611	640	682		
AISI 316		8238	468	13.4	3.48			15.2	18.3	21.3	24.2				
(0.025% C, 16% Cr, 10% Ni, 2% Mo)								504	550	576	602				
AISI 347		7978	480	14.2	3.71			15.8	18.9	21.9	24.7				
(0.02% C, 17% Cr, 4% Ni, 0.2% Nb)								513	559	585	606				

TABLE A.1 Properties of Selected Metals

Tabla A.7 (Continúa de la página anterior)

Gas	$T$ K	$k$ W/m K	$\rho$ kg/m <sup>3</sup>	$c_p$ J/kg K	$\mu \times 10^{6b}$ kg/m s	$\nu \times 10^{6b}$ m <sup>2</sup> /s	Pr
Bióxido de carbono (subl. a 195 K)	250	0.01435	2.15	782	12.8	5.97	0.70
	300	0.01810	1.788	844	15.2	8.50	0.71
	400	0.0259	1.341	937	19.6	14.6	0.71
	500	0.0333	1.073	1011	23.5	21.9	0.71
	600	0.0407	0.894	1074	27.1	30.3	0.71
	800	0.0544	0.671	1168	33.4	49.8	0.72
	1000	0.0665	0.537	1232	38.8	72.3	0.72
	1500	0.0945	0.358	1329	51.5	143.8	0.72
2000	0.1176	0.268	1371	61.9	231.0	0.72	
Refrigerante-12 (PE 243 K)	260	0.00769	5.668	560	10.98	1.938	0.80
	280	0.00868	5.263	582	11.80	2.242	0.79
	300	0.00970	4.912	602	12.60	2.566	0.78
	320	0.0107	4.605	621	13.39	2.908	0.77
	340	0.0118	4.334	639	14.16	3.268	0.77
	360	0.0129	4.093	655	14.92	3.644	0.76
	380	0.0140	3.878	671	15.66	4.038	0.75
	400	0.0151	3.684	685	16.39	4.449	0.74
	420	0.0162	3.509	698	17.10	4.875	0.74
440	0.0173	3.349	710	17.80	5.314	0.73	
460	0.0184	3.203	721	18.48	5.770	0.72	
Refrigerante-113 (PE 320.7 K)	320.7	0.00866	7.120	651	10.77	1.513	0.81
	340	0.00958	6.716	668	11.24	1.674	0.78
	360	0.01056	6.343	688	11.69	1.843	0.76
	380	0.01154	6.009	706	12.11	2.015	0.74
	400	0.01254	5.709	724	12.53	2.195	0.72
	420	0.01359	5.437	742	12.93	2.378	0.71
	440	0.01483	5.190	758	13.35	2.572	0.68
460	0.01623	4.964	774	13.78	2.776	0.66	
Helio (PE 4.3 K)	50	0.046	0.974	5200	6.46	6.63	0.73
	100	0.072	0.487	5200	9.94	20.4	0.72
	150	0.096	0.325	5200	13.0	40.0	0.70
	200	0.116	0.244	5200	15.6	64.0	0.70
	250	0.133	0.195	5200	17.9	92.0	0.70
	300	0.149	0.1624	5200	20.1	124.0	0.70
	400	0.178	0.1218	5200	24.4	200.0	0.71
	500	0.205	0.0974	5200	28.2	290.0	0.72
	600	0.229	0.0812	5200	31.7	390.0	0.72
	800	0.273	0.0609	5200	37.8	620.0	0.72
1000	0.313	0.0487	5200	43.3	890.0	0.72	

(Continúa)

**TABLA A.17**  
Propiedades de gas ideal del aire

T K	h kJ/kg	P <sub>r</sub> kJ/kg	u kJ/kg	v <sub>r</sub> kJ/kg · K	s <sup>o</sup> kJ/kg · K	T K	h kJ/kg	P <sub>r</sub> kJ/kg	u kJ/kg	v <sub>r</sub> kJ/kg · K	s <sup>o</sup> kJ/kg · K
200	199.97	0.3363	142.56	1707.0	1.29559	580	586.04	14.38	419.55	115.7	2.37348
210	209.97	0.3987	149.69	1512.0	1.34444	590	596.52	15.31	427.15	110.6	2.39140
220	219.97	0.4690	156.82	1346.0	1.39105	600	607.02	16.28	434.78	105.6	2.40902
230	230.02	0.5477	164.00	1205.0	1.43557	610	617.53	17.30	442.42	101.2	2.42644
240	240.02	0.6355	171.13	1084.0	1.47824	620	628.07	18.36	450.09	96.92	2.44356
250	250.05	0.7329	178.28	979.0	1.51917	630	638.63	19.84	457.78	92.84	2.46048
260	260.09	0.8405	185.45	887.8	1.55848	640	649.22	20.64	465.50	88.99	2.47716
270	270.11	0.9590	192.60	808.0	1.59634	650	659.84	21.86	473.25	85.34	2.49364
280	280.13	1.0889	199.75	738.0	1.63279	660	670.47	23.13	481.01	81.89	2.50985
285	285.14	1.1584	203.33	706.1	1.65055	670	681.14	24.46	488.81	78.61	2.52589
290	290.16	1.2311	206.91	676.1	1.66802	680	691.82	25.85	496.62	75.50	2.54175
295	295.17	1.3068	210.49	647.9	1.68515	690	702.52	27.29	504.45	72.56	2.55731
300	300.19	1.3860	214.07	621.2	1.70203	700	713.27	28.80	512.33	69.76	2.57277
305	305.22	1.4686	217.67	596.0	1.71865	710	724.04	30.38	520.23	67.07	2.58810
310	310.24	1.5546	221.25	572.3	1.73498	720	734.82	32.02	528.14	64.53	2.60319
315	315.27	1.6442	224.85	549.8	1.75106	730	745.62	33.72	536.07	62.13	2.61803
320	320.29	1.7375	228.42	528.6	1.76690	740	756.44	35.50	544.02	59.82	2.63280
325	325.31	1.8345	232.02	508.4	1.78249	750	767.29	37.35	551.99	57.63	2.64737
330	330.34	1.9352	235.61	489.4	1.79783	760	778.18	39.27	560.01	55.54	2.66176
340	340.42	2.149	242.82	454.1	1.82790	780	800.03	43.35	576.12	51.64	2.69013
350	350.49	2.379	250.02	422.2	1.85708	800	821.95	47.75	592.30	48.08	2.71787
360	360.58	2.626	257.24	393.4	1.88543	820	843.98	52.59	608.59	44.84	2.74504
370	370.67	2.892	264.46	367.2	1.91313	840	866.08	57.60	624.95	41.85	2.77170
380	380.77	3.176	271.69	343.4	1.94001	860	888.27	63.09	641.40	39.12	2.79783
390	390.88	3.481	278.93	321.5	1.96633	880	910.56	68.98	657.95	36.61	2.82344
400	400.98	3.806	286.16	301.6	1.99194	900	932.93	75.29	674.58	34.31	2.84856
410	411.12	4.153	293.43	283.3	2.01699	920	955.38	82.05	691.28	32.18	2.87324
420	421.26	4.522	300.69	266.6	2.04142	940	977.92	89.28	708.08	30.22	2.89748
430	431.43	4.915	307.99	251.1	2.06533	960	1000.55	97.00	725.02	28.40	2.92128
440	441.61	5.332	315.30	236.8	2.08870	980	1023.25	105.2	741.98	26.73	2.94468
450	451.80	5.775	322.62	223.6	2.11161	1000	1046.04	114.0	758.94	25.17	2.96770
460	462.02	6.245	329.97	211.4	2.13407	1020	1068.89	123.4	776.10	23.72	2.99034
470	472.24	6.742	337.32	200.1	2.15604	1040	1091.85	133.3	793.36	22.29	3.01260
480	482.49	7.268	344.70	189.5	2.17760	1060	1114.86	143.9	810.62	21.14	3.03449
490	492.74	7.824	352.08	179.7	2.19876	1080	1137.89	155.2	827.88	19.98	3.05608
500	503.02	8.411	359.49	170.6	2.21952	1100	1161.07	167.1	845.33	18.896	3.07732
510	513.32	9.031	366.92	162.1	2.23993	1120	1184.28	179.7	862.79	17.886	3.09825
520	523.63	9.684	374.36	154.1	2.25997	1140	1207.57	193.1	880.35	16.946	3.11883
530	533.98	10.37	381.84	146.7	2.27967	1160	1230.92	207.2	897.91	16.064	3.13916
540	544.35	11.10	389.34	139.7	2.29906	1180	1254.34	222.2	915.57	15.241	3.15916
550	554.74	11.86	396.86	133.1	2.31809	1200	1277.79	238.0	933.33	14.470	3.17886
560	565.17	12.66	404.42	127.0	2.33685	1220	1301.31	254.7	951.09	13.747	3.19834
570	575.59	13.50	411.97	121.2	2.35531	1240	1324.93	272.3	968.95	13.069	3.21751

Aire

**TABLA A.16**  
Funciones unidimensionales de choque normal para un gas ideal con calores específicos y masa molar constantes, con  $k = 1.4$ <sup>1</sup>

M <sub>r</sub>	M <sub>r</sub>	$\frac{P}{P^*}$	$\frac{\rho}{\rho^*}$	$\frac{T}{T^*}$	$\frac{P_{02}}{P_{01}}$	$\frac{P_{02}}{P_{01}}$
1.00	1.00000	1.0000	1.0000	1.0000	1.00000	1.8929
1.10	0.91177	1.2450	1.1691	1.0649	0.99892	2.1328
1.20	0.84217	1.5133	1.3416	1.1280	0.99280	2.4075
1.30	0.78596	1.8050	1.5157	1.1909	0.97935	2.7135
1.40	0.73971	2.1200	1.6896	1.2547	0.95819	3.0493
1.50	0.70109	2.4583	1.8621	1.3202	0.92978	3.4133
1.60	0.66844	2.8201	2.0317	1.3880	0.89550	3.8049
1.70	0.64055	3.2050	2.1977	1.4583	0.85573	4.2238
1.80	0.61650	3.6133	2.3592	1.5316	0.81268	4.6695
1.90	0.59562	4.0450	2.5157	1.6079	0.76735	5.1417
2.00	0.57735	4.5000	2.6666	1.6875	0.72088	5.6405
2.10	0.56128	4.9784	2.8119	1.7704	0.67422	6.1655
2.20	0.54706	5.4800	2.9512	1.8569	0.62812	6.7163
2.30	0.53441	6.0050	3.0846	1.9468	0.58331	7.2937
2.40	0.52312	6.5533	3.2119	2.0403	0.54015	7.8969
2.50	0.51299	7.1250	3.3333	2.1375	0.49902	8.5262
2.60	0.50387	7.7200	3.4489	2.2383	0.46012	9.1813
2.70	0.49563	8.3383	3.5590	2.3429	0.42359	9.8625
2.80	0.48817	8.9800	3.6635	2.4512	0.38946	10.569
2.90	0.48138	9.6450	3.7629	2.5632	0.35773	11.302
3.00	0.47519	10.333	3.8571	2.6790	0.32834	12.061
4.00	0.43496	18.500	4.5714	4.0469	0.13876	21.068
5.00	0.41523	29.000	5.0000	5.8000	0.06172	32.654
10.00	0.38757	116.50	5.7143	20.388	0.00304	129.217
∞	0.37796	∞	6.0000	∞	0	∞

<sup>1</sup>Cálculo a partir de las siguientes relaciones para  $k = 1.4$ :

$$M_r = \frac{\sqrt{M^2 + 2k(k-1)}}{\sqrt{2M^2/k(k-1) - 1}}$$

$$\frac{P}{P^*} = \frac{1 + kM^2}{1 + kM_r^2}$$

$$\frac{\rho}{\rho^*} = \frac{P/P^*}{T/T^*}$$

$$\frac{T}{T^*} = \frac{1 + M^2(k-1)}{1 + M_r^2(k-1)}$$

$$\frac{P_{02}}{P_{01}} = \frac{M_1}{M_2} \left[ \frac{1 + M_2^2(k-1)}{1 + M_1^2(k-1)} \right]^{\frac{k}{k-1}}$$

$$\frac{P_{02}}{P_{01}} = \frac{P/P^*}{P^*/P^*} = \frac{P/P^*}{1 + kM^2}$$

Una tabla más extensa aparece en Joseph H. Keenan y Joseph Kaye, Gas Tables (Nueva York: John Wiley & Sons, 1948), tabla 30.

### Coeficiente de pérdida dinámica, $C$

#### Codos a 90°

Liso, redondo	0.22
5 piezas, redondo	0.33
4 piezas, redondo	0.37
3 piezas, redondo	0.42
Puntiagudo, redondo	1.20
Liso, rectangular	0.18
T, rama	1.00
T, flujo a través de la tubería principal	0.10
Y simétrica	0.30

#### Amortiguador:

Posición	0°	10°	20°	30°	40°	50°
(completamente abierto)						
$C$	0.20	0.52	1.50	4.5	11.0	29

Rejilla de salida: Suponga que la caída total de presión a través de la rejilla es de 0.06 pulg H<sub>2</sub>O (15 Pa).

Lumbreras de alimentación: Suponga que la caída de presión total a través de la lumbrera es de 0.07 pulg H<sub>2</sub>O (17 Pa).

#### Material

#### Rugosidad, $\epsilon$ (m)

#### Rugosidad, $\epsilon$ (pie)

Vidrio, plástico	Suavidad	Suavidad
Cobre, latón, plomo (tubería)	$1.5 \times 10^{-6}$	$5 \times 10^{-6}$
Hierro fundido: sin revestir	$2.4 \times 10^{-4}$	$8 \times 10^{-4}$
Hierro fundido: revestido de asfalto	$1.2 \times 10^{-4}$	$4 \times 10^{-4}$
Acero comercial o acero soldado	$4.6 \times 10^{-5}$	$1.5 \times 10^{-4}$
Hierro forjado	$4.6 \times 10^{-5}$	$1.5 \times 10^{-4}$
Acero remachado	$1.8 \times 10^{-3}$	$6 \times 10^{-3}$
Concreto	$1.2 \times 10^{-3}$	$4 \times 10^{-3}$



## **ANEXO C: TOMA DE DATOS**



## DATOS PRUEBA 2

SISTEMA DE COMBUSTION DE BIOMASA						
TABLA DE DATOS						
	min					C
Intervalo de tiempo (t)	0	Temperatura ambiente (Ta)				21
Camara de Combustion	T1	T2	T3	T4	T5	Tprom
	C	C	C	C	C	C
Cara 1	28,9	30,1	30,8	29,3	29,4	29,7
Cara 2	27	27,1	26,3	27,1	26,8	26,86
Cara 3	33,1	32,4	32,5	33,1	X	32,775
Cara 4	31,3	30	28,2	28,8	X	29,575
					Tpt	29,7275
Tapas de aislamiento laterales	T1	T2	T3	T4	T5	Tprom
	C	C	C	C	C	C
Cara 1	28,4	30,3	27,9	27,4	29	28,6
Cara 2	29	28,4	28	28,5	29	28,58
					Tpt	28,59
Flujo másico de biomasa	m	kg/s	0.016			
Velocidad de entrada del aire al subsistema de transferencia de energía	Vea	m/s	9,4			
Velocidad de salida del aire del subsistema de transferencia de energía	Vsa	m/s	2,94			
Velocidad de entrada del aire de combustión	Vac	m/s	5,3			
Velocidad de salida de los gases de combustión	Vgc	m/s	4			
Temperatura de entrada del aire al subsistema de transferencia de energía	Tea	C	21			
Temperatura de salida del aire del subsistema de transferencia de energía	Tsa	C	21			
Temperatura de entrada del aire de combustión	Tac	C	21			
Temperatura de salida de los gases de combustión	Tgc	C	21			
Temperatura de los gases de combustión al ingresar a los intercambiadores de calor	Teic	C	21			

<b>SISTEMA DE COMBUSTION DE BIOMASA</b>						
<b>TABLA DE DATOS</b>						
	<b>min</b>					<b>C</b>
<b>Intervalo de tiempo (t)</b>	15	<b>Temperatura ambiente (Ta)</b>				21
<b>Camara de Combustion</b>	<b>T1</b>	<b>T2</b>	<b>T3</b>	<b>T4</b>	<b>T5</b>	<b>Tprom</b>
	<b>C</b>	<b>C</b>	<b>C</b>	<b>C</b>	<b>C</b>	<b>C</b>
<b>Cara 1</b>	32,4	31,2	30,1	32,2	29,4	31,06
<b>Cara 2</b>	32,5	30,3	33,5	30	33,5	31,96
<b>Cara 3</b>	37,2	35,9	38,7	39,9	X	37,925
<b>Cara 4</b>	38	37	36,8	33,7	X	36,375
					<b>Tpt</b>	34,33
<b>Tapas de aislamiento laterales</b>	<b>T1</b>	<b>T2</b>	<b>T3</b>	<b>T4</b>	<b>T5</b>	<b>Tprom</b>
	<b>C</b>	<b>C</b>	<b>C</b>	<b>C</b>	<b>C</b>	<b>C</b>
<b>Cara 1</b>	32,3	31,4	31,4	35,3	35,1	33,1
<b>Cara 2</b>	32	30,3	3,7	35,8	31	26,56
					<b>Tpt</b>	29,83
<b>Flujo másico de biomasa</b>	<b>m</b>	<b>kg/s</b>	0.016			
<b>Velocidad de entrada del aire al subsistema de transferencia de energía</b>	<b>Vea</b>	<b>m/s</b>	9,4			
<b>Velocidad de salida del aire del subsistema de transferencia de energía</b>	<b>Vsa</b>	<b>m/s</b>	2,8			
<b>Velocidad de entrada del aire de combustión</b>	<b>Vac</b>	<b>m/s</b>	5,6			
<b>Velocidad de salida de los gases de combustión</b>	<b>Vgc</b>	<b>m/s</b>	4,5			
<b>Temperatura de entrada del aire al subsistema de transferencia de energía</b>	<b>Tea</b>	<b>C</b>	21			
<b>Temperatura de salida del aire del subsistema de transferencia de energía</b>	<b>Tsa</b>	<b>C</b>	66,3			
<b>Temperatura de entrada del aire de combustión</b>	<b>Tac</b>	<b>C</b>	21			
<b>Temperatura de salida de los gases de combustión</b>	<b>Tgc</b>	<b>C</b>	47,6			
<b>Temperatura de los gases de combustión al ingresar a los intercambiadores de calor</b>	<b>Teic</b>	<b>C</b>	92,5			

<b>SISTEMA DE COMBUSTION DE BIOMASA</b>						
<b>TABLA DE DATOS</b>						
	<b>min</b>					<b>C</b>
<b>Intervalo de tiempo (t)</b>	30	<b>Temperatura ambiente (Ta)</b>				21
<b>Camara de Combustion</b>						
	<b>T1</b>	<b>T2</b>	<b>T3</b>	<b>T4</b>	<b>T5</b>	<b>Tprom</b>
	<b>C</b>	<b>C</b>	<b>C</b>	<b>C</b>	<b>C</b>	<b>C</b>
<b>Cara 1</b>	32,6	34,5	33	31,1	30	32,24
<b>Cara 2</b>	32,2	34,5	33	33,3	33,6	33,32
<b>Cara 3</b>	35,6	37	36	37,2	X	36,45
<b>Cara 4</b>	37,8	38	38	34,6	X	37,1
					<b>Tpt</b>	34,7775
<b>Tapas de aislamiento laterales</b>						
	<b>T1</b>	<b>T2</b>	<b>T3</b>	<b>T4</b>	<b>T5</b>	<b>Tprom</b>
	<b>C</b>	<b>C</b>	<b>C</b>	<b>C</b>	<b>C</b>	<b>C</b>
<b>Cara 1</b>	33,4	34,8	34	35,1	34,6	34,38
<b>Cara 2</b>	34,1	34,8	34,9	34,2	34,6	34,52
					<b>Tpt</b>	34,45
<b>Flujo másico de biomasa</b>						
	<b>m</b>	<b>kg/s</b>				
		0.016				
<b>Velocidad de entrada del aire al subsistema de transferencia de energía</b>						
	<b>Vea</b>	<b>m/s</b>				
		9,3				
<b>Velocidad de salida del aire del subsistema de transferencia de energía</b>						
	<b>Vsa</b>	<b>m/s</b>				
		2,87				
<b>Velocidad de entrada del aire de combustión</b>						
	<b>Vac</b>	<b>m/s</b>				
		5,1				
<b>Velocidad de salida de los gases de combustión</b>						
	<b>Vgc</b>	<b>m/s</b>				
		4,5				
<b>Temperatura de entrada del aire al subsistema de transferencia de energía</b>						
	<b>Tea</b>	<b>C</b>				
		21				
<b>Temperatura de salida del aire del subsistema de transferencia de energía</b>						
	<b>Tsa</b>	<b>C</b>				
		74				
<b>Temperatura de entrada del aire de combustión</b>						
	<b>Tac</b>	<b>C</b>				
		21				
<b>Temperatura de salida de los gases de combustión</b>						
	<b>Tgc</b>	<b>C</b>				
		49,2				
<b>Temperatura de los gases de combustión al ingresar a los intercambiadores de calor</b>						
	<b>Teic</b>	<b>C</b>				
		102,7				

<b>SISTEMA DE COMBUSTION DE BIOMASA</b>						
<b>TABLA DE DATOS</b>						
	<b>min</b>					<b>C</b>
<b>Intervalo de tiempo (t)</b>	45	<b>Temperatura ambiente (Ta)</b>				21
<b>Camara de Combustion</b>	<b>T1</b>	<b>T2</b>	<b>T3</b>	<b>T4</b>	<b>T5</b>	<b>Tprom</b>
	<b>C</b>	<b>C</b>	<b>C</b>	<b>C</b>	<b>C</b>	<b>C</b>
<b>Cara 1</b>	34,9	33,4	35,8	34,7	35	34,76
<b>Cara 2</b>	35,6	35,7	37,2	34	35,6	35,62
<b>Cara 3</b>	34	34,3	34,7	36,8	X	34,95
<b>Cara 4</b>	35,5	35,3	34,9	35,2	X	35,225
					<b>Tpt</b>	35,13875
<b>Tapas de aislamiento laterales</b>	<b>T1</b>	<b>T2</b>	<b>T3</b>	<b>T4</b>	<b>T5</b>	<b>Tprom</b>
	<b>C</b>	<b>C</b>	<b>C</b>	<b>C</b>	<b>C</b>	<b>C</b>
<b>Cara 1</b>	34,2	35,1	36,9	34,7	34	34,98
<b>Cara 2</b>	35,7	33,7	33,9	34,2	34,3	34,36
					<b>Tpt</b>	34,67
<b>Flujo másico de biomasa</b>	<b>m</b>	<b>kg/s</b>	0.016			
<b>Velocidad de entrada del aire al subsistema de transferencia de energía</b>	<b>Vea</b>	<b>m/s</b>	9,65			
<b>Velocidad de salida del aire del subsistema de transferencia de energía</b>	<b>Vsa</b>	<b>m/s</b>	2,94			
<b>Velocidad de entrada del aire de combustión</b>	<b>Vac</b>	<b>m/s</b>	5,35			
<b>Velocidad de salida de los gases de combustión</b>	<b>Vgc</b>	<b>m/s</b>	4,7			
<b>Temperatura de entrada del aire al subsistema de transferencia de energía</b>	<b>Tea</b>	<b>C</b>	21			
<b>Temperatura de salida del aire del subsistema de transferencia de energía</b>	<b>Tsa</b>	<b>C</b>	77,5			
<b>Temperatura de entrada del aire de combustión</b>	<b>Tac</b>	<b>C</b>	21			
<b>Temperatura de salida de los gases de combustión</b>	<b>Tgc</b>	<b>C</b>	50			
<b>Temperatura de los gases de combustión al ingresar a los intercambiadores de calor</b>	<b>Teic</b>	<b>C</b>	114			

<b>SISTEMA DE COMBUSTION DE BIOMASA</b>						
<b>TABLA DE DATOS</b>						
	<b>min</b>					<b>C</b>
<b>Intervalo de tiempo (t)</b>	60	<b>Temperatura ambiente (Ta)</b>				21
<b>Camara de Combustion</b>	<b>T1</b>	<b>T2</b>	<b>T3</b>	<b>T4</b>	<b>T5</b>	<b>Tprom</b>
	<b>C</b>	<b>C</b>	<b>C</b>	<b>C</b>	<b>C</b>	<b>C</b>
<b>Cara 1</b>	35,4	36	35,9	35,6	36,1	35,8
<b>Cara 2</b>	35,5	36,9	34,3	35	35,7	35,48
<b>Cara 3</b>	38	35,4	35,2	35	X	35,9
<b>Cara 4</b>	35,5	37,8	37,1	37	X	36,85
					<b>Tpt</b>	36,0075
<b>Tapas de aislamiento laterales</b>	<b>T1</b>	<b>T2</b>	<b>T3</b>	<b>T4</b>	<b>T5</b>	<b>Tprom</b>
	<b>C</b>	<b>C</b>	<b>C</b>	<b>C</b>	<b>C</b>	<b>C</b>
<b>Cara 1</b>	36,7	34,1	38,2	33,9	37	35,98
<b>Cara 2</b>	36,7	34	34,9	35,3	35	35,18
					<b>Tpt</b>	35,58
<b>Flujo másico de biomasa</b>	<b>m</b>	<b>kg/s</b>	0.016			
<b>Velocidad de entrada del aire al subsistema de transferencia de energía</b>	<b>Vea</b>	<b>m/s</b>	9,8			
<b>Velocidad de salida del aire del subsistema de transferencia de energía</b>	<b>Vsa</b>	<b>m/s</b>	2,9			
<b>Velocidad de entrada del aire de combustión</b>	<b>Vac</b>	<b>m/s</b>	5,2			
<b>Velocidad de salida de los gases de combustión</b>	<b>Vgc</b>	<b>m/s</b>	4,65			
<b>Temperatura de entrada del aire al subsistema de transferencia de energía</b>	<b>Tea</b>	<b>C</b>	21			
<b>Temperatura de salida del aire del subsistema de transferencia de energía</b>	<b>Tsa</b>	<b>C</b>	83			
<b>Temperatura de entrada del aire de combustión</b>	<b>Tac</b>	<b>C</b>	21			
<b>Temperatura de salida de los gases de combustión</b>	<b>Tgc</b>	<b>C</b>	52			
<b>Temperatura de los gases de combustión al ingresar a los intercambiadores de calor</b>	<b>Teic</b>	<b>C</b>	130			

### DATOS PRUEBA 3

SISTEMA DE COMBUSTION DE BIOMASA						
TABLA DE DATOS						
	min					C
Intervalo de tiempo (t)	0	Temperatura ambiente (Ta)				17
Camara de Combustion						
	T1	T2	T3	T4	T5	Tprom
	C	C	C	C	C	C
Cara 1	28,5	30	31,1	29,4	30,2	29,84
Cara 2	26,9	27	25,7	27,6	27	26,84
Cara 3	33	31,9	32,8	33,6	X	32,825
Cara 4	30,6	27,9	28	29	X	28,875
					Tpt	29,595
Tapas de aislamiento laterales						
	T1	T2	T3	T4	T5	Tprom
	C	C	C	C	C	C
Cara 1	29	30	27	27	30	28,6
Cara 2	29	27	28	28	29	28,2
					Tpt	28,4
Flujo másico de biomasa				m	kg/s	0.016
Velocidad de entrada del aire al subsistema de transferencia de energía				Vea	m/s	9,6
Velocidad de salida del aire del subsistema de transferencia de energía				Vsa	m/s	2,9
Velocidad de entrada del aire de combustión				Vac	m/s	5,4
Velocidad de salida de los gases de combustión				Vgc	m/s	4,1
Temperatura de entrada del aire al subsistema de transferencia de energía				Tea	C	17
Temperatura de salida del aire del subsistema de transferencia de energía				Tsa	C	17
Temperatura de entrada del aire de combustión				Tac	C	17
Temperatura de salida de los gases de combustión				Tgc	C	17
Temperatura de los gases de combustión al ingresar a los intercambiadores de calor				Teic	C	17

<b>SISTEMA DE COMBUSTION DE BIOMASA</b>						
<b>TABLA DE DATOS</b>						
	<b>min</b>					<b>C</b>
<b>Intervalo de tiempo (t)</b>	15	<b>Temperatura ambiente (Ta)</b>				17
<b>Camara de Combustion</b>	<b>T1</b>	<b>T2</b>	<b>T3</b>	<b>T4</b>	<b>T5</b>	<b>Tprom</b>
	<b>C</b>	<b>C</b>	<b>C</b>	<b>C</b>	<b>C</b>	<b>C</b>
<b>Cara 1</b>	32,7	31,9	30,6	33	29,7	31,58
<b>Cara 2</b>	32,9	30,4	33,8	31	33,7	32,36
<b>Cara 3</b>	37,9	36,1	38,9	40	X	38,225
<b>Cara 4</b>	40,1	38	37,1	33,9	X	37,275
					<b>Tpt</b>	34,86
<b>Tapas de aislamiento laterales</b>	<b>T1</b>	<b>T2</b>	<b>T3</b>	<b>T4</b>	<b>T5</b>	<b>Tprom</b>
	<b>C</b>	<b>C</b>	<b>C</b>	<b>C</b>	<b>C</b>	<b>C</b>
<b>Cara 1</b>	34,2	32,5	31	34,2	36	33,58
<b>Cara 2</b>	34	31,9	37	37,3	32	34,44
					<b>Tpt</b>	34,01
<b>Flujo másico de biomasa</b>	<b>m</b>	<b>kg/s</b>	0.016			
<b>Velocidad de entrada del aire al subsistema de transferencia de energía</b>	<b>Vea</b>	<b>m/s</b>	9,3			
<b>Velocidad de salida del aire del subsistema de transferencia de energía</b>	<b>Vsa</b>	<b>m/s</b>	2,75			
<b>Velocidad de entrada del aire de combustión</b>	<b>Vac</b>	<b>m/s</b>	5,72			
<b>Velocidad de salida de los gases de combustión</b>	<b>Vgc</b>	<b>m/s</b>	4,53			
<b>Temperatura de entrada del aire al subsistema de transferencia de energía</b>	<b>Tea</b>	<b>C</b>	17			
<b>Temperatura de salida del aire del subsistema de transferencia de energía</b>	<b>Tsa</b>	<b>C</b>	67			
<b>Temperatura de entrada del aire de combustión</b>	<b>Tac</b>	<b>C</b>	17			
<b>Temperatura de salida de los gases de combustión</b>	<b>Tgc</b>	<b>C</b>	48,1			
<b>Temperatura de los gases de combustión al ingresar a los intercambiadores de calor</b>	<b>Teic</b>	<b>C</b>	94,1			

<b>SISTEMA DE COMBUSTION DE BIOMASA</b>						
<b>TABLA DE DATOS</b>						
	<b>min</b>					<b>C</b>
<b>Intervalo de tiempo (t)</b>	30	<b>Temperatura ambiente (Ta)</b>				17
<b>Camara de Combustion</b>	<b>T1</b>	<b>T2</b>	<b>T3</b>	<b>T4</b>	<b>T5</b>	<b>Tprom</b>
	<b>C</b>	<b>C</b>	<b>C</b>	<b>C</b>	<b>C</b>	<b>C</b>
<b>Cara 1</b>	33,9	35	34,2	31,5	31	33,12
<b>Cara 2</b>	33,1	34,4	34	34,8	33,3	33,92
<b>Cara 3</b>	34,5	36	37	37	X	36,125
<b>Cara 4</b>	36,9	36,4	37	36	X	36,575
					<b>Tpt</b>	34,935
<b>Tapas de aislamiento laterales</b>	<b>T1</b>	<b>T2</b>	<b>T3</b>	<b>T4</b>	<b>T5</b>	<b>Tprom</b>
	<b>C</b>	<b>C</b>	<b>C</b>	<b>C</b>	<b>C</b>	<b>C</b>
<b>Cara 1</b>	34	35,9	33	36	33	34,38
<b>Cara 2</b>	34	33,8	34,1	34	35,9	34,36
					<b>Tpt</b>	34,37
<b>Flujo másico de biomasa</b>	<b>m</b>	<b>kg/s</b>	0.016			
<b>Velocidad de entrada del aire al subsistema de transferencia de energía</b>	<b>Vea</b>	<b>m/s</b>	9,5			
<b>Velocidad de salida del aire del subsistema de transferencia de energía</b>	<b>Vsa</b>	<b>m/s</b>	2,93			
<b>Velocidad de entrada del aire de combustión</b>	<b>Vac</b>	<b>m/s</b>	5,3			
<b>Velocidad de salida de los gases de combustión</b>	<b>Vgc</b>	<b>m/s</b>	4,2			
<b>Temperatura de entrada del aire al subsistema de transferencia de energía</b>	<b>Tea</b>	<b>C</b>	17			
<b>Temperatura de salida del aire del subsistema de transferencia de energía</b>	<b>Tsa</b>	<b>C</b>	72			
<b>Temperatura de entrada del aire de combustión</b>	<b>Tac</b>	<b>C</b>	17			
<b>Temperatura de salida de los gases de combustión</b>	<b>Tgc</b>	<b>C</b>	50,4			
<b>Temperatura de los gases de combustión al ingresar a los intercambiadores de calor</b>	<b>Teic</b>	<b>C</b>	104,2			

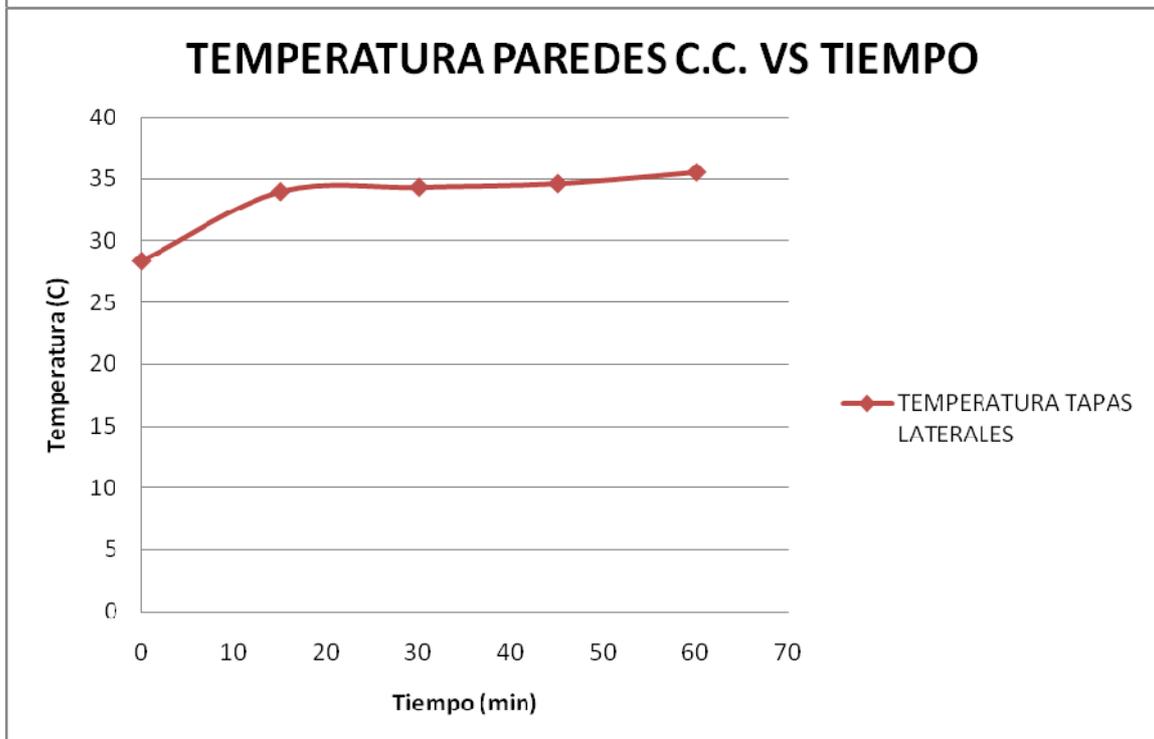
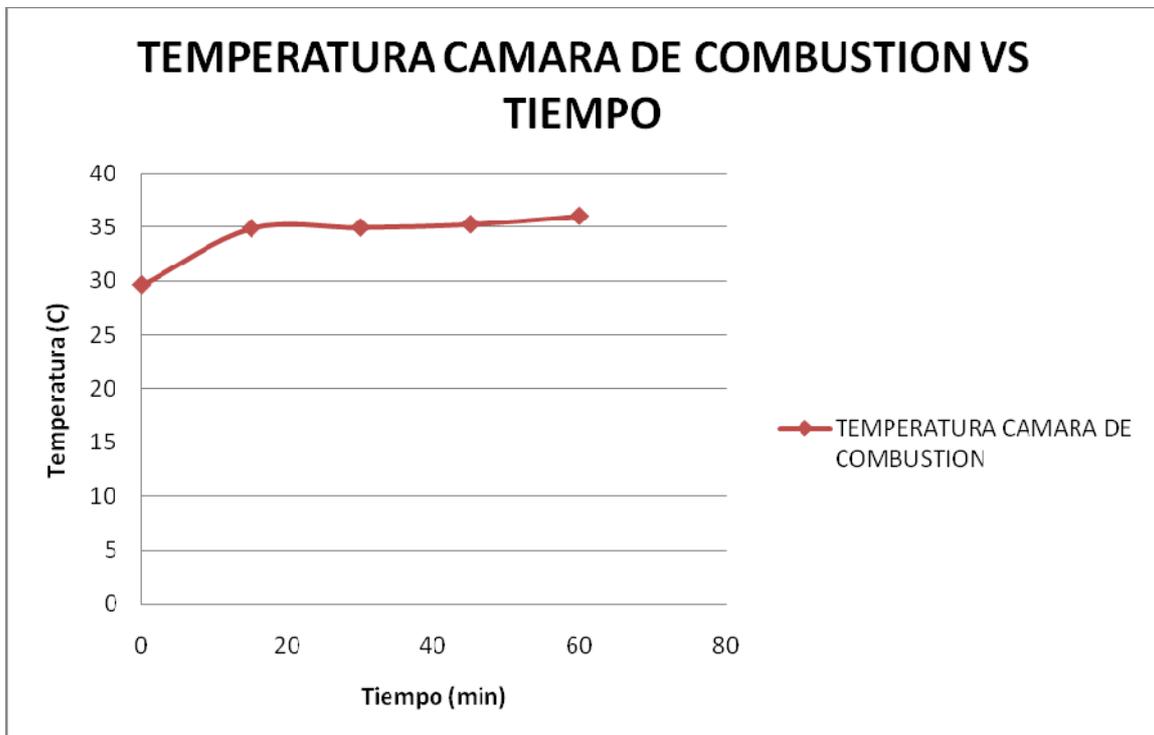
<b>SISTEMA DE COMBUSTION DE BIOMASA</b>						
<b>TABLA DE DATOS</b>						
	<b>min</b>					<b>C</b>
<b>Intervalo de tiempo (t)</b>	45	<b>Temperatura ambiente (Ta)</b>				17
<b>Camara de Combustion</b>	<b>T1</b>	<b>T2</b>	<b>T3</b>	<b>T4</b>	<b>T5</b>	<b>Tprom</b>
	<b>C</b>	<b>C</b>	<b>C</b>	<b>C</b>	<b>C</b>	<b>C</b>
<b>Cara 1</b>	35	34,2	35	35	34,7	34,78
<b>Cara 2</b>	35,6	34,9	37,5	33	35,2	35,24
<b>Cara 3</b>	35,1	33,2	37,1	37,2	X	35,65
<b>Cara 4</b>	35,2	35,8	34	36	X	35,25
					<b>Tpt</b>	35,23
<b>Tapas de aislamiento laterales</b>	<b>T1</b>	<b>T2</b>	<b>T3</b>	<b>T4</b>	<b>T5</b>	<b>Tprom</b>
	<b>C</b>	<b>C</b>	<b>C</b>	<b>C</b>	<b>C</b>	<b>C</b>
<b>Cara 1</b>	34,1	35,1	36,9	34,7	35	35,16
<b>Cara 2</b>	34	33,2	33,9	34,7	35	34,16
					<b>Tpt</b>	34,66
<b>Flujo másico de biomasa</b>	<b>m</b>	<b>kg/s</b>	0.016			
<b>Velocidad de entrada del aire al subsistema de transferencia de energía</b>	<b>Vea</b>	<b>m/s</b>	9,55			
<b>Velocidad de salida del aire del subsistema de transferencia de energía</b>	<b>Vsa</b>	<b>m/s</b>	2,9			
<b>Velocidad de entrada del aire de combustión</b>	<b>Vac</b>	<b>m/s</b>	5,3			
<b>Velocidad de salida de los gases de combustión</b>	<b>Vgc</b>	<b>m/s</b>	4,65			
<b>Temperatura de entrada del aire al subsistema de transferencia de energía</b>	<b>Tea</b>	<b>C</b>	17			
<b>Temperatura de salida del aire del subsistema de transferencia de energía</b>	<b>Tsa</b>	<b>C</b>	77			
<b>Temperatura de entrada del aire de combustión</b>	<b>Tac</b>	<b>C</b>	17			
<b>Temperatura de salida de los gases de combustión</b>	<b>Tgc</b>	<b>C</b>	51			
<b>Temperatura de los gases de combustión al ingresar a los intercambiadores de calor</b>	<b>Teic</b>	<b>C</b>	113			

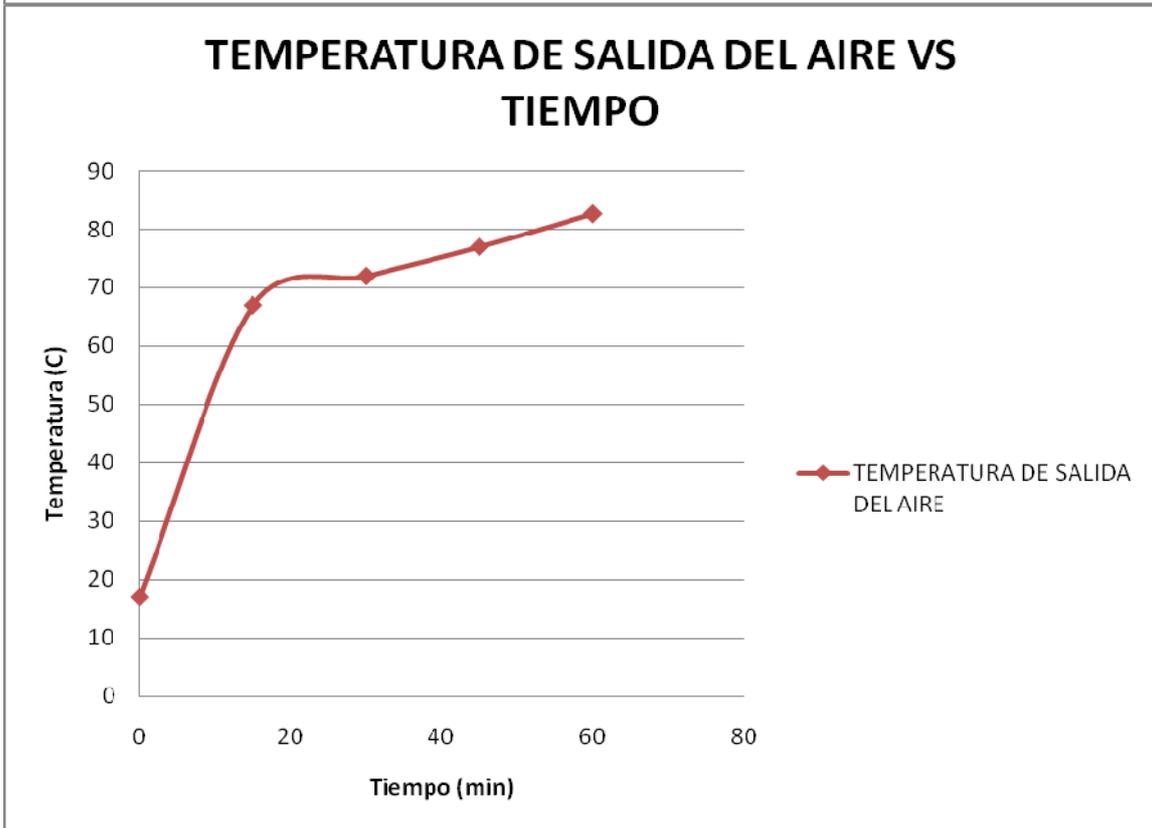
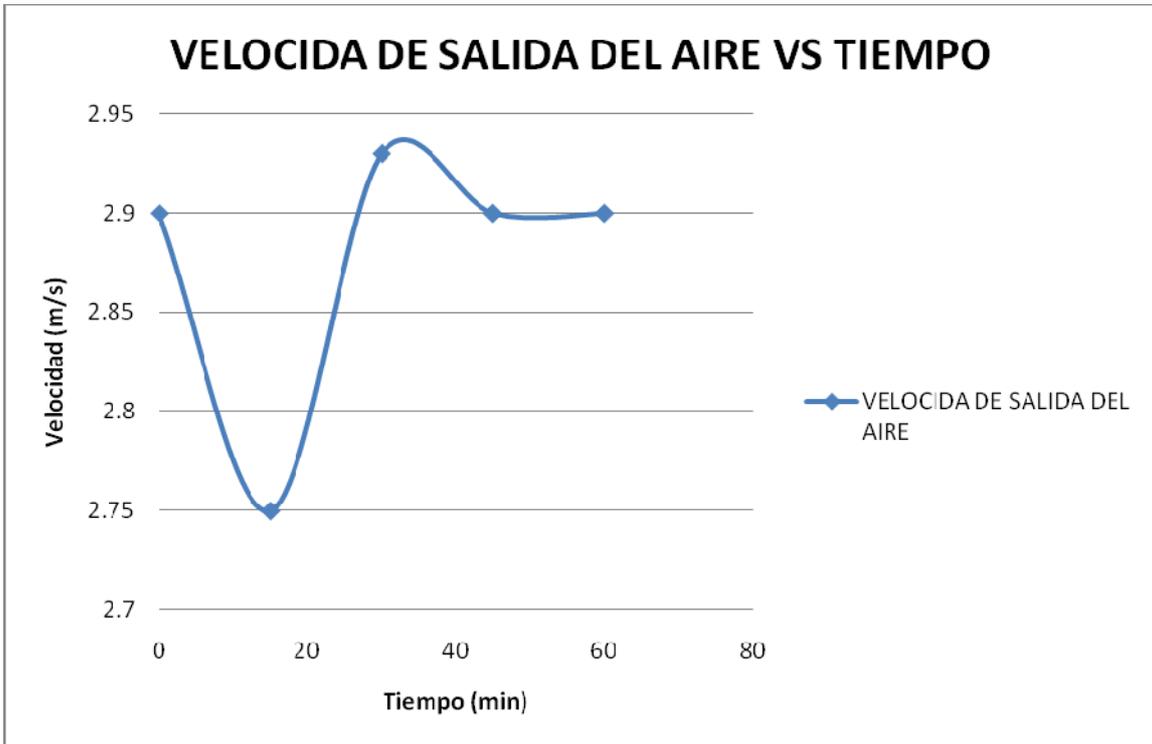
<b>SISTEMA DE COMBUSTION DE BIOMASA</b>						
<b>TABLA DE DATOS</b>						
	<b>min</b>					<b>C</b>
<b>Intervalo de tiempo (t)</b>	60	<b>Temperatura ambiente (Ta)</b>				17
<b>Camara de Combustion</b>						
	<b>T1</b>	<b>T2</b>	<b>T3</b>	<b>T4</b>	<b>T5</b>	<b>Tprom</b>
	<b>C</b>	<b>C</b>	<b>C</b>	<b>C</b>	<b>C</b>	<b>C</b>
<b>Cara 1</b>	35,4	36	35,9	35,6	36,1	35,8
<b>Cara 2</b>	35,5	36,9	34,3	35	35,7	35,48
<b>Cara 3</b>	38	35,4	35,2	35	X	35,9
<b>Cara 4</b>	35,5	37,8	37,1	37	X	36,85
					<b>Tpt</b>	36,0075
<b>Tapas de aislamiento laterales</b>						
	<b>T1</b>	<b>T2</b>	<b>T3</b>	<b>T4</b>	<b>T5</b>	<b>Tprom</b>
	<b>C</b>	<b>C</b>	<b>C</b>	<b>C</b>	<b>C</b>	<b>C</b>
<b>Cara 1</b>	36,7	34,1	38,2	33,9	37	35,98
<b>Cara 2</b>	36,7	34	34,9	35,3	35	35,18
					<b>Tpt</b>	35,58
<b>Flujo másico de biomasa</b>						
				<b>m</b>	kg/s	0.016
<b>Velocidad de entrada del aire al subsistema de transferencia de energía</b>				<b>Vea</b>	m/s	9,8
<b>Velocidad de salida del aire del subsistema de transferencia de energía</b>				<b>Vsa</b>	m/s	2,9
<b>Velocidad de entrada del aire de combustión</b>				<b>Vac</b>	m/s	5,2
<b>Velocidad de salida de los gases de combustión</b>				<b>Vgc</b>	m/s	4,65
<b>Temperatura de entrada del aire al subsistema de transferencia de energía</b>				<b>Tea</b>	C	17
<b>Temperatura de salida del aire del subsistema de transferencia de energía</b>				<b>Tsa</b>	C	82,7
<b>Temperatura de entrada del aire de combustión</b>				<b>Tac</b>	C	17
<b>Temperatura de salida de los gases de combustión</b>				<b>Tgc</b>	C	54
<b>Temperatura de los gases de combustión al ingresar a los intercambiadores de calor</b>				<b>Teic</b>	C	133

## **ANEXO D: GRÁFICOS DE ANÁLISIS DE DATOS**

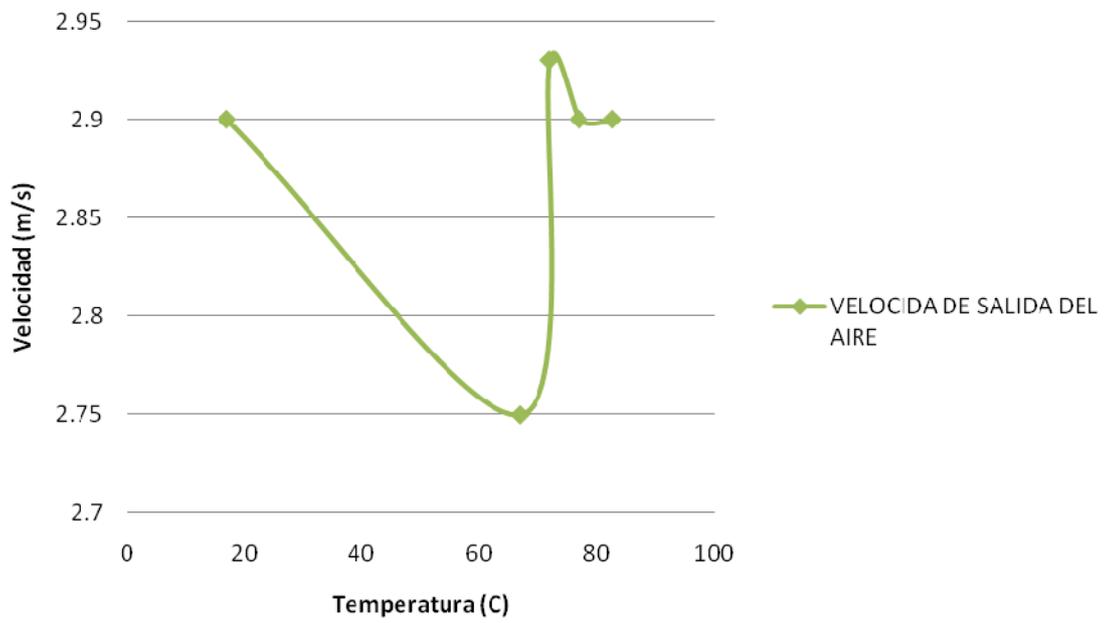


## GRAFICOS PRUEBA 2

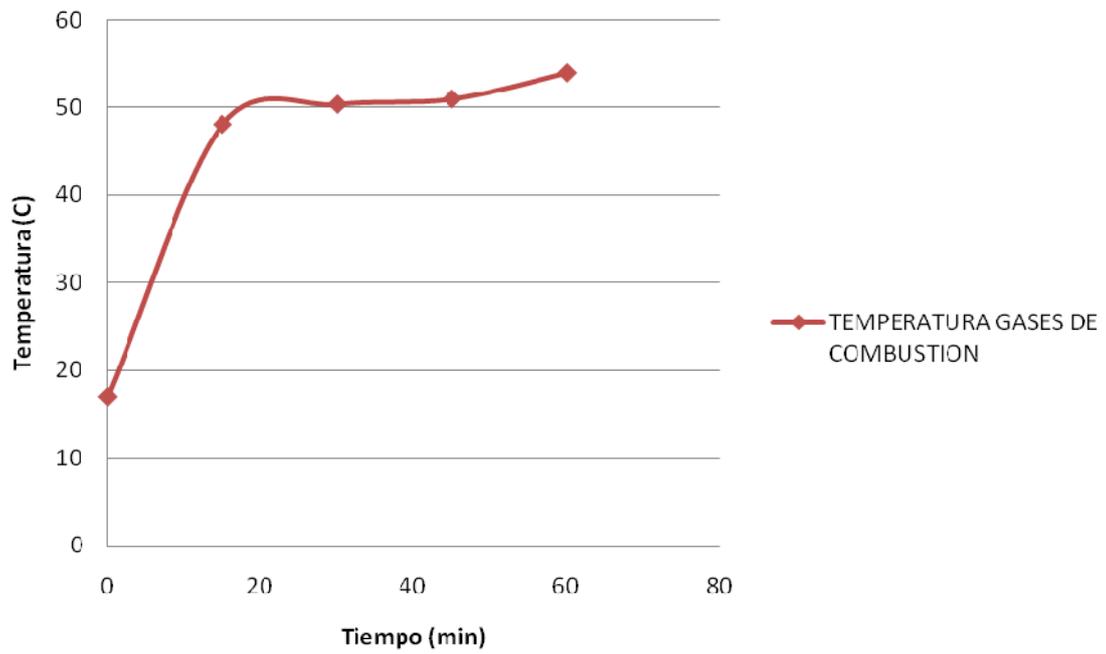




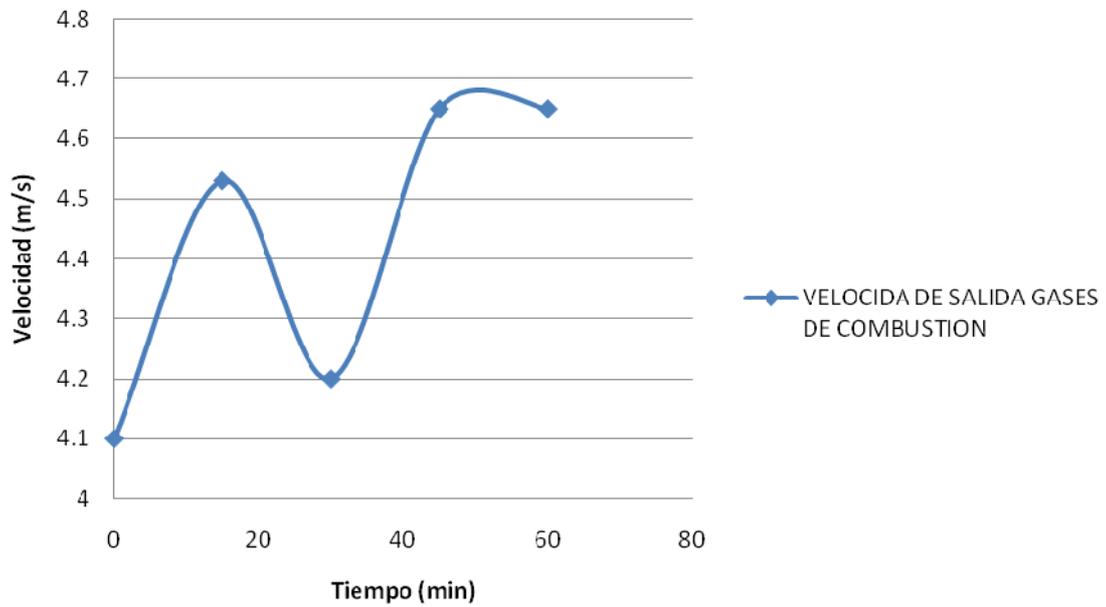
### VELOCIDA DE SALIDA DEL AIRE VS TEMPERATURA DE SALIDA DEL AIRE



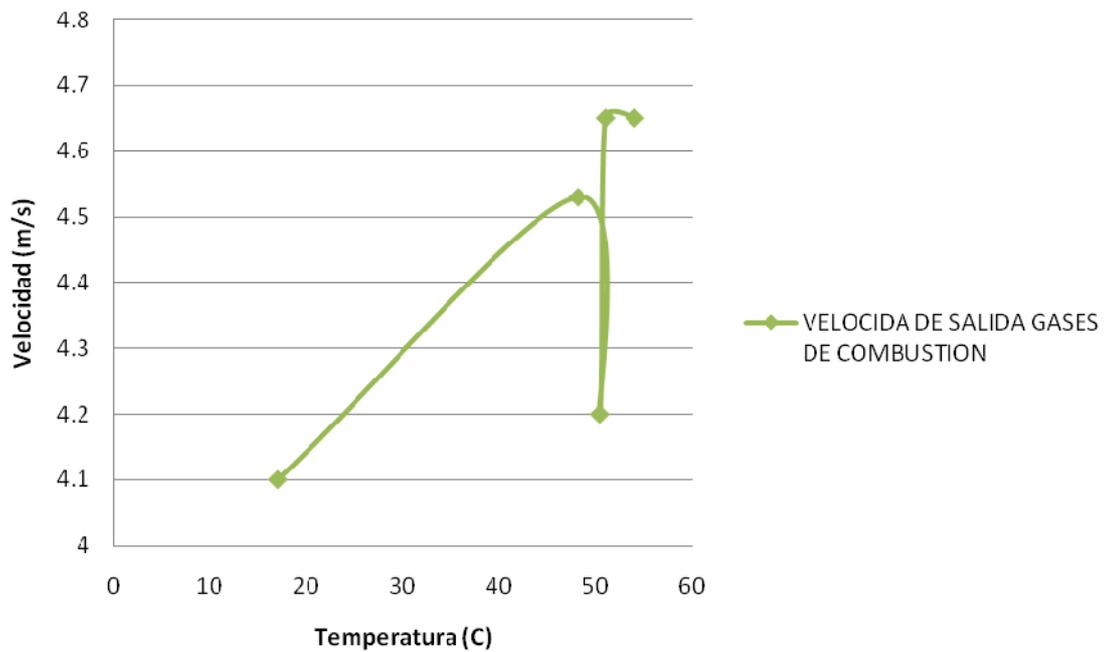
### TEMPERATURA GASES DE COMBUSTION VS TIEMPO



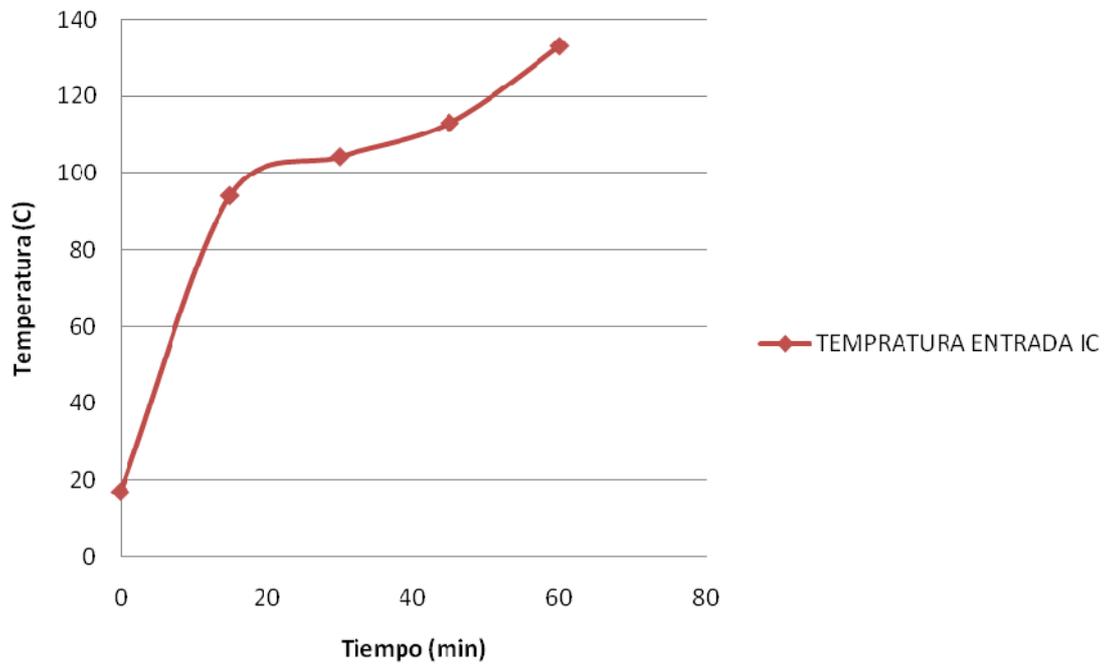
## VELOCIDA DE SALIDA GASES DE COMBUSTION VS TIEMPO



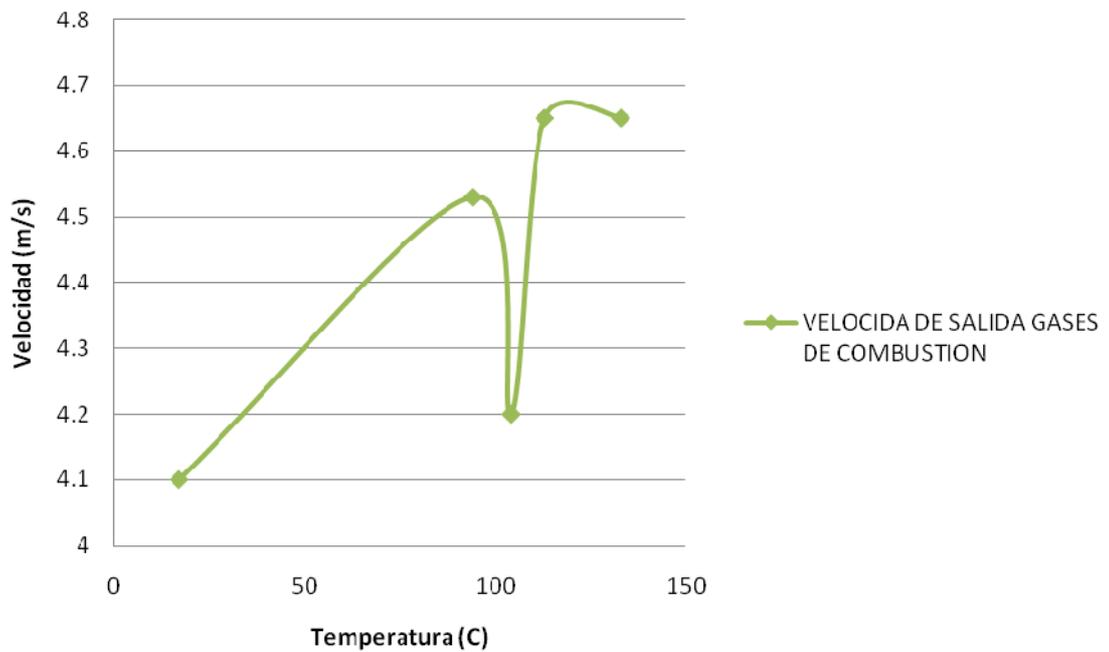
## VELOCIDA DE SALIDA GASES DE COMBUSTION VS TEMPERATURA GASES DE COMBUSTION

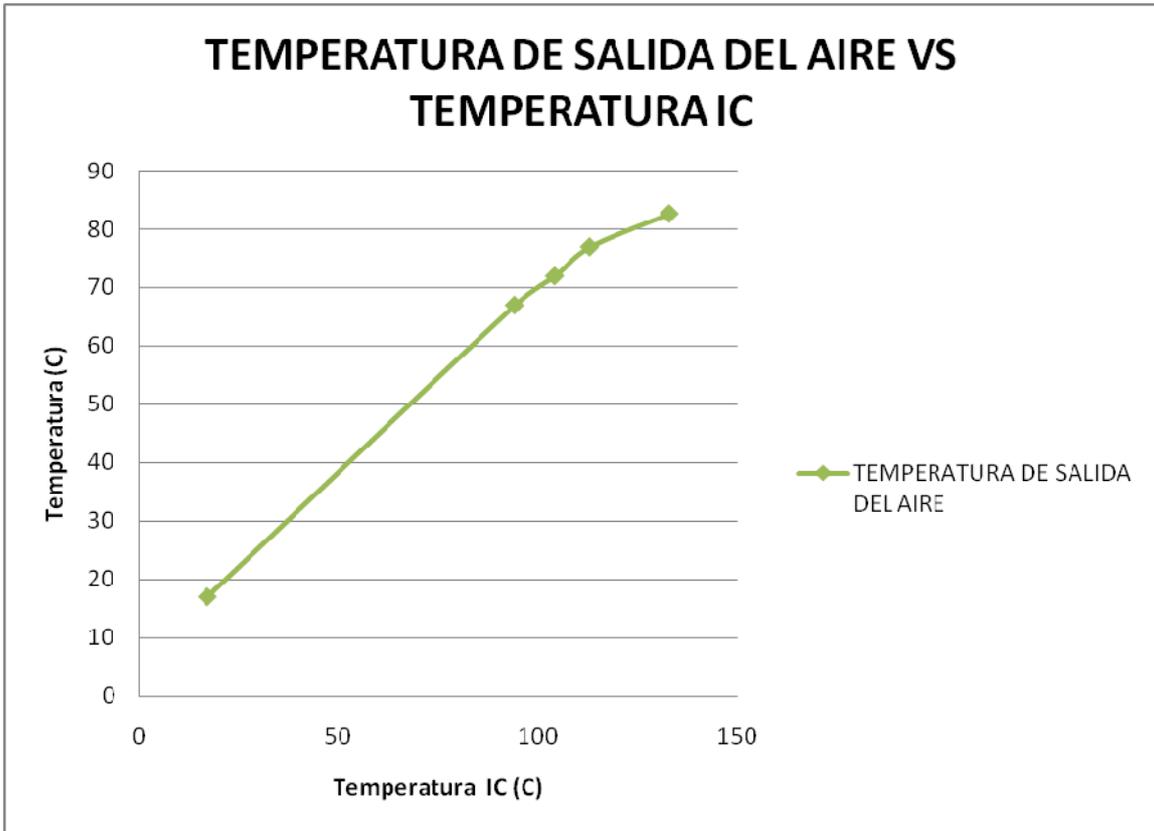


### TEMPRATURA ENTRADA IC VS TIEMPO

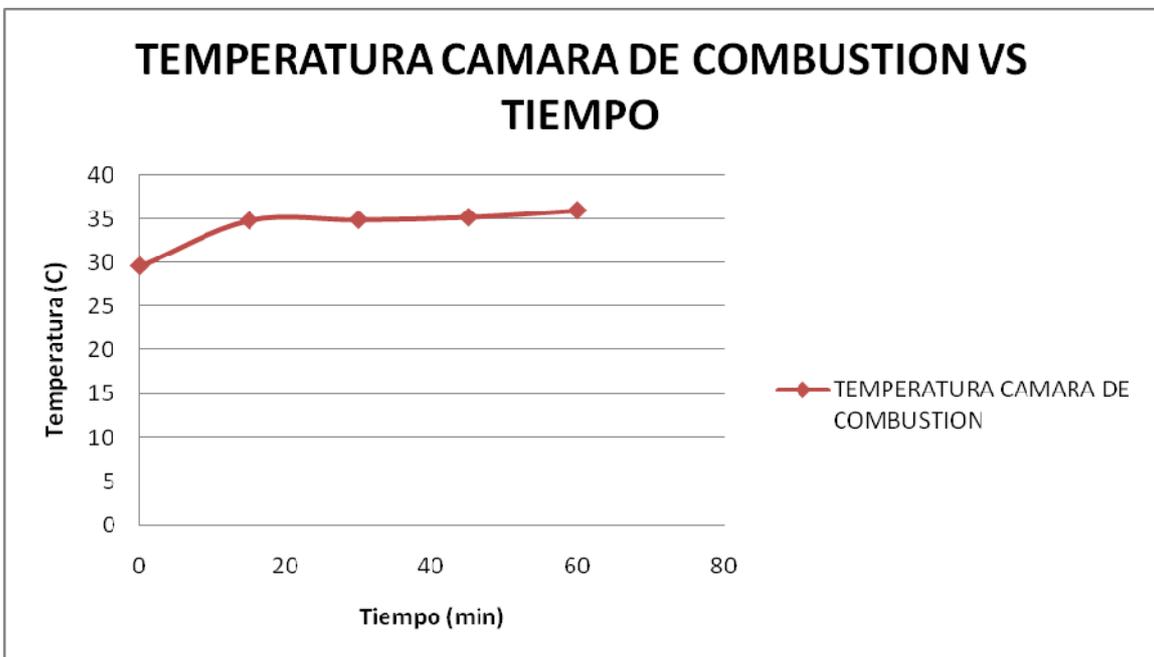


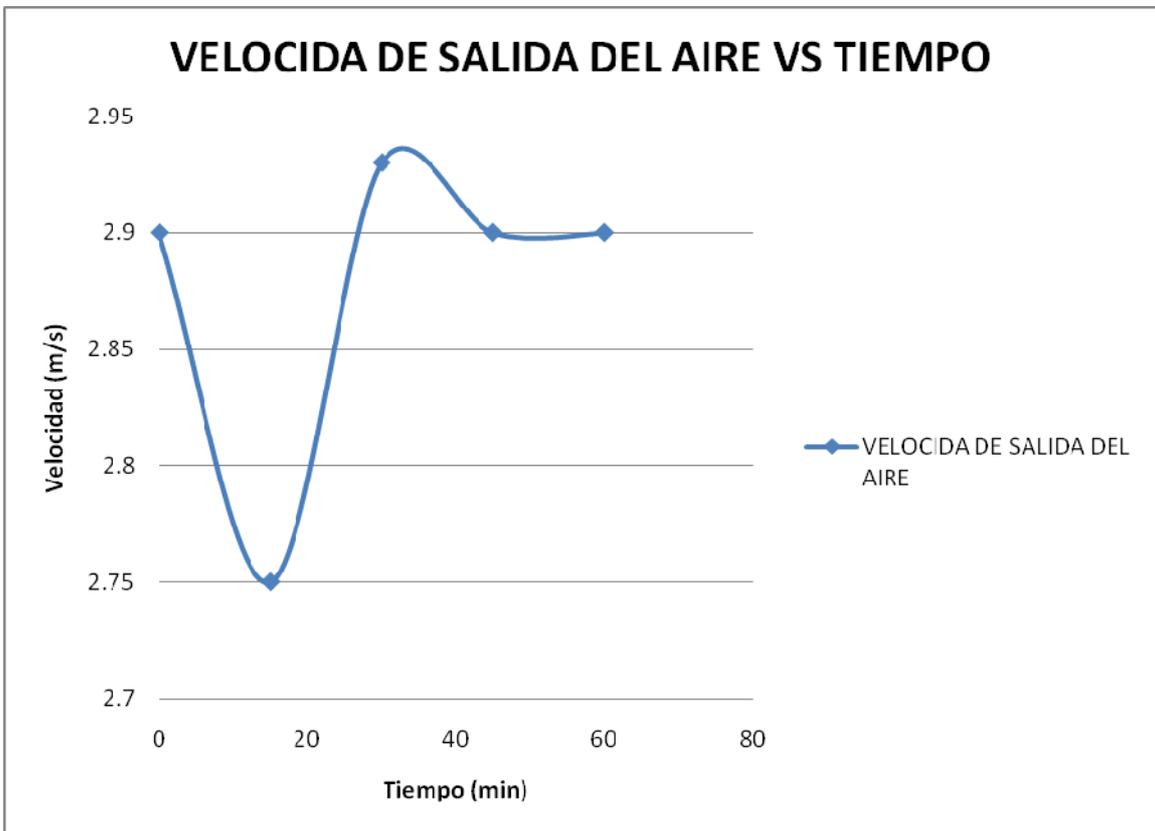
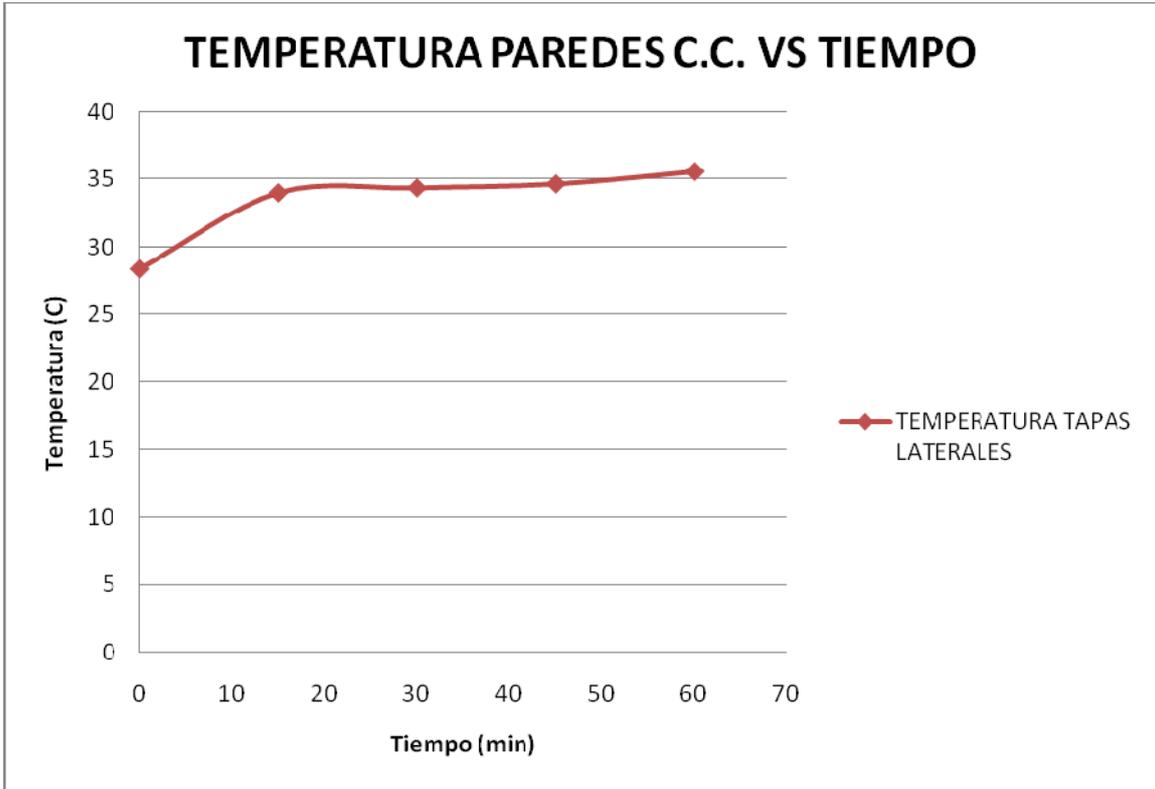
### VELOCIDAD DE SALIDA GASES DE COMBUSTION VS TEMPERATURA ENTRADA IC

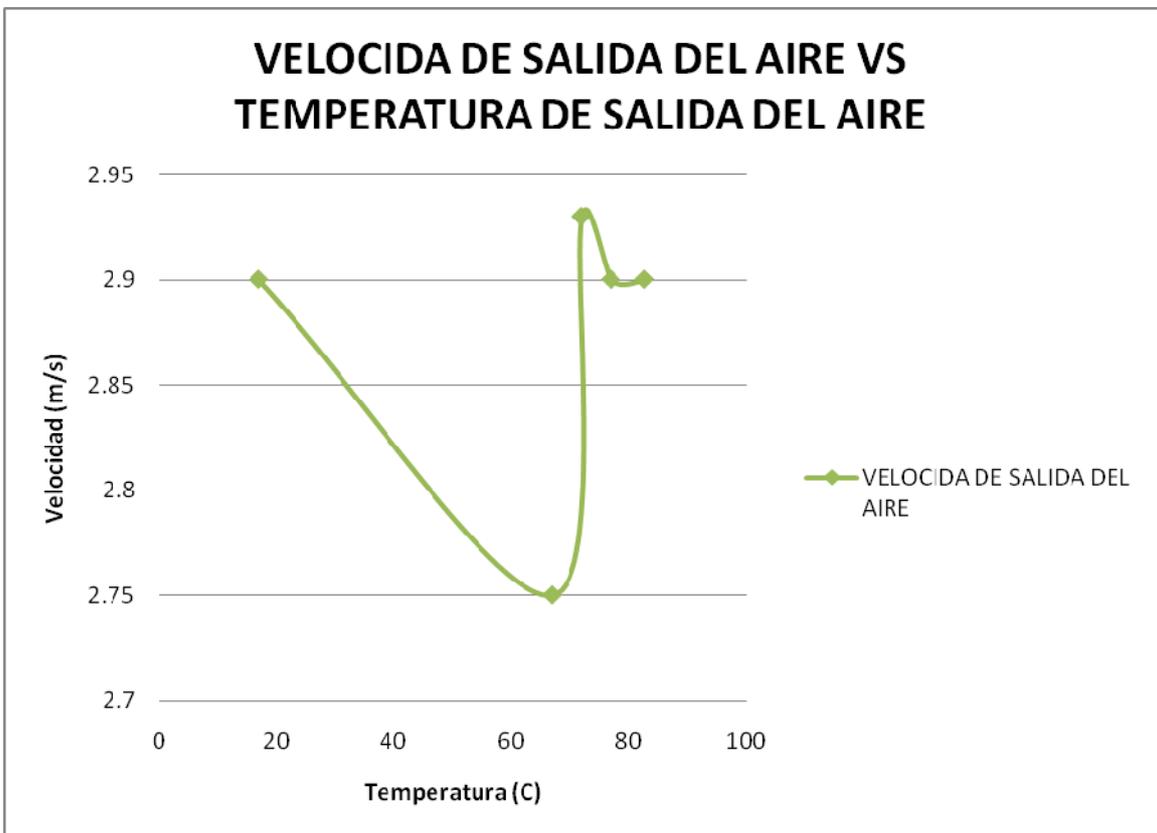
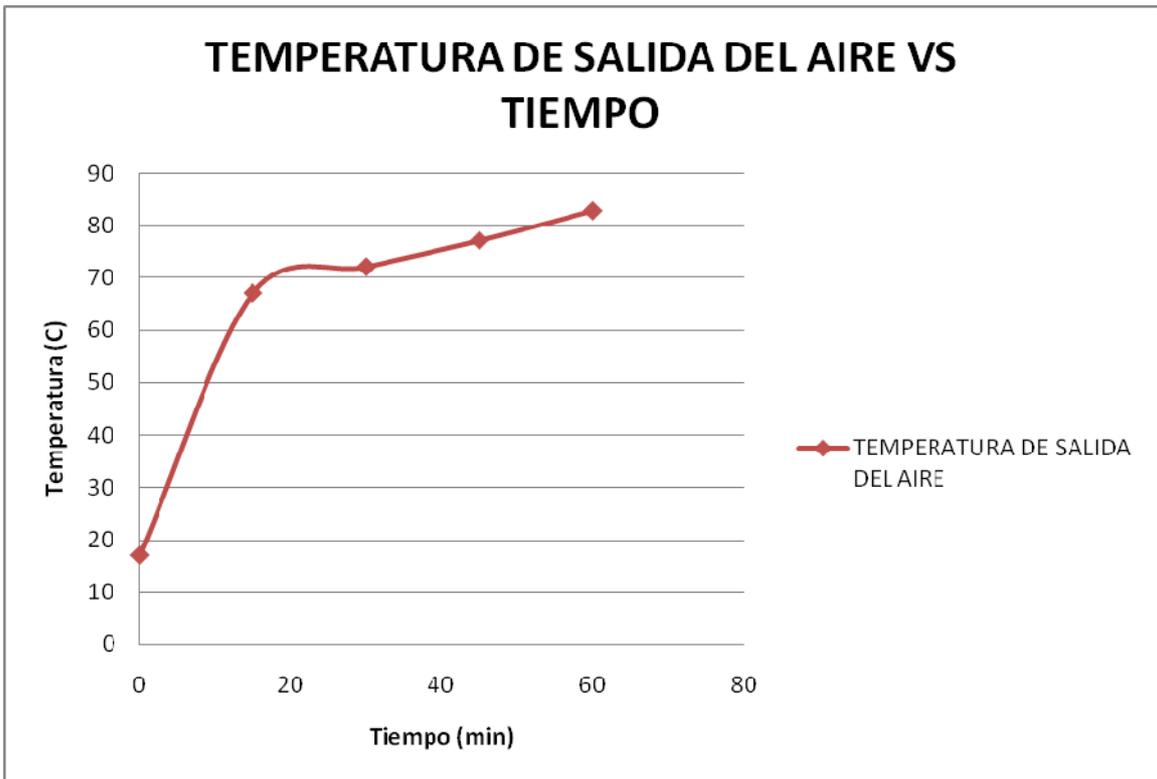




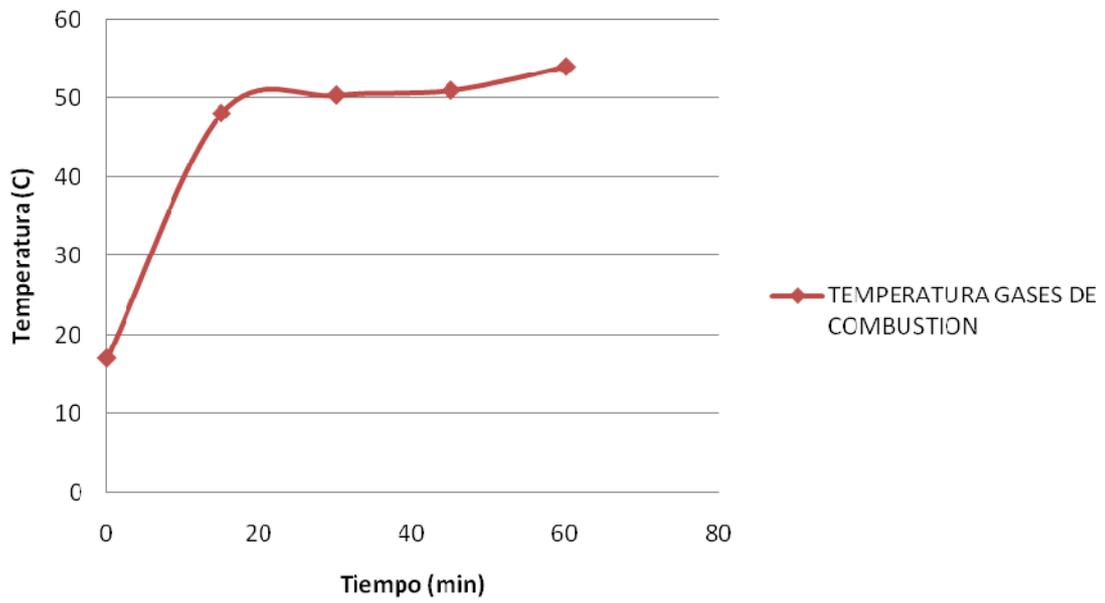
### GRAFICOS PRUEBA 3



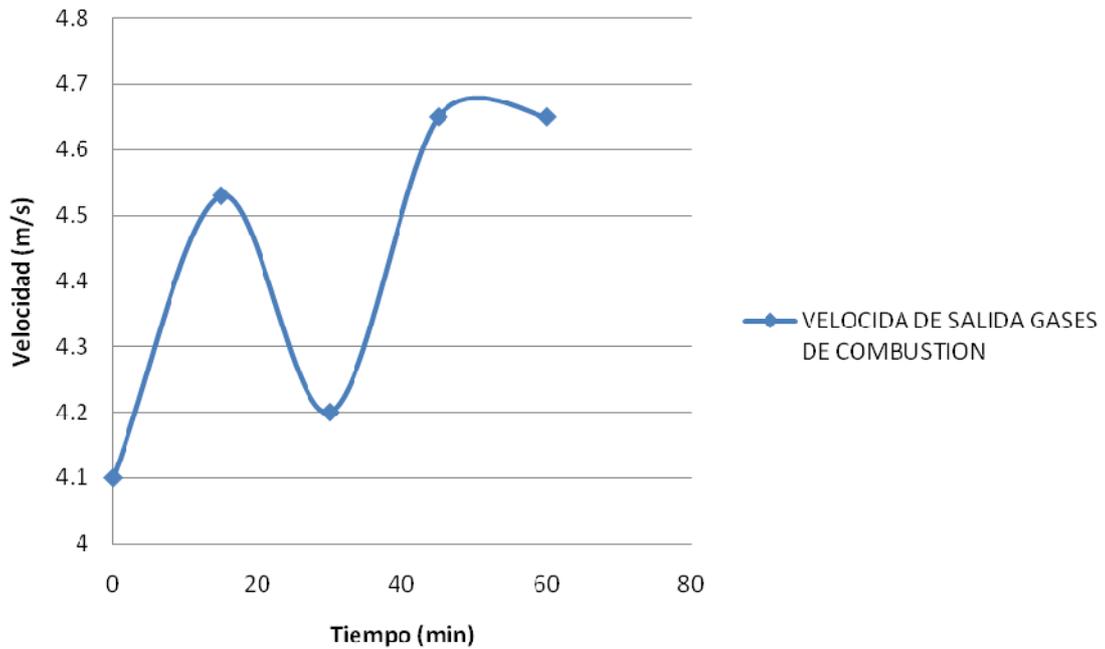




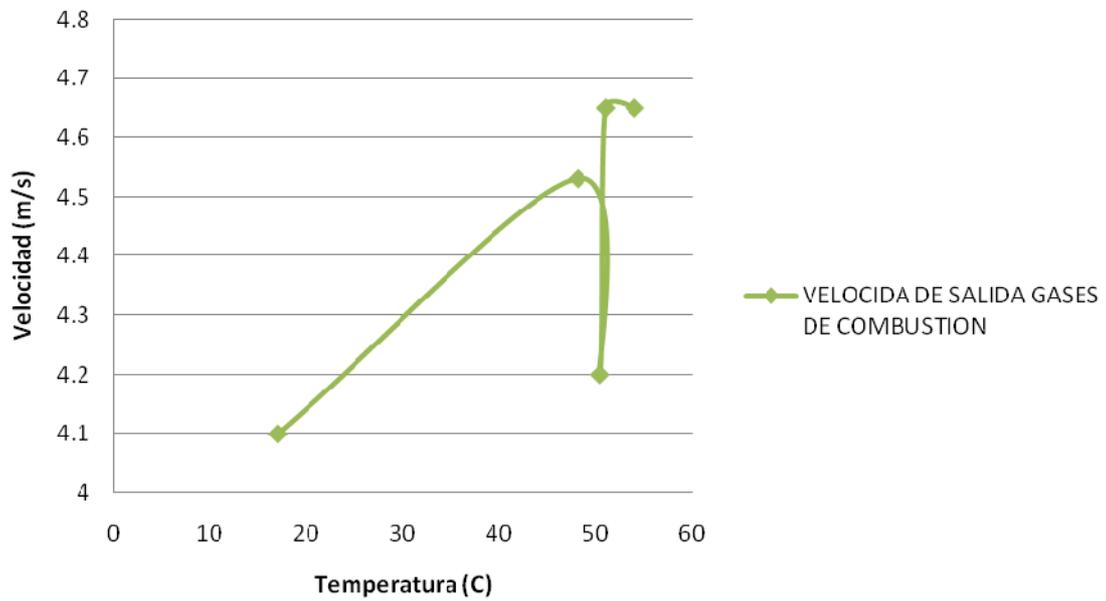
### TEMPERATURA GASES DE COMBUSTION VS TIEMPO



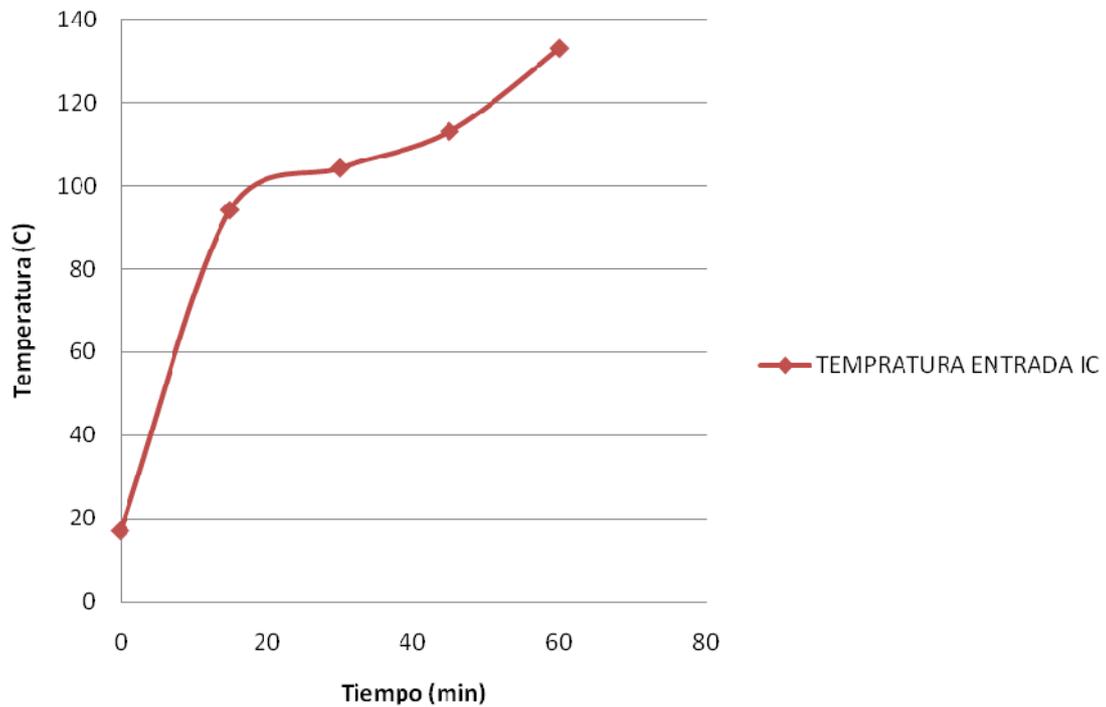
### VELOCIDA DE SALIDA GASES DE COMBUSTION VS TIEMPO



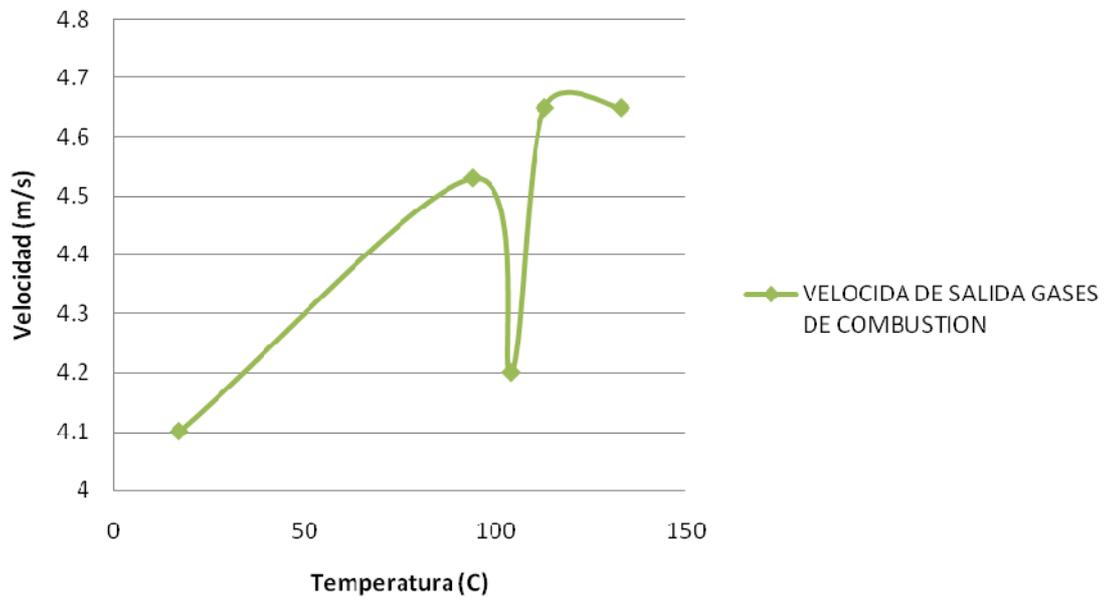
## VELOCIDA DE SALIDA GASES DE COMBUSTION VS TEMPERATURA GASES DE COMBUSTION



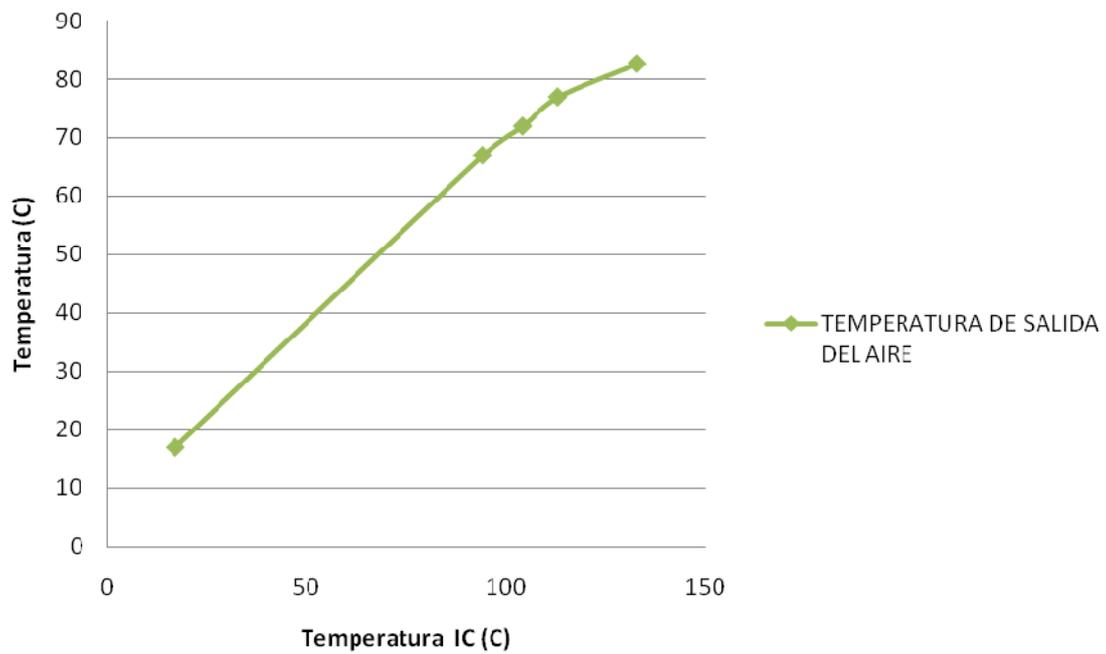
## TEMPRATURA ENTRADA IC VS TIEMPO



### VELOCIDAD DE SALIDA GASES DE COMBUSTION VS TEMPERATURA ENTRADA IC



### TEMPERATURA DE SALIDA DEL AIRE VS TEMPERATURA IC





## **ANEXO E: TABLAS DE RESULTADOS**



## TABLAS DE RESULTADOS PRUEBA 2

TABLA DE RESULTADOS			
Simbolo	Denominacion	Unidad	Valor
QTc	Calor generado por la combustion	W	2,37E+05
Qpcc	Calor perdido en la camara de combustion	W	23,27129
Tsatr	Temperatura de salida del aire teórica	K	376
HLT	Perdidas de presión totales	Pa	545,32065
Vsal	Velocidad de salida del aire teórica	m/s	4,3546
QTf	Calor transferido al subsistema de t.e.	W	1,60E+05
Qtl	Calor perdido en las tapas laterales	W	41,86365
Qpt	Calor total perdido	W	65,13494
Xdest	Exergia destruida	W	5,09172
$\Delta X_{sist}$	Tasa de variacion de exergia del sistema	W	1,53E+07
nii	Eficiencia segunda ley	%	41,98
nic	Eficiencia intercambiadores de calor	%	34,77

TABLA DE RESULTADOS			
Simbolo	Denominacion	Unidad	Valor
QTc	Calor generado por la combustion	BTU/hr	8,07E+04
Qpcc	Calor perdido en la camara de combustion	BTU/hr	7,94E+00
Tsatr	Temperatura de salida del aire teórica	C	103
HLT	Perdidas de presión totales	mmHg	4,08990488
Vsal	Velocidad de salida del aire teórica	m/s	4,3546
QTf	Calor transferido al subsistema de t.e.	BTU/hr	5,46E+04
Qtl	Calor perdido en las tapas laterales	BTU/hr	1,43E+01
Xdest	Exergia destruida	BTU/hr	2,22E+01
$\Delta X_{sist}$	Tasa de variacion de exergia del sistema	BTU/hr	1,74E+00
nii	Eficiencia segunda ley	%	41,98
nic	Eficiencia intercambiadores de calor	%	34,77

### TABLAS DE RESULTADOS PRUEBA 3

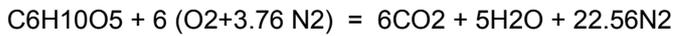
TABLA DE RESULTADOS			
Simbolo	Denominacion	Unidad	Valor
QTc	Calor generado por la combustion	W	2,45E+05
Qpcc	Calor perdido en la camara de combustion	W	20,94288
Tsatr	Temperatura de salida del aire teórica	K	390
HLT	Perdidas de presión totales	Pa	575,38574
Vsal	Velocidad de salida del aire teórica	m/s	4,92165
QTf	Calor transferido al subsistema de t.e.	W	1,79E+05
Qtl	Calor perdido en las tapas laterales	W	47,16354
Qpt	Calor total perdido	W	68,10642
Xdest	Exergía destruida	W	7,63218
$\Delta X_{sist}$	Tasa de variación de exergía del sistema	W	1,60E+07
nii	Eficiencia segunda ley	%	37,55
nic	Eficiencia intercambiadores de calor	%	45,98

TABLA DE RESULTADOS			
Simbolo	Denominacion	Unidad	Valor
QTc	Calor generado por la combustion	BTU/hr	8,35E+04
Qpcc	Calor perdido en la camara de combustion	BTU/hr	7,15E+00
Tsatr	Temperatura de salida del aire teórica	C	117
HLT	Perdidas de presión totales	mmHg	4,31539305
Vsal	Velocidad de salida del aire teórica	m/s	4,92165
QTf	Calor transferido al subsistema de t.e.	BTU/hr	6,11E+04
Qtl	Calor perdido en las tapas laterales	BTU/hr	1,61E+01
Xdest	Exergía destruida	BTU/hr	2,32E+01
$\Delta X_{sist}$	Tasa de variación de exergía del sistema	BTU/hr	2,60E+00
nii	Eficiencia segunda ley	%	37,55
nic	Eficiencia intercambiadores de calor	%	45,98

## **ANEXO F: PROGRAMA DE CÁLCULO EN MATHCAD**

## SISTEMA DE COMBUSTION DE BIOMASA

### BALANCE DE MASA TEORICO



$$PMO_2 := 32$$

$$PMC_6H_{10}O_5 := 162$$

$$PMN_2 := 28$$

$$KG_{aire} := 6 \cdot (PMO_2 + 3.76 PMN_2)$$

$$KG_{aire} = 823.68$$

$$KG_{biomasa} := 1 \cdot PMC_6H_{10}O_5$$

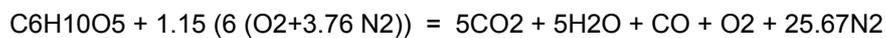
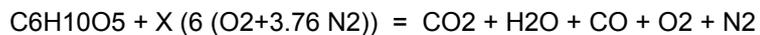
$$KG_{biomasa} = 162 \quad \frac{Kg}{mol}$$

### RELACION AIRE - COMBUSTIBLE

$$AC := \frac{KG_{aire}}{KG_{biomasa}}$$

$$AC = 5.08444$$

### BALANCE DE MASA REAL



$$X := 1.15$$

$$KG_{airereal} := 6 \cdot X \cdot (PMO_2 + 3.76 PMN_2)$$

$$KG_{airereal} = 947.232$$

$$KG_{biomasareal} := 1 \cdot PMC_6H_{10}O_5$$

$$KG_{biomasareal} = 162$$

## RELACION AIRE - COMBUSTIBLE REAL

$$AC_{real} := \frac{KG_{airereal}}{KG_{biomasareal}}$$

$$AC_{real} = 5.84711$$

## TEMPERATURA DE LLAMA ADIABATICA

$$Pc := 1541200 \frac{J}{Kg}$$

$$Q_{ad} := Pc \cdot KG_{biomasa}$$

$$Q_{ad} = 2.49674 \times 10^9 \frac{J}{mol}$$

$$T_{ad} := 1500 \text{ K}$$

## CALCULO DEL CALOR TOTAL POR LA COMBUSTION

$$m_b := 0.01 \frac{kg}{s}$$

$$Q_{Tc} := Pc \cdot m_b$$

$$Q_{Tc} = 2.46592 \times 10^5 \text{ W}$$

## CALOR PERDIDO EN LA CAMARA DE COMBUSTION

### COEFICIENTE DE CONVECCION EXTERNA

$$V_{ve} := 0.81 \frac{m}{s}$$

$$h_{cce} := 2.8 + 3V_{ve}$$

$$h_{cce} = 5.23 \frac{W}{m^2 K}$$

## COEFICIENTE DE CONVECCION INTERNA

$$\gamma_a := 0.97 \frac{\text{Kg}}{\text{m}^3} \quad \text{densidad específica del aire a T ambiente}$$

$$g_r := 9.81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}$$

$$V_{ac} := 5.3 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

$$H_{v1} := \frac{\gamma_a \cdot V_{ac}^2}{2g_r}$$

$$H_{v1} = 1.38875 \quad \text{Pa}$$

$$C_1 := 0.18$$

$$H_{L1} := C_1 \cdot H_{v1}$$

$$H_{L1} = 0.24998 \quad \text{Pa}$$

$$H_{v2} := H_{v1} - H_{L1}$$

$$H_{v2} = 1.13878 \quad \text{Pa}$$

$$V_2 := \sqrt{\frac{H_{v2} \cdot 2 \cdot g_r}{\gamma_a}}$$

$$V_2 = 4.79935 \quad \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

$$C_2 := 0.52$$

$$H_{L2} := C_2 \cdot H_{v2}$$

$$H_{L2} = 0.59216 \quad \text{Pa}$$

$$Hv3 := Hv2 - HL2$$

$$Hv3 = 0.54661 \quad \text{Pa}$$

$$V3 := \sqrt{\frac{Hv3 \cdot 2 \cdot gr}{\gamma a}}$$

$$V3 = 3.32509 \quad \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

$$Vegc := V3$$

$$Vegc = 3.32509 \quad \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

$$vcad := 240 \quad \frac{\text{m}^2}{\text{s}}$$

$$Prad := 0.68$$

viscosidad cinematica y numero de Prandtl  
a la temperatura de llama adiabatica  
1500 K

$$Lcc := 0.54 \quad \text{m}$$

$$Recc := \frac{Vegc \cdot Lcc}{vcad}$$

$$Recc = 7.48145 \times 10^{-3}$$

$$Nuc := 0.664 Recc^{\frac{1}{2}} \cdot Prad^{\frac{1}{3}}$$

$$Nuc = 0.05063$$

$$Kgcad := 100 \cdot 10^3 \quad \frac{\text{W}}{\text{mK}}$$

$$hcci := \frac{Nuc \cdot Kgcad}{Lcc}$$

$$h_{cci} = 9.37557 \times 10^3 \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \text{K}}$$

#### COEFICIENTE GLOBAL DE TRANSFERENCIA DE CALOR

$$L_{c1} := 0.07 \quad \text{m}$$

$$L_{c2} := 0.005 \quad \text{m}$$

$$L_{c3} := 0.04 \quad \text{m}$$

$$L_{c4} := 0.001 \quad \text{m}$$

$$K_{ac} := 30 \quad \frac{\text{W}}{\text{mK}}$$

$$K_{lv} := 0.058 \quad \frac{\text{W}}{\text{mK}}$$

$$K_{lr} := 1.8 \quad \frac{\text{W}}{\text{mK}}$$

$$U_{cc} := \frac{1}{\frac{1}{h_{cci}} + \frac{L_{c1}}{K_{lr}} + \frac{L_{c2}}{K_{ac}} + \frac{L_{c3}}{K_{lv}} + \frac{L_{c4}}{K_{ac}} + \frac{1}{h_{cce}}}$$

$$U_{cc} = 1.08689 \quad \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \text{K}}$$

#### PERDIDAS DE CALOR EN LA CAMARA DE COMBUSTION

$$A_{cc} := 1.24 \quad \text{m}^2$$

$$T_a := 293 \quad \text{K}$$

$$T_{cc} := 309 \quad \text{K}$$

$$Q_{pcc} := U_{cc} \cdot A_{cc} \cdot (T_{cc} - T_a)$$

$$Q_{pcc} = 21.56392 \quad \text{W}$$

### TEMPERATURA DE SALIDA DEL AIRE TEORICA

$$A_{dea} := 0.234 \quad \text{m}^2$$

$$V_{ea} := 9.83 \quad \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

$$\rho_{ae} := 1.2 \quad \frac{\text{Kg}}{\text{m}^3}$$

$$m_{ae} := \rho_{ae} \cdot A_{dea} \cdot V_{ea}$$

$$m_{ae} = 2.76026 \quad \frac{\text{Kg}}{\text{s}}$$

$$Q_{btu} := 25000 \quad \frac{\text{Btu}}{\text{h}}$$

$$Q_w := Q_{btu} \cdot 0.29307$$

$$Q_w = 7.32677 \times 10^4 \quad \text{W}$$

$$h_{1a} := 29016 \quad \frac{\text{J}}{\text{kg}}$$

Entalpia del aire a temperatura ambiente

$$h_{2a} := \frac{Q_{btu}}{m_{ae}} + h_{1a}$$

$$h_{2a} = 3.80731 \times 10^5 \quad \frac{\text{J}}{\text{Kg}}$$

$$h_{2at} := \frac{h_{2a}}{1000}$$

$$h_{2at} = 380.73105 \quad \frac{\text{KJ}}{\text{Kg}}$$

$$T_{\text{satr}} := 380 \quad \text{K}$$

Temperatura a la que le corresponde la entalpia de salida

## PERDIDAS DE PRESION EN EL SUBSISTEMA DE TRANSFERENCIA DE ENERGIA

### CONTRACCION SUBITA

$$H_{\text{Lab}} := 17 \quad \text{Pa}$$

$$H_{\text{Lcs}} := H_{\text{Lab}} \cdot 3$$

$$H_{\text{Lcs}} = 51 \quad \text{Pa}$$

### FRICCION EN TUBERIAS

$$D_{\text{it}} := 0.02657 \quad \text{m}$$

$$L_{\text{t}} := 0.92 \quad \text{m}$$

$$V_{\text{egc}} = 3.32509 \quad \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

$$\nu := 15.89 \cdot 10^{-6} \quad \frac{\text{m}^2}{\text{s}}$$

viscosidad cinemática a temperatura de entrada del aire

$$\text{Ret} := \frac{V_{\text{egc}} \cdot D_{\text{it}}}{\nu}$$

$$\text{Ret} = 5.561 \times 10^3$$

$$\varepsilon_{\text{cobre}} := 1.5 \cdot 10^{-6} \quad \text{m}$$

$$\varepsilon_{\text{acero}} := 4.6 \cdot 10^{-5} \quad \text{m}$$

$$f_{\text{cobre}} := \frac{0.25}{\left[ \log \left[ \frac{1}{3.7 \cdot \left( \frac{D_{\text{it}}}{\varepsilon_{\text{cobre}}} \right)} + \frac{5.74}{\text{Ret}^{0.9}} \right] \right]^2}$$

$$f_{\text{cobre}} = 0.03673$$

$$f_{\text{acero}} := \frac{0.25}{\left[ \log \left[ \frac{1}{3.7 \cdot \left( \frac{\text{Dit}}{\varepsilon_{\text{acero}}} \right)} + \frac{5.74}{\text{Ret}^{0.9}} \right] \right]^2}$$

$$f_{\text{acero}} = 0.03888$$

$$\text{Hl}_{\text{cobre}} := f_{\text{cobre}} \frac{\text{Lt} \cdot \text{Vea}^2}{\text{Dit} \cdot 2 \text{gr}}$$

$$\text{Hl}_{\text{cobre}} = 6.30274 \quad \text{m}$$

$$\text{Hl}_{\text{acero}} := f_{\text{acero}} \frac{\text{Lt} \cdot \text{Vea}^2}{\text{Dit} \cdot 2 \text{gr}}$$

$$\text{Hl}_{\text{acero}} = 6.67258 \quad \text{m}$$

$$\text{Hl}_{\text{tub}} := \text{Hl}_{\text{cobre}} + 2 \text{Hl}_{\text{acero}}$$

$$\text{Hl}_{\text{tub}} = 19.6479 \quad \text{m}$$

$$\rho_{\text{atp}} := 0.99 \frac{\text{Kg}}{\text{m}^3}$$

densidad específica del aire a T promedio

$$\text{HL}_{\text{bc}} := \text{Hl}_{\text{tub}} \cdot \rho_{\text{atp}} \cdot \text{gr}$$

$$\text{HL}_{\text{bc}} = 191.78214 \quad \text{Pa}$$

#### EXPANSION SUBITA

$$\text{HL}_{\text{cd}} := 15 \quad \text{Pa}$$

$$\text{HL}_{\text{es}} := \text{HL}_{\text{cd}} \cdot 3$$

$$H_{Les} = 45 \quad \text{Pa}$$

## DUCTOS DE ROTACION

$$C_{dr} := 0.22$$

$$V_{ea1} := 30$$

$$H_{vea} := \frac{\rho_{ae} \cdot V_{ea1}^2}{2}$$

$$H_{vea} = 540 \quad \text{Pa}$$

$$H_{L1t} := \frac{H_{Lbc}}{3}$$

$$H_{L1t} = 63.92738 \quad \text{Pa}$$

$$H_{vdr} := H_{vea} - H_{Lab} - H_{L1t} - H_{Lcd}$$

$$H_{vdr} = 444.07262 \quad \text{Pa}$$

$$H_{Ldr1} := H_{vdr} \cdot C_{dr}$$

$$H_{Ldr1} = 97.69598 \quad \text{Pa}$$

$$H_{Ldr2} := H_{Ldr1} \cdot C_{dr}$$

$$H_{Ldr2} = 21.49311 \quad \text{Pa}$$

$$H_{Ldr3} := H_{Ldr1} + H_{Ldr2}$$

$$H_{Ldr3} = 119.18909 \quad \text{Pa}$$

$$H_{Ldr} := 2 \cdot H_{Ldr3}$$

$$H_{Ldr} = 238.37818 \quad \text{Pa}$$

## PERDIDAS TOTALES DE PRESION

$$HLT := HLcs + HLbc + HLes + HLdr$$

$$HLT = 526.16032 \quad \text{Pa}$$

#### PRESION Y VELOCIDAD DE SALIDA TEORICA

$$Hsal := Hvea - HLT$$

$$Hsal = 13.83968 \quad \text{Pa}$$

$$Vsal := \sqrt{\frac{Hsal \cdot 2}{\rho_{ae}}}$$

$$Vsal = 4.80272 \quad \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

#### PRESION Y VELOCIDAD DE SALIDA REAL

$$Vsalr := 2.91 \quad \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

$$Hsalr := \frac{\rho_{ae} \cdot Vsalr^2}{2}$$

$$Hsalr = 5.08086 \quad \text{Pa}$$

#### TRANSFERENCIA DE CALOR EN EL SUBSISTEMA DE TRANSFERENCIA DE ENERGIA

#### COEFICIENTE DE CONVECCION INTERNA

$$Pcobre := Hvea - HLab$$

$$Pcobre = 523 \quad \text{Pa}$$

$$V_{\text{cobre}} := \sqrt{\frac{P_{\text{cobre}} \cdot 2}{\rho_{\text{ae}}}}$$

$$V_{\text{cobre}} = 29.524 \quad \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

$$P_{\text{inox}} := P_{\text{cobre}} - \text{HL1t} - \text{HLcd} - \text{HLdr3} - \text{HLab}$$

$$P_{\text{inox}} = 307.88353 \quad \text{Pa}$$

$$V_{\text{inox}} := \sqrt{\frac{P_{\text{inox}} \cdot 2}{\rho_{\text{ae}}}}$$

$$V_{\text{inox}} = 22.65258 \quad \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

$$P_{\text{carb}} := P_{\text{inox}} - \text{HL1t} - \text{HLcd} - \text{HLdr3} - \text{HLab}$$

$$P_{\text{carb}} = 92.76706 \quad \text{Pa}$$

$$V_{\text{carb}} := \sqrt{\frac{P_{\text{carb}} \cdot 2}{\rho_{\text{ae}}}}$$

$$V_{\text{carb}} = 12.4343 \quad \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

$$\text{Recobre} := \frac{V_{\text{cobre}} \cdot \text{Dit}}{\nu}$$

$$\text{Recobre} = 4.9377 \times 10^4$$

$$\text{Reinox} := \frac{V_{\text{inox}} \cdot \text{Dit}}{\nu}$$

$$\text{Reinox} = 3.7885 \times 10^4$$

$$\text{Recarb} := \frac{V_{\text{carb}} \cdot \text{Dit}}{\nu}$$

$$\text{Recarb} = 2.07956 \times 10^4$$

$$\text{Pratp} := 0.7$$

numero de Prandtl del aire a T promedio

$$u := 20.92 \cdot 10^6 \quad \frac{\text{m}^2}{\text{s}}$$

$$u_s := 32.39 \cdot 10^6 \quad \frac{\text{m}^2}{\text{s}}$$

$$\text{Nucobre} := 0.027 \cdot \text{Recobre}^{\frac{4}{5}} \cdot \text{Pratp}^{\frac{1}{3}} \cdot \left( \frac{u}{u_s} \right)^{0.4}$$

$$\text{Nucobre} = 114.44841$$

$$\text{Nuinox} := 0.027 \cdot \text{Reinox}^{\frac{4}{5}} \cdot \text{Pratp}^{\frac{1}{3}} \cdot \left( \frac{u}{u_s} \right)^{0.4}$$

$$\text{Nuinox} = 92.58991$$

$$\text{Nucarb} := 0.027 \cdot \text{Recarb}^{\frac{4}{5}} \cdot \text{Pratp}^{\frac{1}{3}} \cdot \left( \frac{u}{u_s} \right)^{0.4}$$

$$\text{Nucarb} = 57.30158$$

$$\text{Katp} := 30 \cdot 10^3 \quad \frac{\text{W}}{\text{mK}}$$

coeficiente de conductividad del aire a T promedio

$$h_{\text{cobre}} := \frac{\text{Nucobre} \cdot \text{Katp}}{\text{Dit}}$$

$$h_{\text{cobre}} = 1.29199 \times 10^8 \quad \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \text{K}}$$

$$h_{\text{inox}} := \frac{\text{Nuinox} \cdot \text{Katp}}{\text{Dit}}$$

$$h_{\text{inox}} = 1.04523 \times 10^8 \quad \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \text{K}}$$

$$h_{carb} := \frac{Nu_{carb} \cdot k_{atp}}{D_{it}}$$

$$h_{carb} = 6.46866 \times 10^7 \frac{W}{m^2 K}$$

### COEFICIENTE DE CONVECCION EXTERNA

$$St := 0.042 \quad m$$

$$\pi = 3.14159$$

$$Det := 0.02857 \quad m$$

$$V_{pgc} := \frac{V_{egc} \cdot St}{St - \frac{\pi}{4} \cdot Det}$$

$$V_{pgc} = 7.14077 \quad \frac{m}{s}$$

$$Pr_{gc} := 0.69$$

$$\nu_{gc} := 31.40 \cdot 10^{-6} \quad \frac{m^2}{s}$$

$$Re_1 := \frac{V_{pgc} \cdot Det}{\nu_{gc}}$$

$$Re_1 = 6.49833 \times 10^3$$

$$Nu_{gc} := 0.3 + \frac{0.62 Re_1^{\frac{1}{2}} \cdot Pr_{gc}^{\frac{1}{3}}}{1} \left[ 1 + \left( \frac{Re_1}{282000} \right)^{\frac{1}{2}} \right] \left[ 1 + \left( \frac{0.4}{Pr_{gc}} \right)^{\frac{2}{3}} \right]^{\frac{1}{4}}$$

$$\text{Nugc} = 44.88048$$

$$\text{Pt} := \frac{\text{St}}{\text{Det}}$$

$$\text{Pt} = 1.46982$$

$$\text{FC} := 1 + \frac{2}{3\text{Pt}}$$

$$\text{FC} = 1.45357$$

$$\text{NuT} := \text{Nugc} \cdot \text{FC}$$

$$\text{NuT} = 65.23699$$

$$\text{hex} := \frac{\text{NuT} \cdot \text{Katp}}{\text{Det}}$$

$$\text{hex} = 6.84903 \times 10^7 \quad \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \text{K}}$$

#### COEFICIENTE GLOBAL DE TRANSFERENCIA DE CALOR

$$\text{ri} := \frac{\text{Dit}}{2}$$

$$\text{ri} = 0.01329 \quad \text{m}$$

$$\text{re} := \frac{\text{Det}}{2}$$

$$\text{re} = 0.01429 \quad \text{m}$$

$$\text{Kcarb} := 56.7 \quad \frac{\text{W}}{\text{mK}}$$

$$K_{\text{inox}} := 15.2 \quad \frac{\text{W}}{\text{mK}}$$

$$K_{\text{cobre}} := 392 \quad \frac{\text{W}}{\text{mK}}$$

$$U_{\text{cobre}} := \frac{1}{\frac{r_e}{r_i \cdot h_{\text{cobre}}} + \frac{r_e \cdot \ln\left(\frac{r_e}{r_i}\right)}{K_{\text{cobre}}} + \frac{1}{h_{\text{ext}}}}$$

$$U_{\text{cobre}} = 3.75815 \times 10^5 \quad \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \text{K}}$$

$$U_{\text{inox}} := \frac{1}{\frac{r_e}{r_i \cdot h_{\text{inox}}} + \frac{r_e \cdot \ln\left(\frac{r_e}{r_i}\right)}{K_{\text{inox}}} + \frac{1}{h_{\text{ext}}}}$$

$$U_{\text{inox}} = 1.46563 \times 10^4 \quad \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \text{K}}$$

$$U_{\text{carb}} := \frac{1}{\frac{r_e}{r_i \cdot h_{\text{carb}}} + \frac{r_e \cdot \ln\left(\frac{r_e}{r_i}\right)}{K_{\text{carb}}} + \frac{1}{h_{\text{ext}}}}$$

$$U_{\text{carb}} = 5.45985 \times 10^4 \quad \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \text{K}}$$

#### CALOR TRANSFERIDO AL SUBSISTEMA DE TRANSFERENCIA DE ENERGIA

$$T_{\text{ent}} := 402 \quad \text{K}$$

$$T_{\text{sal}} := 323.2 \quad \text{K}$$

$$T_{\text{cent}} := 292 \quad \text{K}$$

$$T_{\text{sal}} := 355.6 \quad \text{K}$$

$$\Delta T1 := T_{\text{hent}} - T_{\text{csal}}$$

$$\Delta T1 = 46.4 \quad \text{K}$$

$$\Delta T2 := T_{\text{hsal}} - T_{\text{cent}}$$

$$\Delta T2 = 30.2 \quad \text{K}$$

$$\Delta T_m := \frac{\Delta T1 - \Delta T2}{\ln\left(\frac{\Delta T1}{\Delta T2}\right)}$$

$$\Delta T_m = 37.72201 \quad \text{K}$$

$$L_t = 0.926 \quad \text{m}$$

$$D_{\text{et}} = 0.02857 \quad \text{m}$$

$$N_t := 124$$

$$\text{Area} := N_t \cdot L_t \cdot \pi \cdot D_{\text{et}}$$

$$\text{Area} = 10.30787 \quad \text{m}^2$$

$$F_{Cq} := 0.95$$

$$Q_{\text{cobre}} := F_{Cq} \cdot U_{\text{cobre}} \cdot \text{Area} \cdot \Delta T_m$$

$$Q_{\text{cobre}} = 1.38823 \times 10^8 \quad \text{W}$$

$$Q_{\text{inox}} := F_{Cq} \cdot U_{\text{inox}} \cdot \text{Area} \cdot \Delta T_m$$

$$Q_{\text{inox}} = 5.41391 \times 10^6 \quad \text{W}$$

$$Q_{\text{carb}} := F_{Cq} \cdot U_{\text{carb}} \cdot \text{Area} \cdot \Delta T_m$$

$$Q_{\text{carb}} = 2.01682 \times 10^7 \quad \text{W}$$

$$QT := Q_{\text{cobre}} + Q_{\text{inox}} + Q_{\text{carb}}$$

$$QT = 1.64405 \times 10^8 \quad \text{W}$$

## PERDIDAS DE CALOR EN LAS TAPAS LATERALES

### COEFICIENTE DE CONVECCION EXTERNA

$$h_{\text{ce}} = 5.23 \quad \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \text{K}}$$

### COEFICIENTE DE CONVECCION INTERNA

$$L_p := 1.6 \quad \text{m}$$

$$v_{\text{gc}} = 3.14 \times 10^{-5}$$

$$\text{Retl} := \frac{v_{\text{pgc}} \cdot L_p}{v_{\text{gc}}}$$

$$\text{Retl} = 3.63861 \times 10^5$$

$$\text{Prtl} := 0.686$$

$$\text{Nutl} := \left( 0.037 \cdot \text{Retl}^{\frac{4}{5}} - 871 \right) \cdot \text{Prtl}^{\frac{1}{3}}$$

$$\text{Nutl} = 148.8726$$

$$K_{\text{gc}} := 0.037$$

$$h_{\text{cilt}} := \frac{\text{Nutl} \cdot K_{\text{gc}}}{L_p}$$

$$h_{\text{cilt}} = 3.44268 \quad \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \text{K}}$$

## COEFICIENTE GLOBAL DE TRANSFERENCIA DE CALOR

$$Lt1 := 0.002 \quad \text{m}$$

$$Lt2 := 0.02 \quad \text{m}$$

$$Lt3 := 0.001 \quad \text{m}$$

$$Utl := \frac{1}{\frac{1}{hcitl} + \frac{Lt1}{Kac} + \frac{Lt2}{Klv} + \frac{Lt3}{Kac} + \frac{1}{hcece}}$$

$$Utl = 0.85358 \quad \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \text{K}}$$

## CALOR PERDIDO POR LAS TAPAS LATERALES

$$Atls := 2.98 \quad \text{m}^2$$

$$Ta = 293 \quad \text{K}$$

$$Ttl := 308 \quad \text{K}$$

$$Qtl := Utl \cdot Atls \cdot (Ttl - Ta)$$

$$Qtl = 38.15519 \quad \text{W}$$

## BALANCE EXERGETICO

### EXERGIA DE FLUJO

$$ha := 400.98 \quad \frac{\text{KJ}}{\text{kg}}$$

$$hb := 325.31 \quad \frac{\text{KJ}}{\text{kg}}$$

$$h1 := 290.16 \quad \frac{\text{KJ}}{\text{kg}}$$

$$h2 := 350.46 \quad \frac{\text{KJ}}{\text{kg}}$$

$$Sa := 1.9919 \quad \frac{\text{KJ}}{\text{kg}} \text{K}$$

$$Sb := 1.7824 \quad \frac{\text{KJ}}{\text{kg}} \text{K}$$

$$S1 := 1.6680 \quad \frac{\text{KJ}}{\text{kg}} \text{K}$$

$$S2 := 1.8570 \quad \frac{\text{KJ}}{\text{kg}} \text{K}$$

$$To := 293 \quad \text{K}$$

$$ve1 := 9.83 \quad \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

$$ve2 := 2.91 \quad \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

$$va := 5.3 \quad \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

$$vb := 4.77 \quad \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

$$\Delta\psi_c := (h_a - h_b) - To \cdot (S_a - S_b) + \frac{v_a^2 - v_b^2}{2}$$

$$\Delta\psi_c = 16.9697 \quad \frac{\text{KJ}}{\text{Kg}}$$

$$\Delta\psi_{st} := (h_2 - h_1) - To \cdot (S_2 - S_1) + \frac{v_{e1}^2 - v_{e2}^2}{2}$$

$$\Delta\psi_{st} = 49.01582 \quad \frac{\text{KJ}}{\text{KG}}$$

## EXERGIA DESTRUIDA

$$Q_{pcc} = 21.56392 \quad \text{W}$$

$$T_o = 293 \quad \text{K}$$

$$T_{ent} := 402 \quad \text{K}$$

$$T_{sal} := 305 \quad \text{K}$$

$$X_{dest} := Q_{pcc} \cdot \left(1 - \frac{T_o}{T_{ent}}\right) - Q_{pcc} \cdot \left(1 - \frac{T_o}{T_{sal}}\right)$$

$$X_{dest} = 4.73036 \quad \text{W}$$

## TASA DE VARIACION DE EXERGIA DEL SISTEMA

$$T_o = 293 \quad \text{K}$$

$$T_k := 325 \quad \text{K}$$

$$A_{ea} := 0.3 \quad \text{m}^2$$

$$d_a := 0.995 \left( \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \right)$$

$$f_{mi} := v_{e1} \cdot d_a \cdot A_{ea}$$

$$f_{mi} = 2.93425 \quad \frac{\text{Kg}}{\text{s}}$$

$$f_{me} := v_{e2} \cdot d_a \cdot A_{ea}$$

$$f_{me} = 0.86864 \quad \frac{\text{Kg}}{\text{s}}$$

$$\psi_i := (-h_1 + T_o \cdot S_1) + \frac{v_{e1}^2}{2}$$

$$\psi_i = 246.88431 \quad \frac{\text{KJ}}{\text{kg}}$$

$$\psi_e := (-h_2 + T_o \cdot S_2) + \frac{ve^2}{2}$$

$$\psi_e = 197.86849$$

$$Q_T = 1.64405 \times 10^8 \quad \text{W}$$

$$\Delta X_{\text{sist}} := Q_T \cdot \left(1 - \frac{T_o}{T_k}\right) + f_{mi} \cdot \psi_i - f_{me} \cdot \psi_e - X_{\text{dest}}$$

$$\Delta X_{\text{sist}} = 1.61881 \times 10^7 \quad \text{W}$$

$$\Delta X_{\text{max}} := Q_T \cdot \left(1 - \frac{T_o}{T_k}\right) + f_{mi} \cdot \psi_i - f_{me} \cdot \psi_e$$

$$\Delta X_{\text{max}} = 1.61881 \times 10^7 \quad \text{W}$$

$$N_{ii} := \frac{\Delta X_{\text{sist}}}{\Delta X_{\text{max}}}$$

$$\text{eficienciaII} := N_{ii} \cdot 100$$

%

$$A_c := 0.6 \text{ m}^2$$

$$f_{mc} := v_a \cdot d_a \cdot A_c$$

$$f_{mc} = 3.3223 \quad \frac{\text{Kg}}{\text{s}}$$

$$N_{ic} := \frac{f_{mi} \cdot \Delta \psi_{st}}{f_{mc} \cdot \Delta \psi_c}$$

$$N_{ic} := 14.88$$

## RESULTADOS

$$Q_{Tc} = 2.46592 \times 10^5 \quad \text{W}$$

$$Q_{pcc} = 21.56392 \quad \text{W}$$

$$T_{satr} = 380 \quad \text{K}$$

$$HLT = 526.16032 \quad \text{Pa}$$

$$V_{sal} = 4.80272 \quad \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

$$Q_{Tf} = 1.64405 \times 10^4 \quad \text{W}$$

$$Q_{tl} = 38.15519 \quad \text{W}$$

$$X_{dest} = 4.73036 \quad \text{W}$$

$$\Delta X_{sist} = 1.61881 \times 10^7 \quad \text{W}$$

$$\text{eficienciaII} = 87.79 \quad \%$$

$$\text{efic\_ic} = 85.12 \quad \%$$



## **ANEXO G: MANUAL DE USUARIO Y MANTENIMIENTO**



## **MANUAL DE USUARIO**

### **ENCENDIDO**

1. Revisar el estado de los ladrillos refractarios en la Cámara de Combustión.
2. Limpiar los posibles residuos presentes en la Cámara de Combustión.
3. Revisar el estado de los ventiladores, tratar de retirar elementos que puedan provocar anomalías en el funcionamiento de los mismos.
4. Revisar las conexiones eléctricas para asegurar la alimentación de los equipos y su correcto funcionamiento, visualizar el estado de los cables para evitar cortocircuitos.
5. Conectar los dos enchufes provenientes del tablero a la toma de distribución de energía eléctrica.
6. Preparar la biomasa para la ignición de la combustión.
7. Acomodar la biomasa dentro de la Cámara de Combustión tratando de formar una hoguera.
8. Encender la hoguera.
9. Encender en el tablero de control el interruptor correspondiente al ventilador superior.
10. Esperar el tiempo necesario para que el fuego dentro de la cámara de combustión haya alcanzado plenitud.
11. Encender en el tablero de control el interruptor correspondiente al ventilador de combustión.

12. Encender en el Tablero de control el interruptor inferior que corresponde al motor-reductor de alimentación de la biomasa.

13. Controlar en la Cámara de Combustión que el fuego se mantenga a plenitud.

### **APAGADO**

1. Apagar en el tablero de control el interruptor que corresponde al motor-reductor de alimentación de biomasa.

2. Apagar en el tablero de control el interruptor correspondiente al ventilador de combustión.

3. Apagar la hoguera en la cámara de combustión.

4. Apagar en el tablero de control el interruptor superior correspondiente al ventilador superior.

5. Desconectar los enchufes provenientes del tablero de control.

### **PRECAUCIONES**

- No manipular el Tablero de Control, sin conocimiento previo de las instalaciones.
- No permitir que los motores eléctricos y el tablero de control tengan contacto con el agua.
- Cuidar el estado de los cables eléctricos y enchufes para así evitar cortocircuitos.
- Dado que los ventiladores son elementos rotativos, mantener las precauciones del caso y evitar manipularlos mientras estén encendidos; además no introducir elementos extraños en los mismos.
- Mientras se esté controlando el fuego en la cámara de combustión utilizar la protección necesaria para evitar quemaduras y para evitar problemas debido a la emisión de gases.

- Evitar el contacto con las paredes externas de la cámara de combustión mientras el equipo se encuentre en operación, esto debido a las altas temperaturas que pueden alcanzar.

## **PLAN DE MANTENIMIENTO**

### **SEMANTAL**

- Limpiar la cámara de combustión
- Limpiar la caja de cenizas
- Limpiar la chimenea
- Limpieza de tolva de alimentación de biomasa
- Limpieza externa de la pintura (con un paño húmedo)

### **SEMESTRAL**

- Revisión de ladrillos refractarios
- Limpieza de parrilla de la cámara de combustión
- Lubricación y alineación de chumaceras del Tornillo sin fin.
- Revisión del estado de los cables y enchufes del sistema eléctrico.

### **ANUAL**

- Mantenimiento básico eléctrico de todos los motores
- Limpieza interna del tablero de control
- Revisión de estado de corrosión.



## **ANEXO H: PLANOS**