



ESPE
UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA

**VICERRECTORADO DE INVESTIGACIÓN
INNOVACIÓN Y TRANSFERENCIA TECNOLÓGICA**

**CENTRO DE POSGRADOS
MAESTRÍA EN ENERGÍAS RENOVABLES
PROMOCIÓN I**

**TRABAJO DE TITULACIÓN, PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL
TÍTULO DE MAGISTER EN ENERGÍAS RENOVABLES**

**TEMA: ADECUACIÓN Y MONTAJE DE LA LÍNEA DE
COMBUSTIÓN DE BIOMASA PARA LA CARACTERIZACIÓN
ENERGÉTICA DEL PENNISSETUM CLANDESTINUM.**

**AUTORES: ING. AYALA JÁCOME, JAIME ENRIQUE
ING. CABRERA CUENCA, EDGAR RODRIGO**

DIRECTORA: PHD. BARRIGA RIVERA, ALFREDO NICOLÁS

SANGOLQUÍ

2016



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

CARRERA DE MAESTRÍA EN ENERGÍAS RENOVABLES

CERTIFICACIÓN

Certifico que el trabajo de titulación, **“ADECUACIÓN Y MONTAJE DE LA LÍNEA DE COMBUSTIÓN DE BIOMASA PARA LA CARACTERIZACIÓN ENERGÉTICA DEL PENNISETUM CLANDESTINUM”** realizado por los señores **AYALA JÁCOME JAIME ENRIQUE** y **CABRERA CUENCA EDGAR RODRIGO**, ha sido revisado en su totalidad y analizado por el software anti-plagio, el mismo que cumple con los requisitos teóricos, científicos, técnicos, metodológicos y legales establecidos por la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, por lo tanto me permito acreditarlo y autorizar a los señores ingenieros **AYALA JÁCOME JAIME ENRIQUE** y **CABRERA CUENCA EDGAR RODRIGO** para que lo sustenten públicamente.

Sangolquí, 18 de mayo del 2016

A handwritten signature in black ink, appearing to read 'Barriga', is written over a horizontal dashed line.

PHD. ALFREDO NICOLÁS BARRIGA RIVERA
DIRECTOR



**DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA ENERGÍA Y
MECÁNICA
CARRERA DE MAESTRÍA EN ENERGÍAS RENOVABLES**

AUTORÍA DE RESPONSABILIDAD

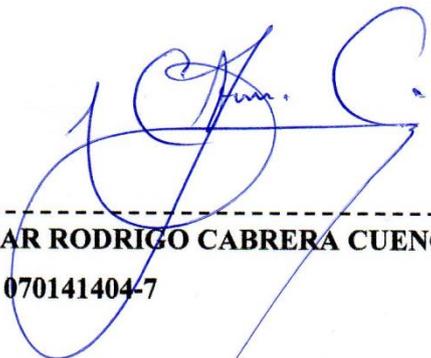
Nosotros, **JAIME ENRIQUE AYALA JÁCOME**, con cédula de identidad N° 171494560-5 y **EDGAR RODRIGO CABRERA CUENCA**, con cédula de identidad N° 070141404-7, declaramos que este trabajo de titulación “**ADECUACIÓN Y MONTAJE DE LA LÍNEA DE COMBUSTIÓN DE BIOMASA PARA LA CARACTERIZACIÓN ENERGÉTICA DEL PENNISETUM CLANDESTINUM**” ha sido desarrollado considerando los métodos de investigación existentes, así como también se ha respetado los derechos intelectuales de terceros considerándose en las citas bibliográficas.

Consecuentemente declaramos que este trabajo es de nuestra autoría, en virtud de ello nos declaramos responsables del contenido, veracidad y alcance de la investigación mencionada.

Sangolquí, 18 de mayo del 2016



JAIME ENRIQUE AYALA JÁCOME
C.C.: 171494560-5



EDGAR RODRIGO CABRERA CUENCA
C.C.: 070141404-7



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

CARRERA DE MAESTRÍA EN ENERGÍAS RENOVABLES

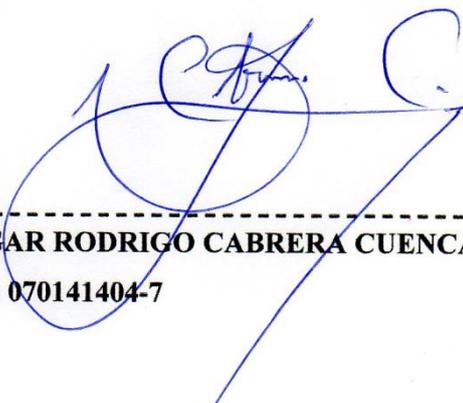
AUTORIZACIÓN (PUBLICACIÓN BIBLIOTECA VIRTUAL)

Nosotros, **JAIME ENRIQUE AYALA JÁCOME** y **EDGAR RODRIGO CABRERA CUENCA**, autorizamos a la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE publicar en la biblioteca Virtual de la institución el presente trabajo de titulación “**ADECUACIÓN Y MONTAJE DE LA LÍNEA DE COMBUSTIÓN DE BIOMASA PARA LA CARACTERIZACIÓN ENERGÉTICA DEL PENNISETUM CLANDESTINUM**” cuyo contenido, ideas y criterios son de nuestra autoría y responsabilidad.

Sangolquí, 18 de mayo del 2016



JAIME ENRIQUE AYALA JÁCOME **EDGAR RODRIGO CABRERA CUENCA**
C.C.: 171494560-5 C.C.: 070141404-7



DEDICATORIA

A mis Padres Jaime Alfredo (†) y Carmen Amelia por darme la vida, su amor y enseñanzas basada en valores. A mi esposa Lorena Sánchez e hijos Ariadna (†), Valentina, Jaime y Joaquín, por ser mi fuerza espiritual, que me dan la energía para seguir día a día en el sendero de la vida. Anhele que ésta meta cumplida, sea fuente de inspiración para alcanzar nuevas metas que nos plantemos en nuestras vidas, bajo la unión familiar mantener viva la llama del amor y de la felicidad alcanzada.

ING. JAIME ENRIQUE AYALA JÁCOME

A mis Padres Estherfilia y Rubén que descansan en paz y que fueron fuente inagotable de valores y valentía en mi formación. A mi esposa Patricia y a mis hijos Andrea, Edgar Andrés y Daniela que me inspiran en cada una de mis actividades. A mi tía Elvia, por ser mi segunda Madre. A mis queridos hermanos Raúl (+), Fernando, Solanda, Ondina y Omar por estar siempre juntos.

ING. EDGAR RODRIGO CABRERA CUENCA, MBA

AGRADECIMIENTOS

A Dios por su eterno amor, que me ilumina, me fortalece y siempre me acompaña en todos los días de mi vida, a la Dra. Amparo Martínez Directora del centro de postgrados de la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, al PhD. Alfredo Barriga Rivera Director por su contante apoyo, al Máster José Guasumba Codena designado a ser mi oponente de tesis, a mi compañero y amigo Ing. Edgar Cabrera por su entrega total y a todas las personas que de una u otra manera me brindaron su apoyo desinteresado durante todo este tiempo para culminar el presente proyecto de investigación.

ING. JAIME ENRIQUE AYALA JÁCOME

A Dios por su infinita misericordia. A la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE en especial a los profesores Master José Guasumba y PhD. Alfredo Barriga por sus conocimientos compartidos y apoyo incondicional al desarrollo de esta Tesis. A mi esposa Patricia y a mis hijos Andrea, Edgar Andrés y Daniela por su apoyo y comprensión al permitirme disponer de gran parte del tiempo de familia que lo dedique a esta Maestría en Energías Renovables y elaboración de la Tesis respectiva. A mi compañero de Tesis Ing. Jaime Ayala, por su entrega en la elaboración de la misma.

ING. EDGAR RODRIGO CABRERA CUENCA, MBA

ÍNDICE GENERAL

CERTIFICACIÓN	ii
AUTORÍA DE RESPONSABILIDAD	iii
AUTORIZACIÓN (PUBLICACIÓN BIBLIOTECA VIRTUAL)	iv
AGRADECIMIENTOS	vi
ÍNDICE GENERAL	vii
ÍNDICE DE FIGURAS	xiii
RESUMEN	xvi
ABSTRACT	xvii
CAPÍTULO I	1
1. GENERALIDADES	1
1.1 Antecedentes	1
1.2 Planteamiento del problema	14
1.2.1 Formulación del problema	14
1.3 Justificación	14
1.4 Objetivos	15
1.4.1 Objetivo general.....	15
1.4.2 Objetivos específicos	15
1.5 Hipótesis	16
CAPÍTULO II	17
2. MARCO TEÓRICO	17
2.1 Proceso integrado del secado de biomasa	17
2.1.1 Parámetros de un proceso de secado de biomasa	18
2.1.2 Tecnologías del secado	22
2.2 Proceso integrado de la compactación de la biomasa	27
2.2.1 Briquetas	27
2.2.2 Características de las briquetas	28
2.2.2 Tecnología del briquetado	32
2.3 Proceso integrado de la combustión de la biomasa	33
2.3.1 Combustión directa	34

2.3.2 Emisiones	36
2.3.3 Aplicaciones de la combustión	37
2.3.4 Eficiencia de la combustión	38
2.4 El Pennisetum Clandestinum	40
2.4.1 Propiedades físico químicas	41
2.4.2 Localización geográfica	44
2.4.3 Manejo	45
2.4.4 Usos y aplicaciones	45
CAPÍTULO III	46
3. ADECUACIÓN Y MONTAJE DE LA LÍNEA DE COMBUSTIÓN DE BIOMASA	46
3.1 Adecuación y montaje.....	46
3.2 Pruebas de operación	50
CAPÍTULO IV.....	52
4. CARACTERIZACIÓN ENERGÉTICA DEL PENNISETUM CLANDESTINUM	52
4.1 Metodología de investigación	52
4.2 Equipos y materiales de investigación	52
4.2.1 Equipo de secado	52
4.2.2 Equipo de briquetado	54
4.2.3 Equipo de combustión	55
4.2.4 Pennisetum Clandestinum	57
4.2.5 Balanza digital	57
4.2.6 Anemómetro digital	58
4.2.7 Hidrómetro digital	59
4.2.8 Termómetro infrarrojo	60
4.3 Condiciones de seguridad.....	61
4.3.1 Riesgos	61
4.3.2 Acciones preventivas	62
4.4 Factores ambientales.	64
4.5 Caracterización del proceso secado.	65
4.5.1 Secado en estado granulado	65
4.5.2 Secado en estado compactado	69

4.5.3 Normalización del proceso de secado	73
4.6 Caracterización del proceso de briquetado.	75
4.6.1 Volumen	76
4.6.2 Densidad.....	77
4.6.3 Poder calórico	77
4.6.4 Normalización del proceso de briquetado	79
4.7 Caracterización del proceso combustión.	80
4.7.1 Combustión en estado compactado.....	81
4.7.2 Combustión en estado granulado	117
4.7.3 Combustión en estado natural	146
4.7.4 Calores de las reacciones y emisiones de la combustión	176
4.7.5 Normalización del proceso de combustión	180
CAPITULO V.....	182
5. ANÁLISIS DE RESULTADOS Y DISCUSIONES	182
5.1 Proceso de secado	182
5.2 Proceso de combustión	193
5.3 Densidad energética	259
CAPÍTULO VI.....	264
6. ANALISIS DE COSTOS DE INVERSIÓN.....	264
6.1 Montaje de la línea de combustión.....	264
6.2 Desarrollo experimental	264
CAPÍTULO VII.....	266
7. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	266
7.1 Conclusiones.....	266
7.2 Recomendaciones.....	267
BIBLIOGRAFÍA	268

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1 Contenido de humedad inicial de algunos tipos de biomosas	20
Tabla 2 Densidad de algunas materias primas	30
Tabla 3 Poder calórico superior de algunas biomosas.....	32
Tabla 4 Eficiencia de algunos equipos electromecánicos	39
Tabla 5 Taxonomía del Pennisetum Clandestinum.....	42
Tabla 6 Composición química y mineral del Pennisetum Clandestinum.....	43
Tabla 7 Superficie y porcentaje de usos de suelo por categorías	44
Tabla 8 Muestra 1 del secado en estado granulado	66
Tabla 9 Pesos iniciales y finales del secado en estado granulado	67
Tabla 10 Parámetros del secado en estado granulado	69
Tabla 11 Muestra 1 del secado en estado compactado	70
Tabla 12 Pesos iniciales y finales del secado en estado compactado.....	71
Tabla 13 Parámetros del secado en estado compactado.....	73
Tabla 14 Poder calórico inferior del Pennisetum Clandestinum.....	79
Tabla 15 Propiedades termo físicas de la pared de la cámara de combustión ...	84
Tabla 16 Entalpías de los productos de la combustión en estado compactado	110
Tabla 17 Entalpías de los productos de la combustión en estado granulado ...	139
Tabla 18 Entalpías de los productos de la combustión en estado natural	169
Tabla 19 Calores de las reacciones por estado de combustión	176
Tabla 20 Peso de secado en estado granulado.....	182
Tabla 21 Temperatura ambiente del secado en estado granulado	183
Tabla 22 Temperatura biomasa en el secado en estado granulado	183
Tabla 23 Humedad relativa del secado en estado granulado	184
Tabla 24 Combustible utilizado en el secado en estado granulado.....	184
Tabla 25 Peso de secado en estado compactado	185
Tabla 26 Temperatura ambiente del secado en estado compactado.....	186
Tabla 27 Temperatura biomasa en el secado en estado compactado	187
Tabla 28 Humedad relativa del secado en estado compactado	188
Tabla 29 Combustible utilizado en el secado en estado compactado	189
Tabla 30 Thi en estado natural	193

Tabla 31 Tho en estado natural	194
Tabla 32 Tci en estado natural	195
Tabla 33 Tco en estado natural	196
Tabla 34 Thi en estado granulado	197
Tabla 35 Tho en estado granulado	198
Tabla 36 Tci en estado granulado	199
Tabla 37 Tco en estado granulado.....	200
Tabla 38 Thi en estado compactado	201
Tabla 39 Tho en estado compactado	202
Tabla 40 Tci en estado compactado	203
Tabla 41 Tco en estado compactado	204
Tabla 42 Thi corregido en estado natural.....	209
Tabla 43 Tho corregido en estado natural.....	210
Tabla 44 Tci corregido en estado natural	211
Tabla 45 Tco corregido en estado natural	212
Tabla 46 Thi corregido en estado granulado	213
Tabla 47 Tho corregido en estado granulado	214
Tabla 48 Tci corregido en estado granulado	215
Tabla 49 Tco corregido en estado granulado	216
Tabla 50 Thi corregido en estado compactado.....	217
Tabla 51 Tho corregido en estado compactado.....	218
Tabla 52 Tci corregido en estado compactado	219
Tabla 53 Tco corregido en estado compactado	220
Tabla 54 Tpi en estado natural	226
Tabla 55 Tpo en estado natural	227
Tabla 56 Tpi en estado granulado	229
Tabla 57 Tpo en estado granulado	231
Tabla 58 Tpi en estado compactado	234
Tabla 59 Tpo en estado compactado	236
Tabla 60 Tcen en estado natural.....	239
Tabla 61 Tcen en estado granulado.....	240
Tabla 62 Tcen en estado compactado	241
Tabla 63 Tamb en estado natural	243

	xii
Tabla 64 Tamb en estado granulado	244
Tabla 65 Tamb en estado compactado	245
Tabla 66 Pennisetum Clandestinum quemado en estado natural	247
Tabla 67 Pennisetum Clandestinum quemado en estado granulado	249
Tabla 68 Pennisetum Clandestinum quemado en estado compactado	252
Tabla 69 Ceniza residual generada en estado natural	256
Tabla 70 Ceniza residual generada en estado granulado.....	256
Tabla 71 Ceniza residual generada en estado compactado	257
Tabla 72 Parámetros termo físicos de la combustión.....	258
Tabla 73 Poder calórico inferior teórico del Pennisetum Clandestinum.....	260
Tabla 74 Densidad energética vs Calor de Reacción.....	262
Tabla 75 Costos montaje de la línea de combustión.....	264
Tabla 76 Costos recurso humano	265
Tabla 77 Costos equipos especializados	265
Tabla 78 Suministros de oficina.....	265

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 Emisiones de CO ₂ en el Ecuador	3
Figura 2 Clasificación de las fuentes energéticas.....	6
Figura 3 Consumo de energía primaria a nivel mundial	7
Figura 4 Equipos empleados en las transformaciones energéticas	8
Figura 5 Porcentaje de energía renovable utilizada para el consumo final	9
Figura 6 Porcentaje de la energía renovable en la producción de electricidad	9
Figura 7 Índice de uso de energía renovable en América Latina y el Caribe	10
Figura 8 Producción e importación de energía en el Ecuador.....	10
Figura 9 Producción de energía primaria en el Ecuador	12
Figura 10 Estructura del consumo por sector de energía en el Ecuador	12
Figura 11 Estructura del consumo por fuente de energía en el Ecuador.....	13
Figura 12 Relación masa vs tiempo en un proceso de secado de biomasa	21
Figura 13 Flujo de calor en una pila en un fenómeno de la termogénesis	23
Figura 14 Secador tipo tambor rotatorio en paralelo.....	24
Figura 15 Secador solar directo (izquierda) e indirecto (derecha)	26
Figura 16 Proceso de torrefacción.....	26
Figura 17 Tipos de briquetas.....	28
Figura 18 Briquetas cilíndricas	29
Figura 19 Balance de masas en un proceso de combustión	33
Figura 20 Formas de energía generadas por la biomasa	37
Figura 21 Eficiencia típicas en la producción de energía secundaria	40
Figura 22 El Pennisetum Clandestinum.....	41
Figura 23 Etapas de la línea de combustión de biomasa.....	46
Figura 24 Área asignada para la línea de combustión de biomasa.....	47
Figura 25 Briquetadora en estado inicial.....	47
Figura 26 Horno de combustión en estado inicial.....	48
Figura 27 Secadora en estado inicial.....	48
Figura 28 Vista interna de la línea de combustión de biomasa	49
Figura 29 Vista externa de la línea de combustión de biomasa	49
Figura 30 Equipo de secado	53
Figura 31 Equipo de briquetado	54

Figura 32 Equipo de combustión	56
Figura 33 Recolección del Pennisetum Clandestinum.....	57
Figura 34 Balanza digital	58
Figura 35 Anemómetro digital	59
Figura 36 Hidrómetro digital	60
Figura 37 Termómetro infrarrojo.....	60
Figura 38 Equipos de protección personal EPP´s	63
Figura 39 Secado del Pennisetum Clandestinum en estado granulado	66
Figura 40 Secado del Pennisetum Clandestinum en estado compactado	70
Figura 41 Aglutinante utilizado para la elaboración de briquetas.....	76
Figura 42 Producción energética en la cámara de combustión	81
Figura 43 Calor perdido en las pared de la cámara de combustión.....	82
Figura 44 Diagrama eléctrico de la pared de la cámara de combustión.....	83
Figura 45 Intercambiador de calor del horno de combustión.....	89
Figura 46 Flujo de aire frio y caliente en el intercambiador de calor	94
Figura 47 Temperaturas y velocidades en el intercambiador de calor.....	95
Figura 48 Variación de las temperaturas en el intercambiador de calor	96
Figura 49 Corte transversal del tubo escalonado del intercambiador de calor.....	98
Figura 50 Incrustaciones en el tubo escalonado del intercambiador de calor...	101
Figura 51 Variación del peso de secado en estado granulado.....	190
Figura 52 Variación del peso de secado en estado compactado	190
Figura 53 Variación de la temperatura de secado en estado compactado	191
Figura 54 Variación de la humedad relativa en el proceso de secado.....	192
Figura 55 T_{hi} en el proceso de combustión	205
Figura 56 T_{ho} en el proceso de combustión	206
Figura 57 T_{ci} en el proceso de combustión.....	207
Figura 58 T_{co} en el proceso de combustión.....	208
Figura 59 T_{hi} corregido en el proceso de combustión	221
Figura 60 T_{ho} corregido en el proceso de combustión	222
Figura 61 T_{ci} corregido en el proceso de combustión	223
Figura 62 T_{co} corregido en el proceso de combustión	224
Figura 63 T_{pi} en la combustión en estado natural	228
Figura 64 T_{po} en la combustión en estado natural.....	228

	xv
Figura 65 T _{pi} en la combustión en estado granulado.....	233
Figura 66 T _{po} en la combustión en estado granulado.....	233
Figura 67 T _{pi} en la combustión en estado compactado	238
Figura 68 T _{po} en la combustión en estado compactado	238
Figura 69 T _{cen} en el proceso de la combustión	242
Figura 70 T _{amb} en el proceso de la combustión.....	246

RESUMEN

En la actualidad el calentamiento global generado por el incremento de las emisiones de los gases de efecto invernadero a la atmósfera producida por la combustión de los combustibles de origen fósil, con lleva a la utilización nuevas fuentes de energías amigables con el medio ambiente y de carácter renovables. El presente proyecto de investigación tiene por objeto la adecuación y montaje de la línea de combustión de biomasa para la caracterización energética del Pennisetum Clandestinum. La combustión se lo realiza en tres estados natural, granulada y compactada. La combustión en estado natural (sin secado) se lo realiza con un contenido de humedad es superior al 60%, en estado granulado (granulometría inferior a 1 mm) y compactada (briqueta cilíndrica) se lo realiza con un contenido de humedad inferior al 12%. Para la caracterización de la combustión del Pennisetum Clandestinum se adecuó y montó la línea de combustión de biomasa en el Laboratorio de Energías Renovables de la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, constituida por una briquetadora, una secadora de flujo cruzado y un horno de combustión con una capacidad de 60.000 Kcal/h. Con la etapa experimental se llegó a determinar que la combustión del Pennisetum Clandestinum con un contenido inferior al 12% es superior en un 50% al compararla con la combustión en estado natural, convirtiéndole en un combustible sólido de carácter renovable. Su aplicación es la generación de calor en donde las pérdidas de transformación no superan el 15%.

PALABRAS CLAVE:

- **PENNISETUM CLANDESTINUM**
- **COMBUSTIÓN**
- **DENSIDAD ENERGÉTICA**

ABSTRACT

Currently global warming generated by the increase in emissions of greenhouse gases to the atmosphere produced by the combustion of fossil fuels, with leads to the use new sources of friendly energy environment and character renewable. This research project aims adequacy and assembly line combustion of biomass for energy characterization of Pennisetum Clandestinum. Combustion is performed in three natural, granulated and compacted states. Combustion in a natural state (without drying) it performs a moisture content exceeds 60%, in granular state (less than 1 mm grain size) and packed (cylindrical briquette) it is done with moisture content below 12 %. To characterize the combustion of Pennisetum Clandestinum was adapted and mounted line combustion of biomass in the Renewable Energy Laboratory of the University of the Armed Forces ESPE, consisting of a briquette, dryer crossflow furnace combustion a capacity of 60,000 Kcal / h. With the pilot phase was reached determined that the combustion of Pennisetum Clandestinum containing less than 12% is higher by 50% when compared to combustion natural state, making it a solid fuel renewable. Its application is the heat generation where transformation losses do not exceed 15%.

KEYWORDS:

- **PENNISETUM CLANDESTINUM**
- **COMBUSTION**
- **ENERGY DENSITY**

CAPÍTULO I

1. GENERALIDADES

1.1 Antecedentes

Nuestra generación actual tiene la responsabilidad impostergable e indelegable de evitar que continúe la tendencia del calentamiento global en nuestro planeta, por cuya razón organismos de ámbito mundial y continental como la Organización de las Naciones Unidas (ONU), la Unión Europea (UE), el grupo de países desarrollados G20 y los países en desarrollo como Ecuador, han trabajado conjuntamente durante los últimos 30 años para evitar la emisión de Gases de Efecto Invernadero (GEI) a la atmósfera que es la causa del calentamiento global. Todo esto, para que las futuras generaciones convivan en un ecosistema sustentable, es decir, que todas las actividades sociales, económicas y ambientales en general se continúen desarrollando de una manera responsable con la sociedad y respetando al medio ambiente.

Desde la primera revolución industrial en la segunda mitad del siglo XVIII en países como el Reino Unido, y que se extendió unas décadas después a gran parte de Europa Occidental y Norteamérica, y que concluyó entre 1820 y 1840, periodo en el que se vivió el mayor conjunto de transformaciones económicas, tecnológicas y sociales de la historia de la humanidad, pasando desde el neolítico, que vio el paso desde una economía rural basada fundamentalmente en la agricultura y el comercio a una economía de carácter urbano, industrializada y mecanizada.

La producción tanto agrícola como de la naciente industria se multiplicó a la vez que disminuía el tiempo de producción. A partir de este momento se inició una transición que acabaría con siglos de una mano de obra basada en el trabajo manual y el uso de la tracción animal siendo estos sustituidos por maquinaria para la fabricación y el transporte de mercancías y pasajeros.

Esta transición se inició a finales del siglo XVIII en la industria textil y la extracción y utilización de carbón. Con la construcción de vías férreas, canales y carreteras con lo que se expandió el comercio; la introducción de la máquina de

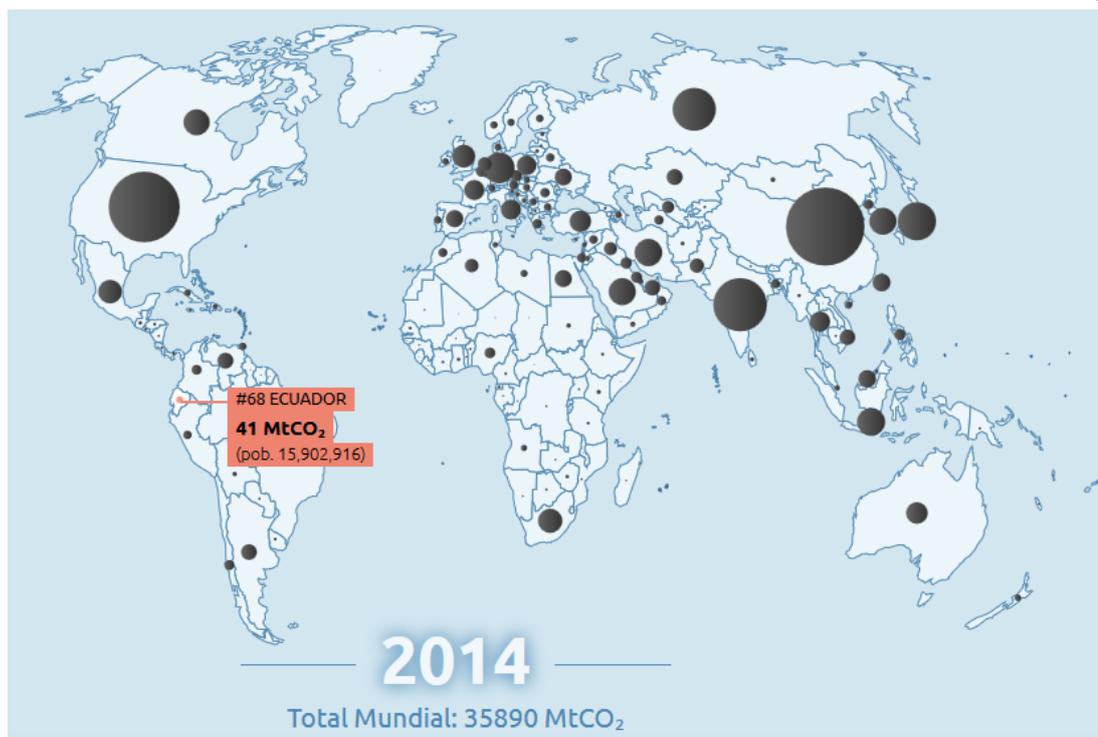
vapor en las distintas industrias fue el paso definitivo en el éxito de esta revolución, pues su uso significó un aumento espectacular de la capacidad de producción. Más tarde el desarrollo de los barcos y ferrocarriles a vapor así como el desarrollo en la segunda mitad del siglo XIX del motor de combustión interna y la energía eléctrica supusieron un progreso tecnológico sin precedentes

A partir de esta fecha se inició una carrera y competencia industrial entre países que en ese entonces no tenían el nivel de desarrollo actual como Estados Unidos, Japón, Canadá, Francia, España, Suiza, la Unión Soviética liderada por Rusia y Alemania, etc., época en que el fin justificaba los medios, es decir, no importaba golpear o herir el medio ambiente sino incrementar la producción instalando nuevas industrias, medios de transporte masivos, centrales de generación de electricidad y a través de las exportaciones de estos productos y servicios finalmente obtener una balanza comercial positiva.

Consecuencias de este vértigo progresista por alcanzar el punto más alto del desarrollo industrial y el crecimiento económico, los países desarrollados han excedido las emisiones de GEI, constituidos principalmente por el dióxido de carbono (CO_2), metano (CH_4), óxido nitroso (N_2O), hidrofluorocarbonos (HFC) y el hexafluoruro de azufre (SF_6), etc., los cuales se acumulan en la atmósfera e impiden que las radiaciones infrarrojas que emite el planeta al calentarse se salgan al espacio. Esto hace que la temperatura del planeta se incremente paulatinamente.

El problema según el Consenso Científico es que las actividades humanas han contribuido a romper el equilibrio ambiental existente. Los procesos industriales, el transporte y el uso desmesurado del suelo han aumentado la concentración de estos gases en la atmósfera.

De acuerdo con el informe de Global Carbon Atlas del año 2014, las emisiones de CO_2 a nivel mundial fueron de 35890 Mt CO_2 . El Ecuador con emisiones de 41 Mt CO_2 representando el 0,11% de las emisiones totales. China con emisiones de 9680 Mt CO_2 representan el 26,97%, Estados Unidos con emisiones de 5561 Mt CO_2 representan el 15,49%, India con emisiones de 2597 Mt CO_2 representan el 7,23%, la Federación Rusa con emisiones de 1595 Mt CO_2 representan el 4,44% y Japón con emisiones de 1232 Mt CO_2 representan el 3,43%, son los cinco países con los mayores índices de emisiones de CO_2 a la atmósfera a nivel mundial (ver figura 1).



Territorial (MtCO₂)

Rango	País	MtCO ₂
1	China	9680
2	Estados Unidos de América	5561
3	India	2597
4	Federación de Rusia	1595
5	Japón	1232
6	Alemania	789
7	Indonesia	641
8	Irán	616
9	Arabia Saudita	602
10	Corea del Sur	599
11	Canadá	558
12	Brasil	507
13	África del Sur	476
14	México	457
15	Reino Unido	428
16	Australia	382
17	Turkia	373

Figura 1 Emisiones de CO₂ en el Ecuador

Fuente: (Global Carbon Atlas, 2016)

El aumento de la concentración de CO₂ proveniente del uso de combustibles de origen fósiles (como el petróleo y sus derivados) ha provocado la intensificación del fenómeno invernadero. Sus consecuencias más notorias son:

- El deshielo de los casquetes polares, lo que provocaría el aumento del nivel del mar.
- Las temperaturas regionales y los regímenes de lluvia también sufren alteraciones, lo que afecta negativamente a la agricultura.
- Aumento de la desertificación.
- Cambios en las estaciones, lo que afectara a la migración de las aves, a la reproducción de los seres vivos, etc.
- Los científicos de la ONU, señalaban que si el ser humano continúa con el ritmo de emisión de GEI sin tomar medidas drásticas de mitigación, la temperatura media global subirá entre 3,70 °C y 4,8 °C en el año 2100 respecto al nivel preindustrial.
- Se produciría la acidificación de los océanos y frecuentes olas de calor y sequía que desafiaran el suministro mundial de agua y de alimentos.
- Se presentarían efectos importantes de migración y conflictos sociales.

Para controlar el calentamiento global del planeta que tiene la condición de irreversible, se han realizado algunas cumbres y convenciones de los países con la finalidad de crear compromisos y estrategias para reducir la emisión de los GEI, como fue el caso de los siguientes eventos:

- Protocolo de Montreal, 1987
- Convención Marco de las Naciones Unidas sobre Cambio Climático, Nueva York, 1992.
- Cumbre de la Tierra, Rio de Janeiro, 1992.
- Protocolo de Kyoto, 1997.
- Convención sobre Cambio Climático, Copenhague 2009.
- Cumbre sobre El Clima. Nueva York 2014, Naciones Unidas.
- Cumbre de Paris, 2015. Naciones Unidas.

El protocolo de Kyoto entro en vigor en el año 2005 y tras de 10 años de aplicación lamentablemente sus metas no se cumplieron, los 37 países firmantes redujeron en 22% las emisiones de GEI por encima de la meta fijada que fue del 5%, pero al no participar de este protocolo potencias mundiales como Estados Unidos y China las emisiones globales siguieron creciendo entre el año 2000 y el 2010 se incrementaron en un 24%.

La Cumbre de París se ha comprometido a tomar acciones drásticas para reducir las emisiones de GEI, de tal manera que hasta el año 2100 el incremento de temperatura este entre 1,5 y 2,0 °C. Esta vez cada país asume su responsabilidad de acuerdo a sus propios planes presentados a la ONU. En esta ocasión ya participan Estados Unidos y China, que son las dos potencias que están entre los diez países que más contaminan la atmósfera y el planeta en general.

El sector energético (producción de energía y transporte) es la principal fuente de emisión de GEI, contribuyendo con más del 75%. Esto señala la urgencia de una transformación drástica del sector energético para el año 2050, con la finalidad de evitar los peores impactos del cambio climático. La distribución geográfica de las emisiones a nivel mundial es muy desigual, los 10 mayores emisores contribuyen con el 72% de las emisiones totales, mientras los 100 menores emisores no consolidan ni el 3% de las emisiones mundiales.

Para poder cerrar la brecha de emisiones que nos evite un cambio climático peligroso, los países desarrollados deben implementar las siguientes acciones:

- Que el acuerdo de París consagre un esquema que asegure que los compromisos nacionales y los objetivos globales se definan de acuerdo a la ciencia y la equidad.
- El acuerdo de París incluya un mecanismo fuerte para revisar y presionar los compromisos nacionales para lograr el objetivo de 2 °C o 1,50 °C si fuera posible.
- Incrementar los nuevos compromisos para financiar la mitigación, adaptación y las pérdidas y daños en los países en desarrollo.
- Aumentar las acciones para lograr una transición energética sostenible global que suponga el abandono definitivo de las energías sucias y redirija la financiación a un nuevo modelo energético protagonizado por la eficiencia energética y la masificación del uso de energías renovables en todas sus variantes.

Se considera como fuentes de energías no renovables, aquellas fuentes de energía que se encuentran en la naturaleza en cantidades limitadas y que en un determinado de tiempo se agotarán, como es el caso de la energía nuclear, el carbón, el petróleo, etc. Las fuentes de energías renovables, son aquellas que se obtienen de fuentes

naturales virtualmente inagotables, como es el caso de la energía solar, eólica, geotérmica, hidroeléctrica, mareomotriz, biomasa, etc., (ver figura 2).

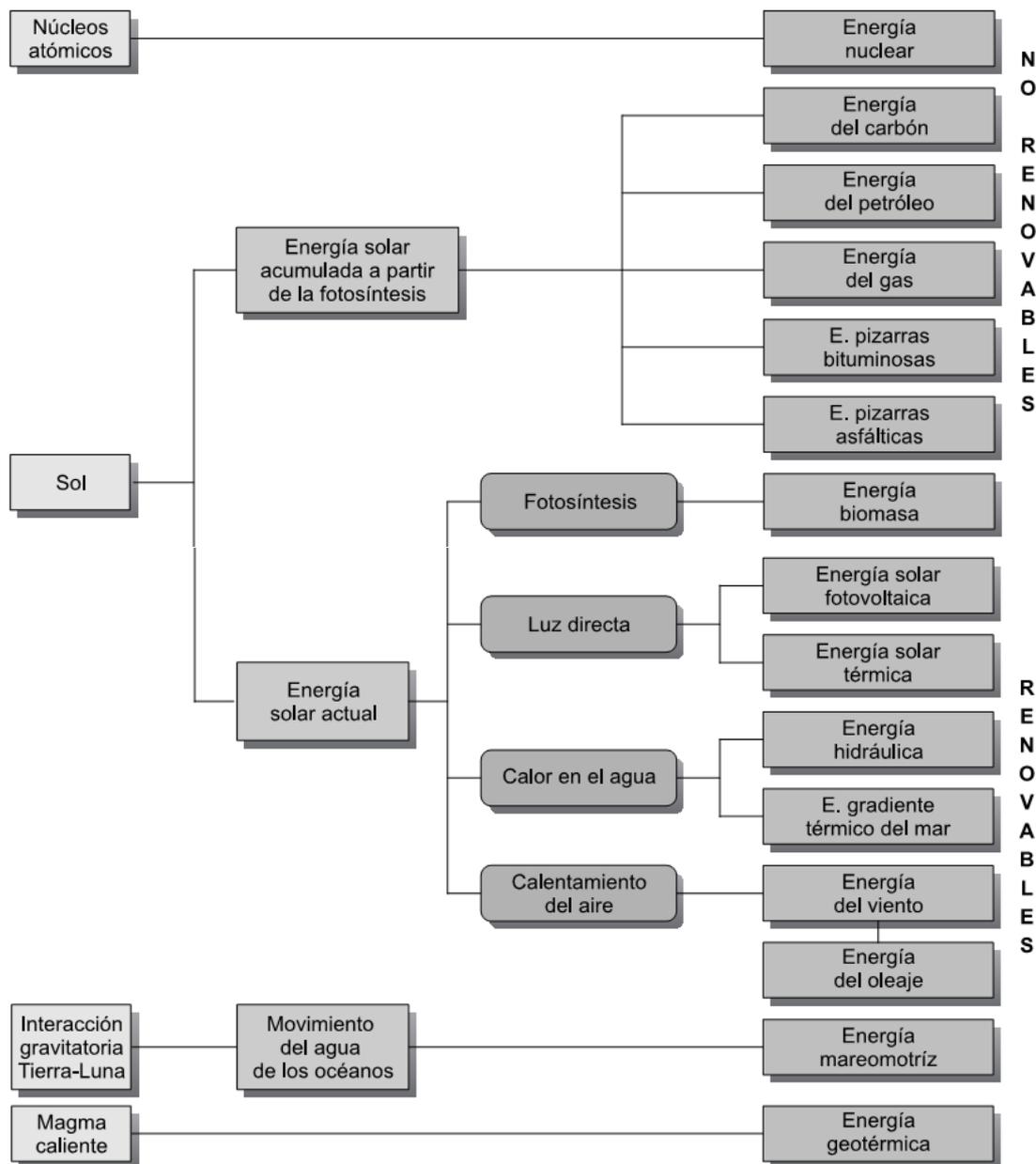


Figura 2 Clasificación de las fuentes energéticas

Fuente: (Calero, 2009)

Se considera como energía primaria a toda forma de energía disponible en la naturaleza antes de ser convertida o transformada, como es el caso del carbón, petróleo, las renovables, nuclear y gas natural. En el reporte de BP de Junio del 2015 en Statical Review of de World Energy, 64th edition, se encontró lo siguiente:

El consumo de energía primaria a nivel mundial en el año 2014 fue de 12928,40 Millones de toneladas equivalentes de petróleo (Mtep), de los

cuales Estados Unidos consumió 2298,7 Mtep, China con un consumo de 2972,10 Mtep, India con un 637,80 Mtep, la Federación Rusa con un consumo del 681,90 Mtep, específicamente en el Ecuador consumió 15,4 Mtep representando a nivel mundial un 0,119% del consumo total de energía primaria. (p.41)

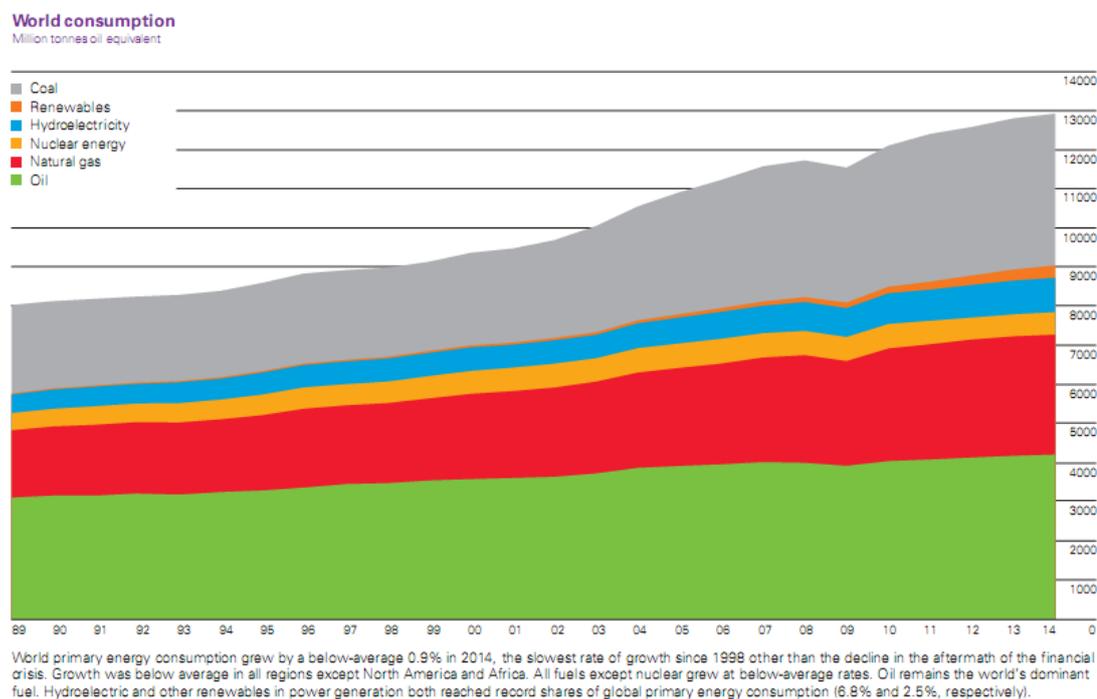


Figura 3 Consumo de energía primaria a nivel mundial

Fuente: (BP, 2015)

De la figura 3, se visualiza que las tres fuentes primarias dominantes por su consumo son las del carbón, petróleo y gas natural. En menor proporción son las energías de origen nuclear, hidroeléctrico y renovable, por lo que la dependencia del consumo de combustibles de origen fósil es predominante.

Se considera como energía secundaria (o energía disponible) a la energía producida a partir de energía primaria en los distintos centros de transformación, para ser consumida de acuerdo con las tecnologías empleadas en los sectores de consumo. Algunas formas de energías secundarias son la electricidad, Gas Licuado de Petróleo (GLP), gasolina (o nafta), diésel, kerosene de avión, carbón vegetal, gas de refinería y productos no energéticos, ejemplo el asfalto y lubricantes derivados del petróleo. Los principales equipos empleados en la transformación de energía primaria en energía secundaria son las celdas fotovoltaicas, paneles solares, reactores nucleares, calderas de vapor, quemadores de gas, motores combinados, pilas de combustible,

turbinas hidráulicas y turbinas eólicas, todos ellos generan principalmente energía eléctrica, térmica o mecánica (ver figura 4).

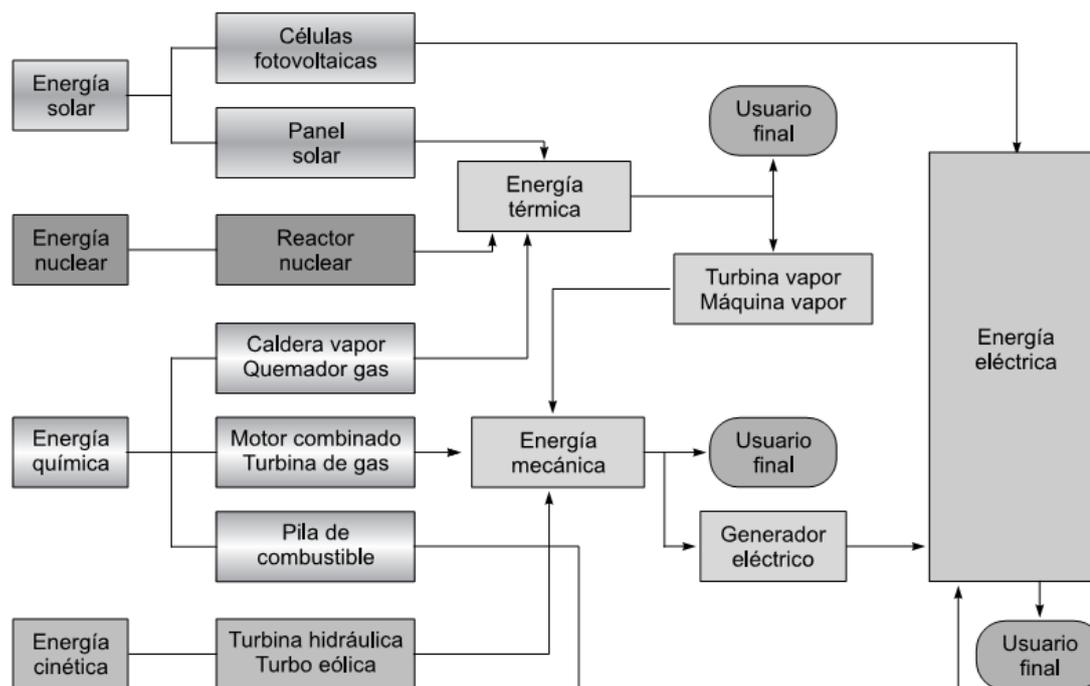


Figura 4 Equipos empleados en las transformaciones energéticas

Fuente: (Calero, 2009)

En el reporte de la Agencia Internacional de Energías Renovables (IRENA) del Reporte de la situación mundial de las energías renovables 2015, se encontró lo siguiente (ver figuras 5 y 6):

Los combustibles fósiles aportan en un 78,3%, en tanto las energías renovables en un 19,1% y la energía nuclear en un 2,6%. Del 19,1% de las energías renovable, se desglosa en 9% en biomasa tradicional, un 3,9% energía hidráulica, 0,8% biocombustibles y un 1,3% en energía eólica, solar, biomasa y geotérmica. Los combustibles fósiles y la energía nuclear generan el 77,2% de electricidad a nivel mundial, en tanto con un 22,8% de participación la energía renovable, de ello, predominando la generación de electricidad a través de energía hidráulica con un 16,6%, la eólica con un 3,1% y la bioenergía con un 1,8%, en menor porcentaje la solar fotovoltaica con un 0,9% y un 0,4% la geotérmica, solar térmica de concentración y mareomotriz. (p.20)

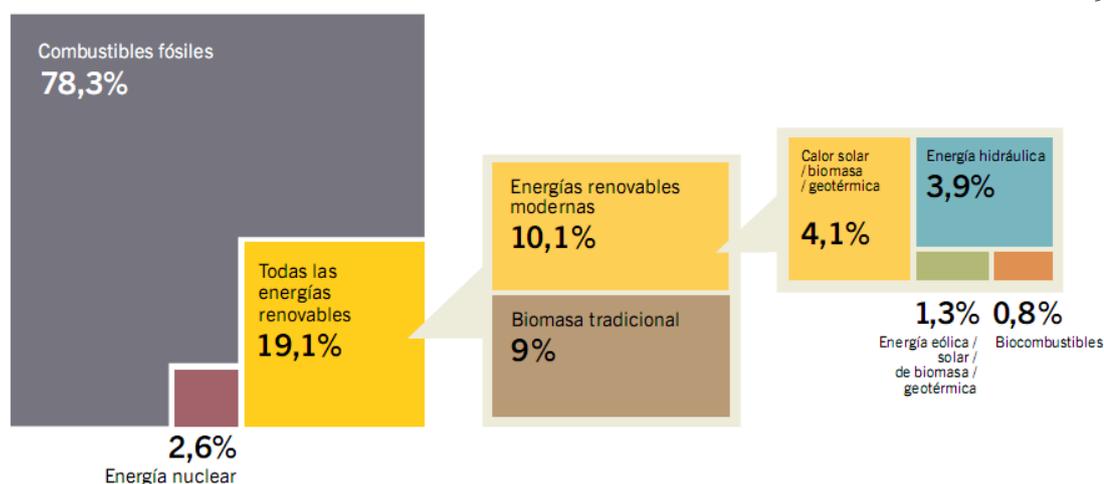


Figura 5 Porcentaje de energía renovable utilizada para el consumo final

Fuente: (IRENA, 2015)

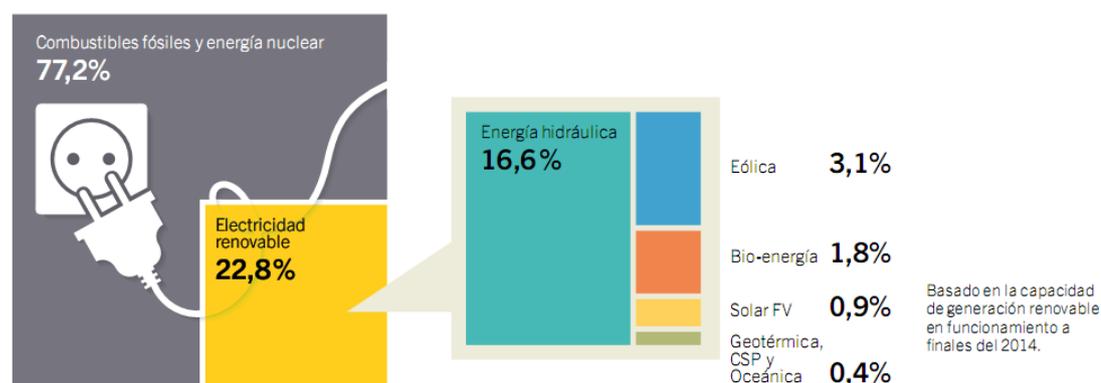


Figura 6 Porcentaje de la energía renovable en la producción de electricidad

Fuente: (IRENA, 2015)

América Latina y El Caribe, es una región rica en recursos energéticos renovables, se estima que apenas un 22% del potencial hidroeléctrico es aprovechado y un 4,2% de las energías renovables restantes son aprovechadas en la actualidad, sin embargo, el 58% de la energía eléctrica es de origen hidroeléctrico y con un 3% de otras fuentes de energías renovables como biomasa, solar, geotérmica y eólica, el 61% de la generación eléctrica es proveniente de energías renovables.

De acuerdo a la OLADE (2014), para el caso ecuatoriano su índice de renovabilidad es del 12,50%, y lo ubica como un país predominantemente no renovable, siendo Paraguay el país con mayor índice de renovabilidad del 75,09% en América Latina y el Caribe (ver figura 7).

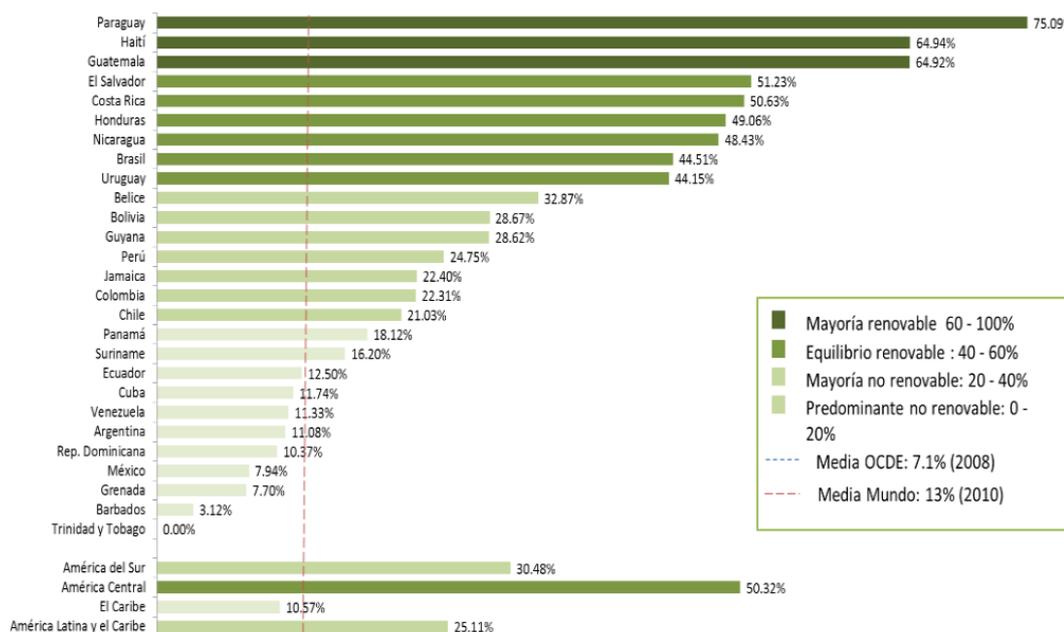


Figura 7 Índice de uso de energía renovable en América Latina y el Caribe
Fuente: (OLADE, 2014)

En el Ecuador los retos sobre el cambio de la matriz energética ya son una realidad. Con la creación del Ministerio de Electricidad y Energías Renovables (MEER) en el año 2007, quien ha invertido en proyectos para sustituir la generación de electricidad empleando combustibles de origen fósil, por una producción basada en fuentes de energías renovables.

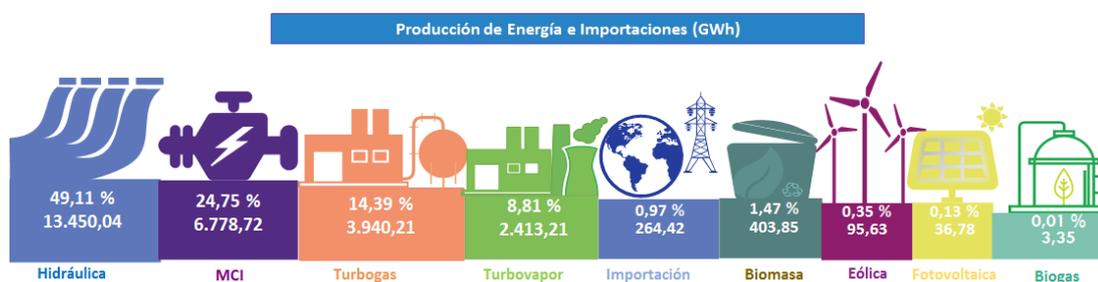


Figura 8 Producción e importación de energía en el Ecuador
Fuente: (ARCONEL, 2016)

En abril del 2016, en el reporte del balance nacional de energía de la Agencia de Regulación y Control de Electricidad (ARCONEL), la producción total de energía por fuentes renovables llego a capacidad de 13.989,65 GWh, lo cual representa el 51,27% del total de la energía eléctrica generada, desglosándose de esta manera: 13.450,04 GWh para centrales hidroeléctricas, 95,63 GWh para centrales eólicas,

403,85 GWh para biomasa, 36,78 GWh para centrales fotovoltaicas y 3,35 GWh para Biogas. La producción total de energía no renovable incluido las importaciones llegaron a 13.132,13 GWh, esto significa el 48,73% de la generación total (ver figura 8).

En los actuales momentos el aporte de generación de energía eléctrica en el Ecuador mediante energías renovables ya supera el 50% , teniendo un incremento del 38,78% respecto del año 2014.

Los proyectos hidroeléctricos emblemáticos en el Ecuador que generan el cambio de la matriz energética liderados por el Ministerios de Electricidad y Energías Renovables (MEER), son:

- Coca Codo Sinclair (1500 MWh),
- Mazar-Dudas (21 MWh),
- Minas-San Francisco (275 MWh),
- Quijos (50 MWh),
- Sopladora (487 MWh),
- Toachi-Pilaton (254,40 MWh),
- Manduriacu (65 MWh en estado operativo desde marzo 2015),
- Delsitanisagua (180 MWh).

Esto da un total de incremento de potencia hidroeléctrica de 2.832,40 MWh. Simultáneamente se ha ejecutado el proyecto Eólico Villonaco de 16,5 MWh que inició sus operaciones en agosto del 2011, que se encuentra localizado en la provincia de Loja. (MEER, 2016)

En el informe del Balance Energético año base 2014 presentado por el Ministerio de Electricidad y Energías Renovables (MEER), se encontró lo siguiente:

- La producción de energía primaria en el Ecuador en el año 2014 (ver figura 9), se concentra en la energía de origen fósil: el petróleo con un 88%, que se divide a su vez en una fracción para exportación en 67% y otra para carga a refinerías nacionales con el 21%, además de contar con un 5% de gas natural. Es así que, la energía de origen fósil representan el 94% del total de la producción de energía primaria, mientras que el resto es producción hidráulica con 4%, productos de caña menor al 2%, leña menos del 1% y otras como la solar y eólica con el 0,03%. (p. 22)

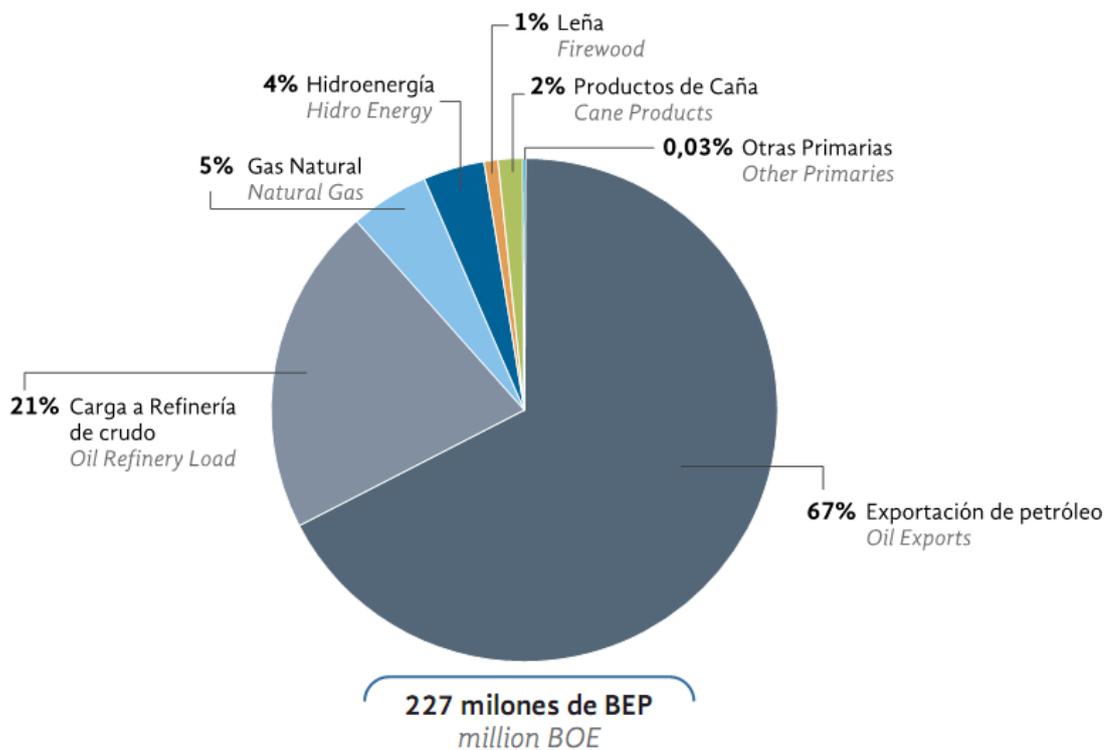


Figura 9 Producción de energía primaria en el Ecuador

Fuente: (MICSE, 2015)

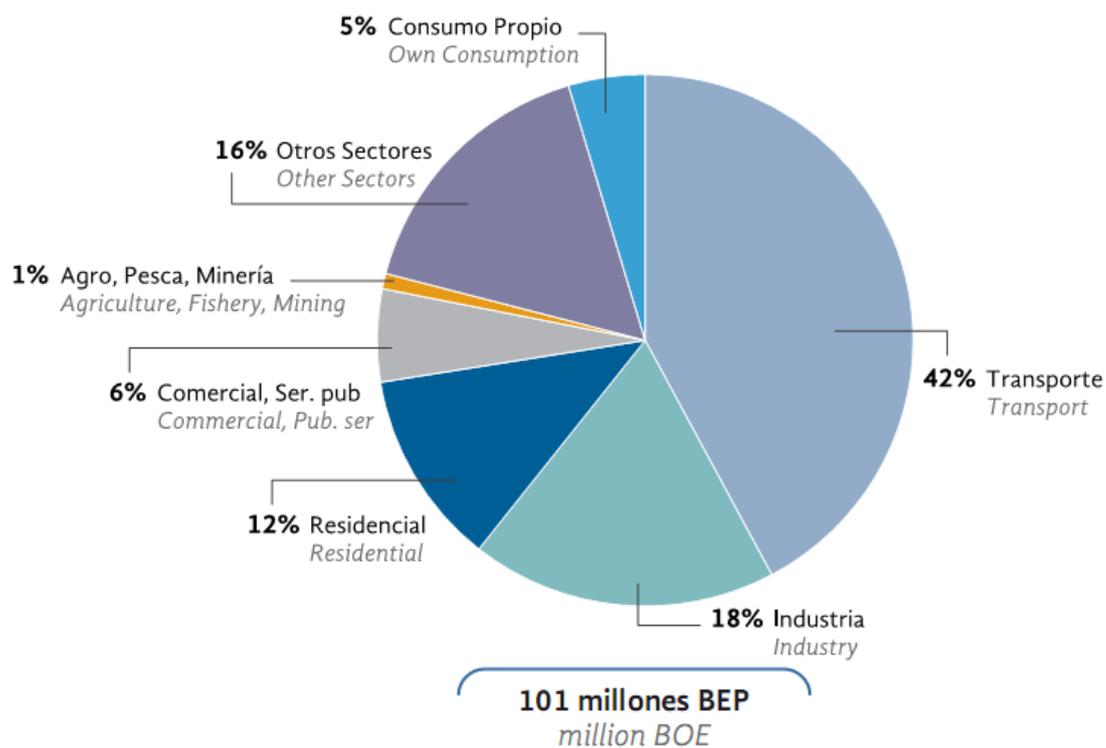


Figura 10 Estructura del consumo por sector de energía en el Ecuador

Fuente: (MICSE, 2015)

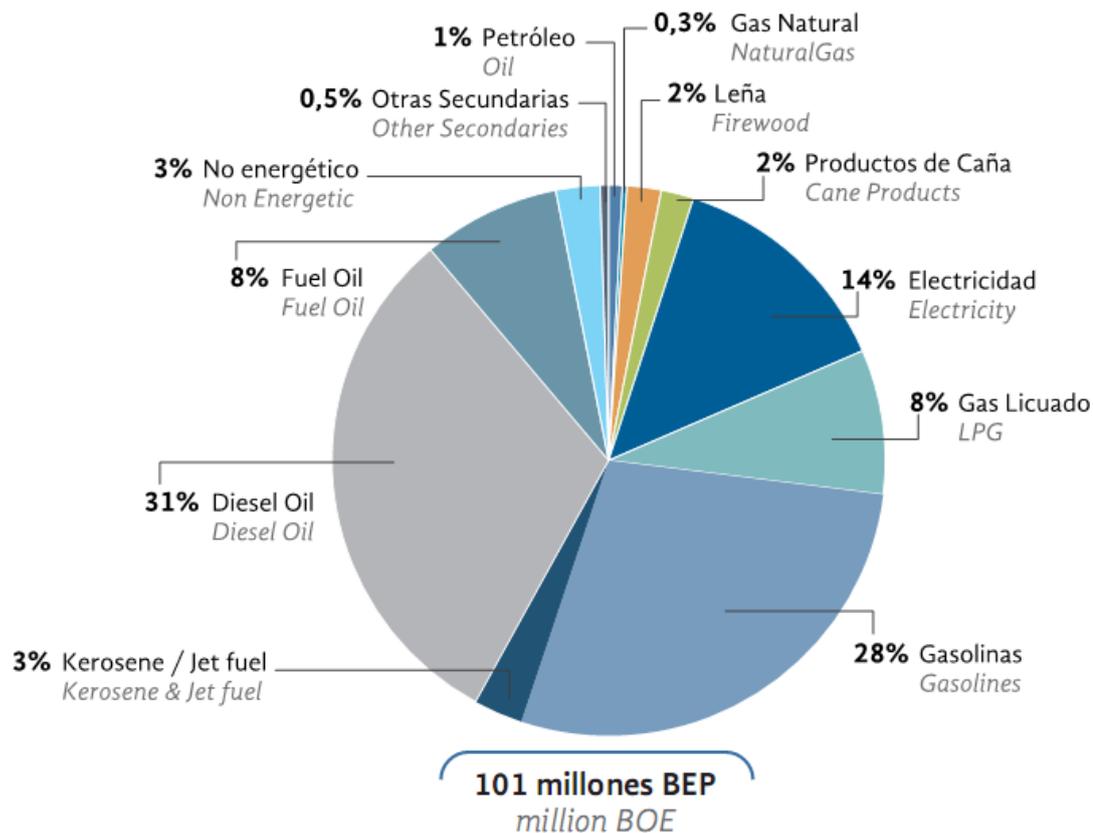


Figura 11 Estructura del consumo por fuente de energía en el Ecuador

Fuente: (MICSE, 2015)

- El consumo de energía por sectores en el Ecuador (ver figura 10), es el sector del transporte con un 42%, seguido por la industria con el 18%, el consumo residencial en 12%, sector comercial y servicios públicos con un 6%, consumo propio con un 5%. (p. 26)
- El consumo de energía por tipo de fuente en el Ecuador (ver figura 11), se concentra en el diésel con un 31%, la gasolina con un 28%, la electricidad con el 14%, el gas licuado de petróleo con un 8% y el fuel oil con el 8%. (p. 28)

Se han determinado que el Ecuador dispone de altos potenciales energéticos basados en biomasa como es la caña de azúcar, cascarilla de arroz, carbón vegetal, leña; aunque en las dos últimas décadas no se han generado proyectos privados ni públicos que permitan la importación, tecnificación, ni el desarrollo de la tecnología de biomasa que aporte sustentablemente en la matriz energética del Ecuador.

El pasto comúnmente llamado Kikuyo o científicamente como Pennisetum Clandestinum es una variedad de biomasa, que hasta los actuales momentos no la ha

estudiado ni caracterizado su potencial energético para posibles aplicaciones energéticas (calor y/o electricidad) en beneficio del Ecuador.

En la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE en los últimos diez años se han generado una gran cantidad de investigaciones de usos de fuentes de energías renovables, las más representativas en las que podemos mencionar son:

- Caracterización de los productos de combustión de la cascarilla de arroz utilizando un sistema térmico con capacidad de 6000 Kcal/h. (Tipanluisa, 2011)
- Análisis y caracterización de biomasa residual agrícola de arroz, cacao y madera mediante dos métodos de gasificación para aplicaciones energéticas. (Villavicencio & Gutierrez, 2015)

En el Ecuador hasta la presente fecha la tecnificación para la utilización de la biomasa vegetal como fuente de energía, ha tenido muy poco impulso para determinar su utilización como fuente energética.

1.2 Planteamiento del problema

Los estudios científicos sobre la utilización de la biomasa de origen vegetal se han enfocado en la utilización del bagazo de la caña de azúcar, la cascarilla de arroz, las cortezas de los residuos forestales, etc., relegando su estudio científico a la utilización del pasto en sus diferentes variantes.

1.2.1 Formulación del problema

No dispone de un estudio que determine la caracterización energética del Pennisetum Clandestinum cuando se realiza un proceso de combustión en dos estados de presentación natural (sin secado) y compactada con un contenido de humedad final inferior al 12%.

1.3 Justificación

De acuerdo con la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura FAO (2004), sobre los perfiles por país del recurso pastura/forraje, el

Pennisetum Clandestinum está sembrado en nuestro país en miles de hectáreas, como es el caso del segmento de las pasturas naturalizadas que de 883,400 Has (Hectáreas) existentes el 20% son de esta variedad de pastura y en los páramos de las ecozonas templadas y frías templadas andinas situadas entre 500 msnm y 3200 msnm el Pennisetum Clandestinum está presente en un porcentaje aproximado al 10% de una base de 1'865,460 Has de tierras con pasto dedicadas a la ganadería. Esto amerita realizar una caracterización de esta variedad de pasto para fines energéticos en la producción de calor y electricidad, puesto que hasta la presente fecha no existe un estudio que se haya realizado en el Ecuador sobre este particular.

1.4 Objetivos

1.4.1 Objetivo general

Realizar la adecuación y montaje de la línea de combustión de biomasa en el Laboratorio de Energías Renovables de la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, para la caracterización energética del Pennisetum Clandestinum.

1.4.2 Objetivos específicos

- Realizar la adecuación y el montaje de la línea de combustión de biomasa en las instalaciones del Laboratorio de Energía Renovables de la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE.
- Caracterizar el proceso de secado del Pennisetum Clandestinum en dos estado de presentación, granulado (granulometría inferior a 1mm) y compactado (en forma de briqueta cilíndrica) para obtener un contenido de humedad final inferior al 12%.
- Caracterizar el proceso de compactación del Pennisetum Clandestinum para obtener briquetas de forma cilíndrica.
- Caracterizar el proceso de combustión del Pennisetum Clandestinum en tres estados de presentación, en estado natural (sin secado), estado granulado (granulometría inferior a 1mm) y en estado compactado (en forma de briqueta) con un contenido de humedad final inferior al 12%.

- Determinar las aplicaciones energéticas al usar el Pennisetum Clandestinum como combustible sólido vegetal.

1.5 Hipótesis

Al utilizar el Pennisetum Clandestinum en un proceso de combustión en sus dos formas de presentación natural y compactada, la primera de una granulometría inferior a 1mm y la segunda en forma de briqueta, deberán obtenerse una densidad energética que supere por lo menos el 50% al compararla con un proceso de combustión en su estado natural sin secado y menos emisiones de monóxido de carbono, al quemarlo con un contenido de humedad inferior al 12% .

CAPÍTULO II

2. MARCO TEÓRICO

2.1 Proceso integrado del secado de biomasa

El término secado se refiere a la eliminación de la humedad en una sustancia. La mayoría de los materiales que tiene las características de biocombustibles sólidos destinados a la producción de calor y electricidad se caracterizan por contener altos porcentajes de humedad. De acuerdo al EB Energías Renovables de la Secretaría de Energía de la República de Argentina, el contenido de agua puede alcanzar valores incluso superiores al 60% del peso total del biocombustible (es decir, 60% de humedad en base húmeda), lo cual incrementa los costos asociados a su manejo, transporte, almacenaje y utilización en planta. Esto dificulta todas las operaciones necesarias para su transformación energética en los procesos de molienda, densificación y combustión. (Secretaría de Energía de Argentina, 2008)

El agua es el medio de transporte de los nutrientes en la materia vegetal, casi todas las reacciones químicas celulares tienen lugar en medio acuoso, es decir; el agua es un componente inherente a ellos. La materia vegetal se caracteriza por su higroscopicidad, que es la capacidad de absorber y perder humedad con el ambiente, un recurso que inicialmente estuviera completamente seco llegaría a presentar humedad si permaneciera almacenado en un ambiente con mayor humedad que la de equilibrio.

La extracción de una parte de la humedad presente en la biomasa, mejora los rendimientos de los procesos de molienda y en los de transformación termoquímica de las partículas así como la disminución de las emisiones de CO, NO_x, etc., asociadas a su conversión energética. Terminado el proceso de secado, el producto reduce su biodegradabilidad y, por lo tanto, la pérdida de materia seca frecuente en un almacenamiento prolongado, así como la aparición de la termogénesis. Además, el secado de la mayor parte de los biocombustibles es un paso previo indispensable en los procesos de densificación.

El propósito de los cálculos en el secado de un material es tanto la obtención de las condiciones de temperatura y de humedad que el agente secante utilizado deberá presentar, como la determinación del tiempo empleado hasta llegar al nivel de

humedad final requerida. Debemos optimizar todos estos aspectos de tal manera que su impacto económico sea mínimo y no afecte el aprovechamiento energético.

Las condiciones económicas y las consideraciones relativas al consumo energético del proceso generan que, a priori el aprovechamiento de las condiciones ambientales para efectuar el secado natural del material pueda resultar más conveniente que la utilización de un combustible para alcanzar las condiciones deseadas con el secado forzado. Sin embargo, las estadísticas nos indican que la humedad final media conseguida con el secado natural de un biocombustible no siempre satisface los requerimientos que precisa el proceso al que precede, bien sea por las condiciones climáticas del emplazamiento, o bien sea por la excesiva duración del periodo de secado necesario. Bajo estas circunstancias, se debe recurrir al secado forzado. La operación de secado es una operación de transferencia de masa de contacto gas-sólido, donde la humedad contenida en el sólido se transfiere por evaporación.

2.1.1 Parámetros de un proceso de secado de biomasa

En un proceso de secado de biomasa, los parámetros más representativos que lo caracterizan son:

- Contenido de humedad en base húmeda,
- Contenido de humedad en base seca, y el
- Periodo de secado.

El contenido de humedad o humedad relativa, se define como la cantidad de agua presente en la biomasa. En general, se hace referencia a tres tipos de agua presentes en la materia vegetal:

- Agua de constitución o agua combinada, es aquella que forma parte de los compuestos químicos que constituyen la materia vegetal y como tal no es posible eliminarla sino transformándola químicamente, por ejemplo, mediante su combustión.
- Agua de impregnación o de saturación, es la que impregna la pared de las células rellenoando los espacios submicroscópicos y microscópicos de la misma. Se introduce dentro de la pared celular y es la causa de la

contracción de la materia vegetal cuando la pierde, por ejemplo, durante el secado, y de su expansión o hinchamiento cuando la recupera.

- Agua libre o de imbibición, es la que llena el lumen (cavidad central de las células) o el xilema (vasos, traqueidas, etc.). Una vez que la materia vegetal la pierde, no puede recuperarla a partir de la humedad atmosférica y solo puede hacerlo por inmersión directa en el agua. El agua libre no tiene más repercusión que la ocupación física de los huecos por lo que no influye en el aumento o disminución del volumen del recurso.

Las dos últimas, el agua de impregnación y el agua libre, son las que constituyen el contenido de humedad de un recurso y las que establecen el tipo de secado aplicarse. Al comenzar el proceso de secado, el agua libre de la partícula de biomasa se va perdiendo por evaporación, pues retenida por fuerzas capilares muy débiles, hasta que sus cavidades celulares están vacías y sus paredes celulares permanecen saturadas.

Este punto del proceso de secado, cuando ya no queda agua libre, se denomina punto de saturación de fibras, el cual para la madera, en promedio corresponde a un contenido de humedad aproximado del 28% (en base húmeda). Superado este punto, el secado comienza a realizarse disminuyendo su contenido de agua de saturación y por ende perdiendo su volumen hasta llegar a un estado de equilibrio con la humedad ambiente.

En general, se emplea el contenido de humedad en base húmeda cuando se habla del recurso en sus condiciones de origen o como materia prima, y en base seca cuando se trabaja en procesos de secado (en este caso, esta referencia es mucho más útil porque si se considera que la cantidad de materia seca no varía en el secado, su uso permite ofrecer una idea exacta sobre la marcha del proceso). Sin embargo, la referencia que en cualquiera de los casos evita las confusiones y las sobrevaloraciones de los recursos existentes, es la base seca.

El exceso de la humedad en un material provoca que la combustión sea incompleta generando carbonilla (carbón) y monóxido de carbono (CO). Así mismo, la biomasa vegetal tiene un escaso contenido de azufre (S), lo que hace que durante la combustión no existen emisiones de azufre a la atmósfera en forma de óxidos.

Se entiende por humedad inicial al porcentaje de contenido de agua que tienen los combustibles de biomasa, extraídos de la naturaleza sin que hayan pasado por ningún proceso de secado. La biomasa vegetal tiene un contenido de humedad inicial superior al 60%, por lo que se requiere que previamente a la combustión sea secada para tener una biomasa seca con un contenido de humedad final inferior al 15%.

Tabla 1

Contenido de humedad inicial de algunos tipos de biomosas

Tipo de biomasa	% Humedad (base húmeda) en el momento del corte
Ramas	35-50 (42,5)
Madera	40-50 (45)
Corteza	25-40 (32,5)
Residuos de aserradero	8-20 (11,3)
Lodos de molino de papel y pulpa	50 – 70 (60,5)
Cascara de arroz	10-20 (12,5)
Mazorca de maíz	40-50 (43)
Cascara de soya	5-15 (9)

Fuente: (IDAE, 2011)

Contenido de humedad de un sólido, se expresa por lo general como la cantidad de humedad por unidad de peso de sólido seco o húmedo. El contenido de humedad en base húmeda ($\%h$), es la que expresa la humedad de un material como porcentaje del peso del sólido mojado. Se define como:

$$\%h = \frac{W_{materia\ a\ secar} - W_{materia\ seca}}{W_{materia\ a\ secar}} \cdot 100$$

Dónde $W_{materia\ a\ secar}$ es el peso de la biomasa vegetal a secar expresada en kilogramos (Kg); $W_{materia\ seca}$ es peso de la biomasa vegetal seca expresada en kilogramos (Kg); y $\%h$ es el contenido de humedad en base húmeda.

El contenido de humedad en base seca, es la que expresa la humedad de un material como porcentaje del peso del sólido seco y se define como:

$$\%h' = \frac{W_{materia\ a\ secar} - W_{materia\ seca}}{W_{materia\ seca}} \cdot 100$$

Dónde $\%h'$ es la el contenido de humedad en base seca.

Se considera el periodo de secado de un proceso de secado para biomasa, al tiempo en que la biomasa pierde progresivamente su humedad inicial, hasta que su peso final de secado es constante en el tiempo. En la figura 12., se describe la relación de la masa y tiempo en un proceso de secado de biomasa.

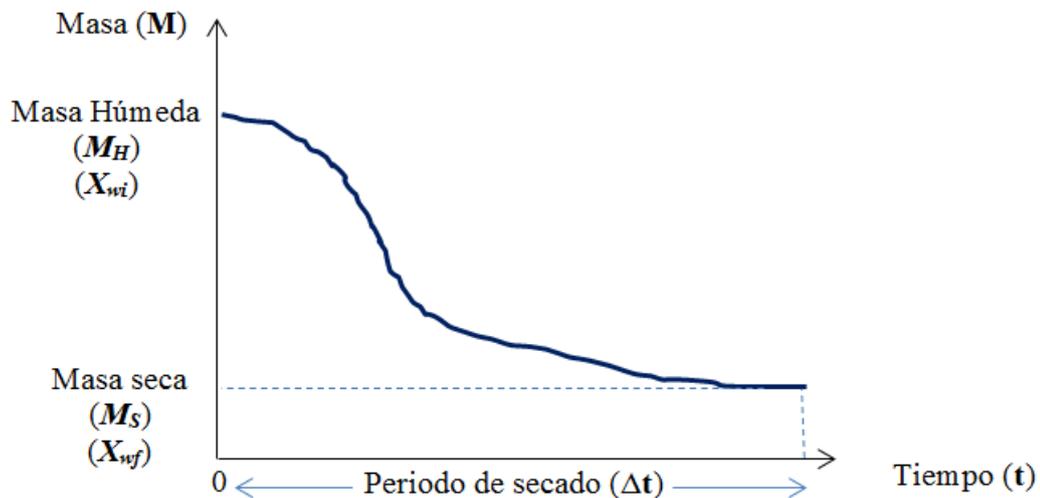


Figura 12 Relación masa vs tiempo en un proceso de secado de biomasa

$$\dot{m}_c = \frac{M_S}{\Delta t}$$

$$M_S = M_H \cdot \left(\frac{100 - X_{wi}}{100} \right)$$

$$X_{wi} = \%h$$

$$\Delta_w = M_S \cdot \left(\frac{X_{wi}}{100 - X_{wi}} - \frac{X_{wf}}{100 - X_{wf}} \right)$$

Dónde \dot{m}_c es la velocidad de secado; Δt es el periodo de secado expresado en unidad de tiempo; M_S es el peso de la biomasa seca expresada en kilogramos (Kg); M_H es el peso de la biomasa húmeda expresada en kilogramos (Kg); X_{wi} es el contenido de humedad inicial de la biomasa; X_{wf} es el contenido de humedad final de la biomasa y Δ_w es el peso de agua que debe perder la biomasa para alcanzar un determinado contenido de humedad final. Para procesos de combustión de biomasa vegetal, comúnmente el $X_{wf} \leq 15\%$, para cálculos analíticos el $X_{wf} = 12\%$.

2.1.2 Tecnologías del secado

En la tecnología del secado, se destacan dos tipos de secado mayoritariamente utilizados, así:

- Secado natural,
- Secado forzado, y
- Torrefacción

En el secado natural, a la biomasa se la seca realizando generalmente mediante el apilado del material con la finalidad de disminuir las necesidades de almacenamiento. Sin embargo, el hecho de que una partícula forme parte de una pila provoca que su velocidad de secado sea menor que si la partícula se encontrara aislada, y, por lo general, la reducción de humedad alcanzada es inferior. Los parámetros del proceso de secado natural a considerar son las condiciones ambientales y el fenómeno de la termogénesis.

- Las condiciones ambientales están relacionado como la humedad relativa, la temperatura ambiental y la velocidad de secado son las que determinan la variación del estado humedad de los recursos. La mayor o menor influencia de las condiciones del ambiente en el proceso de secado depende de varios factores que limitan el contacto de la partícula a secar con el entorno: tamaño del material, dimensiones y forma de la propia pila, grado de compactación y el manejo que pueda recibir, por ejemplo volteo cada cierto tiempo, aireación forzada con un ventilador y cubrimiento con una lona.
- El fenómeno de la termogénesis, comprende la acción conjunta y progresiva de respiración de las células vivas del tejido vegetal, la actividad biológica de microorganismos como bacterias y hongos, la oxidación química y la hidrólisis acida de los componentes celulósicos de los recursos. Estos procesos conducen a la liberación calor en el interior de la pila lo que coadyuva al proceso de secado. En los primeros instantes del almacenamiento, la respiración de las células es la que genera el incremento de temperatura. El mayor incremento de temperatura se genera al interior de la pila, por estar aislado del exterior. Este aumento de temperatura, aunque beneficioso para el secado, debe

ser controlado en todo momento para evitar posibles fenómenos de auto combustión o incendios, frecuentes en el almacenamiento de la biomasa por su gran contenido de volátiles (ver figura 13).

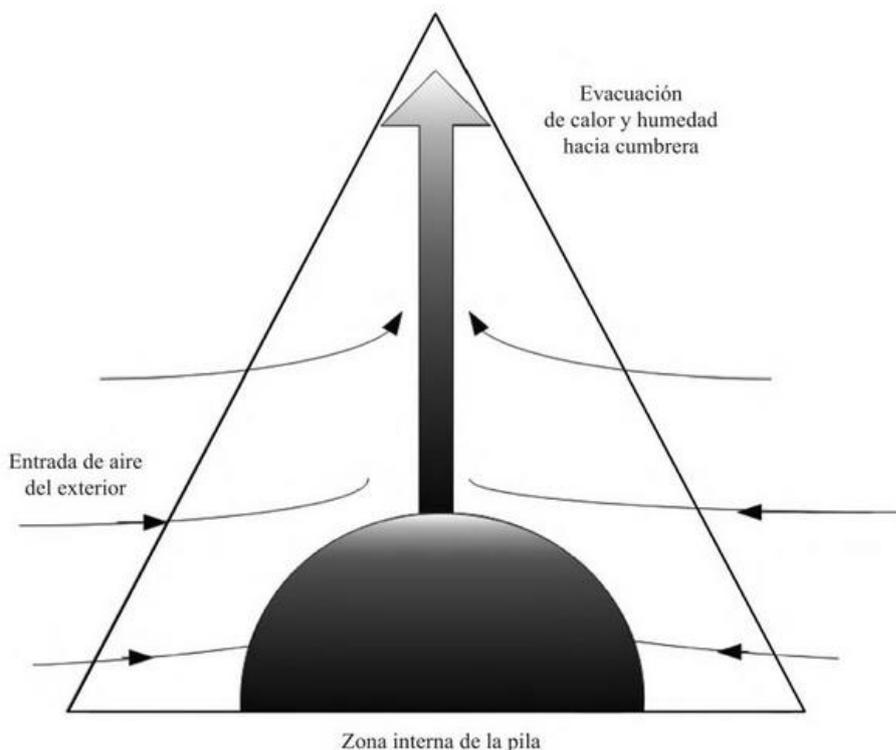


Figura 13 Flujo de calor en una pila en un fenómeno de la termogénesis

Fuente: (Nogués, 2010)

En el secado forzado, se da cuando se utiliza un equipo eléctrico y/o mecánico para realizar el proceso de secado de la biomasa, permitiendo reducir el contenido de humedad, incluso por debajo de la humedad con respecto al secado natural. Con el secado forzado generalmente, salvo excepciones raras, los costos de operación son más elevados que los correspondientes al secado natural. Existen diversos tipos de equipos de secado, los más utilizados son:

- Secadores tipo rotatorio, se componen de una carcasa cilíndrica horizontal o ligeramente inclinada hacia la dirección de salida del material. Al girar el tambor, levanta a la biomasa para dejarla caer en forma de cortina de agua a través del interior del tambor, la alimentación ingresa por un extremo y el producto seco sale por el extremo opuesto. Éste tipo de secadores pueden operar en contracorriente o en paralelo, los primeros suponen que el aire caliente se pone en contacto con el producto seco que va a abandonar el equipo, mientras que el producto

húmedo se encuentra con el aire que sale, es decir, más frío y húmedo. En tanto el secado en paralelo implica que el agente secante y el flujo de sólidos a secar entran en el equipo por el mismo extremo, es decir, el agente secante caliente y seco se ponen en contacto con el sólido frío y húmedo, abandonando ambos flujos el tambor por el extremo opuesto, el sólido ya seco y más caliente que a su entrada y, evidentemente, el gas más frío y húmedo. Se ha demostrado empíricamente que los secaderos rotativos resultan adecuados desde el punto de vista económico y de rendimiento para aplicaciones de secado forzado (ver figura 14).

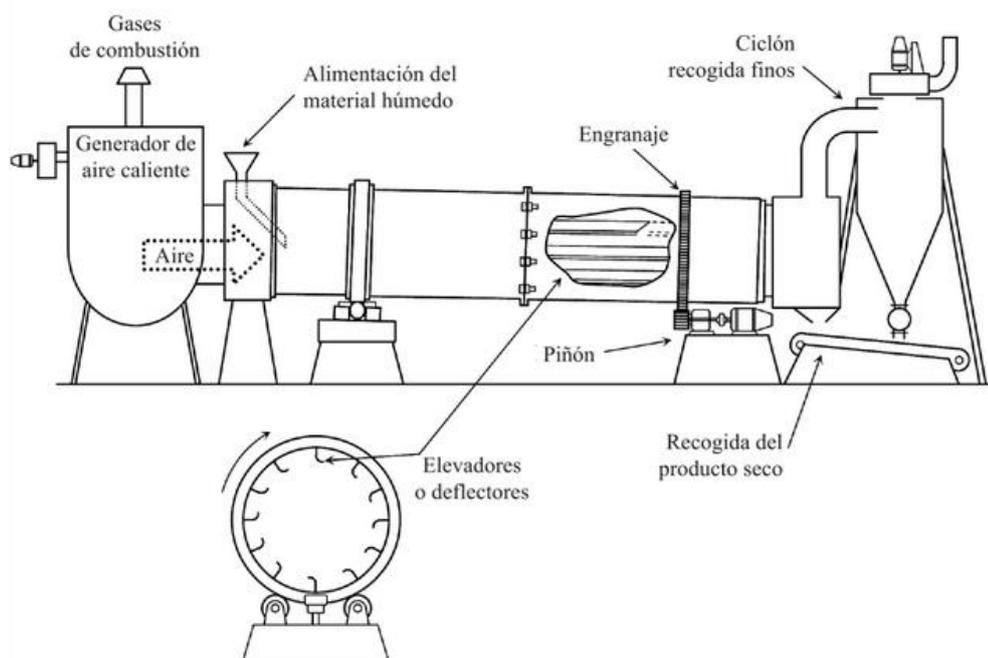


Figura 14 Secador tipo tambor rotatorio en paralelo

Fuente: (Nogués, 2010)

- Secadores tipo fluidizados se clasifican de acuerdo con su medio de secado. El medio de secado puede ser vapor sobrecalentado, aire caliente o gas de los humos. Estos últimos tienen emisiones de aire y riesgo de incendio, mientras que el secador de vapor sobrecalentado no tiene emisiones. Los secadores de vapor sobrecalentado por el contrario tienen condensado que debe ser tratado, existiendo la posibilidad de recuperar algunos compuestos del condensado como aceite de madera que puede ser comercializado. Los secadores de vapor sobrecalentados ventean la humedad evaporada del material, por lo tanto son más convenientes en

instalaciones que tienen un uso para el exceso de vapor de baja presión que debe ser purgado del ciclo de secado. Los secadores pueden diseñarse para operar a presión atmosférica o presión de vacío. El secado de la biomasa bajo vacío reduce el punto de vaporización del agua y por ende se reduce la temperatura requerida para el secado. Los secadores de vacío típicamente tienen costos de capital altos. Esto y el gasto de operación del sistema de vacío deben sopesarse contra el ahorro de energía debido al uso incrementado de la recuperación de calor. Los secadores que emplean el vapor sobrecalentado pueden ser operados a una presión por encima de la atmosférica para permitir una recuperación de calor a una temperatura utilizable más alta. El calor para el secador debe obtenerse de los quemadores del propio secador, desde el gas de los humos de la caldera, desde el calor de los residuos recuperado del escape del calentamiento de procesos en las instalaciones o del vapor de la caldera. Cuando se recupera calor del equipo del proceso, el agua puede calentarse y transferirse a mayores distancias de lo que puede hacerse con el aire.

- Los secadores solares aprovechan las ventajas energéticas y económicas que presentan el uso de la radiación solar y la acción del viento en el secado de la biomasa y disminuir los inconvenientes asociados a la utilización a escala industrial del secado natural, se han desarrollado secaderos solares para reducir el contenido de humedad tanto de productos agrícolas como de otros recursos biomásicos. Los secadores solares se pueden clasificar en:
 - Secaderos solares activos o de convección forzada, incorporan elementos para hacer circular el aire caliente.
 - Secaderos solares pasivos o de convección natural, la convección natural es la única fuente de circulación del aire en el sistema.
 - Secador solar directo en el cual la radiación solar se recoge en la propia cámara de secado.
 - Secador solar indirecto en el cual el colector solar están dispuestos fuera de la cámara de secado, de manera que ambos sistemas son unidades separadas (ver figura 15).

- Secador solar mixto, la captación tiene lugar en la cámara de secado como en un captador específico de aire.

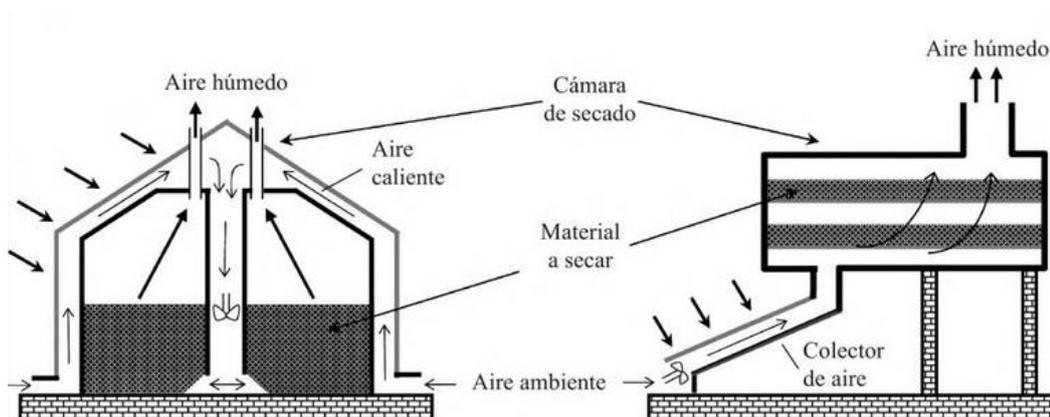


Figura 15 Secador solar directo (izquierda) e indirecto (derecha)

Fuente: (Nogués, 2010)

La torrefacción es una tecnología ampliamente conocida en el ámbito alimenticio, aunque en desarrollo para su utilización en el ámbito energético. Con esta tecnología se obtiene un producto seco, que posee mayor calidad que el biocombustible de partida, y cuyo principal obstáculo para su implantación en la actualidad es su falta de viabilidad económica dentro del proceso de producción energética con biomasa. La torrefacción es un pretratamiento cuyo objetivo es transformar un biocombustible en un producto de mayor calidad mediante la aplicación de calor a una velocidad no superior de $50^{\circ}\text{C}/\text{min}$ hasta alcanzar unas temperaturas de entre 200°C a 300°C , en una atmósfera carente de oxígeno y bajo condiciones de presión cercanas a la atmosférica.

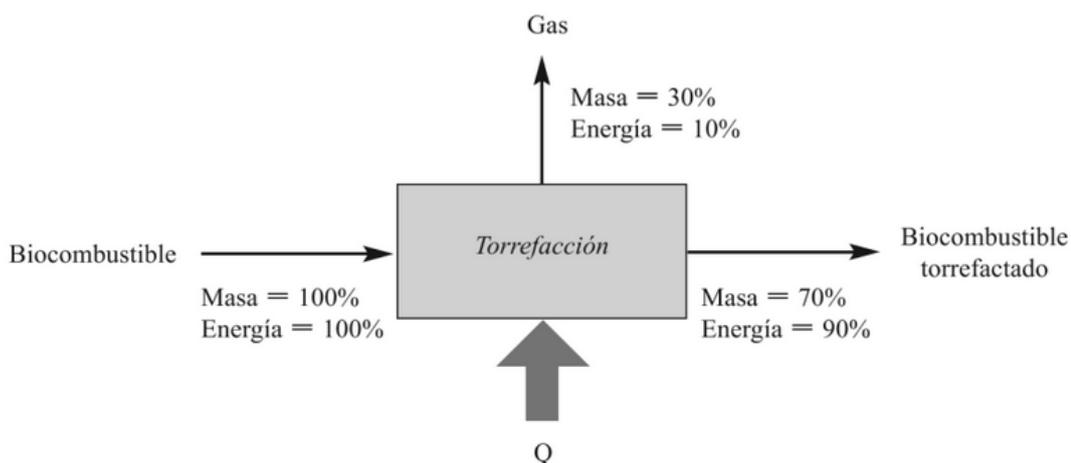


Figura 16 Proceso de torrefacción

Fuente: (Nogués, 2010)

Por las condiciones de operación, en ocasiones se confunde el proceso de torrefacción con las primeras etapas de pirolisis. En el proceso se elimina completamente el contenido de agua de la biomasa y la capacidad de absorber humedad del producto torrefactado disminuye respecto a la del biocombustible de partida. Esto es debido a la destrucción de los grupos hidroxilo (OH), hecho que evita la formación de futuros enlaces de hidrógeno. Las aplicaciones del producto torrefactado son principalmente la obtención de materia prima para proceso de convección termoquímica como la combustión y la gasificación.

El interés en este pretratamiento es creciente por la disminución de costos de transporte y molienda, la mejora de la calidad del combustible y del proceso de convección térmica. Sin embargo, esta tecnología solo es aplicada cuando supone una disminución del costo total de producción energética a partir de biomasa (torrefacción, transporte, almacenamiento, pretratamiento y convección térmica), lo cual en la actualidad no ocurre, y por ello, no está desarrollada a escala comercial.

2.2 Proceso integrado de la compactación de la biomasa

Generalmente la biomasa durante el proceso de recolección o cosecha en la encuentra su estado natural, lo cual para procesos de combustión se la requiere en estado compactada, usualmente en forma de briquetas, pélets y empacados con determinadas características que facilitan la combustión del biocombustible.

2.2.1 Briquetas

El término briqueta se hace referencia a bloques sólidos utilizados como combustibles para generar calor principalmente utilizado en estufas, chimeneas, hornos y calderas. Es un producto 100% ecológico y renovable, ya que están hechas principalmente de desperdicios forestales tales como el papel, madera, cartón, polvo pulido, lino, etc. (ver figura 17). Sus formas de presentación típicas son la cilíndrica recta u octaédrica. Las briquetas sustituye a la leña vegetal con muchas ventajas, entre ellas el poder calorífico similar, fácil y rápido encendido, baja humedad, alta densidad, ocupa menos espacio, homogéneas, fácil manipulación, sin olores, humos ni chispas y menor porcentajes de cenizas.



Figura 17 Tipos de briquetas

Fuente: (MECALUX, 2016)

Los métodos industriales del briquetado datan desde mediados del siglo XIX, época en que el uso de las briquetas ha estado ligado a las de crisis energéticas debido a la escasez de combustible. Durante la segunda guerra mundial en América y Europa fue muy intenso el uso de briquetas a partir de residuos de madera, finalizada la misma, su comercialización fue desplazada por los combustibles fósiles. Nuevamente en la década de los 70 y principios de los 80 se encarece la energía y se incentiva la comercialización de briquetas provenientes de madera.

Actualmente la tendencia es producir briquetas de bajo costo económico a partir de residuos no utilizados para otros fines de mayor valor. Vale indicar que para que se produzca la auto aglomeración de los materiales a densificarse como la madera, es necesario que la humedad sea del 8% al 15% y además que el tamaño de las partículas este comprendido entre 0,5 y 1 cm.

2.2.2 Características de las briquetas

Las características más representativas de una briqueta son:

- Forma,
- Densidad,

- Humedad,
- Composición química, y
- Poder calórico.

La forma de las briquetas puede ser variable y depende de la maquinaria que sea utilizada para su fabricación. Las formas más usadas para la elaboración de las briquetas son las cilíndricas, pero se pueden elaborar de forma octaédrica, con un hueco redondo en el centro, de esta manera se consigue una ignición más rápida, otra forma es la sección rectangular, ligeramente redondeada en las cuatro esquinas para así no desintegrarse con los golpes, este tipo de briquetas arden más despacio pero se almacena mucho mejor pues ocupan menos volumen a igualdad de peso que el tipo cilíndrico (ver figura 18) o el prisma octogonal hueco. El tamaño dependerá principalmente de las características de uso de la briketa, generalmente se los encuentra entre 5 cm a 15 cm de largo, con diámetros comprendidos normalmente entre 5 cm y 10 cm, el color de las briquetas es variado y depende del material utilizado para la elaboración de la briketa, generalmente son de color oscuro.

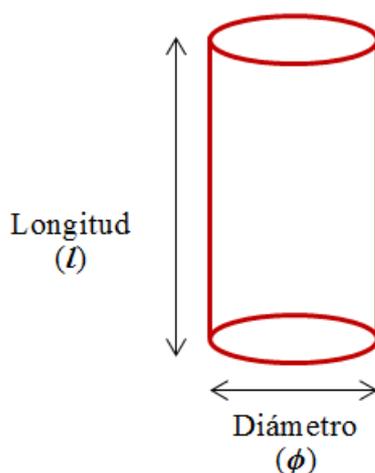


Figura 18 Briquetas cilíndricas

La principal característica de las briquetas es su densidad, influenciado por la materia prima empleada, cuanto mayor sea la densidad de la materia prima mayor será la densidad del producto final. La presión ejercida por la prensa en el proceso de fabricación y el correcto diseño y manipulación de la misma. Para determinar la densidad de una briketa se requiere disponer un volumen de briketa (V_b) en referencia a su masa seca (MS_b) la cual ha eliminado la mayor cantidad de humedad, la densidad de la briketa se determina con las siguientes expresiones:

$$V_b = \frac{\pi \cdot \phi^2 \cdot l}{4}$$

$$\delta_b = \frac{MS_b}{V_b}$$

Dónde V_b es el volumen de la briqueta elaborada en función del diámetro ϕ y de la longitud l ; δ_b es la densidad de la briqueta expresada en gramos por mililitro (g/ml) y MS_b es la masa de una muestra de la biomasa seca expresada en gramos (g).

Tabla 2
Densidad de algunas materias primas

Materia prima	Densidad con un contenido de humedad final del 12%
Ciprés	0,5960
Leña	0,5500 – 0,6500
Astilla	0,2500 – 0,3200
Carbón vegetal	0,1700 – 0,3500
Cedro	0,5700
Pino silvestre	0,5024
Chopo común	0,5300
Nogal	0,6510
Eucalipto	0,5770
Grasa animal	0,7409 – 0,7416

Fuente: (Martín, 2015)

La humedad de la briqueta es función de la forma en que se manipule la biomasa vegetal, como en el proceso de prensado que sufre la materia prima hasta convertirse en briqueta se suele utilizar generalmente biomasa seca, considerando un contenido de humedad final inferior al 12%, y posteriormente dar un proceso adicional de secado para garantizar el porcentaje de humedad adecuado antes del proceso de combustión.

Es indispensable conocer la composición química de las briquetas, porque ésta condiciona su poder calórico. La composición química de las briquetas dependerá del material utilizado en su constitución. Si se emplean aglutinantes o aditivos habrá de tenerse en cuenta la composición química de los mismos. Lo ideal es conocer los

porcentajes (en peso) de la masa vegetal y del aglutinante o aditivo empleado, así como la humedad a la que se manipulan estos productos. Conocidos estos porcentajes puede evaluarse de forma aproximada la composición química de las briquetas.

El poder calórico es la cantidad de energía desprendida por un kilogramo de combustible al quemarse. Si en la combustión el agua se recoge condensada tendremos el poder calórico superior (PCS). Si el agua se evapora tendremos el poder calórico inferior (PCI). El PCS es un valor que se obtiene en los laboratorios mediante ensayos en bomba calorimétrica. Siempre el PCS es mayor que el PCI, ambos son medidos en Kcal/Kg.

Esta es la característica fundamental que define a un combustible como tal. Altos poderes caloríficos, indican buenos combustibles y bajos poderes caloríficos señalan combustibles más discretos. El poder calórico depende fundamentalmente de la composición química del combustible. Existen fórmulas teóricas para su obtención a partir de la composición química elemental. Entre éstas fórmulas podemos señalar la fórmula de Dulong. (Ortega, 2000)

$$PCS = \frac{8100.\%C + 34000.\left(\frac{\%H}{8} - \frac{\%O}{8}\right) + 2500.\%S}{100}$$

$$Q_{H_2O} = \frac{9.\%H.600}{100}$$

$$PCI(0\%) = PCS - Q_{H_2O}$$

$$PCI(h\%) = PCI(0\%).\left(1 - \frac{h\%}{100}\right) - \frac{h\%}{100}.600$$

Dónde PCS es el poder calórico superior; $\%C$ es porcentaje de carbono presente en la materia; $\%H$ es porcentaje de hidrógeno presente en la materia; $\%O$ es porcentaje de oxígeno presente en la materia; $\%S$ es porcentaje de azufre presente en la materia; $PCI(0\%)$ es el poder calórico inferior considerando que la materia se encuentra totalmente seca; $PCI(h\%)$ es el poder calórico inferior considerando que la materia tiene un porcentaje de humedad ($h\%$) y Q_{H_2O} es el calor de evaporación del agua de constitución.

Tabla 3
Poder calórico superior de algunas biomásas

Tipo de biomasa	PCS (Kcal/Kg)
Leña (madera)	4500 – 5300
Astilla	4500 – 5300
Carbón vegetal	7000 – 7300
Briquetas (depende del material)	4500 – 5300
Pasto bermuda	4580 – 4600
Cascarilla de arroz	3000 – 3300
Bagazo de azúcar	4320 – 4600

Fuente: (Martín, 2015)

2.2.2 Tecnología del briquetado

La tecnología del briquetado implementa distintas técnicas de compactación, siendo las más utilizadas la de densificación por:

- Impacto,
- Extrusión, y
- Hidráulica o neumática.

La densificación por impacto (briquetadora de pistón), se la realiza mediante el golpeteo producido sobre la biomasa, por un pistón accionado a través de un volante de inercia. Las densidades conseguidas suelen estar entre 1000 y 1200 Kg/m³.

La densificación por extrusión (Briquetadora de tornillo), se basa en la presión ejercida por un tornillo sinfín especial, que hace avanzar el material hasta una cámara que se estrecha progresivamente en forma cónica, este sistema permite fabricar briquetas con orificios interiores que favorecen su combustión. Este tipo de briquetas tienen mayor densidad que las briquetadoras de impacto están entre 1300 y 1400 Kg/m³, aunque los consumos energéticos y los costos de mantenimiento son notablemente más elevados.

La densificación hidráulica o neumática, se la realiza mediante una máquina que a través de la presión ejercida por uno o varios cilindros accionados por sistemas densifica la biomasa. Se suelen utilizar cuando los residuos son de muy mala calidad

o están húmedos y no se requiere de una briqueta final de gran calidad. Son equipos de bajo consumo y bajos costes de mantenimiento. Estos equipos producen briquetas con densidades del orden de 700 – 800 Kg/m³ y en ciertos casos hasta de 900 – 1000 Kg/m³.

2.3 Proceso integrado de la combustión de la biomasa

La combustión puede ser definida como la secuencia de reacciones químicas relativamente rápida entre un combustible líquido, sólido o gaseoso y un oxidante como el oxígeno del aire, por las cuales se libera energía calórica y luminosa en un ambiente confinado. Producto de la combustión se genera energía en forma de calor, gases de combustión, cenizas y materia inerte de ser el caso.

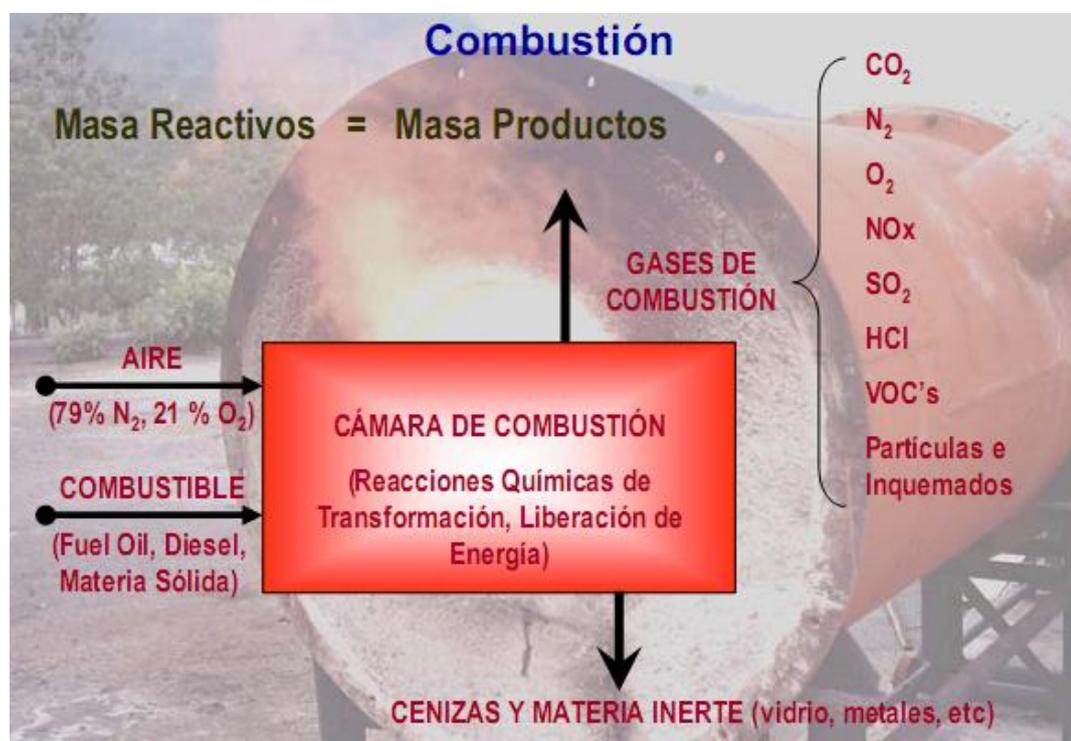


Figura 19 Balance de masas en un proceso de combustión

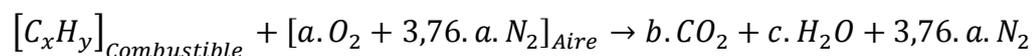
Fuente: (ESPOL, 2015)

De la figura 19, se puede determinar para que se produzca la combustión deben confluir cuatro circunstancias fundamentales:

- Primera: debe haber una cantidad suficiente de combustible (Fuel Oil, Diésel, Materia Sólida).

- Segunda: debe haber una cantidad suficiente del oxidante (aire constituido por el 79% N₂ y 21% O₂), que contiene el oxígeno necesario para oxidar o reaccionar con el combustible.
- Tercero: La temperatura debe ser la suficiente como para que se produzca y se mantenga la reacción. Si la temperatura no supera un determinado valor, denominado temperatura de inflamación (temperatura adiabática o de llama) en la cual el oxidante y el combustible no reaccionan.
- Cuarto: debe haber un iniciador de la combustión, normalmente una llama preexistente. Esto significa que en el encendido del sistema de combustión participan normalmente otros elementos, incluso otros combustibles.

La ecuación química de la combustión, considerando la combustión con el 100% de aire de cualquier combustible del tipo C_xH_y, se la puede expresar como:



Dónde $a = \frac{x+y}{4}$ es la cantidad estequiométrica del oxígeno, b y c son los parámetros algebraicos que resultan del balance numéricos.

La relación aire – combustible del proceso de combustión se la expresa como:

$$RAC = \frac{PM_{aire}}{PM_{Combustible}}$$

Dónde: RAC es la relación aire – combustible; PM_{aire} es el peso molecular del aire y $PM_{combustible}$ es el peso molecular del combustible.

Dentro del análisis de los procesos de combustión se analizan los siguientes parámetros que la caracterizan:

- Combustión directa
- Emisiones
- Aplicaciones de la combustión
- Eficiencia de la combustión

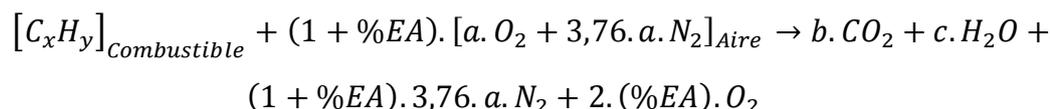
2.3.1 Combustión directa

La combustión directa es un proceso por el que la biomasa directamente o sus biocombustibles derivados son oxidados hasta obtener dióxido de carbono (CO₂),

agua y residuos como las cenizas. El proceso se realiza a altas temperaturas (800 °C a 1000 °C), utilizando aire como agente oxidante e involucra una etapa instantánea inicial de pirolisis y otra de gasificación de la biomasa previa a la de combustión propiamente dicha. Esta es la forma más antigua y más común, hasta hoy, para extraer la energía de la biomasa.

Los sistemas de combustión directa son aplicados para generar calor, el cual puede ser utilizado directamente, como por ejemplo, para la cocción de alimentos o para el secado de productos agrícolas. Además, éste se puede aprovechar en la producción de vapor para procesos industriales y electricidad. Las tecnologías de combustión directa van desde simples, como estufas, hornos y calderas, hasta otros más avanzados como combustión de lecho fluidizado.

En la combustión directa en condiciones reales se emplea una cantidad de aire por encima (exceso) del necesario para efectuar la oxidación total del biocombustible que se utilice en cada caso. En general, el término “combustión de biomasa” suele hacer referencia a la combustión directa de la biomasa o de los biocombustibles sólidos. La ecuación química de la combustión (considerando la combustión con un exceso de aire %EA) de cualquier combustible del tipo C_xH_y , es:



Dónde $a = \frac{x+y}{4}$ es la cantidad estequiométrica del oxígeno, b y c son los parámetros algebraicos que resultan del balance numéricos.

La combustión de la biomasa transcurre con la liberación de la energía en forma de calor y los productos principales resultantes, como se ha mencionado, son el dióxido de carbono, agua en forma de vapor a la salida de equipo de combustión y las sales minerales contenidas en la biomasa empleada como combustible, además de relativamente pequeñas cantidades de óxidos de nitrógeno y de azufre, así como de monóxido de carbono, partículas de carbono y otros productos orgánicos resultantes de la combustión incompleta de la biomasa, denominados genéricamente “inquemados”. Las sales minerales junto con otros inquemados en muy pequeñas cantidades constituyen las cenizas del proceso que, bajo determinadas condiciones, pueden ser, en general, restituidas al suelo como fertilizantes. El resto de los productos secundarios mencionados constituyen las emisiones gaseosas del proceso

cuya minimización es necesaria a fin de disminuir el impacto ambiental producido por este proceso.

2.3.2 Emisiones

La biomasa es considerada como una forma de energía solar almacenada ya que las plantas utilizan esta energía para almacenar CO_2 y agua a través de la fotosíntesis. Además, es un combustible no fósil, neutro desde el punto de vista del ciclo del carbono (ciclo natural del carbono tierra-aire). Las emisiones de CO_2 que se producen, al proceder de un carbono retirado de la atmósfera en el mismo ciclo biológico, no alteran el equilibrio de la concentración de carbono atmosférico, y por tanto no incrementan el efecto invernadero. Su uso contribuye a reducir las emisiones de CO_2 a la atmósfera, siempre que sustituya a un combustible fósil.

Son numerosos los productos en todo tipo de combustión, entre los que podemos mencionar el nitrógeno (N_2), dióxido de carbono (CO_2), vapor de agua (H_2O), oxígeno (O_2 no utilizado en la combustión), monóxido de carbono (CO), óxidos de nitrógenos (N_2O), dióxidos de azufre (SO_2), inquemados (combustible sin terminarse de quemar), cenizas y partículas sólidas.

En la combustión de la biomasa, se considera que tienen un balance neutro las emisiones de CO_2 . Realmente si se produce CO_2 como resultado de la combustión de la biomasa, pero esto se considera así porque se plantea que la combustión de biomasa no contribuye al efecto invernadero, porque el CO_2 que se libera forma parte de la atmósfera actual (es el CO_2 que absorben y liberan continuamente las plantas y árboles para su crecimiento) y no es el CO_2 capturado en el subsuelo a lo largo de miles de años y liberado en un breve espacio de tiempo como ocurre con los combustibles fósiles.

Al principio, el hecho de talar árboles (aunque sea de forma sostenible) hace incrementar las emisiones de CO_2 , porque los árboles talados dejan de absorber evidentemente el CO_2 de la atmósfera y ese CO_2 contenido en la propia madera es emitido a la atmósfera, de ahí el incremento de CO_2 . Si la biomasa es proveniente de una gestión equilibrada y por lo tanto sostenible, se observa que el incremento de CO_2 emitido a la atmósfera acaba por frenarse, pasando a una situación de reducidas emisiones de CO_2 .

2.3.3 Aplicaciones de la combustión

A través de la combustión directa o empleando la conversión termo-química o bioquímica de la biomasa se puede generar calor, el cual puede ser usado para la cocción de alimentos o para el secado de productos agrícolas, así como en la producción de vapor para aplicarlo en procesos industriales y en la generación de electricidad y en fuerza motriz.

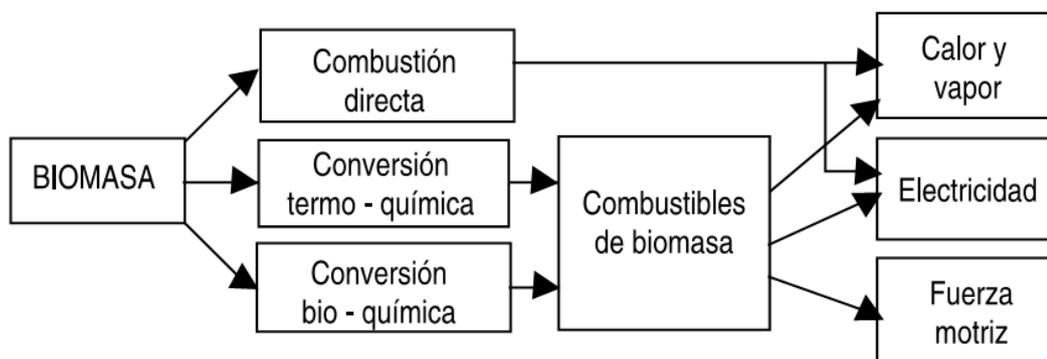


Figura 20 Formas de energía generadas por la biomasa

Fuente: (FOCER, 2002)

De la figura 20, se puede describir que la biomasa puede ser utilizada en:

- Generar calor y vapor mediante la combustión de biomasa o biogás. El calor puede ser el producto principal para aplicaciones en calefacción y cocción, o puede ser un subproducto de la generación de electricidad en ciclos combinados de electricidad y vapor.
- El biogás generado en procesos de digestión anaeróbica o gasificación puede ser usado en motores de combustión interna para generación eléctrica, para calefacción y acondicionamiento en el sector doméstico, comercial e industrial y en vehículos modificados.
- La producción de biocombustibles como el etanol y el biodiesel tiene el potencial para reemplazar cantidades significativas de combustibles fósiles en muchas aplicaciones de transporte. El uso extensivo de etanol en Brasil ha demostrado, durante más de 20 años, que los biocombustibles son técnicamente factibles a gran escala. En los Estados Unidos y Europa su producción está incrementándose y se están comercializando mezclados con derivados del petróleo, por ejemplo, la

mezcla denominada E20, constituida 20% de etanol y 80% de petróleo, resulta aplicable en la mayoría de motores de ignición. Actualmente, este tipo de combustible es subsidiado por los gobiernos, pero, en el futuro, con el incremento en los cultivos energéticos y las economías de escala, la reducción de costos puede hacer competitiva su producción.

- Electricidad generada a partir de los recursos biomásicos puede ser comercializada como “energía verde”, pues no contribuye al efecto invernadero por estar libre de emisiones de CO₂. Este tipo de energía puede ofrecer nuevas opciones al mercado, ya que su estructura de costos permitirá a los usuarios soportar mayores niveles de inversión en tecnologías eficientes, lo cual incrementará la industria bioenergética. La producción de energía eléctrica, es obtenida minoritariamente a partir de la biomasa residual como restos de cortas y podas, y principalmente a partir de cultivos energéticos leñosos de crecimiento rápido como chopo, sauce, eucalipto, robinia, coníferas, acacias, plátanos, etc.
- Co-generación (calor y electricidad) se refiere a la producción simultánea de vapor y electricidad, la cual se aplicaría en muchos procesos industriales que requieren las dos formas de energía. En el Ecuador este proceso se lo genera en los ingenios de azúcar como el caso del Ingenio La Troncal, en el que se aprovechan los desechos del proceso, principalmente el bagazo. Por la alta cantidad de bagazo disponible, tradicionalmente, la co-generación se realiza en una forma bastante ineficiente. Sin embargo, en los últimos años ha existido la tendencia a mejorar el proceso para generar más electricidad y vender el excedente a la red eléctrica.

2.3.4 Eficiencia de la combustión

En todas las transformaciones de energía, se pierde una parte de ella debido a su conversión parcial en una forma que no se puede aprovechar, generalmente en calor. La fracción de la energía utilizable, como resultado de un proceso de convección, y su insumo se llama la eficiencia del proceso, la cual, generalmente se representa como un porcentaje:

$$Eficiencia = \frac{\text{egreso de energía utilizada}}{\text{insumo de energía}} \cdot 100\%$$

En la tabla 4, se describe el porcentaje de eficiencia de algunos equipos electromecánicos, en cuanto más alta sea la eficiencia menos energía se pierde.

Tabla 4
Eficiencia de algunos equipos electromecánicos

Tipo de equipos	% Eficiencia
Motor a diésel	30 – 45
Motor eléctrico	80 – 95
Turbina hidráulica	70 – 99
Bombillo eléctrico incandescente	5 – 10
Estufa de LPG	60 – 70
Estufa de leña	12 – 30

Fuente: (Martín, 2015)

La eficiencia de la combustión depende de varios factores como son el equipamiento utilizado para la combustión, las condiciones ambientales y el poder calórico de la biomasa combustionada, éste último está relacionado directamente con su contenido de humedad, y un elevado porcentaje de humedad reduce la eficiencia de la combustión debido a que gran parte del calor liberado se usa para evaporar el agua y no se aprovecha en la reducción química del material.

En los procesos de combustión directa, generalmente, son muy ineficientes porque mucha de la energía liberada se desperdicia y puede causar contaminación cuando no se realizan bajo condiciones controladas. Estos resultados se podrían disminuir considerablemente con prácticas mejoradas de operación y un diseño adecuado del equipo. Por ejemplo, secar la biomasa antes de utilizarla reduce la cantidad de energía perdida por la evaporación del agua y para procesos industriales, usar pequeños pedazos de leña y atender continuamente el fuego supliendo pequeñas cantidades resulta en una combustión más completa y, en consecuencia, en mayor eficiencia. Asimismo, equipos como los hornos se pueden mejorar con la regulación de la entrada del aire para lograr una combustión más completa y con aislamiento para minimizar las pérdidas de calor.

La producción de electricidad mediante la combustión de la biomasa en una gran central de producción eléctrica, precisa de sistemas complejos que conllevan inversiones elevadas. Este tipo de plantas tienen rendimientos promedios del 30%, esto quiere decir, que por cada 10 KWh generados por la combustión de biomasa, se generan 3 KWh en forma de electricidad, sin embargo, esta misma biomasa si se aprovechase para utilizar su calor en una caldera con un rendimiento del 85%, significaría que de cada 10 KWh generados, se aprovecharía 8,5 KWh. En un proceso combinado se obtienen rendimientos del 20% en generación de electricidad, 65% en generación de calor y un 15% son pérdidas (ver figura 21).

Es más eficaz y respetuoso con la sociedad y el medio ambiente no utilizar la biomasa para producir electricidad, porque puede desequilibrar el mercado de la biomasa e impedir el desarrollo más respetuoso y sostenible de la misma, que sería utilizando la biomasa de origen local, en calderas de calefacción, evitando toneladas de transporte de biomasa de largas distancias favoreciendo a los productores locales y sobre todo utilizando la biomasa con rendimientos altos.

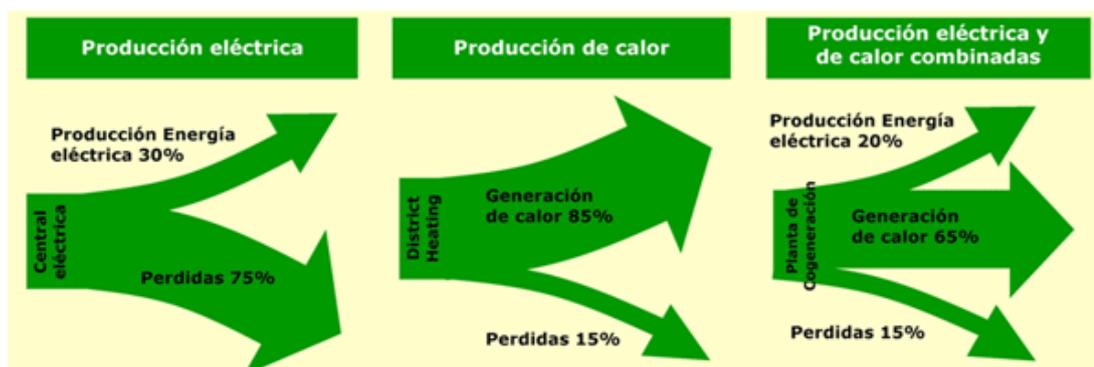


Figura 21 Eficiencia típicas en la producción de energía secundaria

Fuente: (Ortega, 2000)

2.4 El Pennisetum Clandestinum

El Pennisetum Clandestinum es un pasto comúnmente conocido en el Ecuador con el nombre de “Kikuyo”. De acuerdo con Franco et al (2006) el Kikuyo “proviene de los Kikuyus”, una etnia del este del continente Africano, de la región donde el Kikuyo es originario. Este pasto fue introducido en Sudamérica alrededor del año de 1930, con el fin de mejorar los potreros para la cría de ganado. Ha

demostrado ser una de las plantas más invasoras que han llegado al Ecuador, donde se ha propagado por casi todos los pastizales y campos fértiles, desplazando a la mayor parte de las hierbas que crecen en estos lugares. (Franco, Cardona, & Mendoza, 2015)



Figura 22 El Pennisetum Clandestinum

Fuente: (Franco, Cardona, & Mendoza, 2015)

El Pennisetum Clandestinum es la gramínea más común y mejor adaptada de clima frío (entre los 500 y 3200 m.s.n.m.), no prospera bien en suelos pobres, pero sí en suelos fértiles, es tolerante a la sequía pero muy susceptible a las heladas, por esta razón en zonas que presentan frecuentes a este fenómeno heladas durante el año, es recomendable sustituirlo por otras especies resistentes a este fenómeno natural. Este pasto es de duración perenne.

2.4.1 Propiedades físico químicas

Las propiedades físico químicas más representativas del Pennisetum Clandestinum son la taxonomía, sus características botánicas y su composición

química. De acuerdo a Osorio y Roldan (2006) la clasificación taxonómica del Pennisetum Clandestinum es:

Tabla 5
Taxonomía del Pennisetum Clandestinum

Parámetro	Taxonomía
Reino	Vegetal
Clase	Angiosperma
Subclase	Monocotiledónea
Familia	Gramínea
Género	Pennisetum
Género	Clandestinum

Fuente: (Osorio & Roldan, 2006)

La característica botánica principal de éste pasto es la de ser rizomatoso, que forma una masa de follaje baja y compacta. Los rizomas hasta de 5 m de largo, llevan dos clases de tallos, los estériles de entrenudos cortos y hojas largas, y los fértiles, los de las inflorescencias que crecen en las axilas de las hojas. Las espiguillas tienen dos flores, una inferior y estéril y la superior fértil, en la cual se destacan los filamentos de los estambres, que miden 5 cm de largo y sobresalen del follaje. El Kikuyo forma semillas, probablemente apomícticas, las cuales se propagan vegetativamente.

Algunas especies de aves, como los copetones o *Zonotrichia Capensis* se alimentan con las semillas de Kikuyo. El Kikuyo puede reproducirse por medio de semillas, pero su principal método de propagarse es por medio de sus rizomas, cualquier trozo de estos puede desarrollarse hasta formar otra gran mata de Kikuyo. No exige en cuanto a la humedad, siempre y cuando la precipitación pluvial supere los 1000 mm anuales. Sus raíces pueden alcanzar los 2 m de longitud lo que le permite extraer agua del suelo con facilidad. Prefiere los suelos de textura liviana, buen drenaje y alta fertilidad.

Tabla 6

Composición química y mineral del Pennisetum Clandestinum

Componente químico	% de la Masa Seca
Proteína Cruda (PC)	20,50
Extracto Etéreos (EE)	3,63
Cenizas (Cen)	10,60
Fibras en Detergente Neutros (FDN)	
• Hemicelulosa (26,20%)	
• Celulosa (26,90%)	58,10
• Lignina (5,88%)	
Fibras en Detergente Ácidos (FDA)	30,30
Carbohidratos No Estructurados (CNE)	13,40
Componente mineral	% de la Masa Seca
Fósforo (P)	0,46
Calcio (Ca)	0,32
Magnesio (Mg)	0,30
Potasio (K)	3,69
Azufre (S)	0,20
Hidrógeno (H)	4,60
Carbono (C)	33,30
Oxígeno (O)	20,10
Nitrógeno (N)	0,40

Fuente: (Correa, Carulla, & Pabón, 2008)

De la tabla 6, se determina que el Pennisetum Clandestinum está compuesto principalmente por proteínas, fibras, grasas, cenizas y minerales. Los minerales predominantes son el C y el O y en menor proporción el H y N, de la fracción FDN la Celulosa y Hemicelulosa es el componente de mayor porcentaje. En la materia seca se evidencia la presencia de cenizas así como de proteínas crudas. En un proceso de combustión el componente químico que aporta a la combustión es la celulosa.

2.4.2 Localización geográfica

De acuerdo al Instituto Nacional de Estadísticas y Censos (INEC) en el año 2012, en el reporte de la encuesta de superficie y producción agropecuaria continua, se describe que a nivel nacional se disponen de 4'976.122 Hectáreas (Has), de las cuales 3'553.008 Has corresponde a pastos cultivados y 1'423.144 Has de pasto natural, y su usos se centraliza en el sector ganadero como forraje para alimentación del ganado vacuno en la región interandina (ver tabla 7).

Tabla 7
Superficie y porcentaje de usos de suelo por categorías

Tipo de suelo	Nacional	Costa	Sierra	Oriente
Cultivos permanentes	1'382.918 Has. 11,62 % de uso	968.607 Has. 20,99 % de uso	289.529 Has. 6,12 % de uso	124.782 Has. 4,88 % de uso
Cultivos transitorios	1'020.870 Has. 8,58 % de uso	626.431 Has. 13,57 % de uso	351.533 Has. 7,43 % de uso	42.905 Has. 1,68 % de uso
Descanso	126.982 Has. 1,07 % de uso	63.959 Has. 1,39 % de uso	50.801 Has. 1,07 % de uso	12.222 Has. 0,48 % de uso
Pasto cultivados	3'553.008 Has. 29,85 % de uso	1'609.695 Has. 34,88 % de uso	1'067.061 Has. 22,56 % de uso	876.252 Has. 34,25 % de uso
Pasto naturales	1'423.114 Has. 11,96 % de uso	244.045 Has. 5,29 % de uso	1'076.186 Has. 22,75 % de uso	102.903 Has. 4,02 % de uso
Páramos	608.272 Has. 5,11 % de uso	6.524 Has. 0,14 % de uso	567.251 Has. 11,99 % de uso	34.497 Has. 1,35 % de uso
Monte y bosques	3'583.056 Has. 30,10 % de uso	991.083 Has. 21,47 % de uso	1'242.099 Has. 26,26 % de uso	1'349.874 Has. 52,77 % de uso
Otros usos	205.657 Has. 1,73 % de uso	105.199 Has. 2,28 % de uso	85.642 Has. 1,81 % de uso	14.817 Has. 0,58 % de uso
TOTAL	11'903.878 Has. 100,00 % de USO	4'615.522 Has. 100,00 % de USO	4'730.104 Has. 100,00 % de USO	2'558.252 Has. 100,00 % de USO

Fuente: (INEC, 2012), adaptado por Ayala & Cabrera.

De acuerdo a la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura FAO (2004), sobre los perfiles por país del recurso pastura/forraje, el *Pennisetum Clandestinum* está sembrado en nuestro país en miles de hectáreas, como es el caso del segmento de las pasturas naturalizadas que de 883,400 Has existentes el 20% son de esta variedad de pastura y en los páramos de las ecozonas templadas y frías templadas andinas situadas entre 500 msnm y 3200 msnm el

Pennisetum Clandestinum está presente en un porcentaje aproximado al 10% de una base de 1'865,460 Has de tierras con pasto dedicadas a la ganadería.

2.4.3 Manejo

De acuerdo a Franco et al, (2006), sostiene que el Kikuyo se debe manejar adecuadamente si se quiere obtener una buena producción y una capacidad de carga alta. En ocasiones, cuando ha sido mal manejado, se acolchona y la producción disminuye significativamente. El adecuado manejo del Kikuyo a menudo consiste en el pasto rotacional entre 40 y 80 días, de 5 a 10 cortes por año, con una adecuada cantidad de agua y fertilizante correcto. El corte del pasto se lo realiza cuando éste tiene una altura entre 10 a 35 cm. (Franco, Cardona, & Mendoza, 2015)

2.4.4 Usos y aplicaciones

El Pennisetum Clandestinum, en la actualidad por su alto contenido nutricional se lo utiliza como forraje de campos para la producción de leche en el sector agroindustrial, se lo utiliza como alimento del ganado vacuno. No obstante al ser la gramínea más utilizada en los sistemas de leche, presenta varios limitantes nutricionales que afectan tanto la producción como la calidad composicional de la leche. Entre los limitantes más importantes se destacan el alto contenido de proteína cruda, de nitrógeno no proteico, potasio y fibra en detergente neutro así como el bajo contenido de sodio y carbohidratos no estructurales. Estas características ponen en riesgo la competitividad de los sistemas de producción de leche basados en dicha gramínea.

Hasta los actuales momentos el Pennisetum Clandestinum, no se lo ha considerado como un combustible sólido, para la generación de calor o electricidad. Como se lo ha descrito anteriormente, su utilización ha sido únicamente para alimentación del ganado vacuno. Es importante caracterizar su poder energético y determinar su potencial uso como combustible sólido en aplicaciones energéticas.

CAPÍTULO III

3. ADECUACIÓN Y MONTAJE DE LA LÍNEA DE COMBUSTIÓN DE BIOMASA

3.1 Adecuación y montaje

Antes de iniciar la etapa experimental, se han planteado realizar la adecuación y el montaje de la línea de combustión de biomasa en los bajos del Laboratorio de Energías Renovables de la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, en el campus de Sangolquí., el área a utilizarse tiene una superficie de 18 m^2 (ver figura 23), y alojará a los equipos de la:

- Etapa de secado,
- Etapa de briquetado, y
- Etapa de combustión.

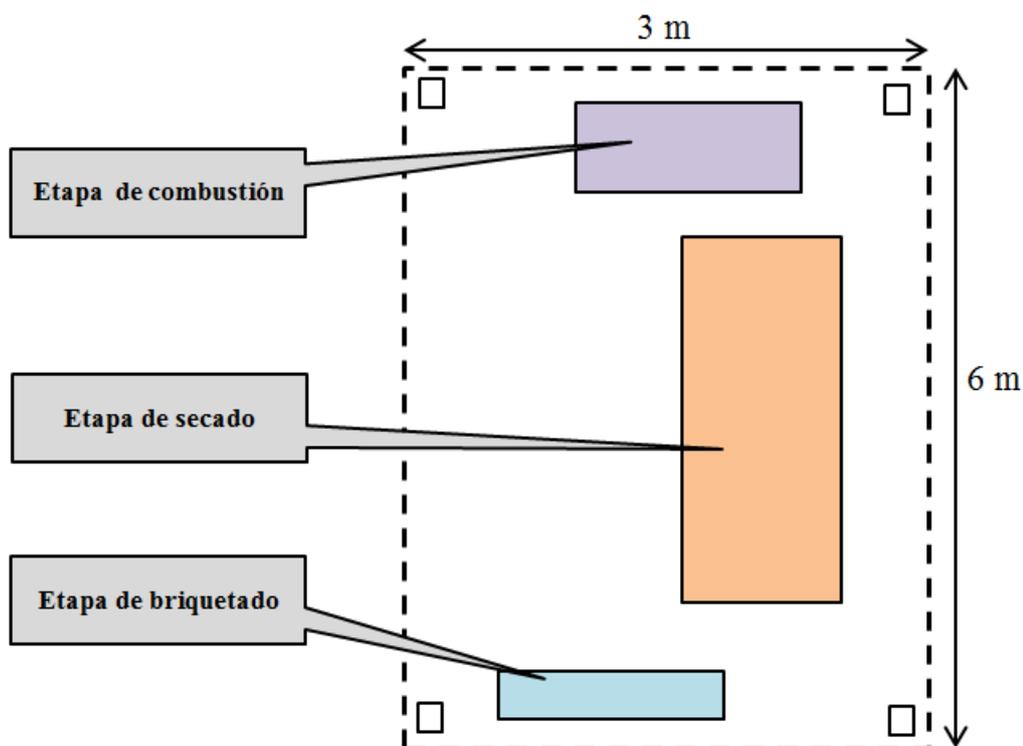


Figura 23 Etapas de la línea de combustión de biomasa

Los equipos que conforma cada una de las etapas de la línea combustión de biomasa son propiedad de la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, los trabajos

de adecuación y montaje comprenden en reubicar los equipos de su ubicación inicial y darles mantenimiento para su posterior utilización en la eta experimental.

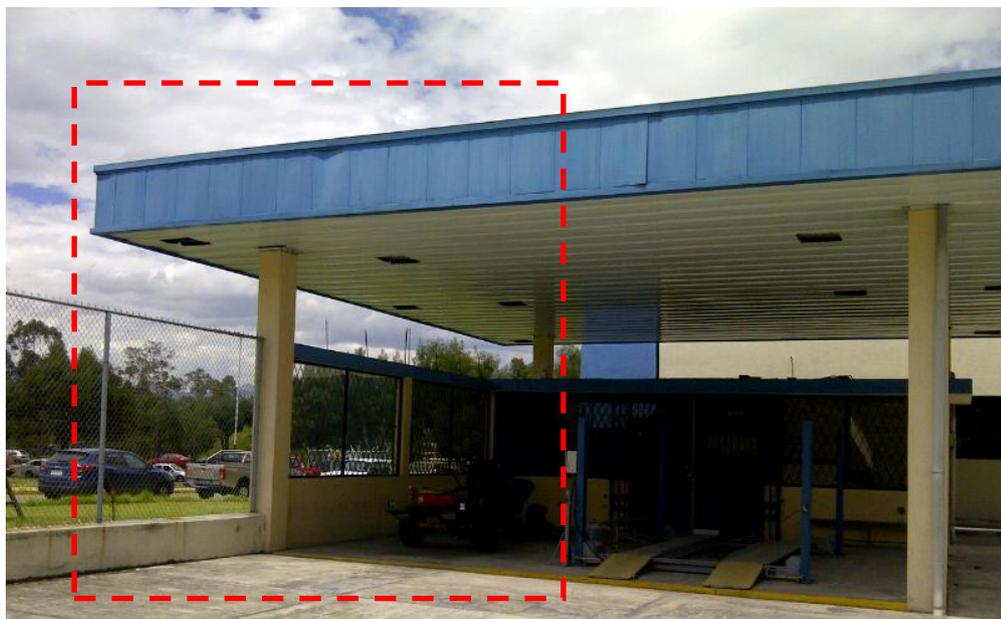


Figura 24 Área asignada para la línea de combustión de biomasa

De la figura 24, se puede visualizar el área designada para el montaje de la línea de combustión de biomasa, la misma que se encuentra ubicado en el Laboratorio de Energías Renovables de la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE.



Figura 25 Briquetadora en estado inicial



Figura 26 Horno de combustión en estado inicial



Figura 27 Secadora en estado inicial

De las figuras 25, 26 y 27, se puede visualizar el estado inicial de los equipos de briquetado, combustión y secado respectivamente los mismos que conforman la

línea de combustión de biomasa, los trabajos efectuados sobre estos equipos comprenden el mantenimiento integral del sistema eléctrico mecánicos, calibración y puesta a punta, reubicación y montaje en el área asignada.



Figura 28 Vista interna de la línea de combustión de biomasa



Figura 29 Vista externa de la línea de combustión de biomasa

De las figuras 28 y 29, se visualizan el estado final del montaje de la línea de combustión de biomasa, en la que se instaló un letrero de identificación del

laboratorio, un sistema de chimeneas para la salida de los gases de las cámaras de combustión tanto para la secadora y del horno.

3.2 Pruebas de operación

Con la adecuación y montaje de la línea de combustión de biomasa, se realizan las respectivas pruebas de operación para verificar la funcionalidad de cada uno de los equipos instalados, esto se lo realiza previo a iniciar la etapa experimental

Para la etapa de briquetado se emplea la briquetadora y sus componentes electromecánicos, se realiza la elaboración de unas muestras de briquetas empleando Kikuyo en estado natural, con lo cual se verifica el estado funcional de la briquetadora. El instructivo de operación de la briquetadora es:

1. Verifica que la briquetadora se encuentre limpia y sin residuos de biomasa de prácticas anteriormente realizadas.
2. El motor eléctrico de la briquetadora se conecta a la fuente de energía eléctrica.
3. Alimentar la tova de la briquetadora con la biomasa acondicionada para hacer briquetas.
4. Energizar el motor eléctrico y encenderlo.
5. A la salida del tornillo extrusor se realiza la recolección de las briquetas en función del largo requerido.
6. Realizar la recarga de biomasa en la tova, cada 2 Kg, hasta conseguir la cantidad de briquetas requeridas para las pruebas de secado o combustión.
7. En caso de emergencia aplastar el pulsador de detención del equipo.
8. Recoge las briquetas en un recipiente del tamaño deseado.
9. Apaga el motor eléctrico y desconectarlo de la energía eléctrica.
10. Realiza la limpieza final de todos los componentes de la briquetadora a fin de garantizar la vida útil del equipo.

Para la etapa de secado se emplea la secadora y todos sus componentes electromecánicos, se realiza el secado de Kikuyo en estado natural, con lo cual se verifica el estado funcional de la secadora, el instructivo de operación es:

1. Verifica que la secadora se encuentre limpia y sin residuos de biomasa de anteriores prácticas.

2. Energizar los ventiladores eléctricos.
3. Encender la cámara de combustión con la utilización de madera seca u otro combustible sólido, hasta alcanzar la temperatura de operación de la cámara de aproximadamente 650°C.
4. Encender los ventiladores eléctricos.
5. Introducir el combustible sólido progresivamente a la cámara de combustión.
6. Introducir y retirar la biomasa de la bandeja de secado de manera progresiva.
7. Finalizado el proceso de secado, apagar los ventiladores eléctricos y desconectar de la fuente de energía eléctrica.
8. Apagar la cámara de combustión de la secadora.
9. Realiza la limpieza integral de la secadora incluida la cámara de combustión, a fin de garantizar la vida útil del equipo.

Para la etapa de combustión se emplea el horno de combustión y todos sus componentes electromecánicos, se realiza el quemado de Kikuyo secado previamente por la secadora, con lo cual se verifica el estado funcional del horno de combustión, el instructivo de operación es:

1. Realiza una limpieza previa de la cámara de combustión.
2. Conecta los ventiladores eléctricos a la fuente de energía eléctrica.
3. Encender la cámara de combustión y se espera aproximadamente 5 minutos hasta que alcance su temperatura de operación aproximadamente de 650 °C.
4. Introduce la biomasa a quemarse cada 10 Kg.
5. Calcular el potencial calórico en función de las temperaturas.
6. Verificar las temperaturas de escape y niveles de gases que escapan de la cámara de combustión.
7. Finalizada la etapa de combustión, se apaga los ventiladores y se desconectan de la fuente de energía eléctrica.
8. Apagar la cámara de combustión.
9. Una vez enfriada las paredes de la cámara de combustión realizar la limpieza integral del horno de combustión, a fin de garantizar la vida útil del equipo.

CAPÍTULO IV

4. CARACTERIZACIÓN ENERGÉTICA DEL PENNISETUM CLANDESTINUM

Finalizada la adecuación y el montaje de la línea de combustión de biomasa en las instalaciones del Laboratorio de Energías Renovables de la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, campus Sangolquí, se inicia la etapa experimental que permita la caracterización energética del Pennisetum Clandestinum en tres estados de combustión, estado natural (sin secado), estado granulado (con una granulometría inferior a 1mm) y estado compactado (en forma de briqueta cilíndrica), las dos últimas con un contenido de humedad final (X_{wf}) inferior al 12% de humedad.

Para desarrollar la etapa experimental hay de describir la metodología de investigación, los equipos y materiales utilizados, así como los factores ambientales utilizados en la caracterización del Pennisetum Clandestinum.

4.1 Metodología de investigación

La presente investigación es del tipo laboratorio y estudios exploratorios, puesto que por la primera vez se realiza este tipo de investigación sobre la caracterización energética del Pennisetum Clandestinum en nuestro país. Se emplea el método de estudios descriptivos, ya que se relatan los hechos en base a los datos obtenidos. Finalmente se aplica el método deductivo, puesto que una vez realizadas las pruebas en el Laboratorio y la tabulación de datos se realizan los cálculos que nos permitieron determinar la densidad energética del Pennisetum Clandestinum cuando se combustiona en estado natural, granulado y compactado.

4.2 Equipos y materiales de investigación

4.2.1 Equipo de secado

El equipo de secado que forma parte de la línea de combustión de biomasa es propiedad de la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE (ver figura 30).

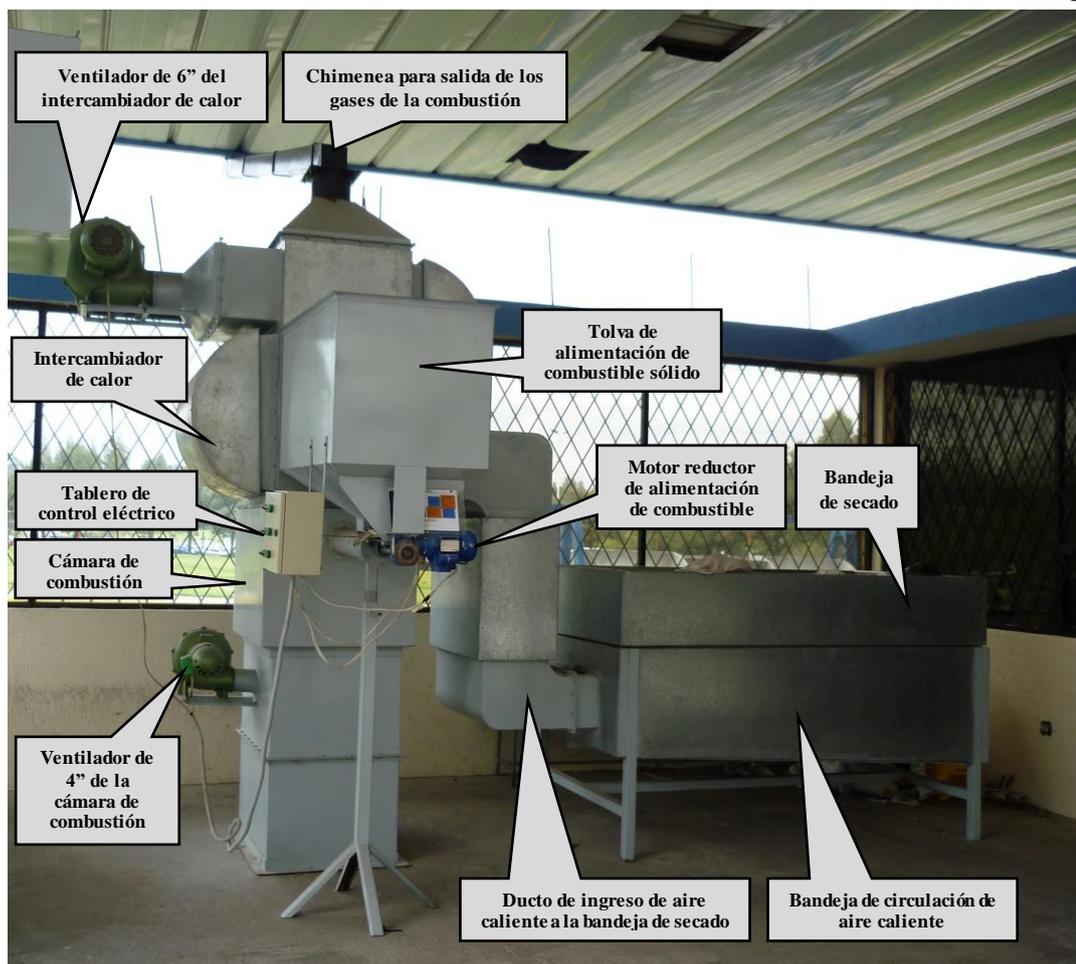


Figura 30 Equipo de secado

De la figura 30, se describe el equipo de secado que forma parte de la línea de combustión de biomasa, que está conformada por una cámara de combustión, un intercambiador de calor de flujo cruzado, una bandeja contenedora de biomasa a secar, una tolva de almacenamiento de combustible de la cámara de combustión, dos ventiladores eléctricos tipo caracol, y sus características son:

- Nombre: secadora de biomasa,
- Año de fabricación: 2009,
- Fabricantes:estudiantes DECEM. ESPE campus Sangolquí,
- Material: acero al carbono, acero inoxidable,
- Código Inventario: ENERG9,
- Potencia: 7 KWT (Kilo Watios Térmicos),
- Capacidad: 20 Kg por tanda de secado,
- Cámara de combustión: fabricada con ladrillo refractario,

- Consumo de combustible: 2 Kg/h,
- Temperatura de proceso: 650 °C,
- Temperatura de gases salida: 173 °C,
- Ventilador 6": marca Blower, tipo caracol, velocidad 3000/3600 rpm, frecuencia de operación 60Hz, Amperaje de consumo 10A, 110 Vac.
- Ventilador 4": marca Blower, tipo caracol, velocidad 3000/3600 rpm, frecuencia de operación 60Hz, Amperaje de consumo 5A, 110 Vac.
- Motor reductor: marca CSM, tipo MM 6384 monofásico, velocidad 1600/1630 rpm, potencia 0.18KW, voltaje de operación 110/220 Vac.
- Tablero de control: control eléctrico manual, switch analógicos para encendido y apagado de los ventiladores de 6" y 4" y del motor reductor, cada switch dispone de un foco indicador de encendido de color verde.

4.2.2 Equipo de briquetado

El equipo de briquetado de la línea de combustión de biomasa es propiedad de la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE.

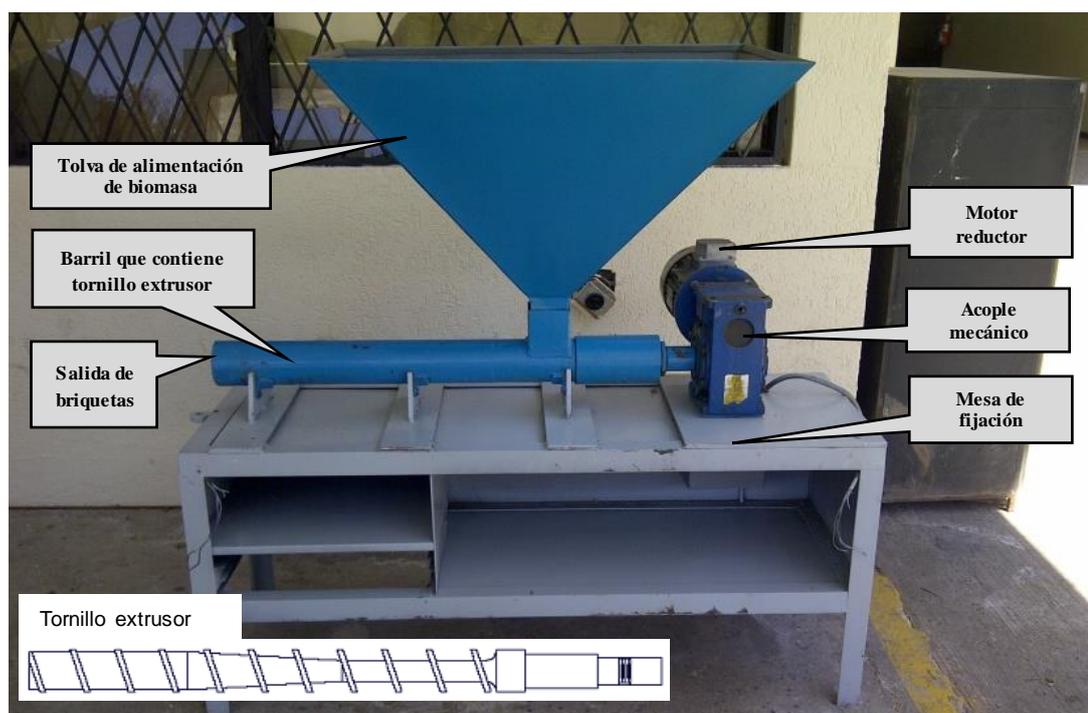


Figura 31 Equipo de briquetado

De la figura 31, se describe el equipo de briquetado que forma parte de la línea de combustión de biomasa, que está conformada una tolva de alimentación de la biomasa, un barril metálico, un tornillo extrusor, un motor reductor, un acople mecánico y una mesa de fijación de la briquetadora, y sus características son:

- Nombre: briquetadora de biomasa,
- Año de fabricación: 2009,
- Fabricantes: estudiantes DECEM. ESPE, campus Sangolquí,
- Código Inventario: ENER7,
- Capacidad briquetado: 100 Kg/h,
- Motor reductor: marca Rossi, velocidad 69 rpm, potencia 3 HP, voltaje de operación 110/220 Vac,
- Barril metálico: longitud 750mm, con diámetro interno de 63mm, externo de 95mm, material de fabricación acero.
- Tornillo extrusor: diámetro 63mm, longitud del usillo 650mm, velocidad de rotación 69 rpm, material del usillo acero AISI 4340 (acero bonificado para maquinaria).
- Mesa de fijación: permite elabora el contrapeso de la briquetadora.
- Tolva de alimentación: elaborada en acero galvanizado A36 espesor 1/32" dimensiones 50cmx80cm, altura 50cm.
- Acople mecánico: marca Love Joy, tipo L090-250, incluye 2 cuerpos metálicos, 1 cuerpo de caucho, 2 chaveteros y 4 pernos de sujeción.

4.2.3 Equipo de combustión

El equipo de combustión de la línea de combustión de biomasa es propiedad de la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE y está conformado por está conformada una tolva de alimentación del combustible sólido de la cámara de combustión, un barril metálico que contiene un tornillo extrusor para el transporte del combustible sólidos de la tolva hacia la cámara de combustión, un motor reductor acoplado al tornillo extrusor, una mesa de soporte, dos ventiladores uno para alimentar a la cámara de combustión y otro para hacer fluir al aire del ambiente al interior del intercambiador de calor, y un tablero de control electrónico que opera el encendido y apagado de los motores eléctricos y ventiladores.

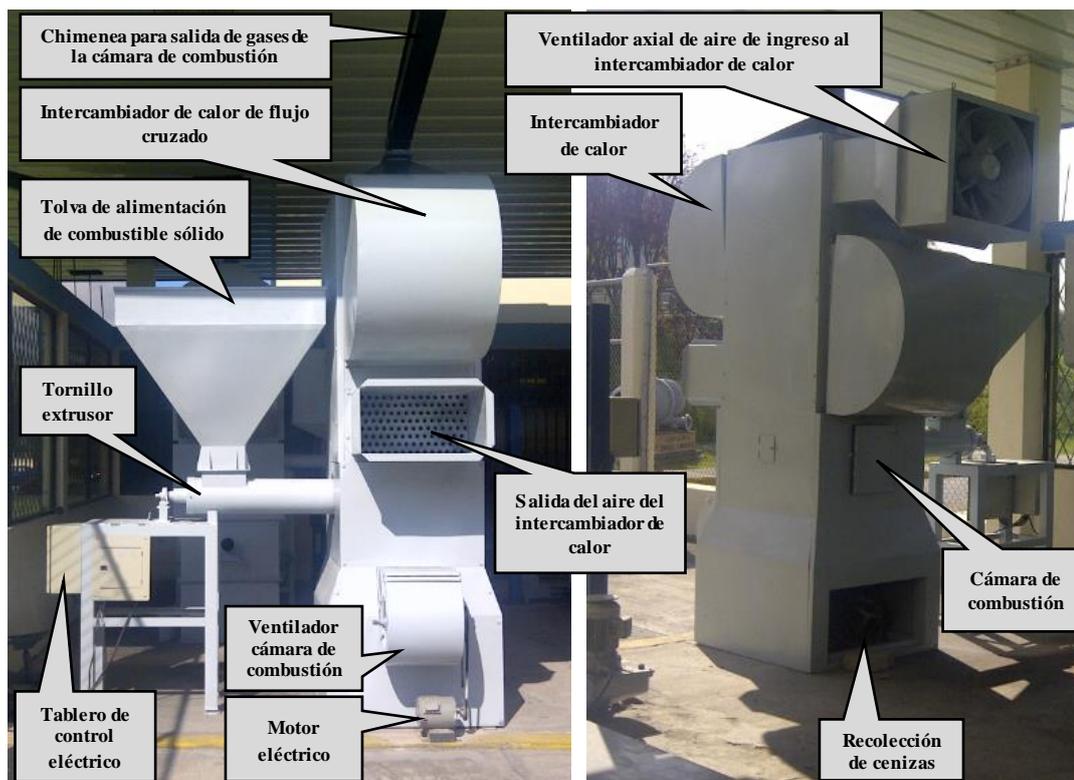


Figura 32 Equipo de combustión

De la figura 32, se describe los componentes que conforman el equipo de combustión de la línea de combustión de biomasa, sus características operativas son:

- Nombre: briquetadora de biomasa,
- Año de fabricación: 2009,
- Fabricantes: CICTE/J.GUASUMBA,
- Material: Acero al carbón,
- Propietario: ESPE campus Sangolquí,
- Código Inventario: ERE 6,
- Potencia térmica: 60.000 Kcal/h,
- Cámara de combustión: fabricada con ladrillo refractario,
- Consumo de combustible: 10 a 20 Kg/ h.
- Temperatura de combustión: 850 °C,
- Temperatura de los gases de entrada al intercambiador: 270 °C,
- Temperatura de los gases de salida del intercambiador: 56 °C,
- Temperatura de salida del aire caliente del intercambiador: 170 °C,

- Ventilador axial: velocidad 3000/3600 rpm, frecuencia de operación 60Hz, amperaje de consumo 15A, voltaje de operación 110 Vac.
- Ventilador cámara de combustión: velocidad 3000/3600 rpm, frecuencia de operación 60Hz, Amperaje de consumo 10A, voltaje de operación 110 Vac.
- Motor eléctrico: marca LS, tipo iG5A, voltaje de entrada 200 – 230 Vac, fase trifásica en salida y entrada.
- Tablero de control: control eléctrico manual, dispone de switch magnéticos para encendido y apagado de los ventiladores y del motor eléctrico.

4.2.4 Pennisetum Clandestinum



Figura 33 Recolección del Pennisetum Clandestinum

De la figura 33, se describe la recolección del Pennisetum Clandestinum de las áreas verdes aledañas al Laboratorio de Energías Renovables de la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, el mismo que fue recolectado en estado natural (con un alto contenido de humedad y sin ser triturado), transportadas en fundas plásticas y almacenadas en el Laboratorio de Combustión de Biomasa para su posterior tratamiento en los procesos de secado, briquetado y combustión.

4.2.5 Balanza digital

La balanza digital es propiedad de la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE y forma parte del Laboratorio de Energías Renovables.



Figura 34 Balanza digital

De la figura 34, se visualiza la balanza digital utilizada en la etapa experimental, sus características son:

- Nombre: balanza digital,
- Año de fabricación: 2010,
- Marca: Digiweigh,
- Modelo: DW-500B,
- Capacidad: 50000 g,
- Resolución: 0.001 g,
- Calibración: automática,
- Fuente de energía: 110 Vac, y
- Conexión serial: RS232.

4.2.6 Anemómetro digital

De la figura 35, se visualiza el anemómetro digital utilizado en la etapa experimental, el mismo que es propiedad de la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, sus características son:

- Nombre: anemómetro digital,
- Año de fabricación: 2011,
- Marca: Extech,

- Modelo: 407113,
- Paletas: metálicas CFM para trabajos pesados, soportan una temperatura de hasta 175°F (80°C) y una velocidad de aire de hasta 6890 ft (2100 m) por minuto,
- Lectura: indica el flujo de aire (CFM) o la velocidad del aire más la temperatura.
- Interfaz: RS232 para PC incorporado, y
- Precisión: $\pm (2\% + 0.2 \text{ m/s})$; 0.8°C (1.5°F).



Figura 35 Anemómetro digital

Fuente: (EXTECH 407113, 2016)

4.2.7 Hidrómetro digital

De la figura 36, se visualiza medidor de temperatura y humedad digital utilizado en la etapa experimental, el mismo que es propiedad de la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, sus características son:

- Nombre: Hidrómetro digital,
- Año de fabricación: 2011,
- Marca: Extech,
- Modelo: Hidrotermómetro con dígitos grandes 445703,
- Humedad: de 10 a 99% Humedad Relativa,
- Temperatura: de 14 a 140 °F o -10 a 60 °C,
- Precisión: $\pm 5\%$ Humedad Relativa, $\pm 1,8^\circ\text{F}$, $\pm 1^\circ\text{C}$,
- Lecturas: mínima/máxima con botón de “reinicio”, y

- Dígitos: de 1" en pantalla LCD súper grande.



Figura 36 Hidrómetro digital

4.2.8 Termómetro infrarrojo



Figura 37 Termómetro infrarrojo

Fuente: (EXTECH 42545, 2016)

De la figura 37, se visualiza el termómetro infrarrojo utilizado en la etapa experimental, el mismo que es propiedad de la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, sus características son:

- Nombre: Termómetro infrarrojo para altas temperaturas,
- Año de fabricación: 2011,
- Marca: Extech,

- Modelo: 42545,
- Temperatura: de -50 a 1000 °C,
- Precisión: \pm (2% de la lectura + 9°F/4°C) <30°F/-1°C; \pm (2% de la lectura + 4°F/2°C) 30°F a 800°F (-1°C a 426°C),
- Puntero: láser incorporado para mejorar la puntería,
- Emisividad: ajustable, y
- Pantalla: amplia pantalla LCD retro iluminada.

4.3 Condiciones de seguridad

Una condición de seguridad segura e insegura depende de los factores que intervienen durante la realización de una actividad independientemente de su naturaleza o ambiente de trabajo, por lo que se hace necesario identificar los riesgos y las acciones y condiciones inseguras durante la etapa experimental, a fin de plantear acciones preventivas que permitan precautelar la integridad física de las personas y de los equipos que intervienen.

4.3.1 Riesgos

El riesgo es considerado como la probabilidad de que ocurra un evento peligroso, y el peligro es una fuente, situación o acto con el potencial de daño en términos de lesiones o enfermedades, o la combinación de ellas. Un factor de riesgo es un elemento agresor o contaminante sujeto a valoración, que actúa sobre el trabajador o los medios de producción y hace posible la presencia del riesgo. Los riesgos identificados en el proceso de caracterización energética del Pennisetum Clandestinum son:

Riesgos físicos:

- Ruido generado por los motores eléctricos.
- Quemaduras en la piel por la presencia de llamas durante la combustión.
- Radiación térmica generada por las altas temperatura generada por el proceso de combustión.
- Descargas eléctricas (shock eléctrico) en motores y conductores eléctricos.

- Lesiones o torceduras por caídas de nivel.
- Asfixia por gases de combustión.

Riesgos químicos:

- Vapores inorgánicos.
- Gases de combustión.

Riesgos biológicos:

- Hongos que se puedan producir en la piel.
- Virus presente en el ambiente.

4.3.2 Acciones preventivas

Se considera una acción insegura a una actuación personal inadecuada que se desvía de los procedimientos o metodologías de trabajo aceptados como correctos. Una condición insegura se considera como una condición del puesto de trabajo que no cumpla los requisitos mínimos para garantizar la seguridad y salud del trabajador. Para evitar las condiciones inseguras y reducir la presencia potencial de los riesgos identificados se han planteado acciones preventivas que deberán implementarse durante todo el proceso.

Acciones inseguras:

- No utilizar los Equipo de Protección Personal EPP's.
- Falta de capacitación en la operación de los equipos.
- No respetar las normas de seguridad industrial vigentes.

Condiciones inseguras:

- Cables eléctricos sin aislamiento.
- Zona de trabajo con basura o con biomasa vegetal en el piso.
- Zona de trabajo sin señalización.
- Cámaras de combustión con fuga de materia incandescentes.

Una acción preventiva es considerada como una actividad planificada que ejecuta para evitar la presencia de un riesgo, de una acción o condición insegura durante un proceso, las acciones preventivas propuestas para la etapa experimental durante la caracterización energética del Pennisetum Clandestinum son:

- Suministro de Equipos de Protección Personal (EPP's) al personal de trabajo.
- Los equipos deberán estar en condiciones operativas.
- Instalaciones eléctricas deberán ser verificados previo su operación.
- El área de trabajo deberá estar limpia y garantizar las condiciones seguras.



Figura 38 Equipos de protección personal EPP's

De la figura 38, se visualizan los Equipos de Protección Personal (EPP's) utilizados durante la etapa experimental durante la caracterización energética del Pennisetum Clandestinum, los mismos que cumplen con las normas de protección personal aprobadas por las OSHAS, ANSI e INEN los equipos deben garantizar la integridad física de las personas, sus características principales son:

- Respirador media cara modelo 6200 marca 3M.
- Filtro de protección contra gases y vapores orgánicos modelo 6300 marca 3M.
- Guante de cuero de 18" de largo.
- Mono gafa de ventilación directa modelo 1623AF marca 3M.
- Mandil en tela jean.
- Pantalón en tela jean.
- Botín en cuero dieléctrico con punta de acero, con planta antideslizante.
- Orejera tipo diadema modelo H9A de 25dB de atenuación.

4.4 Factores ambientales.

Las condiciones ambientales en las que se ejecutan el proyecto están condicionadas por la ubicación geográfica de la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, la que se ubica a 2450 metros sobre el nivel del mar (msnm), con una temperatura promedio ambiente de 23,34 °C (temperatura promedio durante etapa experimental), los factores ambientales considerados son:

- Temperatura ambiente,
- Presión atmosférica, y la
- Densidad del aire.

El análisis cuantitativo para las condiciones ambientales vienen dada por las siguientes expresiones:

$$T_{amb} = T_a + 273,15$$

Dónde:

$T_a = 23,34$ °C, es la temperatura ambiente promedio etapa experimental.

$$T_{amb} = 23,34 + 273,15$$

$$T_{amb} = 296,49 \text{ °K}$$

$$P_{atm} = 101325 \cdot \left(\frac{T_{amb} - 0,0065 \cdot z}{T_{amb}} \right)^{5,25}$$

Dónde:

$z = 2450$ m, es altura geográfica en Sangolquí.

$$P_{atm} = 101325 \cdot \left(\frac{296,49 - 0,0065 \cdot (2450)}{296,49} \right)^{5,25}$$

$$P_{atm} = 75829,76 \text{ Pascales}$$

$$1 \text{ Pascal} = 9,8692 \cdot 10^{-6} \text{ atm}$$

$$P_{atm} = 0,7483 \text{ atm}$$

$$\delta_{aire} = \frac{P_{atm}}{R_a \cdot T_{amb}}$$

Dónde:

$R_a = 0,2870 \cdot 10^3 \frac{Nm}{Kg \cdot °K}$, es la constante del aire a temperatura ambiente.

$$\delta_{aire} = \frac{75829,76}{(0,2870 \cdot 10^3) \cdot (296,49)}$$

$$\delta_{aire} = 0,8911 \frac{Kg}{m^3}$$

Con estas condiciones ambientales se inicia el proceso experimental iniciando con la etapa de secado, posteriormente la etapa de briquetado y finalizando la etapa de combustión.

4.5 Caracterización del proceso secado.

El término secado se refiere a la eliminación de humedad en una sustancia. El contenido de humedad en biomasa vegetal puede alcanzar valores incluso superiores al 60% del peso total, es decir, 60% de humedad en base húmeda, por lo que se requiere que previamente a la combustión sea secada para tener una biomasa seca con un contenido de humedad final inferior al 15%.

El exceso de la humedad en una biomasa provoca que la combustión sea incompleta generando carbonilla (carbón) y monóxido de carbono (CO), así mismo, la biomasa vegetal tiene un escaso contenido de azufre (S), lo que hace que durante la combustión no existen emisiones de azufre a la atmósfera en forma de óxidos.

Durante la etapa experimental se han caracterizado el secado del Pennisetum Clandestinum en estado granulado y estado compactado previo al proceso de combustión y su caracterización analítica se la describe a continuación.

4.5.1 Secado en estado granulado

Con el Pennisetum Clandestinum almacenado en el Laboratorio de Combustión de Biomasa, se lo procede a granular hasta obtener una granulometría inferior a 1 mm. En el proceso de secado los parámetros medibles se los describe en la tabla 8, y son tomados en intervalos de tiempo constante:

- La hora de lectura,
- Peso de la biomasa,
- Temperatura ambiente,
- Temperatura de la biomasa, y la
- Humedad relativa del ambiente.

Tabla 8

Muestra 1 del secado en estado granulado

Número de muestra		1				
Estado de la Biomasa		Granulado (granulometría inferior a 1 mm)				
Hora de lectura	Peso entrada (Kg)	Peso salida (Kg)	Peso agua (Kg)	Temperatura Biomasa (°C)	Temperatura Ambiente (°C)	Humedad Relativa (%)
9:00 am	22,65			21,00	18,00	64
10:00 am		18,91	3,74	43,00	18,00	65
11:00 am		15,70	3,21	45,00	19,08	67
12:00 pm		9,77	5,93	49,00	20,30	64
1:00 pm		8,05	1,72	53,00	21,04	61
2:00 pm		7,55	0,50	53,90	21,10	58
3:00 pm		6,96	0,59	59,50	18,00	55



Figura 39 Secado del Pennisetum Clandestinum en estado granulado

De la figura 39, se visualiza el secado del Pennisetum Clandestinum en estado granulado empleando la secadora de la línea de combustión de biomasa, la lectura de cada parámetro se lo realiza en intervalos de una hora.

Tabla 9

Pesos iniciales y finales del secado en estado granulado

Muestra	Peso inicial del Pennisetum Clandestinum (Kg)	Peso de final del Pennisetum Clandestinum (Kg)
1	22,65	6,96
2	25,66	4,30
3	19,02	5,47
4	15,33	4,53
5	20,10	3,32
6	17,80	4,99
7	22,86	3,94
Valor máximo	25,66	6,96
Valor mínimo	15,33	3,32
Valor promedio	20,49	4,79

En la tabla 9, se describen los pesos iniciales y finales de cada una de las muestras realizadas en el proceso de secado del Pennisetum Clandestinum en estado granulado, considerando una granulometría inferior a 1 mm. Los parámetros que caracterización del proceso de secado se describen con las siguientes expresiones:

$$\%h = \frac{W_{materia\ a\ secar} - W_{materia\ seca}}{W_{materia\ a\ secar}} \cdot 100$$

Dónde:

$\%h$, es el contenido de humedad en base húmeda.

X_{wi} , es el contenido de humedad inicial.

$W_{materia\ a\ secar} = 20,49\ Kg$, es el peso inicial promedio de la biomasa.

$W_{materia\ seca} = 4,79\ Kg$, es el final promedio de la biomasa.

$$\%h = \frac{20,49 - 4,79}{20,49} \cdot 100$$

$$\%h = \mathbf{76,64\ \%} = X_{wi}$$

$$\%h' = \frac{W_{materia\ a\ secar} - W_{materia\ seca}}{W_{materia\ seca}} \cdot 100$$

Dónde:

$\%h'$, es el contenido de humedad en base seca.

$$\%h' = \frac{20,49 - 4,79}{4,79} \cdot 100$$

$$\%h' = \mathbf{327,99\ \%}$$

El valor de % h' indica que la masa de agua es 3,28 veces respecto a su masa su masa seca.

$$M_S = M_H \cdot \left(\frac{100 - X_{wi}}{100} \right)$$

Dónde:

M_H , masa húmeda.

M_S , masa seca.

$$M_H = 20,49 \text{ Kg}$$

$$M_S = (20,49) \cdot \left(\frac{100 - 76,64}{100} \right)$$

$$M_S = \mathbf{4,787 \text{ Kg}}$$

$$\dot{m}_c = \frac{M_S}{\Delta t}$$

Dónde:

\dot{m}_c , velocidad de secado.

Δ_t , tiempo de secado.

$$\Delta_t = \mathbf{6 \text{ h}}$$

$$\dot{m}_c = \frac{4,787}{6}$$

$$\dot{m}_c = \mathbf{0,798 \frac{Kg}{h}}$$

$$X_{wf} = \frac{X_{wi}}{100 - X_{wi}}$$

Dónde:

X_{wi} , es el contenido de humedad inicial.

X_{wf} , es el contenido de humedad final.

$$X_{wf} = \frac{76,64}{100 - 76,64}$$

$$X_{wf} = \mathbf{3,28 \%}$$

$$\Delta_W = M_S \cdot \left(\frac{X_{wi}}{100 - X_{wi}} - \frac{X_{wf}}{100 - X_{wf}} \right)$$

Dónde:

X_{wi} , es el contenido de humedad inicial.

X_{wf} , es el contenido de humedad final.

Δ_W , es el peso de agua promedio que debe perder la biomasa.

$$\Delta_W = 4,787 \cdot \left(\frac{76,64}{100 - 76,64} - \frac{3,28}{100 - 3,28} \right)$$

$$\Delta_W = \mathbf{15,54 \text{ Kg}}$$

El Pennisetum Clandestinum en estado granulado para alcanzar un contenido de humedad final del 3,28 %, ha tenido que perder 15,54 Kg de agua de su masa inicial. En la tabla 10, se resumen los parámetros del proceso de secado del Pennisetum Clandestinum en estado granulado.

Tabla 10
Parámetros del secado en estado granulado

Parámetro	Valor	Unidad
$\%h$	76,64	%
$\%h'$	327,99	%
Δ_t	6	horas
\dot{m}_c	0,798	Kilogramo/hora
M_H	20,49	Kilogramo
M_S	4,787	Kilogramo
X_{wi}	76,64	%
X_{wf}	3,28	%
Δ_W	15,54	Kilogramo

Para que el Pennisetum Clandestinum en estado granulado alcance un contenido de humedad final del 12 %, debe perder 15,05 Kg de agua de su masa inicial.

4.5.2 Secado en estado compactado

Con el Pennisetum Clandestinum granulado y previamente compactado en forma de briqueta cilíndrica, se lo procede a secar. En el proceso de secado los parámetros medibles se los describe en la tabla 11, y son tomados en intervalos de tiempo constante:

- La hora de lectura,
- Peso de la biomasa,
- Temperatura ambiente,
- Temperatura de la biomasa, y la
- Humedad relativa del ambiente.

Tabla 11

Muestra 1 del secado en estado compactado

Número de muestra		1				
Estado de la Biomasa		Compactado (en forma de briqueta cilíndrica)				
Hora de lectura	Peso entrada (Kg)	Peso salida (Kg)	Peso agua (Kg)	Temperatura Biomasa (°C)	Temperatura Ambiente (°C)	Humedad Relativa (%)
9:00 am	23,63			21,00	17,20	73
10:00 am		13,78	9,85	40,00	19,60	68
11:00 am		8,99	4,79	49,00	20,70	59
12:00 pm		6,14	2,85	52,00	20,90	61
1:00 pm		5,14	1,00	50,00	22,70	55
2:00 pm		4,84	0,30	49,00	22,40	54
3:00 pm		4,6	0,24	46,00	23,90	52



Figura 40 Secado del Pennisetum Clandestinum en estado compactado

De la figura 40, se visualiza el secado del Pennisetum Clandestinum en estado granulado empleando la secadora de la línea de combustión de biomasa, la lectura de cada parámetro se lo realiza en intervalos de una hora.

Tabla 12

Pesos iniciales y finales del secado en estado compactado

Muestra	Peso inicial del Pennisetum Clandestinum (Kg)	Peso de final del Pennisetum Clandestinum (Kg)
1	23,63	4,60
2	22,18	4,30
3	20,22	4,99
4	21,33	6,43
5	20,01	5,61
6	19,22	5,30
7	18,99	5,21
8	21,18	6,50
9	20,18	5,45
Valor máximo	23,63	6,50
Valor mínimo	18,99	4,30
Valor promedio	20,77	5,38

En la tabla 12, se describen los pesos iniciales y finales de cada una de las muestras realizadas en el proceso de secado del Pennisetum Clandestinum en estado compactado. Los parámetros que caracterización del proceso de secado se describen con las siguientes expresiones:

$$\%h = \frac{W_{materia\ a\ secar} - W_{materia\ seca}}{W_{materia\ a\ secar}} \cdot 100$$

Dónde:

$\%h$, es el contenido de humedad en base húmeda.

X_{wi} , es el contenido de humedad inicial.

$W_{materia\ a\ secar} = 20,77\ Kg$, es el peso inicial promedio de la biomasa.

$W_{materia\ seca} = 5,38\ Kg$, es el final promedio de la biomasa.

$$\%h = \frac{20,77 - 5,38}{20,77} \cdot 100$$

$$\%h = 74,10\ \% = X_{wi}$$

$$\%h' = \frac{W_{materia\ a\ secar} - W_{materia\ seca}}{W_{materia\ seca}} \cdot 100$$

Dónde:

$\%h'$, es el contenido de humedad en base seca.

$$\%h' = \frac{20,77-5,38}{5,38} \cdot 100$$

$$\%h' = \mathbf{286,32 \%}$$

El valor de $\%h'$ indica que la masa de agua es 2,86 veces respecto a su masa su masa seca.

$$M_S = M_H \cdot \left(\frac{100 - X_{wi}}{100} \right)$$

Dónde:

M_H , masa húmeda.

M_S , masa seca.

$$M_H = 20,77 \text{ Kg}$$

$$M_S = (20,77) \cdot \left(\frac{100 - 74,10}{100} \right)$$

$$M_S = \mathbf{5,380 \text{ Kg}}$$

$$\dot{m}_c = \frac{M_S}{\Delta t}$$

Dónde:

\dot{m}_c , velocidad de secado.

Δ_t , tiempo de secado.

$$\Delta_t = \mathbf{6 \text{ h}}$$

$$\dot{m}_c = \frac{5,380}{6}$$

$$\dot{m}_c = \mathbf{0,897 \frac{Kg}{h}}$$

$$X_{wf} = \frac{X_{wi}}{100 - X_{wi}}$$

Dónde:

X_{wi} , es el contenido de humedad inicial.

X_{wf} , es el contenido de humedad final.

$$X_{wf} = \frac{74,10}{100 - 74,10}$$

$$X_{wf} = \mathbf{2,86 \%}$$

$$\Delta_W = M_S \cdot \left(\frac{X_{wi}}{100 - X_{wi}} - \frac{X_{wf}}{100 - X_{wf}} \right)$$

Dónde:

X_{wi} , es el contenido de humedad inicial.

X_{wf} , es el contenido de humedad final.

Δ_W , es el peso de agua promedio que debe perder la biomasa.

$$\Delta_W = 5,380 \cdot \left(\frac{74,10}{100-74,10} - \frac{2,86}{100-2,86} \right)$$

$$\Delta_W = \mathbf{15,23 \text{ Kg}}$$

El Pennisetum Clandestinum en estado granulado para alcanzar un contenido de humedad final del 2,86 %, ha tenido que perder 15,23 Kg de agua de su masa inicial. En la tabla 13, se resumen los parámetros del proceso de secado del Pennisetum Clandestinum en estado granulado.

Tabla 13

Parámetros del secado en estado compactado

Parámetro	Valor	Unidad
$\%h$	74,10	%
$\%h'$	286,32	%
Δ_t	6	horas
\dot{m}_c	0,897	Kilogramo/hora
M_H	20,77	Kilogramo
M_S	5,380	Kilogramo
X_{wi}	74,10	%
X_{wf}	2,86	%
Δ_W	15,23	Kilogramo

Para que el Pennisetum Clandestinum en estado compactado alcance un contenido de humedad final del 12 debe perder 14,66 Kg de agua de su masa inicial.

4.5.3 Normalización del proceso de secado

Con la finalidad de estandarizar el proceso de secado de cualquier tipo de biomasa vegetal sólida empleando la secadora de la línea de combustión de biomasa del Laboratorio de Energías Renovables de la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, se propone seguir con la siguiente secuencia de actividades:

1. Verificar y determinar las condiciones ambientales antes de iniciar la etapa experimental, como son la temperatura ambiental, humedad relativa y velocidad del viento circundante.
2. Verificar las instalaciones eléctricas y mecánicas antes de su operación.
3. Realizar una limpieza de la cámara de combustión del horno combustión de la secadora de ser necesario.
4. Realizar una limpieza de la bandeja de secado de ser necesario.
5. Realizar la medición del peso total del combustible (biomasa sólida) que será quemada en la cámara de combustión de la secadora, la misma que debe contener un contenido de humedad final inferior al 12% para garantizar una adecuada combustión y garantizar un óptimo secado de la biomasa húmeda.
6. Realizar la medición del peso inicial de la biomasa húmeda que será sometida al proceso de secado, a fin de determinar el contenido de humedad inicial presente en la biomasa.
7. Se debe realizar la calibración de todos los instrumentos de medida como son: balanza digital, termómetro laser, anemómetro digital, etc.
8. Encender los equipos eléctricos y medir sus parámetros de operación inicial (como motor reductor, ventiladores, etc.).
9. Encender la cámara de combustión con las medidas de seguridad para evitar afectación a la salud, por quemaduras, inhalación de monóxido de carbono.
10. Se introduce el combustible progresivamente a la cámara de combustión.
11. Se introduce y retira de la bandeja de secado la biomasa de manera progresiva (tiempo recomendado intervalos de una hora).
12. En cada retiro de la biomasa de la bandeja de secado, se realizará el registro de su peso actual antes de volver a depositar en la bandeja de secado, a fin de evidenciar la variación de la humedad en la biomasa.
13. Registrar las variables termo físicas a ser registradas en la etapa experimental durante el proceso de secado, para este caso, la temperatura la biomasa en proceso de secado, la temperatura ambiente, la humedad relativa, la velocidad del aire de entrada y salida de la bandeja de secado.

14. Una vez finalizada las pruebas experimentales, se apaga los equipos eléctricos y mecánicos.
15. Se apaga la cámara de combustión, con la debida precaución del caso.
16. Se realiza la limpieza integral del horno de combustión incluida la cámara de combustión (una vez que se ha enfriado la cámara) y de la bandeja de secado, a fin de garantizar la vida útil del equipo.
17. Se finaliza el proceso de secado de biomasa con la generación del informe de los resultados de los parámetros registrados, en base al análisis cuantitativo descrito para la caracterización del secado.

4.6 Caracterización del proceso de briquetado.

El término briqueta se hace referencia a bloques sólidos utilizados como combustibles para generar calor principalmente utilizado en estufas, chimeneas, hornos y calderas. Es un producto 100% ecológico y renovable, ya que están hechas principalmente de desperdicios forestales tales como el aserrín, viruta, chips, ramas, restos de poda, raleo fino, pasto, etc., catalogada como bioenergía sólida, que viene en forma cilíndrica o de ladrillo y sustituye a la leña con muchas ventajas: poder calorífico similar, fácil y rápido encendido, baja humedad, alta densidad, ocupa menos espacio, homogéneas, fácil manipulación, sin olores, humos ni chispas y menor porcentajes de cenizas.

Con el Pennisetum Clandestinum almacenado el proceso de briquetado inicia por la preparación de la biomasa, la cual se la granula y se mezcla con aglutinante previo a introducirla en la tolva de la briquetadora. El aglutinante utilizado para éste proyecto es de origen animal, específicamente se utilizado la grasa residual en estado líquido procedente de la preparación del “Hornado” del sector de Sangolquí, éste aglutinante facilita la elaboración de briquetas, las mismas que deben ser secadas previo al proceso de combustión, a fin de eliminar la humedad suministrada por el aglutinante (ver figura 41).



Figura 41 Aglutinante utilizado para la elaboración de briquetas

Para caracterizar el proceso de briquetado se han definido los criterios relacionados con:

- El volumen,
- La densidad, y
- El poder calórico.

4.6.1 Volumen

Empleando la briquetadora que forma parte de la línea de combustión de biomasa, de la cual el tornillo extrusor que tiene un diámetro de 63 mm, y definiendo el largo promedio de 15 cm para las briquetas elaboradas, se determina el volumen de la briqueta, con la siguiente expresión:

$$V_b = \frac{\pi \cdot \phi^2 \cdot l}{4}$$

Dónde:

V_b , es el volumen promedio de la briqueta elaborada.

$\phi = 63 \text{ mm} = 6,3 \text{ cm}$, es el diámetro de la briqueta elaborada.

$l = 15 \text{ cm}$, es la longitud de la briqueta elaborada.

$\pi = 3,141593$

$$V_b = \frac{\pi \cdot (6,30)^2 \cdot (15)}{4}$$

$$V_b = 467,59 \text{ cm}^3$$

4.6.2 Densidad

Para la elaboración de las briquetas se ha empleado como aglutinante grasa de origen animal específicamente de cerdo (ver figura 42), procedente de la elaboración del plato típico de la zona de Sangolquí, conocido como “Hornado”, la densidad relativa de la grasa de cerdo tiene un valor que varía entre 0,896 – 0,906 (g/ml).

Para determinar la densidad de la briqueta elaborada se emplea la siguiente expresión:

$$\delta_b = \frac{MS_b}{V_b}$$

Dónde:

δ_b , es la densidad de la briqueta expresada en gramos por mililitro (g/ml).

$MS_b = 143 \text{ g}$, es la masa de una muestra de la biomasa seca.

$V_b = 467,59 \text{ cm}^3 = 467,59 \text{ ml}$, es el volumen de la briqueta elaborada.

$$\delta_b = \frac{143}{467,59}$$

$$\delta_b = 0,3058 \frac{\text{g}}{\text{ml}}$$

4.6.3 Poder calórico

Se ha descrito, que el poder calórico depende fundamentalmente de la composición química del combustible. Existen fórmulas teóricas para su obtención a partir de la composición química elemental. Entre éstas fórmulas podemos señalar la fórmula de Dulong. (Ortega, 2000)

De la tabla 6, donde se describe la composición química y mineral del Pennisetum Clandestinum se utilizarán los valores de los contenidos minerales para determinar el valor teórico del poder calórico, empleando la siguiente expresión:

$$PCS = \frac{8100.\%C + 34000.\left(\%H - \frac{\%O}{8}\right) + 2500.\%S}{100}$$

Dónde:

PCS , es el poder calórico superior del Pennisetum Clandestinum.

$\%H = 4,60 \%$, porcentaje de hidrógeno en el Pennisetum Clandestinum.

$\%O = 20,10 \%$, porcentaje de oxígeno en el Pennisetum Clandestinum.

$\%C = 33,30 \%$, porcentaje de carbono en el Pennisetum Clandestinum.

$\%S = 0,20 \%$, porcentaje de azufre en el Pennisetum Clandestinum.

$$PCS = \frac{8100 \cdot (33,30) + 34000 \cdot \left((4,60) - \frac{(20,10)}{8} \right) + 2500 \cdot (0,20)}{100}$$

$$PCS = 3412,05 \frac{Kcal}{Kg}$$

$$Q_{H_2O} = \frac{9 \cdot \%H \cdot 600}{100}$$

Dónde:

Q_{H_2O} , es el poder calor de evaporación del agua de constitución.

$$Q_{H_2O} = \frac{9 \cdot (4,60) \cdot 600}{100}$$

$$Q_{H_2O} = 248,40 \frac{Kcal}{Kg}$$

$$PCI(0\%) = PCS - Q_{H_2O}$$

Dónde:

$PCI(0\%)$, es el calor de evaporación del agua de constitución en base seca

$$PCI(0\%) = 3412,05 - 248,40$$

$$PCI(0\%) = 3163,65 \frac{Kcal}{Kg}$$

Considerando un porcentaje de humedad final $h\%$, el poder PCS es:

$$PCI(h\%) = PCI(0\%) \cdot \left(1 - \frac{h\%}{100} \right) - \frac{h\%}{100} \cdot 600$$

Dónde:

$PCI(0\%)$, es el calor de evaporación del agua de constitución en base seca.

$h\%$, es el contenido de humedad final.

$PCI(h\%)$, es el calor de evaporación del agua de constitución a un determinado contenido de humedad final $h\%$.

Si $h\% = 12\%$

$$PCI(12\%) = 3163,65 \cdot \left(1 - \frac{12}{100} \right) - \frac{12}{100} \cdot 600$$

$$PCI(12\%) = 2712,01 \frac{Kcal}{Kg}$$

En la tabla 14., se describen el poder calórico inferior del Pennisetum Clandestinum para diferentes porcentajes de contenidos de humedad final calculados

utilizando la ecuación de Dulong, de la cual se determina que el poder calórico que en base seca es de 3163,65 (Kcal/kg), y 2712,01 (Kcal/Kg) para un contenido de humedad final del 12%.

Tabla 14

Poder calórico inferior del Pennisetum Clandestinum

Contenido de humedad %h	PCI Kcal/Kg
22	2335,65
18	2486,19
14	2636,74
12	2712,01
10	2787,29
8	2862,56
6	2937,83
4	3013,10
2	3088,38
0 (en base seca)	3163,65

4.6.4 Normalización del proceso de briquetado

Con la finalidad de estandarizar el proceso de briquetado de cualquier tipo de biomasa vegetal sólida empleando la briquetadora de la línea de combustión de biomasa del Laboratorio de Energías Renovables de la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, se propone seguir con la siguiente secuencia de actividades:

1. Verificar y determinar las condiciones ambientales antes de iniciar la etapa experimental, como son la temperatura ambiental, humedad relativa y velocidad del viento circundante.
2. Verificar las instalaciones eléctricas y mecánicas antes de su operación.
3. Realizar una limpieza de la briquetadora de ser necesario.
4. De ser necesario la biomasa vegetal mezclarla con un aglutinante o resina de ser necesario.

5. Realizar la medición del peso total de la biomasa vegetal que será compactada.
6. Encender el motor de la briquetadora.
7. Dejar funcionar el equipo algunos minutos para eliminar residuos de procesos anteriores.
8. Cargar en la tolva con la biomasa a compactarse.
9. Ayudarse con una varilla para hacer fluir de mejor manera la mezcla dentro de la tolva para evitar atascamientos y vacíos en su interior.
10. Recoger el producto (briquetas) en un recipiente o bandeja, el tamaño de las briquetas serán de acuerdo a los parámetros establecidos.
11. Una vez finalizada las pruebas experimentales, se apaga los equipos eléctricos y mecánicos.
12. En caso de emergencia aplastar el pulsador de detención del equipo.
13. Al finalizar la etapa experimental, se realiza la limpieza integral de la briquetadora, a fin de garantizar la vida útil del equipo.
14. Se finaliza el proceso de briquetado de la biomasa con la generación del informe de los resultados de los parámetros registrados, en base al análisis cuantitativo descrito para la caracterización del briquetado.

4.7 Caracterización del proceso combustión.

Para caracterizar el proceso de combustión, se utilizará el horno de combustión de biomasa que forma parte de la línea de combustión de biomasa, el cual, está conformada por una cámara de combustión vertical fabricada con ladrillo refractario, el mismo que tiene la característica de soportar altas temperaturas, reflejar la radiación térmica hacia la zona de combustión y reducir las pérdidas de calor hacia el exterior que se presentan, para el aislamiento las paredes tienen lana de vidrio, y la alimentación del combustible sólidos se lo realiza por un ducto circular.

En la figura 42, se describen los calores resultantes de la producción energética presente en la cámara de combustión, los mismos, que se emplearán para caracterizar el proceso de combustión de biomasa.

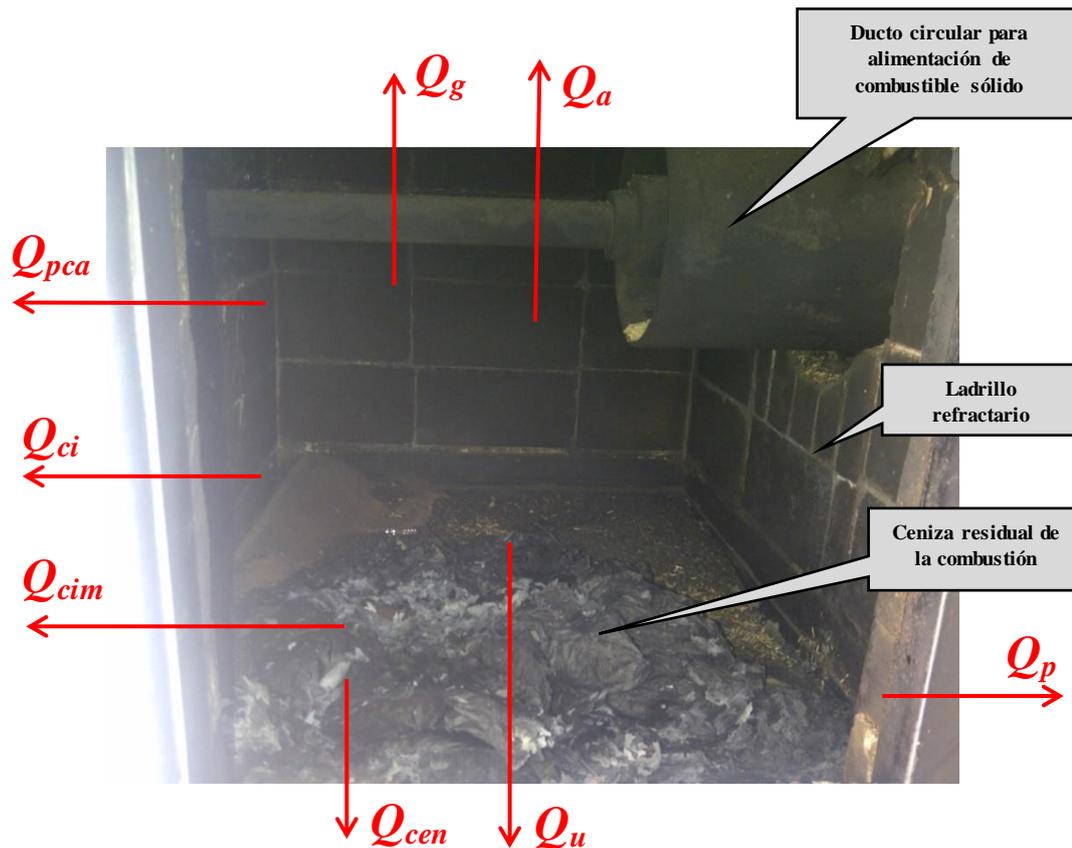


Figura 42 Producción energética en la cámara de combustión

Dónde:

Q_p , es el calor perdido en las paredes de la cámara de combustión.

Q_u , es el calor útil de la cámara de combustión.

Q_a , es el calor almacenado en la cámara de combustión.

Q_g , es el calor perdido por los gases de la combustión.

Q_{cen} , es el calor perdido en las cenizas residuales producto de la combustión.

Q_{cim} , es el calor perdido por la combustión imperfecta mecánica.

Q_{ci} , es el calor perdido por la combustión incompleta.

Q_{pca} , es el calor perdido por los cambios de aire en la cámara de combustión.

4.7.1 Combustión en estado compactado

En la tabla 13, se describen los parámetros del proceso de secado para el Pennisetum Clandestinum en estado compactado en forma de briqueta, de la cual se emplearán los valores del coeficiente de humedad final (X_{wf}) de 2,86%. Para el caso experimental, el promedio de la masa quemada en la cámara de combustión es de

4,66 Kg por hora (ver tabla 68). El calor de la reacción de la combustión del Pennisetum Clandestinum en estado compactado ($Q_{compactado}$) se lo determina con el siguiente análisis cuantitativo.

Calor perdido en las paredes laterales de la cámara de combustión (Q_p), es el flujo de calor que atraviesa a las paredes de la cámara de combustión desde el interior de la cámara hacia el exterior y que se disipa en el ambiente.

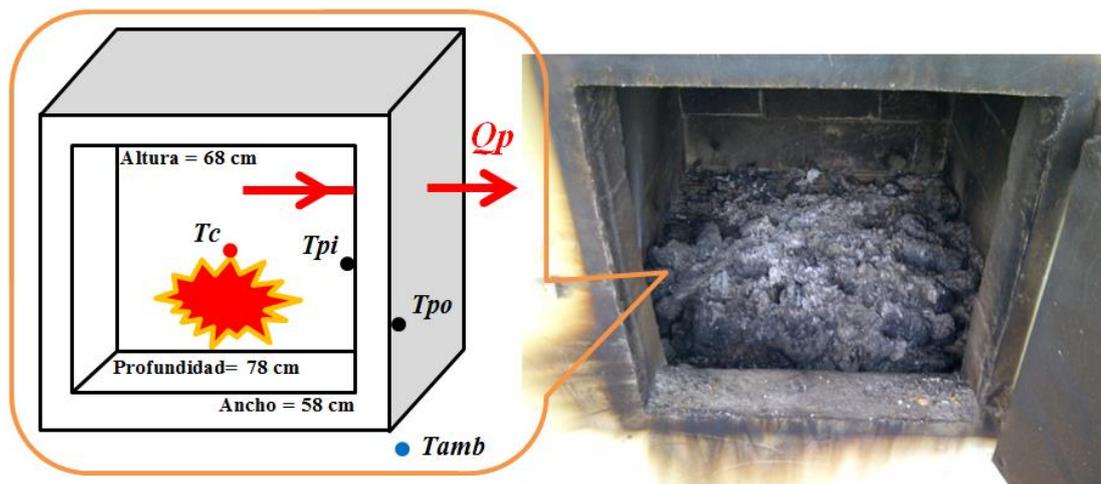


Figura 43 Calor perdido en las pared de la cámara de combustión

La cámara de combustión tiene un ancho de 58 cm, una altura de 68 cm y una profundidad de 78 cm, dando un volumen de cámara de $0,3076 \text{ m}^3$.

$$At = A_{pld} + A_{pli} + A_{pf} + A_{pp}$$

Dónde:

At , área total de las paredes de la cámara de combustión.

A_{pld} , área de la pared lateral derecha de la cámara de combustión.

A_{pli} , área de la pared lateral izquierda de la cámara de combustión.

A_{pf} , área de la pared frontal de la cámara de combustión.

A_{pp} , área de la pared posterior de la cámara de combustión.

$$At = (0,78 \cdot 0,68) + (0,78 \cdot 0,68) + (0,58 \cdot 0,68) + (0,58 \cdot 0,68)$$

$$At = 1,8496 \text{ m}^2$$

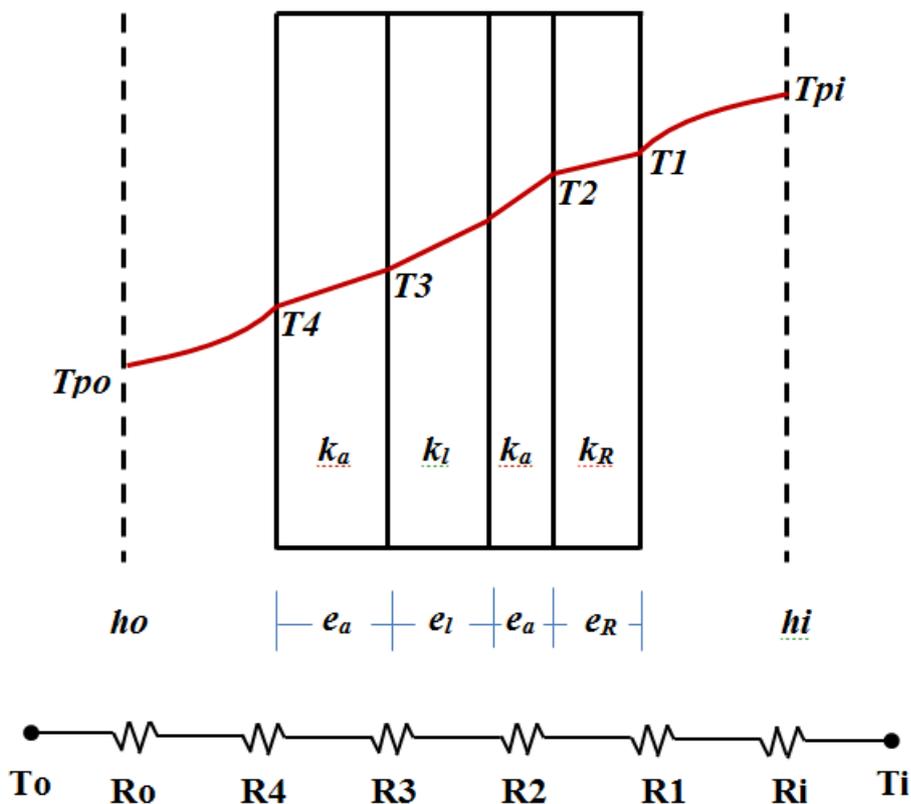


Figura 44 Diagrama eléctrico de la pared de la cámara de combustión

Dónde:

h_i , es el coeficiente de convección interna.

h_o , es el coeficiente de convección externa.

T_{pi} , es la temperatura interna de la pared de la cámara de combustión.

T_{po} , es la temperatura externa de la pared de la cámara de combustión.

T_1 , es la temperatura interna del ladrillo refractario.

T_2 , es la temperatura externa del ladrillo refractario.

T_3 , es la temperatura de la lana de vidrio.

T_4 , es la temperatura del acero.

e_a , es el espesor del acero.

e_l , es el espesor de la lana de vidrio.

e_R , es el espesor del ladrillo refractario.

k_a , es el coeficiente de transferencia de calor por conducción en el acero.

k_l , es el coeficiente de transferencia de calor por conducción en la lana de vidrio.

k_R , es el coeficiente de transferencia de calor por conducción en el ladrillo refractario.

$$\Delta T = T_c - T_{amb}$$

Dónde:

ΔT , es la variación de la temperatura – ambiente.

$$T_{amb} = 23,34 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$T_c = 850 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$\Delta T = 850 - 23,34$$

$$\Delta T = \mathbf{826,66 \text{ } ^\circ\text{C}}$$

Tabla 15

Propiedades termo físicas de la pared de la cámara de combustión

Referencia	Espesor (m)	Conductividad k (W/m ² C)	Densidad δ (Kg/m ³)	Calor específico cp (Kcal/Kg°C)	Material
e_R	0,0650	$k_R = 0,850$	2645	0,2294455	Ladrillo refractario
e_{a1}	0,0003	$k_{a1} = 48,800$	7854	0,1037284	Acero 1
e_l	0,0460	$k_l = 0,043$	105	0,1900000	Lana de vidrio
e_{a2}	0,0001	$k_{a2} = 48,800$	7854	0,1037284	Acero 2

Fuente: (Incopera & DeWiit, 1996)

En la Tabla 15, se describen las propiedades termo físicas de la pared de la cámara del horno de combustión, que está conformada por ladrillo refractario, lana de vidrio y dos capas de acero.

De acuerdo a la fórmula de Wattmuff se puede calcular el coeficiente de convección externa (ho), con la siguiente expresión:

$$ho = 2,8 + 3v$$

Dónde:

v , es la velocidad del viento en expresada en m/s.

ho , es el coeficiente de convección externa expresado en W/m²C.

Se tiene que:

$$v = 1,255 \frac{m}{s}, \text{ velocidad promedio del viento externo a la cámara de combustión}$$

$$ho = 2,8 + 3 \cdot (1,255)$$

$$ho = 6,565 \frac{W}{m^2 \text{ } ^\circ\text{C}}$$

De acuerdo con Vlassov (2001), “la velocidad de gases en el interior de una cámara de combustión se puede asumir de 1,00 m/s” (p.167).

Para el caso experimental se asumirá que la velocidad de gases al interior de la cámara es de 1,00 m/s, la temperatura promedio de los gases de salida (Thi) es de 259,01 °C, considerando que el Pennisetum Clandestinum se encuentra en estado compactado, en forma de briqueta y su temperatura del lecho varía entre 600°C y 800°C.

En éstas condiciones, de acuerdo con Cengel (2011), en la tabla A-15, a 250 °C la viscosidad cinemática del aire caliente es de $4,091 \cdot 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$, y a 300 °C la viscosidad cinemática del aire caliente es de $4,765 \cdot 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$. (Cengel, 2011)

La viscosidad del aire caliente (γg) a la temperatura de 259,01 °C se la determina utiliza la ecuación de interpolación lineal:

$$y(x_*) = y_{k-1} + \frac{x_* - x_{k-1}}{x_k - x_{k-1}} \cdot (y_k - y_{k-1})$$

Dónde:

$x_k = 300 \text{ °C}$, temperatura superior.

$x_{k-1} = 250 \text{ °C}$, temperatura inferior.

$x_* = 259,01 \text{ °C}$, temperatura de estudio.

$y_k = 4,765 \cdot 10^{-5} \frac{\text{m}^2}{\text{s}}$, viscosidad del aire a temperatura superior.

$y_{k-1} = 4,091 \cdot 10^{-5} \frac{\text{m}^2}{\text{s}}$, viscosidad del aire a temperatura inferior.

$y(x_*) = 4,091 \cdot 10^{-5} + \frac{(259,01 - 250)}{(300 - 250)} \cdot (4,765 \cdot 10^{-5} - 4,091 \cdot 10^{-5})$

$y(x_*) = 4,212 \cdot 10^{-5} \frac{\text{m}^2}{\text{s}}$

$\gamma g = 4,212 \cdot 10^{-5} \frac{\text{m}^2}{\text{s}}$, viscosidad del aire caliente a temperatura de 259,01 °C.

El número de Reynolds (Re), es un número adimensional utilizado para caracterizar el movimiento de los fluidos, para el caso experimental caracteriza el movimiento de los gases al interior de la cámara de combustión durante la transferencia de calor.

$$A_g = \text{ancho} \times \text{profundidad}$$

Dónde:

A_g , área de gases al interior de la cámara de combustión.

$\text{ancho} = 0,58 \text{ cm}$, ancho de la cámara de combustión.

$\text{profundidad} = 0,78 \text{ cm}$, profundidad de la cámara de combustión.

$A_g = (0,58) \cdot (0,78)$

$$A_g = 0,4524 \text{ m}^2$$

$$\text{Perímetro} = 2 \cdot \text{ancho} + 2 \cdot \text{profundidad}$$

Dónde:

Perímetro, es el perímetro interior de la cámara de combustión.

$$\text{Perímetro} = (2 \cdot 0,58) + (2 \cdot 0,78)$$

$$\text{Perímetro} = 2,72 \text{ m}$$

$$Dh = \frac{4 \cdot A_g}{\text{Perímetro}}$$

Dónde:

Dh, es el diámetro hidráulico de la cámara de combustión.

$$Dh = \frac{4 \cdot (0,4524)}{2,72}$$

$$Dh = 0,655 \text{ m}$$

$$Re = \frac{v_w \cdot Dh}{\gamma g}$$

Dónde:

$v_w = 1,00 \frac{\text{m}}{\text{s}}$, es la velocidad de los gases en la cámara de combustión.

$$Re = \frac{(1,00) \cdot (0,655)}{4,212 \cdot 10^{-5}}$$

$$Re = 15550,80 = 15,55 \times 10^3$$

Considerando que la velocidad de los gases dentro de la cámara de combustión es de 1,00 m/s, el proceso de combustión se encuentra en un régimen de transición por lo que mediante la variación de la velocidad del ventilador de la cámara de combustión se puede incrementar la velocidad de los gases de 2,00 m/s a 4,00 m/s, con lo que se consigue entrar en un régimen de convección forzada de flujo turbulento.

$$Re = \frac{v_w \cdot Dh}{\gamma g}$$

Dónde:

$v_w = 2,00 \frac{\text{m}}{\text{s}}$, es la velocidad de los gases en flujo turbulento.

$$Re = \frac{(2,00) \cdot (0,655)}{4,212 \cdot 10^{-5}}$$

$$Re = 31101,61 = 31,10 \times 10^3$$

El número de Nusselt (Nu_{Dh}) es un número adimensional que mide el aumento de la transmisión de calor desde una superficie, por lo que un fluido discurre (transferencia de calor por convección) comparada con la transferencia de calor si

ésta ocurriera solamente por conducción, para el caso experimental caracteriza el aumento de la transmisión de calor para el diámetro hidráulico de la cámara de combustión.

$$Nu_{Dh} = 0,023 \cdot Re^{0,8} \cdot Pr^n$$

Dónde:

Nu_{Dh} , número de Nusselt para el diámetro hidráulicos de la cámara combustión.

Re , número de Reynolds considerando un régimen de convección forzada de flujo turbulento.

Pr , número de Prandtl.

Esta correlación es válida para rangos $0,7 < Pr < 160$, $Re > 10000$.

n , el exponente de Pr tiene un valor de $n=0,3$ cuando el fluido se enfría y $n=0,4$ cuando el fluido se calienta.

Para el caso experimental, se determina que:

$Re = 31101,61$, con velocidad de gases de 2,00 m/s.

$Pr = 0,7$

$n = 0,4$

$Nu_{Dh} = 0,023 \cdot (31101,61)^{0,8} \cdot (0,7)^{0,4}$

$Nu_{Dh} = 78,34$

El número de Nusselt en función del coeficiente de convección interna hi , se lo determina relacionando el diámetro hidráulico y la conductividad térmica del gas.

$$Nu_{Dh} = \frac{hi \cdot Dh}{k_{gas}}$$

Dónde:

hi , es el coeficiente de convección interna expresado en $W/m^2 \cdot ^\circ C$.

k_{gas} , es la conductividad térmica del gas de la cámara de combustión expresada en $W/m \cdot ^\circ C$.

Dh , es el diámetro hidráulico de la cámara de combustión expresado en m^2 .

Nu_{Dh} , número de Nusselt para el diámetro hidráulico de la cámara de combustión.

$Dh = 0,655 \text{ m}$

$k_{gas} = 0,00722 \frac{W}{m \cdot ^\circ C}$

$Nu_{Dh} = 78,34$

$$h_i = \frac{Nu_{Dh} \cdot k_{gas}}{Dh}$$

$$h_i = \frac{(78,34) \cdot (0,0722)}{0,655}$$

$$h_i = 8,635 \frac{W}{m^2 \cdot ^\circ C}$$

$\sigma = 5,67037 \cdot 10^{-8} \frac{W}{m^2 \cdot K^4}$, es la constante de Stefan – Boltzmann.

$\epsilon m = 0,9$, (Salvi; 2000, p. 145).

Considerando la combustión del Pennisetum Clandestinum en estado compactado con un contenido de humedad final de $X_{wf} = 2,86\%$, se determina:

$$h_{ir} = \frac{\sigma \cdot \epsilon m \cdot [(Thi+273,15)^4 - (Tpi+273,15)^4]}{(Thi+273,15) - (Tpi+273,15)}$$

Dónde:

h_{ir} , es el coeficiente de transferencia de calor por radiación.

$Tpi = 160,13 \text{ } ^\circ C$, es la temperatura promedio interna de pared.

$Thi = 259,01 \text{ } ^\circ C$, es la temperatura promedio salida de gases.

$$h_{ir} = \frac{(5,67037 \cdot 10^{-8}) \cdot (0,9) \cdot [(259,01+273,15)^4 - (160,13+273,15)^4]}{(259,01+273,15) - (160,13+273,15)}$$

$$h_{ir} = 23,20 \frac{W}{m^2 \cdot K} \cdot \frac{274,15 \text{ } ^\circ K}{1 \text{ } ^\circ C}$$

$$h_{ir} = 6360,28 \frac{W}{m^2 \cdot ^\circ C}$$

Para la pared plana compuesta de la cámara de combustión se define:

$$U = \frac{1}{\left(\frac{1}{h_i+h_{ir}}\right) + \left(\frac{eR}{kR}\right) + \left(\frac{ea1}{ka1}\right) + \left(\frac{el}{kl}\right) + \left(\frac{ea2}{ka2}\right) + \left(\frac{1}{h_o}\right)}$$

Dónde:

U , coeficiente global de transferencia de calor.

$h_i = 8,635 \frac{W}{m^2 \cdot ^\circ C}$, coeficiente de convección interna.

$h_{ir} = 6360,28 \frac{W}{m^2 \cdot ^\circ C}$, coeficiente de transferencia de calor por radiación.

$h_o = 6,565 \frac{W}{m^2 \cdot ^\circ C}$, coeficiente de convección externa.

$eR = 0,0650 \text{ m}$, espesor del ladrillo refractario.

$ea1 = 0,0003 \text{ m}$, espesor de acero 1.

$el = 0,0460 \text{ m}$, espesor de la lana de vidrio.

$ea2 = 0,0001 \text{ m}$, espesor de acero 2.

$kR = 0,850 \frac{W}{m^2 \cdot ^\circ C}$, conductividad del ladrillo refractario.

$ka1 = 48,80 \frac{W}{m^2 \cdot ^\circ C}$, conductividad del acero 1.

$kl = 0,043 \frac{W}{m^2 \cdot ^\circ C}$, conductividad de la lana de vidrio.

$ka2 = 48,80 \frac{W}{m^2 \cdot ^\circ C}$, conductividad del acero 2.

$$U = \frac{1}{\left(\frac{1}{8,635+6360,28}\right) + \left(\frac{0,0650}{0,850}\right) + \left(\frac{0,0003}{48,80}\right) + \left(\frac{0,0460}{0,043}\right) + \left(\frac{0,0001}{48,80}\right) + \left(\frac{1}{6,565}\right)}$$

$$U = 0,7698 \frac{Wh}{m^2 \cdot ^\circ C}$$

$$Qp = U \cdot At \cdot \Delta T$$

Dónde:

Qp , calor perdido en las paredes laterales de la cámara de combustión.

$At = 1,8496 m^2$, área total de las paredes de la cámara de combustión.

$U = 0,7698 \frac{Wh}{m^2 \cdot ^\circ C}$, coeficiente global de transferencia de calor.

$\Delta T = 826,66 ^\circ C$, es la variación de la temperatura – ambiente.

$$Qp = (0,7698) \cdot (1,8496) \cdot (826,66)$$

$$Qp = 1177,01 Wh$$

El calor perdido en las paredes de la cámara de combustión, resultado de la combustión el Pennisetum Clandestinum en estado compactado, en forma de briqueta con un contenido de humedad final inferior al 12% ($X_{wf} = 2,86\%$), es aproximadamente de 1,17 KWh.

El calor útil de la cámara de combustión (Qu), se lo determina apoyándose en la teoría desarrollada por E.D. Grimson, para haces de tubos en flujo transversal. El intercambiador de calor del horno de combustión de biomasa, está constituido por tres pasos de aire de proceso por el sector de tubos y un paso de aire caliente por la carcasa. (Pitts & Sissom, 1979)

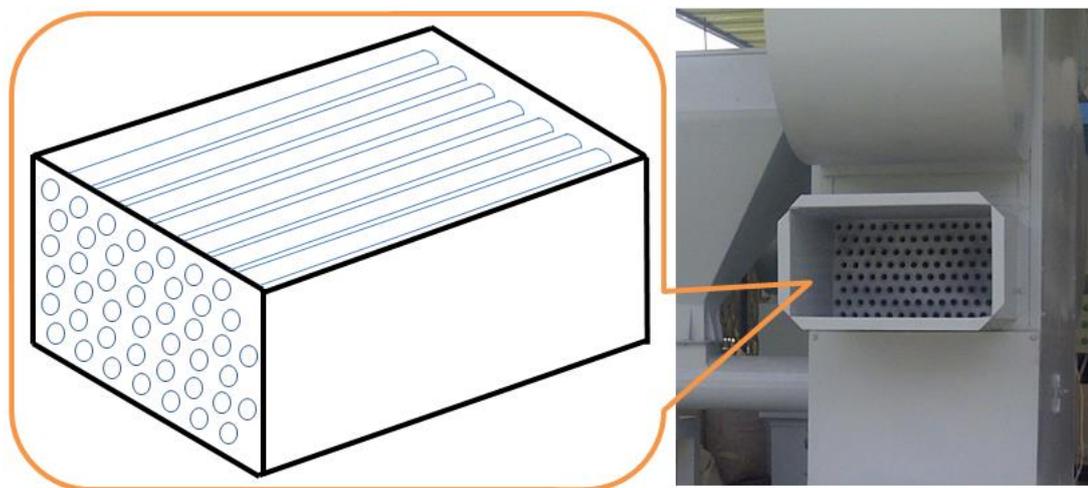


Figura 45 Intercambiador de calor del horno de combustión

En la figura 45, se visualiza el intercambiador de calor de tubos escalonados del horno de combustión de biomasa. Para determinar el paso del aire en los tubos escalonados, se toma el menor valor entre las siguientes expresiones.

$$F_1 = \frac{a-D}{2}$$

$$F_2 = \sqrt{\left(\frac{a}{2}\right)^2 + b^2}$$

De acuerdo con el análisis de Baskakov (1985), en Termotecnia “las velocidades normales de llama en un proceso varían entre 0,3 m/s a 0,5 m/s”. Para el caso experimental se considera el valor de 0,5 m/s.

Dónde:

$$a = 0,0375 \text{ m}$$

$$b = 0,0375 \text{ m}$$

$$D = 0,0254 \text{ m}$$

$$F_1 = \frac{0,0375-0,0254}{2}$$

$$F_1 = 6,05 \cdot 10^{-3} \text{ m}$$

$$F_2 = \sqrt{\left(\frac{0,0375}{2}\right)^2 + (0,0375)^2}$$

$$F_2 = 17 \cdot 10^{-3} \text{ m}$$

$$v_{max} = \frac{V_{\infty} \cdot a}{2 \cdot F}$$

Dónde:

v_{max} , es la velocidad del aire caliente dentro del intercambiador.

$$F = F_1$$

$$V_{\infty} = 0,5 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

$$v_{max} = \frac{V_{\infty} \cdot a}{2 \cdot F_1} = \frac{(0,5) \cdot (0,0375)}{2 \cdot (6,05 \cdot 10^{-3})}$$

$$v_{max} = 1,55 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

Hay que considerar que el acero cuando su temperatura es superior a los 400 °C pierde sus propiedades mecánicas, para el caso experimental se han determinado que la temperatura promedio de los gases de salida (T_{hi}) de la cámara de combustión es de 259,01 °C, considerando que la combustión del Pennisetum Clandestinum se da en estado compactado, en forma de briqueta y con un contenido de humedad final $X_{wf} = 2,86\%$.

En éstas condiciones, las propiedades termo físicas del aire caliente que atraviesa los tubos escalonados del intercambiador de calor, se las determina apoyándose en la ecuación de interpolación lineal y con los datos termo físicos del aire descritos en la tabla A-15 de Cengel. (Cengel, 2011)

$$y(x_*) = y_{k-1} + \frac{x_* - x_{k-1}}{x_k - x_{k-1}} \cdot (y_k - y_{k-1})$$

Dónde:

$x_k = 300 \text{ }^\circ\text{C}$, temperatura superior.

$x_{k-1} = 250 \text{ }^\circ\text{C}$, temperatura inferior

$x_* = 259,01 \text{ }^\circ\text{C}$, temperatura de estudio.

Para γ_{gases}

$$y_k = 4,765 \cdot 10^{-5} \frac{m^2}{s}$$

$$y_{k-1} = 4,091 \cdot 10^{-5} \frac{m^2}{s}$$

$$y(x_*) = 4,091 \cdot 10^{-5} + \frac{(259,01-250)}{(300-250)} \cdot (4,765 \cdot 10^{-5} - 4,091 \cdot 10^{-5})$$

$$y(x_*) = \mathbf{4,212 \cdot 10^{-5} \frac{m^2}{s}}$$
, es la γ_{gases} a la temperatura de estudio.

Para C_p

$$y_k = 1044 \frac{J}{Kg^\circ K}$$

$$y_{k-1} = 1033 \frac{J}{Kg^\circ K}$$

$$y(x_*) = 1033 + \frac{(259,01-250)}{(300-250)} \cdot (1044 - 1033)$$

$$y(x_*) = \mathbf{1034,98 \frac{J}{Kg^\circ K}}$$
, es el C_p a la temperatura de estudio.

Para k_{gases}

$$y_k = 0,04418 \frac{W}{m^\circ K}$$

$$y_{k-1} = 0,04104 \frac{W}{m^\circ K}$$

$$y(x_*) = 0,04104 + \frac{(259,01-250)}{(300-250)} \cdot (0,04418 - 0,04104)$$

$$y(x_*) = \mathbf{0,041605 \frac{W}{m^\circ K}}$$
, es la k_{gases} a la temperatura de estudio.

Para Pr

$$y_k = 0,6935$$

$$y_{k-1} = 0,6949$$

$$y(x_*) = 0,6946 + \frac{(259,01-250)}{(300-250)} \cdot (0,6935 - 0,6949)$$

$y(x_*) = 0,694401$, es el Pr a la temperatura de estudio.

En resumen se tiene:

$Thi = 259,01$ °C, es la temperatura promedio de salida de los gases de cámara.

$\gamma_{gases} = 4,212 \cdot 10^{-5} \frac{m^2}{s}$, es la viscosidad cinemática del aire.

$Cp = 1034,98 \frac{J}{kg^\circ K}$, es el calor específico del aire.

$k_{gases} = 0,041605 \frac{W}{m^\circ K}$, es la conductividad térmica del aire.

$Pr = 0,694401$, es el número de Prandtl.

Determinando el número de Reynolds:

$$Re_{max} = \frac{v_{max} \cdot D}{\gamma_{gases}}$$

Dónde:

$v_{max} = 1,55 \frac{m}{s}$, es la velocidad del aire caliente dentro del intercambiador.

$$D = 0,0254 \text{ m}$$

$$Re_{max} = \frac{(1,55) \cdot (0,0254)}{4,212 \cdot 10^{-5}}$$

$$Re_{max} = \mathbf{934,71}$$

De acuerdo con Pitts (1979) en la tabla 7.7, para tubos escalonados $C1 = 0,460$, $n2 = 0,562$ (p. 177). (Pitts & Sissom, 1979)

$$ho_i = \frac{C1 \cdot (Re_{max})^{n2} \cdot k_{gases}}{D}$$

Dónde:

ho_i , es el coeficiente de convección externa del intercambiador.

$$ho_i = \frac{(0,460) \cdot (934,71)^{0,562} \cdot (0,041605)}{0,0254}$$

$$ho_i = \mathbf{35,203 \frac{W}{m^2^\circ C}}$$

La ecuación de Grimson está definida para haces de tubos escalonados considerando mínimo 10 tubos de profundidad. En nuestro caso práctico el intercambiador del horno de combustión de biomasa tiene 8 tubos de profundidad, por lo que se realizará el ajuste al valor del coeficiente de convección. (Pitts & Sissom, 1979)

$$\frac{h(8 \text{ tubos})}{h(10 \text{ tubos})} = 0,98$$

Dónde:

$h(8 \text{ tubos}) = 0,98 \cdot h_{oi}$, es el coeficiente de convección del intercambiador.

$$h(10 \text{ tubos}) = h_{oi}$$

$$h(8 \text{ tubos}) = 0,98 \cdot (35,203)$$

$$\mathbf{h(8 \text{ tubos}) = 34,499} \frac{W}{m^2 \cdot ^\circ C}$$

En la figura 46, se representa el flujo de aire frío que ingresa al intercambiador de calor y el flujo de los gases calientes provenientes de la cámara de combustión que atraviesan al intercambiador de calor del horno de combustión de biomasa. Este flujo caliente – frío, se produce durante el proceso de la combustión siempre y cuando el ventilador axial ingrese el aire frío (aire a temperatura ambiente) al intercambiador de calor. En el intercambiador de calor se presentan cuatro temperaturas y velocidades, así:

- Temperatura y velocidad del aire frío que ingresa al intercambiador.
- Temperatura y velocidad del aire calentado que sale del intercambiador.
- Temperatura y velocidad de los gases calientes provenientes de la cámara de combustión que atraviesan el intercambiador.
- Temperatura y velocidad de los gases enfriados que salen por la chimenea una vez que atraviesan el intercambiador de calor.

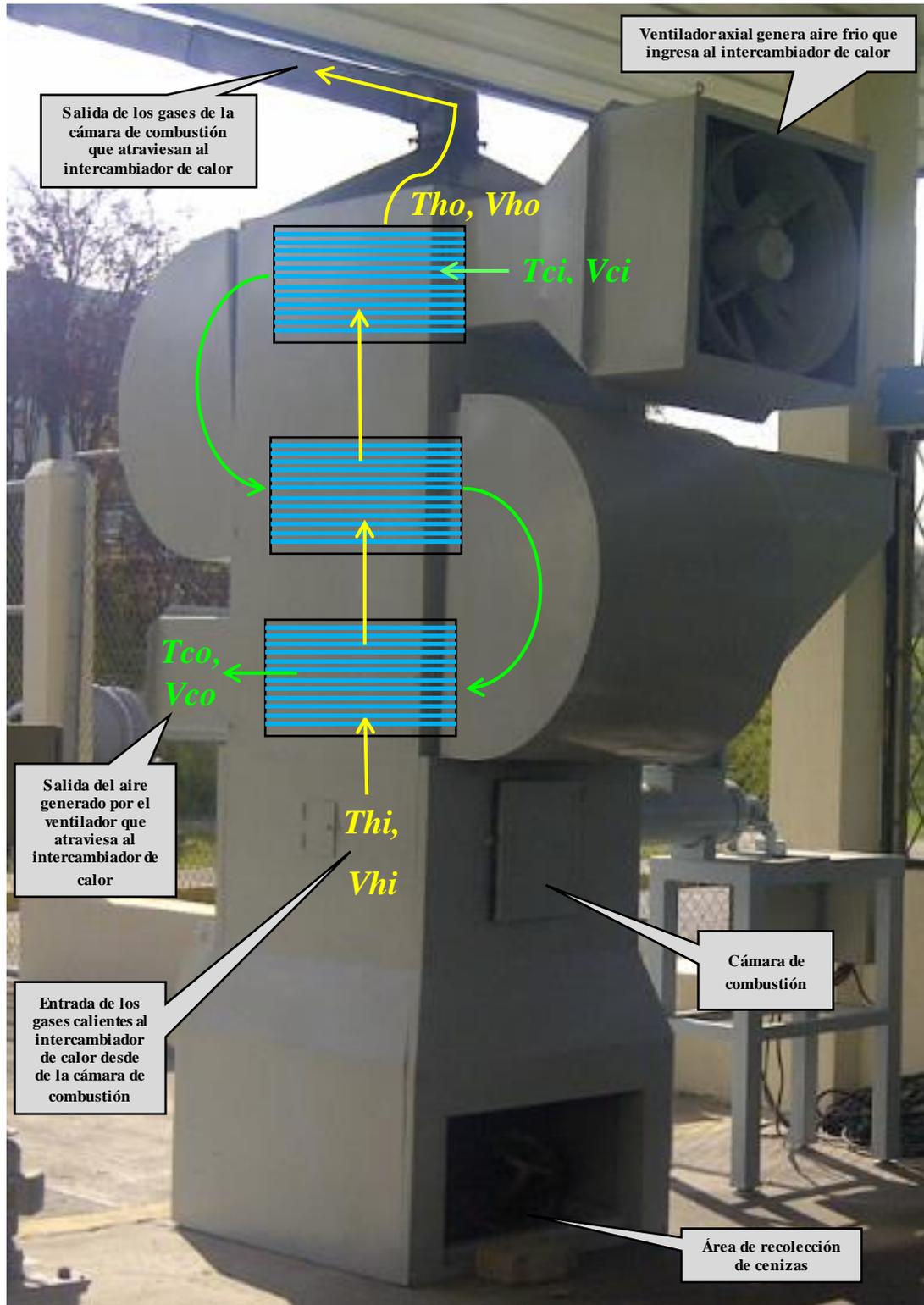


Figura 46 Flujo de aire frio y caliente en el intercambiador de calor

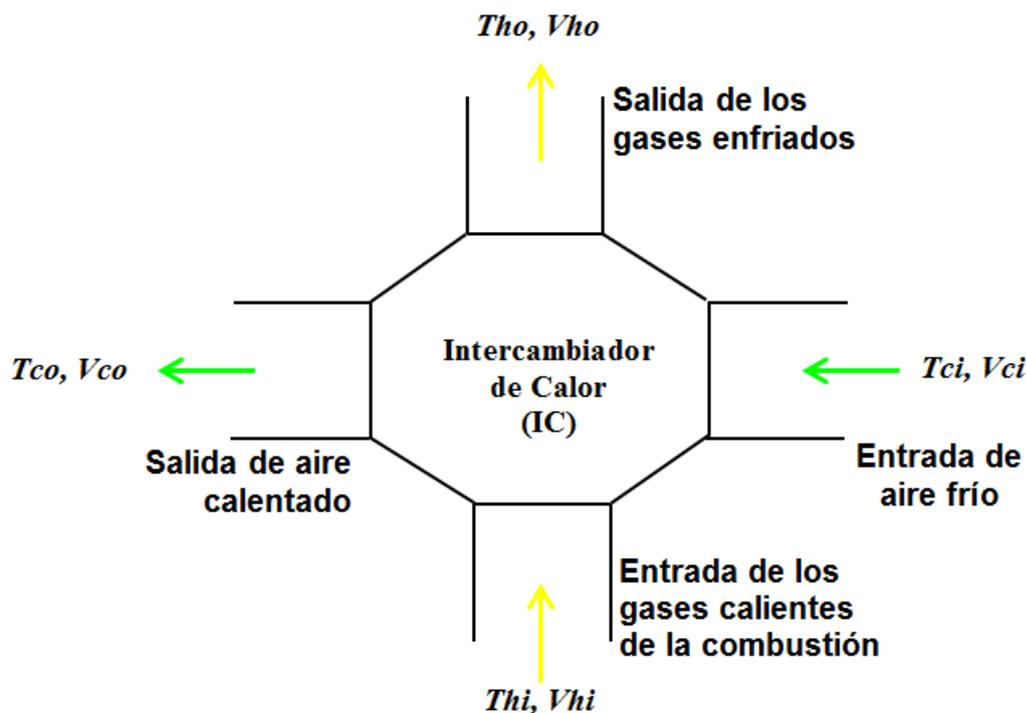


Figura 47 Temperaturas y velocidades en el intercambiador de calor

En la figura 47, se representa a través de un diagrama las temperaturas y velocidades presentes en el intercambiador de calor descritas en la figura 46.

Dónde:

Thi , es la temperatura de los gases de entrada al intercambiador de calor.

Tho , es la temperatura de los gases de salida del intercambiador de calor.

Tci , es la temperatura del aire de entrada al intercambiador de calor.

Tco , es la temperatura del aire de salida del intercambiador de calor.

Vhi , es la velocidad de los gases de entrada al intercambiador de calor.

Vho , es la velocidad de los gases de salida del intercambiador de calor.

Vci , es la velocidad del aire de entrada al intercambiador de calor.

Vco , es la velocidad del aire de salida del intercambiador de calor.

En la figura 49, se representa la variación de las temperaturas de entrada de los gases y del aire presentes en el intercambiador de calor descritas en la figura 48, de la cual, se generan dos deltas de temperaturas que permiten determinar la media logarítmica de la variación de la temperatura en el intercambiador de calor, descrita por la siguiente expresión.

$$\Delta T_{ml} = \frac{\Delta T_2 - \Delta T_1}{\ln\left(\frac{\Delta T_2}{\Delta T_1}\right)}$$

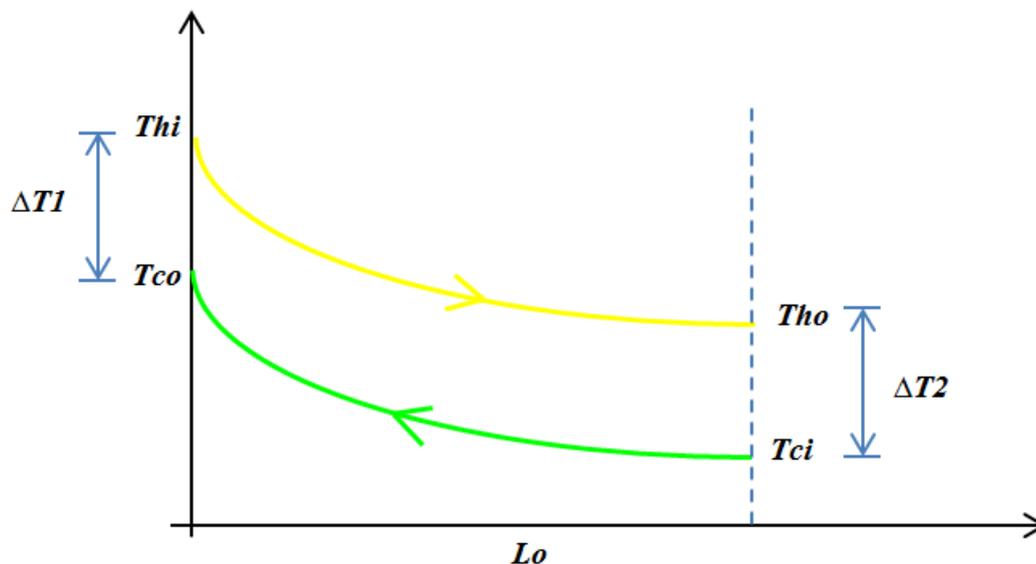


Figura 48 Variación de las temperaturas en el intercambiador de calor

De la figura 48, se determina la medida logarítmica de la diferencia de temperatura para flujo cruzado con fluidos no mezclados presente en el Intercambiador de Calor (IC), para el caso experimental durante la combustión del Pennisetum Clandestinum en estado compactado, en forma de briqueta.

$T_{hi} = 259,01\text{ }^{\circ}\text{C}$, temperatura de ingreso de los gases al IC.

$T_{ho} = 53,30\text{ }^{\circ}\text{C}$, temperatura de salida de los gases del IC.

$T_{ci} = T_{amb} = 23,34\text{ }^{\circ}\text{C}$, temperatura de ingreso del aire al IC.

$T_{co} = 137,80\text{ }^{\circ}\text{C}$, temperatura de salida del aire del IC.

$$\Delta T1 = T_{hi} - T_{co}$$

$$\Delta T1 = 259,01 - 137,80$$

$$\Delta T1 = 121,21\text{ }^{\circ}\text{C}$$

$$\Delta T2 = T_{ho} - T_{ci}$$

$$\Delta T2 = 53,30 - 23,34$$

$$\Delta T2 = 29,96\text{ }^{\circ}\text{C}$$

$$\Delta T_{ml} = \frac{\Delta T2 - \Delta T1}{\ln\left(\frac{\Delta T2}{\Delta T1}\right)}$$

Dónde:

ΔT_{ml} , es la media logarítmica de la variación de temperatura del IC.

$$\Delta T_{ml} = \frac{29,96 - 121,21}{\ln\left(\frac{29,96}{121,21}\right)}$$

$$\Delta T_{ml} = 65,287\text{ }^{\circ}\text{C}$$

$$ATubos = \#tubos \cdot \pi \cdot D \cdot Lo$$

Dónde:

$ATubos$, área de los tubos del intercambiador.

$\#tubos = 384$

$Lo = 0,78 \text{ m}$, longitud de los tubos del IC.

$D = 0,0254 \text{ m}$, diámetros de los tubos del IC.

$$ATubos = (384) \cdot \pi \cdot (0,0254) \cdot (0,78)$$

$$ATubos = 23,90 \text{ m}^2$$

El factor de corrección de la temperatura media logarítmica (F) para intercambiadores complejos de calor, se utiliza las siguientes expresiones.

$$R = \frac{T_{hi} - T_{ho}}{T_{co} - T_{ci}}$$

$$R = \frac{259,10 - 53,30}{137,80 - 23,34}$$

$$R = 1,798$$

$$P = \frac{T_{co} - T_{ci}}{T_{hi} - T_{ci}}$$

$$P = \frac{137,80 - 23,34}{259,01 - 23,34}$$

$$P = 0,485$$

$$F = \sqrt{\frac{R^2 + 1}{R - 1}} \cdot \frac{\ln\left(\frac{1 - P}{1 - PR}\right)}{\ln\left(\frac{2 - (PR) + 1 + \sqrt{R^2 + 1}}{2 - (PR) + 1 - \sqrt{R^2 + 1}}\right)}$$

Dónde:

F , factor de conversión de la temperatura media logarítmica para intercambiadores complejos de calor.

$$F = \sqrt{\frac{(1,798)^2 + 1}{(1,798) - 1}} \cdot \frac{\ln\left(\frac{1 - 0,485}{1 - 0,485 \cdot 1,798}\right)}{\ln\left(\frac{2 - (0,485 \cdot 1,798) + 1 + \sqrt{(1,798)^2 + 1}}{2 - (0,485 \cdot 1,798) + 1 - \sqrt{(1,798)^2 + 1}}\right)}$$

$$F = 0,788$$

En la figura 49, se representa el corte transversal de un tubo escalonado del intercambiador de calor del horno de combustión de biomasa. En la cual se describen las dimensiones del tubo de acero que forman el haz escalonado del horno de combustión.

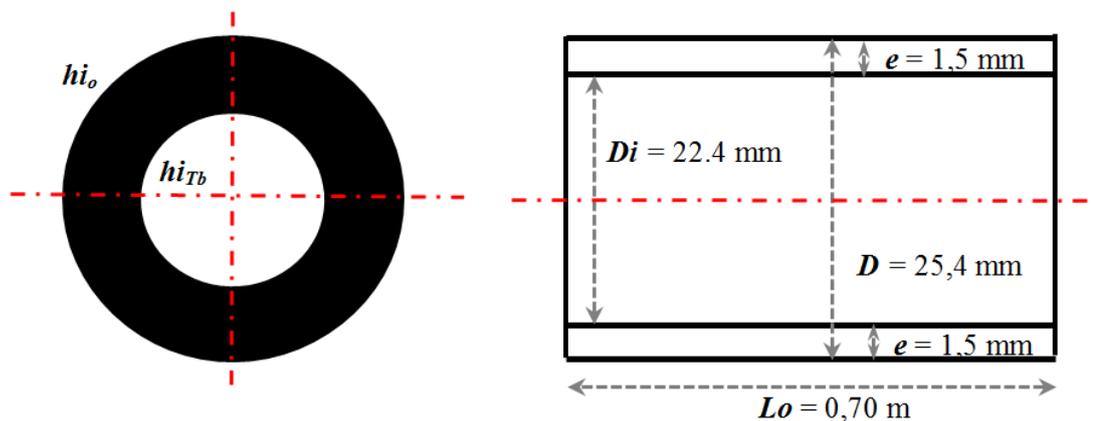


Figura 49 Corte transversal del tubo escalonado del intercambiador de calor

Dónde:

$L_o = 0,78$, es la longitud de un tubo escalonado del IC.

$D = 0,0254$ m, es el diámetro externo del tubo escalonado del IC.

$D_i = 0,0224$ m, es el diámetro interno del tubo escalonado del IC.

$e = 0,0015$ m, es el espesor del tubo escalonado del IC.

$$L_{tubo} = 3 \cdot L_o$$

Dónde:

L_{tubo} , es la longitud total del tubo escalonado del IC.

$$L_{tubo} = 3 \cdot (0,78)$$

$$L_{tubo} = 2,34 \text{ m}$$

De acuerdo con Corvalan (1992) en la Ingeniería del secado solar, secadores de convección forzada, “para ductos escalonados de diámetro menores a 0,05 m, la velocidad de aire entre ellos varía entre 5 a 10 m/s²” (p. 8-5).

Para el caso experimental, se considera que en el intercambiador de calor del horno de combustión, el aire atraviesa por el interior del haz de los tubos escalonados con una velocidad de 10 m/s².

$$T_b = \frac{T_{ci} + T_{co}}{2}$$

Dónde:

T_b , es la temperatura media volumétrica.

$$T_b = \frac{23,34 + 137,80}{2}$$

$$T_b = 80,57 \text{ } ^\circ\text{C}$$

En estas condiciones, las propiedades termo físicas del aire frío que atraviesa los tubos escalonados del intercambiador de calor, se las determina apoyándose en la ecuación de interpolación lineal y con los datos termo físicos del aire descritos en la tabla A-15 de Cengel. (Cengel, 2011)

$$y(x_*) = y_{k-1} + \frac{x_* - x_{k-1}}{x_k - x_{k-1}} \cdot (y_k - y_{k-1})$$

Dónde:

$x_k = 90 \text{ }^\circ\text{C}$, temperatura superior.

$x_{k-1} = 80 \text{ }^\circ\text{C}$, temperatura inferior

$x_* = 80,57 \text{ }^\circ\text{C}$, temperatura de estudio.

Para γ_{Tb}

$$y_k = 2,201 \cdot 10^{-5} \frac{m^2}{s}$$

$$y_{k-1} = 2,097 \cdot 10^{-5} \frac{m^2}{s}$$

$$y(x_*) = 2,097 \cdot 10^{-5} + \frac{(80,57-80)}{(90-80)} \cdot (2,201 \cdot 10^{-5} - 2,097 \cdot 10^{-5})$$

$$y(x_*) = \mathbf{2,103 \cdot 10^{-5} \frac{m^2}{s}}$$
, es la γ_{Tb} a la temperatura de estudio.

Para Cp_{Tb}

$$y_k = 1008 \frac{J}{Kg^\circ K}$$

$$y_{k-1} = 1008 \frac{J}{Kg^\circ K}$$

$$y(x_*) = 1008 + \frac{(80,57-80)}{(90-80)} \cdot (1008 - 1008)$$

$$y(x_*) = \mathbf{1008 \frac{J}{Kg^\circ K}}$$
, es el Cp_{Tb} a la temperatura de estudio.

Para $k_{gas Tb}$

$$y_k = 0,03024 \frac{W}{m^\circ K}$$

$$y_{k-1} = 0,02953 \frac{W}{m^\circ K}$$

$$y(x_*) = 0,02953 + \frac{(80,57-80)}{(90-80)} \cdot (0,03024 - 0,02953)$$

$$y(x_*) = \mathbf{0,02957 \frac{W}{m^\circ K}}$$
, es la $k_{gas Tb}$ a la temperatura de estudio.

Para Pr_{Tb}

$$y_k = 0,7132$$

$$y_{k-1} = 0,7154$$

$$y(x_*) = 0,7154 + \frac{(80,57-80)}{(90-80)} \cdot (0,7132 - 0,7154)$$

$y(x_*) = \mathbf{0,71527}$, es el Pr_{Tb} a la temperatura de estudio.

En resumen se tiene:

$Tb = 80,57 \text{ }^\circ\text{C}$, es la temperatura media volumétrica.

$\gamma_{Tb} = 2,103 \cdot 10^{-5} \frac{\text{m}^2}{\text{s}}$, es la viscosidad cinemática del aire en los tubos del IC.

$Cp_{Tb} = 1008 \frac{\text{J}}{\text{Kg}^\circ\text{K}}$, es el calor específico del aire en los tubos del IC.

$k_{gas Tb} = 0,02957 \frac{\text{W}}{\text{m}^\circ\text{K}}$, es la conductividad térmica del aire en los tubos del IC.

$Pr_{Tb} = 0,71527$, es el número de Prandtl para el aire en los tubos del IC.

Determinando el número de Reynolds:

$$Re_{Di} = \frac{v_{tubo} \cdot Di}{\gamma_{Tb}}$$

Dónde:

$v_{tubo} = 10 \frac{\text{m}}{\text{s}}$, es la velocidad del aire dentro del intercambiador.

$Di = 0,0224 \text{ m}$, diámetro interno del tubo escalonado del IC.

$$Re_{Di} = \frac{(10) \cdot (0,0224)}{2,103 \cdot 10^{-5}}$$

$$\mathbf{Re_{Di} = 10651,45}$$

El valor del número de Reynolds es de 10651,45, por lo que se tiene convección forzada en flujo turbulento. Para éste régimen el número de Nusselt se determina con la ecuación de Dittus-Boelter. (Pitts & Sissom, 1979)

$$Nu_{Di} = \frac{hi_{Tb} \cdot Di}{k_{gas Tb}}$$

Dónde:

hi_{Tb} , es el coeficiente de convección interna de los tubos escalonados en flujo turbulento expresado en $\text{W/m}^2\text{ }^\circ\text{C}$.

$k_{gas Tb}$, es la conductividad térmica del aire en los tubos escalonados expresado en $\text{W/m}^\circ\text{C}$.

Di , es el diámetro interno de los tubos escalonados expresado en m^2 .

Nu_{Di} , es el número de Nusselt para el diámetro interno.

$$\frac{hi_{Tb} \cdot Di}{k_{gas Tb}} = 0,023 \cdot Re_{Di} \cdot Di^{0,8} \cdot Pr_{Tb}^{n1}$$

Dónde:

$n1 = 0,4$, para escenarios con calentamiento de fluido.

$$hi_{Tb} = \frac{[0,023 \cdot Re_{Di} \cdot Di^{0,8} \cdot Pr_{Tb}^{n1}] \cdot k_{gas} T_b}{Di}$$

$$hi_{Tb} = \frac{[(0,023) \cdot (10651,45) \cdot (0,0224)^{0,8} \cdot (0,71527)^{0,4}] \cdot (0,02957)}{0,0224}$$

$$hi_{Tb} = 13,543 \frac{W}{m^2 \cdot C}$$

De acuerdo con Pitts (1979), en Transferencia de calor, “El rendimiento de los intercambiadores de calor depende de que las superficies de transferencia de calor se encuentren limpias y libres de corrosión” (p. 248).

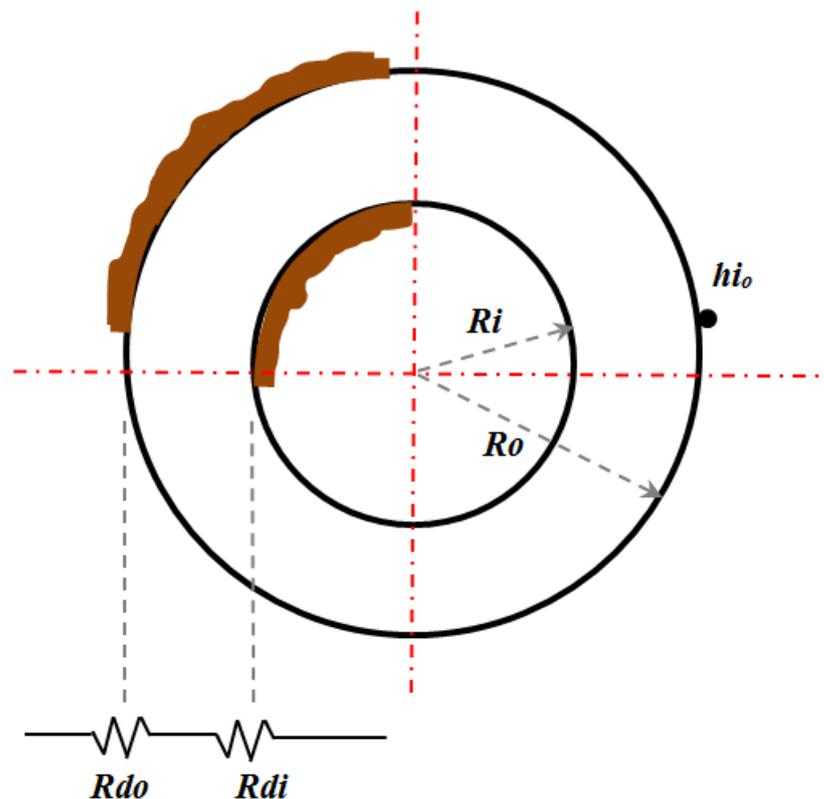


Figura 50 Incrustaciones en el tubo escalonado del intercambiador de calor

En la figura 50, se describen las secciones de un tubo escalonado del intercambiador de calor del horno de combustión de biomasa, con incrustaciones en el interior y exterior del tubo por la suciedad producida por el ambiente.

Dónde:

Rdi , es la resistencia térmica por acumulación de incrustaciones en el interior del tubo escalonado del intercambiador de calor.

Rdo , es la resistencia térmica por acumulación de incrustaciones en el exterior del tubo escalonado del intercambiador de calor.

R_i , es el radio interior del tubo escalonado del intercambiador de calor.

R_o , es el radio exterior del tubo del intercambiador de calor.

hi_o , es el coeficiente de conversión interna corregido del tubo escalonado del intercambiador de calor.

$$hi_o = hi_{Tb} \cdot \frac{R_i}{R_o}$$

Dónde:

$$R_i = 0,0112 \text{ m}$$

$$R_o = 0,0127 \text{ m}$$

$$hi_{Tb} = 13,543 \frac{W}{m^2 \cdot ^\circ C}$$

$$hi_o = (13,543) \cdot \frac{0,0112}{0,0127}$$

$$hi_o = \mathbf{11,943} \frac{W}{m^2 \cdot ^\circ C}$$

$$Uc = \frac{hi_o \cdot ho_i}{hi_o + ho_i}$$

Dónde:

Uc , es el coeficiente global de transferencia de calor limpio.

$$ho_i = 35,203 \frac{W}{m^2 \cdot ^\circ C}, \text{ coeficiente de convección externa del intercambiador.}$$

$$hi_o = 11,943 \frac{W}{m^2 \cdot ^\circ C}, \text{ coeficiente de convección interna de los tubos del IC.}$$

$$Uc = \frac{(11,943) \cdot (35,203)}{11,943 + 35,203}$$

$$Uc = \mathbf{8,917} \frac{W}{m^2 \cdot ^\circ C}$$

$$Rd = Rdi + Rdc$$

Dónde:

$Rd = 0,004$, de acuerdo con Pitts (1979), tabla 10.3, (p. 248).

Considerando el aire industrial, se tiene:

$$\frac{1}{Ud} = \frac{1}{Uc} + Rd$$

Dónde:

Ud , es el coeficiente global de transferencia de calor.

$$Ud = \frac{1}{\frac{1}{Uc} + Rd}$$

$$Ud = \frac{1}{\frac{1}{8,917} + 0,04}$$

$$Ud = \mathbf{6,573} \frac{Wh}{m^2 \cdot ^\circ C}$$

$$Q_u = U_d \cdot A_{\text{Tubos}} \cdot \Delta T_{ml} \cdot F$$

Dónde:

Q_u , es el calor útil de la cámara de combustión.

$U_d = 6,573 \frac{Wh}{m^2 \cdot ^\circ C}$, es el coeficiente global de transferencia de calor.

$A_{\text{Tubos}} = 23,90 m^2$, es el área de los tubos escalonados.

$\Delta T_{ml} = 65,287 ^\circ C$, es la media logarítmica de la variación de temperatura.

$F = 0,788$, es el factor de conversión de la temperatura.

$$Q_u = (6,573) \cdot (23,90) \cdot (65,287) \cdot (0,788)$$

$$\mathbf{Q_u = 8081,91 Wh}$$

El calor útil de la cámara de combustión, es igual al calor trasferido a los haces de los tubos escalonados del intercambiador de calor, resultado de la combustión del Pennisetum Clandestinum en estado compactado, en forma de briqueta, con un contenido de humedad final inferior al 12% ($X_{wf} = 2,86\%$), es aproximadamente de 8,08 KWh.

El calor almacenado en la cámara de combustión (Q_a), se lo determina cuantificando el calor que se almacena en las paredes de la cámara de combustión, considerando las propiedades termo físicas de la pared compuesta de la cámara combustión descritas en la figura 45 y tabla 15, para el caso experimentales considerando la combustión del Pennisetum Clandestinum en estado compactado, en forma de briqueta, con un contenido de humedad final inferior al 12% ($X_{wf} = 2,86\%$), se tiene:

$$T_m = \frac{T_{pi} + T_{po}}{2}$$

Dónde:

T_m , es la temperatura media de la pared de la cámara de combustión.

$T_{pi} = 160,13 ^\circ C$, es la temperatura promedio interna de pared.

$T_{po} = 73,84 ^\circ C$, es la temperatura promedio externa de pared.

$$T_m = \frac{160,13 + 73,84}{2}$$

$$\mathbf{T_m = 116,985 ^\circ C}$$

$$\Delta T_{pc} = T_{pi} - T_m$$

Dónde:

ΔT_{pc} , es la temperatura perdida en las paredes de la cámara de combustión.

$$\Delta T_{pc} = 160,13 - 116,985$$

$$\Delta T_{pc} = 43,145 \text{ } ^\circ\text{C}$$

Para el ladrillo refractario de la cámara de combustión, se determina:

$$mR = \delta R \cdot VR$$

Dónde:

mR , es la masa del ladrillo refractario de la cámara de combustión.

$\delta R = 2645 \frac{\text{Kg}}{\text{m}^3}$, densidad del ladrillo refractario de la cámara de combustión.

$VR = 0,120224 \text{ m}^3$, volumen del ladrillo refractario en la cámara.

$$mR = (2645) \cdot (0,120224)$$

$$\mathbf{mR = 317,992 Kg}$$

$$QR = mR \cdot CpR \cdot \Delta T_{pc}$$

Dónde:

QR , calor almacenado en el ladrillo refractario de la cámara de combustión.

$CpR = 0,2294455 \frac{\text{Kcal}}{\text{Kg} \cdot ^\circ\text{C}}$, calor específico del ladrillo refractario.

$$QR = (317,992) \cdot (0,2294455) \cdot (43,145)$$

$$\mathbf{QR = 3147,938 Kcal}$$

Para el acero 1 de la pared de la cámara de combustión, se determina:

$$ma1 = \delta a1 \cdot Va1$$

Dónde:

$ma1$, es la masa del acero 1 de la cámara de combustión.

$\delta a1 = 7854 \frac{\text{Kg}}{\text{m}^3}$, densidad del acero 1 de la cámara de combustión.

$Va1 = 0,0055488 \text{ m}^3$, volumen del acero 1 en la cámara de combustión.

$$ma1 = (7854) \cdot (0,0055488)$$

$$\mathbf{ma1 = 43,58 Kg}$$

$$Qa1 = ma1 \cdot Cpa1 \cdot \Delta T_{pc}$$

Dónde:

$Qa1$, calor almacenado en el acero 1 de la cámara de combustión.

$Cpa1 = 0,1037284 \frac{\text{Kcal}}{\text{Kg} \cdot ^\circ\text{C}}$, calor específico del acero 1.

$$Qa1 = (43,58) \cdot (0,1037284) \cdot (43,145)$$

$$\mathbf{Qa1 = 195,037 Kcal}$$

Para la lana de vidrio de la cámara de combustión, se determina:

$$ml = \delta l \cdot Vl$$

Dónde:

ml , es la masa de la lana de vidrio de la cámara de combustión.

$\delta l = 105 \frac{Kg}{m^3}$, densidad de la lana de vidrio de la cámara de combustión.

$Vl = 0,0850816 m^3$, volumen de la lana de vidrio en la cámara de combustión.

$$ml = (150) \cdot (0,0850816)$$

$$ml = 12,76 Kg$$

$$Ql = ml \cdot Cpl \cdot \Delta Tpc$$

Dónde:

Ql , calor almacenado en la lana de vidrio de la cámara de combustión.

$Cpl = 0,1900000 \frac{Kcal}{Kg \cdot ^\circ C}$, calor específico de la lana de vidrio.

$$Ql = (12,76) \cdot (0,1900000) \cdot (43,145)$$

$$Ql = 104,612 Kcal$$

Para el acero 2 de la pared de la cámara de combustión, se determina:

$$ma2 = \delta a2 \cdot Va2$$

Dónde:

$ma2$, es la masa del acero 2 de la cámara de combustión.

$\delta a2 = 7854 \frac{Kg}{m^3}$, densidad del acero 2 de la cámara de combustión.

$Va2 = 0,0018496 m^3$, volumen del acero 2 en la cámara de combustión.

$$ma2 = (7854) \cdot (0,0018496)$$

$$ma2 = 14,526 Kg$$

$$Qa2 = ma2 \cdot Cpa2 \cdot \Delta Tpc$$

Dónde:

$Qa2$, calor almacenado en el acero 2 de la cámara de combustión.

$Cpa2 = 0,1037284 \frac{Kcal}{Kg \cdot ^\circ C}$, calor específico del acero 2.

$$Qa2 = (14,526) \cdot (0,1037284) \cdot (43,145)$$

$$Qa2 = 65,012 Kcal$$

$$Qa = QR + Qa1 + Ql + Qa2$$

Dónde:

Qa , calor almacenado en la cámara de combustión.

$$Qa = 3147,938 + 195,037 + 104,612 + 65,012$$

$$Qa = 3512,599 Kcal$$

$$1 \text{ Kcal} = 4187 \text{ J}; 1 \text{ KWh} = 3,6 \cdot 10^6 \text{ J} = 1000 \text{ Wh}$$

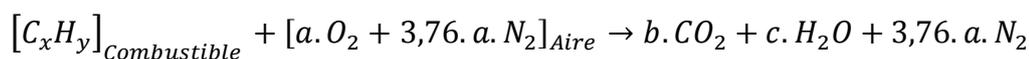
$$Qa = 3512,599 \text{ Kcal} \cdot \frac{4187 \text{ J}}{1 \text{ Kcal}} \cdot \frac{1 \text{ KWh}}{3,6 \cdot 10^6 \text{ J}} \cdot \frac{1000 \text{ W}}{1 \text{ KWh}} = 4085,34 \text{ Wh}$$

$$\mathbf{Qa = 4085,34 Wh}$$

El calor almacenado en la cámara de combustión, como resultado de la combustión del Pennisetum Clandestinum en estado compactado, en forma de briqueta, con un contenido de humedad final inferior al 12% ($X_{wf} = 2,86\%$), es aproximadamente 4,08 KWh.

El calor perdido por los gases de la combustión (Qg), es el calor transferido por los gases de la combustión del Pennisetum Clandestinum en estado compactado, en forma de briqueta, con estado de humedad final inferior al 12% ($X_{wf} = 2,86\%$), se lo determina considerando las entalpías a la temperatura de salida de gases del intercambiador de calor ($Tho = 53,30 \text{ }^\circ\text{C}$) y a la respectiva temperatura de ambiente ($T_{amb} = 23,34 \text{ }^\circ\text{C}$). Se deben determinar los productos de la combustión.

La ecuación química de la combustión de cualquier combustible del tipo C_xH_y , se la define con la siguiente expresión.



Dónde:

$$a = \frac{x+y}{4}, \text{ es la cantidad estequiométrica del oxígeno.}$$

b y c , son los parámetros algebraicos que resultan del balance numéricos.

De la tablas 6, se describe que el Pennisetum Clandestinum se encuentra formado principalmente por Fibras en Detergente Neutro (FDN con un 58,10%), del cual el contenido de Celulosa representa el 26,90%, Hemicelulosa con un 26,20% y Lignina con un 5,88%.

La Hemicelulosa constituye un grupo heterogéneo de polisacáridos cuya composición varía marcadamente entre especies vegetales, en cambio la celulosa presenta un bajo contenido de pentosas estando constituida principalmente por glucosa. La Lignina es un polifenol con una estructura no definida, que no presenta secuencias repetidas y cuyo tamaño no está bien definido. La lignina cuando es sometida a altas temperaturas desarrolla una propiedad aglomerante que para el caso del Pennisetum Clandestinum, se transforma en una pasta sólida "Grumo de Pasto vivo" difícil de romper. Uno de los elementos que aporta a la combustión del

Pennisetum Clandestinum es la celulosa $(C_6H_{10}O_5)_n$ con un valor mínimo de $n=200$, siendo el componente principal de las fibras FDN. (Correa, Carulla, & Pabón, 2008)

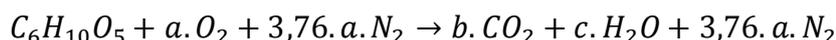
Para el experimental se empleará como fórmula empírica del Pennisetum Clandestinum la ecuación $C_6H_{10}O_5$.

Considerando una reacción química con el 100% de aire teórico, se tiene:



Dónde:

$PC = C_6H_{10}O_5$, es fórmula empírica del Pennisetum Clandestinum.



Para O_2 : $5 + 2a = 2b + c$

Para H : $10 = 2c$

Para C : $6 = b$

Para N_2 : $3,76a = 3,76a$

Se determinan los valores de $a = 6$; $b = 6$; $c = 5$.

$C_6H_{10}O_5 + 6O_2 + 22,56N_2 \rightarrow 6CO_2 + 5H_2O + 22,56N_2$, es la combustión del Pennisetum Clandestinum con el 100% de aire.

$$n = \frac{m}{PM}$$

Dónde:

n , es el número de moles de la sustancia

m , es la masa del combustible expresada en Kg.

PM , es el peso molecular expresado en Kg/Kmol.

$$PM_{PC} = 6.PM_C + 10.PM_H + 5.PM_O$$

Dónde:

PM_{PC} , peso molecular del Pennisetum Clandestinum.

$PM_C = 12,0107$, peso molecular del carbono.

$PM_H = 1,008$, peso molecular del hidrógeno.

$PM_O = 15,9994$, peso molecular del oxígeno.

$$PM_{PC} = (6.12,0107) + (10.1,008) + (5.15,9994)$$

$$PM_{PC} = 162,1412 \frac{Kg}{Kmol}$$

$$PM_p = 6.PM_{CO_2} + 5.PM_{H_2O} + 22,56.PM_{N_2}$$

Dónde:

PM_p , peso molecular de los productos de la combustión del Pennisetum
Clandestinum.

$$PM_{CO_2} = 44,01 \frac{Kg}{Kmol}, \text{ peso molecular del dióxido de carbono.}$$

$$PM_{H_2O} = 18,01528 \frac{Kg}{Kmol}, \text{ peso molecular del agua.}$$

$$PM_{N_2} = 28,0134 \frac{Kg}{Kmol}, \text{ peso molecular del nitrógeno.}$$

$$PM_p = (6,44,01) + (5,18,01528) + (22,56,28,0134)$$

$$PM_p = 986,1187 \frac{Kg}{Kmol}$$

$$PM_{aire} = 6 \cdot PM_{O_2} + 22,56 \cdot PM_{N_2}$$

Dónde:

PM_{aire} , peso molecular del 100% aire en la combustión del Pennisetum
Clandestinum.

$$PM_{O_2} = 31,9988 \frac{Kg}{Kmol}, \text{ peso molecular del oxígeno.}$$

$$PM_{N_2} = 28,0134 \frac{Kg}{Kmol}, \text{ peso molecular del nitrógeno.}$$

$$PM_{aire} = (6,31,9988) + (22,56,28,0134)$$

$$PM_{aire} = 823,9751 \frac{Kg}{Kmol}$$

$$RAC = \frac{PM_{aire}}{PM_{Combustible}}$$

Dónde:

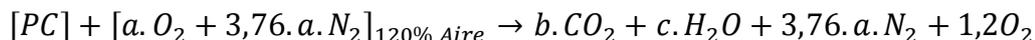
RAC , relación 100% aire – combustible.

$$RAC = \frac{823,9751}{162,1412}$$

$$RAC = 5,0818$$

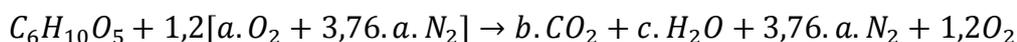
En condiciones teóricas con el 100% de aire, por la combustión de 1 Kg de
Pennisetum Clandestinum se requieren 5,0818 Kg de aire.

Considerando un exceso del 20% de aire, en estas condiciones se asemejan a las
condiciones reales de combustión del Pennisetum Clandestinum, se determina que:



Dónde:

$PC = C_6H_{10}O_5$, es fórmula empírica del Pennisetum Clandestinum.



$$PM_{p(120\%)} = 6 \cdot PM_{CO_2} + 5 \cdot PM_{H_2O} + 27,072 \cdot PM_{N_2} + 1,2 \cdot PM_{O_2}$$

Dónde:

$PM_{p(120\%)}$, peso molecular de los productos de la combustión del Pennisetum Clandestinum considerando un 20% de exceso de aire.

$$PM_{CO_2} = 44,01 \frac{Kg}{Kmol}, \text{ peso molecular del dióxido de carbono.}$$

$$PM_{H_2O} = 18,01528 \frac{Kg}{Kmol}, \text{ peso molecular del dióxido de agua.}$$

$$PM_{N_2} = 28,0134 \frac{Kg}{Kmol}, \text{ peso molecular del dióxido de nitrógeno.}$$

$$PM_{O_2} = 31,9988 \frac{Kg}{Kmol}, \text{ peso molecular del dióxido de oxígeno.}$$

$$PM_{p(120\%)} = (6 \cdot 44,01) + (5 \cdot 18,01528) + (27,072 \cdot 28,0134) + (1,2 \cdot 31,9988)$$

$$PM_{p(120\%)} = 1150,9137 \frac{Kg}{Kmol}$$

$$PM_{120\% \text{ aire}} = 7,2 \cdot PM_{O_2} + 27,072 \cdot PM_{N_2}$$

Dónde:

PM_{aire} , peso molecular del 120% aire en la combustión del Pennisetum Clandestinum.

$$PM_{N_2} = 28,0134 \frac{Kg}{Kmol}, \text{ peso molecular del dióxido de nitrógeno.}$$

$$PM_{O_2} = 31,9988 \frac{Kg}{Kmol}, \text{ peso molecular del dióxido de oxígeno.}$$

$$PM_{120\% \text{ aire}} = (7,2 \cdot 31,9988) + (27,072 \cdot 28,0134)$$

$$PM_{120\% \text{ aire}} = 988,7701 \frac{Kg}{Kmol}$$

$$RAC_{120\% \text{ aire}} = \frac{PM_{120\% \text{ aire}}}{PM_{PC}}$$

Dónde:

$RAC_{120\% \text{ aire}}$, relación 120% aire – combustible.

$$PM_{PC} = 162,1412 \frac{Kg}{Kmol}$$

$$RAC_{120\% \text{ aire}} = \frac{988,7701}{162,1412}$$

$$RAC_{120\% \text{ aire}} = 6,0982$$

En condiciones reales, con un exceso del 20% de aire, se determina que para combustionar de 1 Kg de Pennisetum Clandestinum se requieren 6,0982 Kg de aire.

En la Tabla 16, se describen las entalpías de los productos de combustión del Pennisetum Clandestinum en estado compactado, considerando una combustión con

el 120% de aire, a una temperatura de salida de gases del intercambiador de calor ($T_{ho} = 53,30 \text{ }^\circ\text{C}$) y a la temperatura de ambiente ($T_{amb} = 23,34 \text{ }^\circ\text{C}$).

Tabla 16

Entalpías de los productos de la combustión en estado compactado

Referencia	h a T_{amb} (KJ/Kmol)	h a T_{ho} (KJ/Kmol)
CO_2	9364	11862
H_2O	9904	11077
O_2	8682	9707
N_2	8669	9589

Fuente: (Potter & Somerton, 2004)

Con el 120% de aire, se ha definido la ecuación de la combustión del Pennisetum Clandestinum, como:



Dónde:

$6CO_2 + 5H_2O + 27,072N_2 + 1,2O_2$, son los productos de la combustión.

$T_{ho} = 326,45 \text{ }^\circ\text{K}$, es la temperatura de salida de gases del IC.

$T_{ci} = T_{amb} = 296,49 \text{ }^\circ\text{K}$, es la temperatura de ingreso de aire al IC.

$$H_{Productos} = H_{CO_2} + H_{H_2O} + H_{N_2} + H_{O_2}$$

Dónde:

$H_{Productos}$, es la entalpía de los productos de la combustión.

H_{CO_2} , es la entalpía del dióxido de carbono.

$$H_{CO_2} = H_{CO_2 \text{ a } T_{ho}} - H_{CO_2 \text{ a } T_{amb}}$$

$$H_{CO_2} = 11862 - 9364$$

$$H_{CO_2} = 2498 \frac{KJ}{Kmol}$$

H_{H_2O} , es la entalpía del agua.

$$H_{H_2O} = H_{H_2O \text{ a } T_{ho}} - H_{H_2O \text{ a } T_{amb}}$$

$$H_{H_2O} = 11077 - 9904$$

$$H_{H_2O} = 1173 \frac{KJ}{Kmol}$$

H_{N_2} , es la entalpía del nitrógeno.

$$H_{N_2} = H_{N_2 \text{ a } T_{ho}} - H_{N_2 \text{ a } T_{amb}}$$

$$H_{N_2} = 9589 - 8669$$

$$H_{N_2} = 920 \frac{KJ}{Kmol}$$

H_{O_2} , es la entalpía del oxígeno.

$$H_{O_2} = H_{O_2 a T_{ho}} - H_{O_2 a T_{amb}}$$

$$H_{O_2} = 9707 - 8682$$

$$H_{O_2} = 1025 \frac{KJ}{Kmol}$$

$$H_{Productos} = 2498 + 1173 + 920 + 1025$$

$$H_{Productos} = 5616 \frac{KJ}{Kmol}$$

$$RPCC_{120\% \text{ aire}} = \frac{PM_p}{PM_{PC}}$$

Dónde:

$RPCC_{120\% \text{ aire}}$, relación gases de la combustión – combustible.

$PM_p = 1150,9137 \frac{Kg}{Kmol}$, peso molecular de los productos de la combustión con el aire a un 120%.

$PM_{PC} = 162,1412 \frac{Kg}{Kmol}$, peso molecular del Pennisetum Clandestinum.

$$RPCC_{120\% \text{ aire}} = \frac{1150,9137}{162,1412}$$

$$RPCC_{120\% \text{ aire}} = 7,0982$$

En condiciones reales de aire, se determina que por la combustión de 1 Kg de Pennisetum Clandestinum en estado compactado se producen 7,0982 Kg de gases de producto de la combustión.

$$Qg = H_{Productos} \cdot F_{moles}$$

Dónde:

Qg , calor perdido por los gases de la combustión.

$F_{moles} = 0,086 \text{ Kmol}$, factor de corrección molar.

$$Qg = (5616) \cdot (0,086) \text{ KJ}$$

$$3,6 \cdot 10^6 \text{ J} = 1000 \text{ Wh}$$

$$Qg = 482,976 \text{ KJ} \cdot \frac{1000 \text{ Wh} \cdot 1000 \text{ J}}{3,6 \cdot 10^6 \text{ J} \cdot 1 \text{ KJ}}$$

$$Qg = 134,16 \text{ Wh}$$

El calor perdido por los gases de la combustión, como resultado de la combustión del Pennisetum Clandestinum en estado compactado, en forma de briqueta, con un contenido de humedad final inferior al 12% ($X_{wf} = 2,86\%$), es aproximadamente 0,13 KWh.

El calor perdido en las cenizas residuales producto de la combustión (Q_{cen}), se genera cuando se descarga la ceniza desde la cámara de combustión hacia la parte inferior de la cámara, esta lleva una cantidad de calor (ver figura 46).

$$\Delta T_{cen} = T_{cen} - T_{amb}$$

Dónde:

$T_{amb} = 23,34 \text{ } ^\circ\text{C}$, es la temperatura de ambiente.

$T_{cen} = 169,24 \text{ } ^\circ\text{C}$, es la temperatura de cenizas.

$$\Delta T_{cen} = 169,24 - 23,34$$

$$\Delta T_{cen} = \mathbf{145,90 \text{ } ^\circ\text{C}}$$

De acuerdo al estudio realizado por Choi y Okos en 1986 Effects of temperature on the thermal properties of food. Vol 1, “se determinan el calor específico de los alimentos en función de su temperatura”, el mismo que está expresado en $\text{J/Kg}^\circ\text{C}$.

$$cp_{cen} = 1092,60 + 1889,60 \cdot 10^{-3} \cdot T_{cen} - 3681,70 \cdot 10^{-6} \cdot T_{cen}^2$$

Dónde:

cp_{cen} , calor específico la temperatura de las cenizas T_{cen} .

$$cp_{cen} = 1092,60 + 1889,60 \cdot 10^{-3} \cdot (169,24) - 3681,70 \cdot 10^{-6} \cdot (169,24)^2$$

$$cp_{cen} = \mathbf{1036,94277 \frac{J}{Kg \cdot ^\circ\text{C}}}$$

$$Q_{cen} = m_{cen} \cdot cp_{cen} \cdot \Delta T_{cen}$$

Dónde:

Q_{cen} , calor perdido en las cenizas residuales producto de la combustión.

$m_{cen} = 1,616 \text{ Kg}$, masa promedio de las cenizas para el caso experimental.

$$Q_{cen} = (1,616) \cdot (1036,94277) \cdot (145,90)$$

$$Q_{cen} = 308143,6482 \text{ J} \cdot \frac{1000 \text{ Wh}}{3,6 \cdot 10^6 \text{ J}}$$

$$Q_{cen} = \mathbf{85,595 \text{ Wh}}$$

El calor perdido en las cenizas residuales producto de la combustión del Pennisetum Clandestinum cuando se encuentra en estado compactado, en forma de briqueta, con un contenido de humedad final inferior al 12% ($X_{wf} = 2,86\%$), es aproximadamente 0,0855 KWh.

El calor perdido por la combustión imperfecta mecánica (Q_{cim}), se lo determina a través del contenido medio de las sustancias inflamables ($Imed$) expresadas en tanto por ciento de la masa de los residuos generados en la combustión como son las cenizas y las escorias. Para simplificar su análisis se

considera que estos se componen de carbono con un calor de combustión igual a 32,65 MJ/Kg. (Baskakov, 1985)

$$Q_{cim} = \frac{32,65 \cdot Fim \cdot Imed}{100 \cdot (100 - Imed)}$$

Dónde:

Q_{cim} , es el calor generado por la combustión imperfecta mecánica.

$Imed = 10,60\%$, es el contenido medio de las sustancias inflamables equivalentes al contenido de cenizas presentes en el Pennisetum Clandestinum (ver tabla 6.)

$Fim = 6,10$, factor de conversión de la combustión imperfecta mecánica.

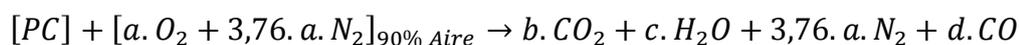
$$Q_{cim} = \frac{32,65 \cdot (6,10) \cdot (10,60)}{100 \cdot (100 - 10,60)}$$

$$Q_{cim} = 0,23614 \text{ MJ} \cdot \frac{1000 \text{ Wh}}{3,6 \cdot 10^6 \text{ J}} \cdot \frac{1 \cdot 10^6 \text{ J}}{1 \text{ MJ}}$$

$$\mathbf{Q_{cim} = 65,596 \text{ Wh}}$$

El calor perdido por la combustión imperfecta mecánica, como resultado de la combustión del Pennisetum Clandestinum en estado compactado, en forma de briqueta, con un contenido de humedad final inferior al 12% ($X_{wf} = 2,86\%$), es aproximadamente de 0,0655 KWh.

El calor perdido por la combustión incompleta (Q_{ci}), se genera por la presencia del monóxido de carbono (CO) en los productos de la combustión, cuando no se dispone del 100% de aire para la combustión. Para el caso experimental el Q_{ci} se lo determina considerando la combustión del Pennisetum Clandestinum con el 90% de aire.



Dónde:

$PC = C_6H_{10}O_5$, es fórmula empírica del Pennisetum Clandestinum.



$$m_{CO} = 1,2PM_{CO}$$

Dónde:

m_{CO} , es la masa del dióxido de carbono.

$PM_{CO} = 28,01$, es el peso molecular del dióxido de carbono.

$$m_{CO} = 1,2 \cdot (28,01)$$

$$\mathbf{m_{CO} = 33,612 \text{ g}}$$

$$M_{CO} = \text{moles} \cdot m_{CO}$$

Dónde:

M_{CO} , es la masa molecular del dióxido de carbono.

$$\text{moles} = 86$$

$$M_{CO} = 86 \cdot (36,612)$$

$$M_{CO} = 2890,632 \text{ g}$$

$$\mathbf{M_{CO} = 2,890 \text{ Kg}}$$

$$V_{CO} = \frac{M_{CO}}{\delta_{CO}}$$

Dónde:

V_{CO} , volumen que ocupa el dióxido de carbono en la cámara de combustión.

$$\delta_{CO} = 1,145 \frac{\text{Kg}}{\text{m}^3}, \text{ densidad del dióxido de carbono.}$$

$$V_{CO} = \frac{2,890}{1,145}$$

$$\mathbf{V_{CO} = 2,524 \text{ m}^3}$$

De acuerdo a Baskakov (1985), “la temperatura teórica de combustión del dióxido de carbono (CO) es de 2643 °K” (p. 225).

$$\mathbf{h_{CO_1} = 88991 \frac{KJ}{Kmol}}, \text{ entalpía del dióxido de carbono.}$$

La estequiometría del Pennisetum Clandestinum con un 90% de aire, determina que en la combustión de 1 Kmol de celulosa ($C_6H_{10}O_5$) que se producen 1,2 Kmol de CO, y para que 0,086 Kmol de celulosa se obtienen 0,1032 Kmol de CO.

$$Q_{Ci1} = h_{CO_1} \cdot (0,1032)$$

$$Q_{Ci1} = (88991) \cdot (0,1032)$$

$$Q_{Ci1} = 9183,8712 \text{ KJ} \cdot \frac{1000 \text{ Wh}}{3,6 \cdot 10^6 \text{ J}} \cdot \frac{1000 \text{ J}}{1 \text{ KJ}}$$

$$\mathbf{Q_{Ci1} = 2551,075 \text{ Wh}}$$

El calor perdido por la combustión incompleta es aproximadamente de 2,5 KWh para la temperatura teórica de combustión de 2643 °K. Considerando que el Pennisetum Clandestinum se inflama a temperaturas mayores de 650 °C y que la temperatura de combustión de la cámara de combustión es de 850 °C, el calor perdido por la combustión incompleta real, a una temperatura real de combustión del CO de 1123,15 °K, de acuerdo por Baskakov (p. 225), se tiene:

$$\mathbf{h_{CO} = 34492,35 \frac{KJ}{Kmol}}, \text{ es la entalpía del CO a la temperatura de 1123,15 °K.}$$

$$Q_{ci} = h_{co} \cdot (0,1032)$$

Dónde:

Q_{ci} , es el calor perdido por la combustión incompleta.

$$Q_{ci} = (34492,35) \cdot (0,1032)$$

$$Q_{ci} = 3559,61 \text{ KJ} \cdot \frac{1000 \text{ Wh}}{3,6 \cdot 10^6 \text{ J}} \cdot \frac{1000 \text{ J}}{1 \text{ KJ}}$$

$$\mathbf{Q_{ci} = 988,78 \text{ Wh}}$$

El calor perdido por la combustión incompleta del Pennisetum Clandestinum en estado compactado, en forma de briqueta, con un contenido de humedad final inferior al 12% ($X_{wf} = 2,86\%$), es aproximadamente de 0,988 KWh.

El calor perdido por los cambios de aire en la cámara de combustión (Q_{pca}), se presenta durante la apertura y cierre de la compuerta de la cámara de combustión, debido, a que se deben realizar la respectiva toma de lectura de las temperaturas presentes en el proceso de la combustión. El Q_{pca} es la cantidad de calor que se transfiere desde el interior de la cámara de combustión hacia el ambiente cuando se realiza la apertura de la puerta de la cámara de combustión.

$$\Delta T_{ca} = T_{hi} - T_{amb}$$

Dónde:

ΔT_{ca} , es el delta de temperatura generado por los cambios de aire.

$T_{amb} = 23,34 \text{ }^\circ\text{C} = 296,49 \text{ }^\circ\text{K}$, es la temperatura ambiente.

$T_{hi} = 259,01 \text{ }^\circ\text{C} = 532,16 \text{ }^\circ\text{K}$, es la temperatura interna del aire de la cámara.

$$\Delta T_{ca} = 532,16 - 296,49$$

$$\mathbf{\Delta T_{ca} = 235,67 \text{ }^\circ\text{K}}$$

$$V_a = \text{altura} \cdot \text{ancho} \cdot \text{profundidad}$$

Dónde:

V_a , volumen de la cámara de combustión.

$\text{altura} = 0,68 \text{ m}$, altura de la cámara de combustión.

$\text{ancho} = 0,58 \text{ m}$, ancho de la cámara de combustión.

$\text{profundidad} = 0,78 \text{ m}$, profundidad de la cámara de combustión.

$$V_a = (0,68) \cdot (0,58) \cdot (0,78)$$

$$\mathbf{V_a = 0,3076 \text{ m}^3}$$

$$Q_{cpa} = N_{ca} \cdot \delta a \cdot V_a \cdot C_{pa} \cdot \Delta T_{ca}$$

Dónde:

Q_{cpa} , es el calor perdido por cambios de aire en la cámara de combustión.

$N_{ca} = 3$, es el número de cambios de aire por hora, caso experimental.

$\delta a = 1,1906 \frac{Kg}{m^3}$, es la densidad del aire a la temperatura ambiente.

$C_{pa} = 1007 \frac{J}{Kg^{\circ}K}$, es el calor específico del aire a la temperatura ambiente.

$$Q_{cpa} = (3) \cdot (1,1906) \cdot (0,3076) \cdot (1007) \cdot (235,67)$$

$$Q_{cpa} = 260739,74498 J \cdot \frac{1000 Wh}{3,6 \cdot 10^6 J}$$

$$\mathbf{Q_{cpa} = 72,427 Wh}$$

El calor perdido por los cambios de aire en la cámara de combustión, como resultado de la combustión del Pennisetum Clandestinum en estado compactado, en forma de briqueta, con un contenido de humedad final inferior al 12% ($X_{wf} = 2,86\%$), es aproximadamente de 0,072 KWh.

El calor de la reacción por la combustión del Pennisetum Clandestinum en estado compactado ($Q_{r_{compactado}}$), es el resultado del balance energético presente en la cámara de combustión cuando se combustiona el Pennisetum Clandestinum en estado compactado, en forma de briqueta, con un contenido de humedad final inferior al 12% ($X_{wf} = 2,86\%$).

$$Q_{r_{compactado}} = Q_p + Q_u + Q_a + Q_g + Q_{cen} + Q_{cim} + Q_{ci} + Q_{pca}$$

Dónde:

$Q_p = 1177,01 Wh$, calor perdido en las paredes de la cámara de combustión.

$Q_u = 8081,91 Wh$, calor útil de la cámara de combustión.

$Q_a = 4085,34 Wh$, calor almacenado en la cámara de combustión.

$Q_g = 134,16 Wh$, calor perdido por los gases de la combustión.

$Q_{cen} = 85,595 Wh$, calor perdido en las cenizas residuales producto de la combustión.

$Q_{cim} = 65,596 Wh$, calor perdido por la combustión imperfecta mecánica.

$Q_{ci} = 988,78 Wh$, calor perdido por la combustión incompleta.

$Q_{pca} = 72,427 Wh$, calor perdido por los cambios de aire en la cámara de combustión.

$$Q_{r_{compactado}} = (1177,01) + (8081,91) + (4085,34) + (134,16) + (85,595) \\ + (65,596) + (988,78) + (72,427)$$

$$\mathbf{Q_{r_{compactado}} = 14690,818 Wh}$$

En condiciones estables para la combustión de 4,66 Kg/h del Pennisetum Clandestinum en estado compactado, en forma de briqueta, con un contenido de humedad final inferior al 12% ($X_{wf} = 2,86\%$), el calor de la reacción es aproximadamente 14,69 KWh.

4.7.2 Combustión en estado granulado

En la tabla 10, se describen los parámetros del proceso de secado para el Pennisetum Clandestinum en estado granulado, con una granulometría inferior a 1 mm, de la cual se emplearán los valores del coeficiente de humedad final (X_{wf}) de 3,28%. Para el caso experimental, el promedio de la masa quemada en la cámara de combustión es de 5,82 Kg por hora (ver tabla 67). El calor de la reacción de la combustión del Pennisetum Clandestinum en estado granulado ($Q_{rgranulado}$) se lo determina con el siguiente análisis cuantitativo.

Calor perdido en las paredes laterales de la cámara de combustión (Q_p), es el flujo de calor que atraviesa a las paredes de la cámara de combustión desde el interior de la cámara hacia el exterior y que se disipa en el ambiente. De la figura 43, se determina:

$$A_t = 1,8496 \text{ m}^2, \text{ área total de las paredes de la cámara de combustión.}$$

En las condiciones ambientales para el caso experimental de la combustión en estado granulado se tiene:

$$\Delta T = T_c - T_{amb}$$

Dónde:

ΔT , es la variación de la temperatura – ambiente.

$$T_{amb} = 22,21 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$T_c = 850 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$\Delta T = 850 - 23,34$$

$$\Delta T = \mathbf{827,79 \text{ } ^\circ\text{C}}$$

De acuerdo a la fórmula de Wattmuff se puede calcular el coeficiente de convección externa (h_o), con la siguiente expresión:

$$h_o = 2,8 + 3v$$

Dónde:

v , es la velocidad del viento en expresada m/s.

h_o , es el coeficiente de convección externa expresado en $W/m^2\text{°C}$.

Se tiene que:

$v = 1,255 \frac{m}{s}$, velocidad promedio del viento externo a la cámara de combustión

$$h_o = 2,8 + 3 \cdot (1,255)$$

$$h_o = 6,565 \frac{W}{m^2\text{°C}}$$

De acuerdo con Vlassov (2001), “la velocidad de gases en el interior de una cámara de combustión se puede asumir de 1,00 m/s” (p.167).

Para el caso experimental se asumirá que la velocidad de gases al interior de la cámara es de 1,00 m/s, la temperatura promedio de los gases de salida (Th_i) es de 273,30 °C, considerando que el Pennisetum Clandestinum se encuentra en estado granulado y su temperatura del lecho varía entre 600°C y 800°C.

En éstas condiciones, de acuerdo con Cengel (2011), en la tabla A-15, a 250 °C la viscosidad cinemática del aire caliente es de $4,091 \cdot 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$, y a 300 °C la viscosidad cinemática del aire caliente es de $4,765 \cdot 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$. (Cengel, 2011)

La viscosidad del aire caliente (γg) a la temperatura de 273,30 °C se la determina utiliza la ecuación de interpolación lineal:

$$y(x_*) = y_{k-1} + \frac{x_* - x_{k-1}}{x_k - x_{k-1}} \cdot (y_k - y_{k-1})$$

Dónde:

$x_k = 300 \text{ °C}$, temperatura superior.

$x_{k-1} = 250 \text{ °C}$, temperatura inferior.

$x_* = 273,30 \text{ °C}$, temperatura de estudio.

$y_k = 4,765 \cdot 10^{-5} \frac{m^2}{s}$, viscosidad del aire a temperatura superior.

$y_{k-1} = 4,091 \cdot 10^{-5} \frac{m^2}{s}$, viscosidad del aire a temperatura inferior.

$$y(x_*) = 4,091 \cdot 10^{-5} + \frac{(273,30 - 250)}{(300 - 250)} \cdot (4,765 \cdot 10^{-5} - 4,091 \cdot 10^{-5})$$

$$y(x_*) = 4,405 \cdot 10^{-5} \frac{m^2}{s}$$

$\gamma g = 4,405 \cdot 10^{-5} \frac{m^2}{s}$, viscosidad del aire caliente a temperatura de 273,30 °C.

El número de Reynolds (Re), es un número adimensional utilizado para caracterizar el movimiento de los fluidos, para el caso experimental caracteriza el movimiento de los gases al interior de la cámara de combustión durante la transferencia de calor.

$$A_g = \text{ancho} \times \text{profundidad}$$

Dónde:

A_g , área de gases al interior de la cámara de combustión.

$\text{ancho} = 0,58 \text{ cm}$, ancho de la cámara de combustión.

$\text{profundidad} = 0,78 \text{ cm}$, profundidad de la cámara de combustión.

$$A_g = (0,58) \cdot (0,78)$$

$$\mathbf{A_g = 0,4524 \text{ m}^2}$$

$$\text{Perímetro} = 2 \cdot \text{ancho} + 2 \cdot \text{profundidad}$$

Dónde:

Perímetro , es el perímetro interior de la cámara de combustión.

$$\text{Perímetro} = (2 \cdot 0,58) + (2 \cdot 0,78)$$

$$\mathbf{\text{Perímetro} = 2,72 \text{ m}}$$

$$Dh = \frac{4 \cdot A_g}{\text{Perímetro}}$$

Dónde:

Dh , es el diámetro hidráulico de la cámara de combustión.

$$Dh = \frac{4 \cdot (0,4524)}{2,72}$$

$$\mathbf{Dh = 0,655 \text{ m}}$$

$$Re = \frac{v_w \cdot Dh}{\gamma g}$$

Dónde:

$v_w = 1,00 \frac{\text{m}}{\text{s}}$, es la velocidad de los gases en la cámara de combustión.

$$Re = \frac{(1,00) \cdot (0,655)}{4,405 \cdot 10^{-5}}$$

$$\mathbf{Re = 14869,46 = 14,87 \times 10^3}$$

Considerando que la velocidad de los gases dentro de la cámara de combustión es de 1,00 m/s, el proceso de combustión se encuentra en un régimen de transición por lo que mediante la variación de la velocidad del ventilador de la cámara de combustión se puede incrementar la velocidad de los gases de 2,00 m/s a 4,00 m/s, con lo que se consigue entrar en un régimen de convección forzada de flujo turbulento.

$$Re = \frac{v_w \cdot Dh}{\gamma g}$$

Dónde:

$v_w = 2,00 \frac{m}{s}$, es la velocidad de los gases en flujo turbulento.

$$Re = \frac{(2,00) \cdot (0,655)}{4,405 \cdot 10^{-5}}$$

$$Re = 29738,93 = 29,73 \times 10^3$$

El número de Nusselt (Nu_{Dh}) es un número adimensional que mide el aumento de la transmisión de calor desde una superficie, por lo que un fluido discurre (transferencia de calor por convección) comparada con la transferencia de calor si ésta ocurriera solamente por conducción, para el caso experimental caracteriza el aumento de la transmisión de calor para el diámetro hidráulico de la cámara de combustión.

$$Nu_{Dh} = 0,023 \cdot Re^{0,8} \cdot Pr^n$$

Dónde:

Nu_{Dh} , número de Nusselt para el diámetro hidráulicos de la cámara combustión.

Re , número de Reynolds considerando un régimen de convección forzada de flujo turbulento.

Pr , número de Prandtl.

Esta correlación es válida para rangos $0,7 < Pr < 160$, $Re > 10000$.

n , el exponente de Pr tiene un valor de $n=0,3$ cuando el fluido se enfría y $n=0,4$ cuando el fluido se calienta.

Para el caso experimental, se determina que:

$Re = 29738,65$, con velocidad de gases de 2,00 m/s.

$$Pr = 0,7$$

$$n = 0,4$$

$$Nu_{Dh} = 0,023 \cdot (29738,65)^{0,8} \cdot (0,7)^{0,4}$$

$$Nu_{Dh} = 75,58$$

El número de Nusselt en función del coeficiente de convección interna hi , se lo determina relacionando el diámetro hidráulico y la conductividad térmica del gas.

$$Nu_{Dh} = \frac{hi \cdot Dh}{k_{gas}}$$

Dónde:

hi , es el coeficiente de convección interna expresada en $W/m^2 \cdot ^\circ C$.

k_{gas} , es la conductividad térmica del gas de la cámara de combustión expresada en $W/m \cdot ^\circ C$.

Dh , es el diámetro hidráulico de la cámara de combustión expresado en m^2 .

Nu_{Dh} , número de Nusselt para el diámetro hidráulico de la cámara de combustión.

$$Dh = 0,655 \text{ m}$$

$$k_{gas} = 0,00722 \frac{W}{m^{\circ}C}$$

$$Nu_{Dh} = 75,58$$

$$hi = \frac{Nu_{Dh} \cdot k_{gas}}{Dh}$$

$$hi = \frac{(75,58) \cdot (0,0722)}{0,655}$$

$$hi = 8,331 \frac{W}{m^2 \cdot C}$$

$$\sigma = 5,67037 \cdot 10^{-8} \frac{W}{m^2 \cdot K^4}, \text{ es la constante de Stefan - Boltzmann.}$$

$$\epsilon m = 0,9, \text{ (Salvi; 2000, p. 145).}$$

Considerando la combustión del Pennisetum Clandestinum en estado granulado con un contenido de humedad final de $X_{wf} = 3,28\%$, se determina:

$$hir = \frac{\sigma \cdot \epsilon m \cdot [(Thi+273,15)^4 - (Tpi+273,15)^4]}{(Thi+273,15) - (Tpi+273,15)}$$

Dónde:

hir , es el coeficiente de transferencia de calor por radiación.

$Tpi = 203,60 \text{ }^{\circ}C$, es la temperatura promedio interna de pared.

$Thi = 273,30 \text{ }^{\circ}C$, es la temperatura promedio salida de gases.

$$hir = \frac{(5,67037 \cdot 10^{-8}) \cdot (0,9) \cdot [(273,30+273,15)^4 - (203,60+273,15)^4]}{(273,30+273,15) - (203,60+273,15)}$$

$$hir = 27,46 \frac{W}{m^2 \cdot K} \cdot \frac{274,15 \text{ }^{\circ}K}{1 \text{ }^{\circ}C}$$

$$hir = 7528,16 \frac{W}{m^2 \cdot C}$$

Para la pared plana compuesta de la cámara de combustión se define:

$$U = \frac{1}{\left(\frac{1}{hi+hir}\right) + \left(\frac{eR}{kR}\right) + \left(\frac{ea1}{ka1}\right) + \left(\frac{el}{kl}\right) + \left(\frac{ea2}{ka2}\right) + \left(\frac{1}{ho}\right)}$$

Dónde:

U , coeficiente global de transferencia de calor.

$hi = 8,331 \frac{W}{m^2 \cdot C}$, coeficiente de convección interna.

$hir = 7528,16 \frac{W}{m^2 \cdot C}$, coeficiente de transferencia de calor por radiación.

$ho = 6,565 \frac{W}{m^2 \cdot C}$, coeficiente de convección externa.

$eR = 0,0650 \text{ m}$, espesor del ladrillo refractario.

$ea1 = 0,0003 \text{ m}$, espesor de acero 1.

$el = 0,0460 \text{ m}$, espesor de la lana de vidrio.

$ea2 = 0,0001 \text{ m}$, espesor de acero 2.

$kR = 0,850 \frac{W}{m^2 \cdot ^\circ C}$, conductividad del ladrillo refractario.

$ka1 = 48,80 \frac{W}{m^2 \cdot ^\circ C}$, conductividad del acero 1.

$kl = 0,043 \frac{W}{m^2 \cdot ^\circ C}$, conductividad de la lana de vidrio.

$ka2 = 48,80 \frac{W}{m^2 \cdot ^\circ C}$, conductividad del acero 2.

$$U = \frac{1}{\left(\frac{1}{8,331+7528,16}\right) + \left(\frac{0,0650}{0,850}\right) + \left(\frac{0,0003}{48,80}\right) + \left(\frac{0,0460}{0,043}\right) + \left(\frac{0,0001}{48,80}\right) + \left(\frac{1}{6,565}\right)}$$

$$U = 0,7698 \frac{Wh}{m^2 \cdot ^\circ C}$$

$$Qp = U \cdot At \cdot \Delta T$$

Dónde:

Qp , calor perdido en las paredes laterales de la cámara de combustión.

$At = 1,8496 \text{ m}^2$, área total de las paredes de la cámara de combustión.

$U = 0,7698 \frac{Wh}{m^2 \cdot ^\circ C}$, coeficiente global de transferencia de calor.

$\Delta T = 827,79 \text{ } ^\circ C$, es la variación de la temperatura – ambiente.

$$Qp = (0,7698) \cdot (1,8496) \cdot (827,79)$$

$$Qp = 1178,62 \text{ Wh}$$

El calor perdido en las paredes de la cámara de combustión, resultado de la combustión el Pennisetum Clandestinum en estado granulado (granulometría inferior a 1 mm), con un contenido de humedad final inferior al 12% ($X_{wf} = 3,28\%$), es aproximadamente de 1,17 KWh.

El calor útil de la cámara de combustión (Qu), se lo determina apoyándose en la teoría desarrollada por E.D. Grimson, para haces de tubos en flujo transversal. El intercambiador de calor del horno de combustión de biomasa, está constituido por tres pasos de aire de proceso por el sector de tubos y un paso de aire caliente por la carcasa. (Pitts & Sissom, 1979)

En la figura 45, se visualiza el intercambiador de calor de tubos escalonados del horno de combustión de biomasa. Para determinar el paso del aire en los tubos escalonados, se toma el valor entre las siguientes expresiones.

$$F_1 = \frac{a-D}{2}$$

$$F_2 = \sqrt{\left(\frac{a}{2}\right)^2 + b^2}$$

De acuerdo con el análisis de Baskakov (1985), en Termotecnia “las velocidades normales de llama en un proceso varían entre 0,3 m/s a 0,5 m/s”. Para el caso experimental se considera el valor de 0,5 m/s.

Dónde:

$$a = 0,0375 \text{ m}$$

$$b = 0,0375 \text{ m}$$

$$D = 0,0254 \text{ m}$$

$$F_1 = \frac{0,0375 - 0,0254}{2}$$

$$F_1 = 6,05 \cdot 10^{-3} \text{ m}$$

$$F_2 = \sqrt{\left(\frac{0,0375}{2}\right)^2 + (0,0375)^2}$$

$$F_2 = 17 \cdot 10^{-3} \text{ m}$$

$$v_{max} = \frac{V_{\infty} \cdot a}{2 \cdot F}$$

Dónde:

v_{max} , es la velocidad del aire caliente dentro del intercambiador.

$$F = F_1$$

$$V_{\infty} = 0,5 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

$$v_{max} = \frac{V_{\infty} \cdot a}{2 \cdot F_1} = \frac{(0,5) \cdot (0,0375)}{2 \cdot (6,05 \cdot 10^{-3})}$$

$$v_{max} = 1,55 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

Hay que considerar que el acero cuando su temperatura es superior a los 400 °C pierde sus propiedades mecánicas, para el caso experimental se han determinado que la temperatura promedio de los gases de salida (Th_i) de la cámara de combustión es de 273,30 °C, considerando que la combustión del Pennisetum Clandestinum se da en estado granuloso (granulometría inferior a 1 mm), con un contenido de humedad final $X_{wf} = 3,28\%$.

En éstas condiciones, las propiedades termo físicas del aire caliente que atraviesa los tubos escalonados del intercambiador de calor, se las determina apoyándose en la ecuación de interpolación lineal y con los datos termo físicos del aire descritos en la tabla A-15 de Cengel. (Cengel, 2011)

$$y(x_*) = y_{k-1} + \frac{x_* - x_{k-1}}{x_k - x_{k-1}} \cdot (y_k - y_{k-1})$$

Dónde:

$x_k = 300 \text{ }^\circ\text{C}$, temperatura superior.

$x_{k-1} = 250 \text{ }^\circ\text{C}$, temperatura inferior

$x_* = 273,30 \text{ }^\circ\text{C}$, temperatura de estudio.

Para γ_{gases}

$$y_k = 4,765 \cdot 10^{-5} \frac{\text{m}^2}{\text{s}}$$

$$y_{k-1} = 4,091 \cdot 10^{-5} \frac{\text{m}^2}{\text{s}}$$

$$y(x_*) = 4,091 \cdot 10^{-5} + \frac{(273,30-250)}{(300-250)} \cdot (4,765 \cdot 10^{-5} - 4,091 \cdot 10^{-5})$$

$$y(x_*) = \mathbf{4,405 \cdot 10^{-5} \frac{\text{m}^2}{\text{s}}}$$
, es la γ_{gases} a la temperatura de estudio.

Para C_p

$$y_k = 1044 \frac{\text{J}}{\text{Kg}^\circ\text{K}}$$

$$y_{k-1} = 1033 \frac{\text{J}}{\text{Kg}^\circ\text{K}}$$

$$y(x_*) = 1033 + \frac{(273,30-250)}{(300-250)} \cdot (1044 - 1033)$$

$$y(x_*) = \mathbf{1038,12 \frac{\text{J}}{\text{Kg}^\circ\text{K}}}$$
, es el C_p a la temperatura de estudio.

Para k_{gases}

$$y_k = 0,04418 \frac{\text{W}}{\text{m}^\circ\text{K}}$$

$$y_{k-1} = 0,04104 \frac{\text{W}}{\text{m}^\circ\text{K}}$$

$$y(x_*) = 0,04104 + \frac{(273,30-250)}{(300-250)} \cdot (0,04418 - 0,04104)$$

$$y(x_*) = \mathbf{0,042503 \frac{\text{W}}{\text{m}^\circ\text{K}}}$$
, es la k_{gases} a la temperatura de estudio.

Para Pr

$$y_k = 0,6935$$

$$y_{k-1} = 0,6949$$

$$y(x_*) = 0,6946 + \frac{(273,30-250)}{(300-250)} \cdot (0,6935 - 0,6949)$$

$$y(x_*) = \mathbf{0,693947}$$
, es el Pr a la temperatura de estudio.

En resumen se tiene:

$Th_i = 273,30 \text{ }^\circ\text{C}$, es la temperatura promedio de salida de los gases de cámara.

$\gamma_{gases} = 4,405 \cdot 10^{-5} \frac{m^2}{s}$, es la viscosidad cinemática del aire.

$C_p = 1038,12 \frac{J}{Kg^\circ K}$, es el calor específico del aire.

$k_{gases} = 0,042503 \frac{W}{m^\circ K}$, es la conductividad térmica del aire.

$Pr = 0,693947$, es el número de Prandtl.

Determinando el número de Reynolds:

$$Re_{max} = \frac{v_{max} \cdot D}{\gamma_{gases}}$$

Dónde:

$v_{max} = 1,55 \frac{m}{s}$, es la velocidad del aire caliente dentro del intercambiador.

$$D = 0,0254 \text{ m}$$

$$Re_{max} = \frac{(1,55) \cdot (0,0254)}{4,405 \cdot 10^{-5}}$$

$$Re_{max} = \mathbf{893,75}$$

De acuerdo con Pitts (1979) en la tabla 7.7, para tubos escalonados $C1 = 0,460$, $n2 = 0,562$ (p. 177). (Pitts & Sissom, 1979)

$$ho_i = \frac{C1 \cdot (Re_{max})^{n2} \cdot k_{gases}}{D}$$

Dónde:

ho_i , es el coeficiente de convección externa del intercambiador.

$$ho_i = \frac{(0,460) \cdot (893,75)^{0,562} \cdot (0,042503)}{0,0254}$$

$$ho_i = \mathbf{35,069} \frac{W}{m^2^\circ C}$$

La ecuación de Grimson está definida para haces de tubos escalonados considerando mínimo 10 tubos de profundidad. En nuestro caso práctico el intercambiador del horno de combustión de biomasa tiene 8 tubos de profundidad, por lo que se realizará el ajuste al valor del coeficiente de convección. (Pitts & Sissom, 1979)

$$\frac{h(8 \text{ tubos})}{h(10 \text{ tubos})} = 0,98$$

Dónde:

$h(8 \text{ tubos}) = 0,98 \cdot ho_i$, es el coeficiente de convección del intercambiador.

$$h(10 \text{ tubos}) = ho_i$$

$$h(8 \text{ tubos}) = 0,98 \cdot (35,069)$$

$$h(8 \text{ tubos}) = \mathbf{34,368} \frac{W}{m^2^\circ C}$$

En la figura 46, se representa el flujo de aire frío que ingresa al intercambiador de calor y el flujo de los gases calientes provenientes de la cámara de combustión que atraviesan al intercambiador de calor del horno de combustión de biomasa. Este flujo caliente – frío, se produce durante el proceso de la combustión siempre y cuando el ventilador axial ingrese el aire frío (aire a temperatura ambiente) al intercambiador de calor. En el intercambiador de calor se presentan cuatro temperaturas y velocidades, así:

- Temperatura y velocidad de aire frío que ingresa al intercambiador.
- Temperatura y velocidad de aire calentado que sale del intercambiador.
- Temperatura y velocidad de gases calientes provenientes de la cámara de combustión que atraviesan el intercambiador.
- Temperatura y velocidad de gases enfriados que salen por la chimenea una vez que atraviesan el intercambiador de calor.

En la figura 47, se representa a través de un diagrama las temperaturas y velocidades presentes en el intercambiador de calor descritas en la figura 46.

Dónde:

T_{hi} , es la temperatura de los gases de entrada al intercambiador de calor.

T_{ho} , es la temperatura de los gases de salida del intercambiador de calor.

T_{ci} , es la temperatura del aire de entrada al intercambiador de calor.

T_{co} , es la temperatura del aire de salida del intercambiador de calor.

V_{hi} , es la velocidad de los gases de entrada al intercambiador de calor.

V_{ho} , es la velocidad de los gases de salida del intercambiador de calor.

V_{ci} , es la velocidad del aire de entrada al intercambiador de calor.

V_{co} , es la velocidad del aire de salida del intercambiador de calor.

En la figura 48, se representa la variación de las temperaturas de entrada de los gases y del aire presentes en el intercambiador de calor descritas en la figura 47, de la cual, se generan dos deltas de temperaturas que permiten determinar la media logarítmica de la variación de la temperatura en el intercambiador de calor (IC), descrita por la siguiente expresión.

$$\Delta T_{ml} = \frac{\Delta T_2 - \Delta T_1}{\ln\left(\frac{\Delta T_2}{\Delta T_1}\right)}$$

Dónde.

$T_{hi} = 273,30 \text{ }^\circ\text{C}$, temperatura de ingreso de los gases al IC.

$T_{ho} = 54,60 \text{ }^\circ\text{C}$, temperatura de salida de los gases del IC.

$T_{ci} = T_{amb} = 22,21 \text{ }^\circ\text{C}$, temperatura de ingreso del aire al IC.

$T_{co} = 142,40 \text{ }^\circ\text{C}$, temperatura de salida del aire del IC.

$$\Delta T1 = T_{hi} - T_{co}$$

$$\Delta T1 = 273,30 - 142,40$$

$$\Delta T1 = 130,90 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$\Delta T2 = T_{ho} - T_{ci}$$

$$\Delta T2 = 54,60 - 22,21$$

$$\Delta T2 = 32,39 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$\Delta T_{ml} = \frac{\Delta T2 - \Delta T1}{\ln\left(\frac{\Delta T2}{\Delta T1}\right)}$$

Dónde:

ΔT_{ml} , es la media logarítmica de la variación de temperatura del IC.

$$\Delta T_{ml} = \frac{32,39 - 130,90}{\ln\left(\frac{32,39}{130,90}\right)}$$

$$\Delta T_{ml} = 70,536 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$A_{Tubos} = \#tubos \cdot \pi \cdot D \cdot Lo$$

Dónde:

A_{Tubos} , área de los tubos del intercambiador.

$$\#tubos = 384$$

$Lo = 0,78 \text{ m}$, longitud de los tubos del IC.

$D = 0,0254 \text{ m}$, diámetros de los tubos del IC.

$$A_{Tubos} = (384) \cdot \pi \cdot (0,0254) \cdot (0,78)$$

$$A_{Tubos} = 23,90 \text{ m}^2$$

El factor de corrección de la temperatura media logarítmica (F) para intercambiadores complejos de calor, se utiliza las siguientes expresiones.

$$R = \frac{T_{hi} - T_{ho}}{T_{co} - T_{ci}}$$

$$R = \frac{273,30 - 54,60}{142,60 - 22,21}$$

$$R = 1,816$$

$$P = \frac{T_{co} - T_{ci}}{T_{hi} - T_{ci}}$$

$$P = \frac{142,60 - 22,21}{273,30 - 22,21}$$

$$P = 0,479$$

$$F = \sqrt{\frac{R^2+1}{R-1}} \cdot \frac{\ln\left(\frac{1-P}{1-PR}\right)}{\ln\left(\frac{2-(PR)+1+\sqrt{R^2+1}}{2-(PR)+1-\sqrt{R^2+1}}\right)}$$

Dónde:

F , factor de conversión de la temperatura media logarítmica para intercambiadores complejos de calor.

$$F = \sqrt{\frac{(1,816)^2+1}{(1,816)-1}} \cdot \frac{\ln\left(\frac{1-0,479}{1-0,479 \cdot 1,816}\right)}{\ln\left(\frac{2-(0,479 \cdot 1,816)+1+\sqrt{(1,816)^2+1}}{2-(0,479 \cdot 1,816)+1-\sqrt{(1,816)^2+1}}\right)}$$

$$F = 0,740$$

En la figura 49, se representa el corte transversal de un tubo escalonado del intercambiador de calor del horno de combustión de biomasa. En la cual se describen las dimensiones del tubo de acero que forman el haz escalonado del horno de combustión.

Dónde:

$L_o = 0,78$, es la longitud de un tubo escalonado del IC.

$D = 0,0254 \text{ m}$, es el diámetro externo del tubo escalonado del IC.

$D_i = 0,0224 \text{ m}$, es el diámetro interno del tubo escalonado del IC.

$e = 0,0015 \text{ m}$, es el espesor del tubo escalonado del IC.

$$L \text{ tubo} = 3 \cdot L_o$$

Dónde:

$L \text{ tubo}$, es la longitud total del tubo escalonado del IC.

$$L \text{ tubo} = 3 \cdot (0,78)$$

$$L \text{ tubo} = 2,34 \text{ m}$$

De acuerdo con Corvalan (1992) en la Ingeniería del secado solar, secadores de convección forzada, “para ductos escalonados de diámetro menores a 0,05 m, la velocidad de aire entre ellos varía entre 5 a 10 m/s²” (p. 8-5).

Para el caso experimental, se considera que en el intercambiador de calor del horno de combustión, el aire atraviesa por el interior del haz de los tubos escalonados con una velocidad de 10 m/s².

$$Tb = \frac{T_{ci} + T_{co}}{2}$$

Dónde:

Tb , es la temperatura media volumétrica.

$$Tb = \frac{22,21+142,40}{2}$$

$$Tb = 82,305 \text{ } ^\circ\text{C}$$

En éstas condiciones, las propiedades termo físicas del aire frío que atraviesa los tubos escalonados del intercambiador de calor, se las determina apoyándose en la ecuación de interpolación lineal y con los datos termo físicos del aire descritos en la tabla A-15 de Cengel. (Cengel, 2011)

$$y(x_*) = y_{k-1} + \frac{x_* - x_{k-1}}{x_k - x_{k-1}} \cdot (y_k - y_{k-1})$$

Dónde:

$$x_k = 90 \text{ } ^\circ\text{C}, \text{ temperatura superior.}$$

$$x_{k-1} = 80 \text{ } ^\circ\text{C}, \text{ temperatura inferior}$$

$$x_* = 82,305 \text{ } ^\circ\text{C}, \text{ temperatura de estudio.}$$

Para γ_{Tb}

$$y_k = 2,201 \cdot 10^{-5} \frac{m^2}{s}$$

$$y_{k-1} = 2,097 \cdot 10^{-5} \frac{m^2}{s}$$

$$y(x_*) = 2,097 \cdot 10^{-5} + \frac{(82,305-80)}{(90-80)} \cdot (2,201 \cdot 10^{-5} - 2,097 \cdot 10^{-5})$$

$$y(x_*) = 2,12 \cdot 10^{-5} \frac{m^2}{s}, \text{ es la } \gamma_{Tb} \text{ a la temperatura de estudio.}$$

Para Cp_{Tb}

$$y_k = 1008 \frac{J}{Kg^\circ K}$$

$$y_{k-1} = 1008 \frac{J}{Kg^\circ K}$$

$$y(x_*) = 1008 + \frac{(82,305-80)}{(90-80)} \cdot (1008 - 1008)$$

$$y(x_*) = 1008 \frac{J}{Kg^\circ K}, \text{ es el } Cp_{Tb} \text{ a la temperatura de estudio.}$$

Para $k_{gas Tb}$

$$y_k = 0,03024 \frac{W}{m^\circ K}$$

$$y_{k-1} = 0,02953 \frac{W}{m^\circ K}$$

$$y(x_*) = 0,02953 + \frac{(82,305-80)}{(90-80)} \cdot (0,03024 - 0,02953)$$

$$y(x_*) = 0,02969 \frac{W}{m^\circ K}, \text{ es la } k_{gas Tb} \text{ a la temperatura de estudio.}$$

Para Pr_{Tb}

$$y_k = 0,7132$$

$$y_{k-1} = 0,7154$$

$$y(x_*) = 0,7154 + \frac{(82,305-80)}{(90-80)} \cdot (0,7132 - 0,7154)$$

$y(x_*) = \mathbf{0,71489}$, es el Pr_{Tb} a la temperatura de estudio.

En resumen se tiene:

$Tb = 82,305 \text{ }^\circ\text{C}$, es la temperatura media volumétrica.

$\gamma_{Tb} = 2,12 \cdot 10^{-5} \frac{\text{m}^2}{\text{s}}$, es la viscosidad cinemática del aire en los tubos del IC.

$Cp_{Tb} = 1008 \frac{\text{J}}{\text{kg}^\circ\text{K}}$, es el calor específico del aire en los tubos del IC.

$k_{gas Tb} = 0,02969 \frac{\text{W}}{\text{m}^\circ\text{K}}$, es la conductividad térmica del aire en los tubos del IC.

$Pr_{Tb} = 0,71489$, es el número de Prandtl para el aire en los tubos del IC.

Determinando el número de Reynolds:

$$Re_{Di} = \frac{v_{tubo} \cdot Di}{\gamma_{Tb}}$$

Dónde:

$v_{tubo} = 10 \frac{\text{m}}{\text{s}}$, es la velocidad del aire dentro del intercambiador.

$Di = 0,0224 \text{ m}$, diámetro interno del tubo escalonado del IC.

$$Re_{Di} = \frac{(10) \cdot (0,0224)}{2,12 \cdot 10^{-5}}$$

$$\mathbf{Re_{Di} = 10566,03}$$

El valor del número de Reynolds es de 10566,03, por lo que se tiene convección forzada en flujo turbulento. Para éste régimen el número de Nusselt se determina con la ecuación de Dittus-Boelter. (Pitts & Sissom, 1979)

$$Nu_{Di} = \frac{hi_{Tb} \cdot Di}{k_{gas Tb}}$$

Dónde:

hi_{Tb} , es el coeficiente de convección interna de los tubos escalonados en flujo turbulento expresado en $\text{W}/\text{m}^2\text{ }^\circ\text{C}$.

$k_{gas Tb}$, es la conductividad térmica del aire en los tubos escalonados expresada en $\text{W}/\text{m}^\circ\text{C}$.

Di , es el diámetro interno de los tubos escalonados expresado en m^2 .

Nu_{Di} , es el número de Nusselt para el diámetro interno.

$$\frac{hi_{Tb} \cdot Di}{k_{gas Tb}} = 0,023 \cdot Re_{Di} \cdot Di^{0,8} \cdot Pr_{Tb}^{n1}$$

Dónde:

$n_1 = 0,4$, para escenarios con calentamiento de fluido.

$$hi_{Tb} = \frac{[0,023 \cdot Re_{Di} \cdot Di^{0,8} \cdot Pr_{Tb}^{n_1}] \cdot k_{gas} T_b}{Di}$$

$$hi_{Tb} = \frac{[(0,023) \cdot (10566,03) \cdot (0,0224)^{0,8} \cdot (0,71489)^{0,4}] \cdot (0,02969)}{0,0224}$$

$$hi_{Tb} = 13,486 \frac{W}{m^2 \cdot C}$$

De acuerdo con Pitts (1979), en Transferencia de calor, “El rendimiento de los intercambiadores de calor depende de que las superficies de transferencia de calor se encuentren limpias y libres de corrosión” (p. 248).

En la figura 50, se describen las secciones de un tubo escalonado del intercambiador de calor del horno de combustión de biomasa, con incrustaciones en el interior y exterior del tubo por la suciedad producida por el ambiente.

Dónde:

R_{di} , es la resistencia térmica por acumulación de incrustaciones en el interior del tubo escalonado del intercambiador de calor.

R_{do} , es la resistencia térmica por acumulación de incrustaciones en el exterior del tubo escalonado del intercambiador de calor.

R_i , es el radio interior del tubo escalonado del intercambiador de calor.

R_o , es el radio exterior del tubo del intercambiador de calor.

hi_o , es el coeficiente de conversión interna corregido del tubo escalonado del intercambiador de calor.

$$hi_o = hi_{Tb} \cdot \frac{R_i}{R_o}$$

Dónde:

$$R_i = 0,0112 \text{ m}$$

$$R_o = 0,0127 \text{ m}$$

$$hi_{Tb} = 13,486 \frac{W}{m^2 \cdot C}$$

$$hi_o = (13,486) \cdot \frac{0,0112}{0,0127}$$

$$hi_o = 11,893 \frac{W}{m^2 \cdot C}$$

$$U_c = \frac{hi_o \cdot ho_i}{hi_o + ho_i}$$

Dónde:

U_c , es el coeficiente global de transferencia de calor limpio.

$ho_i = 35,069 \frac{W}{m^2 \cdot ^\circ C}$, coeficiente de convección externa del intercambiador.

$hi_o = 11,893 \frac{W}{m^2 \cdot ^\circ C}$, coeficiente de convección interna de los tubos del IC.

$$Uc = \frac{(11,893) \cdot (35,069)}{11,893 + 35,069}$$

$$Uc = 8,881 \frac{W}{m^2 \cdot ^\circ C}$$

$$Rd = Rdi + Rdc$$

Dónde:

$Rd = 0,004$, de acuerdo con Pitts (1979), tabla 10.3, (p. 248).

Considerando el aire industrial, se tiene:

$$\frac{1}{Ud} = \frac{1}{Uc} + Rd$$

Dónde:

Ud , es el coeficiente global de transferencia de calor.

$$Ud = \frac{1}{\frac{1}{Uc} + Rd}$$

$$Ud = \frac{1}{\frac{1}{8,881} + 0,004}$$

$$Ud = 6,553 \frac{Wh}{m^2 \cdot ^\circ C}$$

$$Qu = Ud \cdot ATubos \cdot \Delta Tml \cdot F$$

Dónde:

Qu , es el calor útil de la cámara de combustión.

$Ud = 6,553 \frac{Wh}{m^2 \cdot ^\circ C}$, es el coeficiente global de transferencia de calor.

$ATubos = 23,90 m^2$, es el área de los tubos escalonados.

$\Delta Tml = 70,536 ^\circ C$, es la media logarítmica de la variación de temperatura.

$F = 0,740$, es el factor de conversión de la temperatura.

$$Qu = (6,553) \cdot (23,90) \cdot (70,536) \cdot (0,740)$$

$$Qu = 8174,86 Wh$$

El calor útil de la cámara de combustión, es igual al calor transferido a los haces de los tubos escalonados del intercambiador de calor, resultado de la combustión del Pennisetum Clandestinum en estado granulado (granulometría inferior a 1 mm), con un contenido de humedad final inferior al 12% ($X_{wf} = 3,28\%$), es aproximadamente de 8,17 KWh.

El calor almacenado en la cámara de combustión (Qa), se lo determina cuantificando el calor que se almacena en las paredes de la cámara de combustión, considerando las propiedades termo físicas de la pared compuesta de la cámara combustión descritas en la figura 44 y tabla 15, para el caso experimentales considerando la combustión del Pennisetum Clandestinum en estado granulado (granulometría inferior a 1 mm), con un contenido de humedad final inferior al 12% ($X_{wf} = 3,28\%$), se tiene:

$$Tm = \frac{Tpi + Tpo}{2}$$

Dónde:

Tm , es la temperatura media de la pared de la cámara de combustión.

$Tpi = 203,60 \text{ } ^\circ\text{C}$, es la temperatura promedio interna de pared.

$Tpo = 98,16 \text{ } ^\circ\text{C}$, es la temperatura promedio externa de pared.

$$Tm = \frac{203,60 + 98,16}{2}$$

$$Tm = 150,88 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$\Delta Tpc = Tpi - Tm$$

Dónde:

ΔTpc , es la temperatura perdida en las paredes de la cámara de combustión.

$$\Delta Tpc = 203,60 - 150,88$$

$$\Delta Tpc = 52,72 \text{ } ^\circ\text{C}$$

Para el ladrillo refractario de la cámara de combustión, se determina:

$$mR = \delta R \cdot VR$$

Dónde:

mR , es la masa del ladrillo refractario de la cámara de combustión.

$\delta R = 2645 \frac{\text{Kg}}{\text{m}^3}$, densidad del ladrillo refractario de la cámara de combustión.

$VR = 0,120224 \text{ m}^3$, volumen del ladrillo refractario en la cámara.

$$mR = (2645) \cdot (0,120224)$$

$$mR = 317,992 \text{ Kg}$$

$$QR = mR \cdot CpR \cdot \Delta Tpc$$

Dónde:

QR , calor almacenado en el ladrillo refractario de la cámara de combustión.

$CpR = 0,2294455 \frac{\text{Kcal}}{\text{Kg} \cdot ^\circ\text{C}}$, calor específico del ladrillo refractario.

$$QR = (317,992). (0,2294455). (52,72)$$

$$\mathbf{QR = 3846,547 Kcal}$$

Para el acero 1 de la pared de la cámara de combustión, se determina:

$$ma1 = \delta a1.Va1$$

Dónde:

$ma1$, es la masa del acero 1 de la cámara de combustión.

$\delta a1 = 7854 \frac{Kg}{m^3}$, densidad del acero 1 de la cámara de combustión.

$Va1 = 0,0055488 m^3$, volumen del acero 1 en la cámara de combustión.

$$ma1 = (7854). (0,0055488)$$

$$\mathbf{ma1 = 43,58 Kg}$$

$$Qa1 = ma1.Cpa1.\Delta Tpc$$

Dónde:

$Qa1$, calor almacenado en el acero 1 de la cámara de combustión.

$Cpa1 = 0,1037284 \frac{Kcal}{Kg.^{\circ}C}$, calor específico del acero 1.

$$Qa1 = (43,58). (0,1037284). (52,72)$$

$$\mathbf{Qa1 = 238,319 Kcal}$$

Para la lana de vidrio de la cámara de combustión, se determina:

$$ml = \delta l.Vl$$

Dónde:

ml , es la masa de la lana de vidrio de la cámara de combustión.

$\delta l = 105 \frac{Kg}{m^3}$, densidad de la lana de vidrio de la cámara de combustión.

$Vl = 0,0850816 m^3$, volumen de la lana de vidrio en la cámara de combustión.

$$ml = (105). (0,0850816)$$

$$\mathbf{ml = 12,76 Kg}$$

$$Ql = ml.Cpl.\Delta Tpc$$

Dónde:

Ql , calor almacenado en la lana de vidrio de la cámara de combustión.

$Cpl = 0,1900000 \frac{Kcal}{Kg.^{\circ}C}$, calor específico de la lana de vidrio.

$$Ql = (12,76). (0,1900000). (52,72)$$

$$\mathbf{Ql = 127,814 Kcal}$$

Para el acero 2 de la pared de la cámara de combustión, se determina:

$$ma2 = \delta a2.Va2$$

Dónde:

$ma2$, es la masa del acero 2 de la cámara de combustión.

$\delta a2 = 7854 \frac{Kg}{m^3}$, densidad del acero 2 de la cámara de combustión.

$Va2 = 0,0018496 m^3$, volumen del acero 2 en la cámara de combustión.

$$ma2 = (7854). (0,0018496)$$

$$\mathbf{ma2 = 14,526 Kg}$$

$$Qa2 = ma2.Cpa2.\Delta Tpc$$

Dónde:

$Qa2$, calor almacenado en el acero 2 de la cámara de combustión.

$Cpa2 = 0,1037284 \frac{Kcal}{Kg.^{\circ}C}$, calor específico del acero 2.

$$Qa2 = (14,526). (0,1037284). (52,72)$$

$$\mathbf{Qa2 = 79,436 Kcal}$$

$$Qa = QR + Qa1 + Ql + Qa2$$

Dónde:

Qa , calor almacenado en la cámara de combustión.

$$Qa = 3846,547 + 238,319 + 127,814 + 79,436$$

$$Qa = 4292,116 Kcal$$

$$1 Kcal = 4187 J; 1KWh = 3,6.10^6 J = 1000 Wh$$

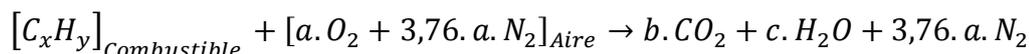
$$Qa = 4292,116 Kcal \cdot \frac{4187 J}{1 Kcal} \cdot \frac{1 KWh}{3,6.10^6 J} \cdot \frac{1000 Wh}{1 KWh} = 4991,96 W$$

$$\mathbf{Qa = 4991,96 Wh}$$

El calor almacenado en la cámara de combustión, como resultado de la combustión del Pennisetum Clandestinum en estado granulado (granulometría inferior a 1 mm), con un contenido de humedad final inferior al 12% ($X_{wf} = 3,28\%$), es aproximadamente 4,99 KWh.

El calor perdido por los gases de la combustión (Qg), es el calor transferido por los gases de la combustión del Pennisetum Clandestinum en estado granulado (granulometría inferior a 1 mm), con estado de humedad final inferior al 12% ($X_{wf} = 3,28\%$), se lo determina considerando las entalpias a la temperatura de salida de gases del intercambiador de calor ($Tho = 54,60$ °C) y a la respectiva temperatura de ambiente ($T_{amb} = 22,21$ °C). Se deben determinar los productos de la combustión.

La ecuación química de la combustión de cualquier combustible del tipo C_xH_y , se la define con la siguiente expresión.



Dónde:

$a = \frac{x+y}{4}$, es la cantidad estequiométrica del oxígeno.

b y c , son los parámetros algebraicos que resultan del balance numéricos.

De la tablas 6, se describe que el Pennisetum Clandestinum se encuentra formado principalmente por Fibras en Detergente Neutro (FDN con un 58,10%), del cual el contenido de Celulosa representa el 26,90%, Hemicelulosa con un 26,20% y Lignina con un 5,88%.

La Hemicelulosa constituye un grupo heterogéneo de polisacáridos cuya composición varía marcadamente entre especies vegetales, en cambio la celulosa presenta un bajo contenido de pentosas estando constituida principalmente por glucosa. La Lignina es un polifenol con una estructura no definida, que no presenta secuencias repetidas y cuyo tamaño no está bien definido. La lignina cuando es sometida a altas temperaturas desarrolla una propiedad aglomerante que para el caso del Pennisetum Clandestinum, se transforma en una pasta sólida “Grumo de Pasto vivo” difícil de romper. Uno de los elementos que aporta a la combustión del Pennisetum Clandestinum es la celulosa $(C_6H_{10}O_5)_n$ con un valor mínimo de $n=200$, siendo el componente principal de las fibras FDN. (Correa, Carulla, & Pabón, 2008)

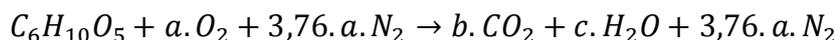
Para el experimental se empleará como fórmula empírica del Pennisetum Clandestinum la ecuación $C_6H_{10}O_5$.

Considerando una reacción química con el 100% de aire teórico, se tiene que:



Dónde:

$PC = C_6H_{10}O_5$, es fórmula empírica del Pennisetum Clandestinum.



Para O_2 : $5 + 2a = 2b + c$

Para H : $10 = 2c$

Para C : $6 = b$

Para N_2 : $3,76a = 3,76a$

Se determinan los valores de $a = 6$; $b = 6$; $c = 5$.

$C_6H_{10}O_5 + 6O_2 + 22,56N_2 \rightarrow 6CO_2 + 5H_2O + 22,56N_2$, es la combustión del Pennisetum Clandestinum con el 100% de aire.

$$n = \frac{m}{PM}$$

Dónde:

n , es el número de moles de la sustancia

m , es la masa del combustible expresada en Kg.

PM , es el peso molecular expresado en Kg/Kmol.

$$PM_{PC} = 6.PM_C + 10.PM_H + 5.PM_O$$

Dónde:

PM_{PC} , peso molecular del Pennisetum Clandestinum.

$PM_C = 12,0107$, peso molecular del carbono.

$PM_H = 1,008$, peso molecular del hidrógeno.

$PM_O = 15,9994$, peso molecular del oxígeno.

$PM_{PC} = (6.12,0107) + (10.1,008) + (5.15,9994)$

$$PM_{PC} = \mathbf{162,1412} \frac{Kg}{Kmol}$$

$$PM_p = 6.PM_{CO_2} + 5.PM_{H_2O} + 22,56.PM_{N_2}$$

Dónde:

PM_p , peso molecular de los productos de la combustión del Pennisetum Clandestinum.

$PM_{CO_2} = 44,01 \frac{Kg}{Kmol}$, peso molecular del dióxido de carbono.

$PM_{H_2O} = 18,01528 \frac{Kg}{Kmol}$, peso molecular del agua.

$PM_{N_2} = 28,0134 \frac{Kg}{Kmol}$, peso molecular del nitrógeno.

$PM_p = (6.44,01) + (5.18,01528) + (22,56.28,0134)$

$$PM_p = \mathbf{986,1187} \frac{Kg}{Kmol}$$

$$PM_{aire} = 6.PM_{O_2} + 22,56.PM_{N_2}$$

Dónde:

PM_{aire} , peso molecular del 100% aire en la combustión del Pennisetum Clandestinum.

$PM_{O_2} = 31,9988 \frac{Kg}{Kmol}$, peso molecular del oxígeno.

$PM_{N_2} = 28,0134 \frac{Kg}{Kmol}$, peso molecular del nitrógeno.

$$PM_{aire} = (6.31,9988) + (22,56.28,0134)$$

$$PM_{aire} = 823,9751 \frac{Kg}{Kmol}$$

$$RAC = \frac{PM_{aire}}{PM_{Combustible}}$$

Dónde:

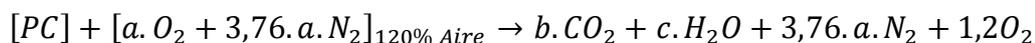
RAC , relación 100% aire – combustible.

$$RAC = \frac{823,9751}{162,1412}$$

$$RAC = 5,0818$$

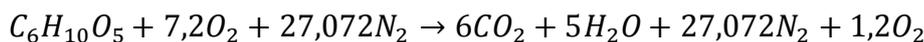
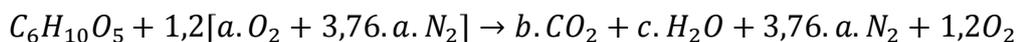
En condiciones teóricas con el 100% de aire, por la combustión de 1 Kg de Pennisetum Clandestinum se requieren 5,0818 Kg de aire.

Considerando un exceso del 20% de aire, en estas condiciones se asemejan a las condiciones reales de combustión del Pennisetum Clandestinum, se determina que:



Dónde:

$PC = C_6H_{10}O_5$, es fórmula empírica del Pennisetum Clandestinum.



$$PM_{p(120\%)} = 6. PM_{CO_2} + 5. PM_{H_2O} + 27,072. PM_{N_2} + 1,2. PM_{O_2}$$

Dónde:

$PM_{p(120\%)}$, peso molecular de los productos de la combustión del Pennisetum Clandestinum considerando un 20% de exceso de aire.

$$PM_{CO_2} = 44,01 \frac{Kg}{Kmol}, \text{ peso molecular del dióxido de carbono.}$$

$$PM_{H_2O} = 18,01528 \frac{Kg}{Kmol}, \text{ peso molecular del dióxido de agua.}$$

$$PM_{N_2} = 28,0134 \frac{Kg}{Kmol}, \text{ peso molecular del dióxido de nitrógeno.}$$

$$PM_{O_2} = 31,9988 \frac{Kg}{Kmol}, \text{ peso molecular del dióxido de oxígeno.}$$

$$PM_{p(120\%)} = (6.44,01) + (5.18,01528) + (27,072.28,0134) + (1,2.31,9988)$$

$$PM_{p(120\%)} = 1150,9137 \frac{Kg}{Kmol}$$

$$PM_{120\% aire} = 7,2. PM_{O_2} + 27,072. PM_{N_2}$$

Dónde:

PM_{aire} , peso molecular del 120% aire en la combustión del Pennisetum Clandestinum.

$$PM_{N_2} = 28,0134 \frac{Kg}{Kmol}, \text{ peso molecular del dióxido de nitrógeno.}$$

$$PM_{O_2} = 31,9988 \frac{Kg}{Kmol}, \text{ peso molecular del dióxido de oxígeno.}$$

$$PM_{120\% \text{ aire}} = (7,2 \cdot 31,9988) + (27,072 \cdot 28,0134)$$

$$PM_{120\% \text{ aire}} = \mathbf{988,7701} \frac{Kg}{Kmol}$$

$$RAC_{120\% \text{ aire}} = \frac{PM_{120\% \text{ aire}}}{PM_{PC}}$$

Dónde:

$RAC_{120\% \text{ aire}}$, relación 120% aire – combustible.

$$PM_{PC} = 162,1412 \frac{Kg}{Kmol}$$

$$RAC_{120\% \text{ aire}} = \frac{988,7701}{162,1412}$$

$$RAC_{120\% \text{ aire}} = \mathbf{6,0982}$$

En condiciones reales, con un exceso del 20% de aire, se determina que para combustionar de 1 Kg de Pennisetum Clandestinum se requieren 6,0982 Kg de aire.

En la Tabla 17, se describen las entalpías de los productos de combustión del Pennisetum Clandestinum en estado granulado, considerando una combustión con el 120% de aire, a una temperatura de salida de gases del intercambiador de calor ($T_{ho} = 54,60 \text{ }^\circ\text{C}$) y a la temperatura de ambiente ($T_{amb} = 22,21 \text{ }^\circ\text{C}$).

Tabla 17

Entalpías de los productos de la combustión en estado granulado

Referencia	$h \text{ a } T_{amb}$ (KJ/Kmol)	$h \text{ a } T_{ho}$ (KJ/Kmol)
CO_2	9380	11882
H_2O	9931	11087
O_2	8693	9752
N_2	8685	9612

Fuente: (Potter & Somerton, 2004)

Con el 120% de aire, se ha definido la ecuación de la combustión del Pennisetum Clandestinum, como:



Dónde:

$6CO_2 + 5H_2O + 27,072N_2 + 1,2O_2$, son los productos de la combustión.

$T_{ho} = 327,75 \text{ }^\circ\text{K}$, es la temperatura de salida de gases del IC.

$T_{ci} = T_{amb} = 295,36 \text{ }^\circ\text{K}$, es la temperatura de ingreso de aire al IC.

$$H_{\text{Productos}} = H_{\text{CO}_2} + H_{\text{H}_2\text{O}} + H_{\text{N}_2} + H_{\text{O}_2}$$

Dónde:

$H_{\text{Productos}}$, es la entalpía de los productos de la combustión.

H_{CO_2} , es la entalpía del dióxido de carbono.

$$H_{\text{CO}_2} = H_{\text{CO}_2 \text{ a } T_{ho}} - H_{\text{CO}_2 \text{ a } T_{amb}}$$

$$H_{\text{CO}_2} = 11882 - 9380$$

$$H_{\text{CO}_2} = \mathbf{2502} \frac{\text{KJ}}{\text{Kmol}}$$

$H_{\text{H}_2\text{O}}$, es la entalpía del agua.

$$H_{\text{H}_2\text{O}} = H_{\text{H}_2\text{O} \text{ a } T_{ho}} - H_{\text{H}_2\text{O} \text{ a } T_{amb}}$$

$$H_{\text{H}_2\text{O}} = 11087 - 9931$$

$$H_{\text{H}_2\text{O}} = \mathbf{1156} \frac{\text{KJ}}{\text{Kmol}}$$

H_{N_2} , es la entalpía del nitrógeno.

$$H_{\text{N}_2} = H_{\text{N}_2 \text{ a } T_{ho}} - H_{\text{N}_2 \text{ a } T_{amb}}$$

$$H_{\text{N}_2} = 9612 - 8685$$

$$H_{\text{N}_2} = \mathbf{927} \frac{\text{KJ}}{\text{Kmol}}$$

H_{O_2} , es la entalpía del oxígeno.

$$H_{\text{O}_2} = H_{\text{O}_2 \text{ a } T_{ho}} - H_{\text{O}_2 \text{ a } T_{amb}}$$

$$H_{\text{O}_2} = 9752 - 8693$$

$$H_{\text{O}_2} = \mathbf{1059} \frac{\text{KJ}}{\text{Kmol}}$$

$$H_{\text{Productos}} = 2502 + 1156 + 927 + 1059$$

$$H_{\text{Productos}} = \mathbf{5644} \frac{\text{KJ}}{\text{Kmol}}$$

$$RPC_{120\% \text{ aire}} = \frac{PM_p}{PM_{PC}}$$

Dónde:

$RPC_{120\% \text{ aire}}$, relación gases de la combustión – combustible.

$PM_p = 1150,9137 \frac{\text{Kg}}{\text{Kmol}}$, peso molecular de los productos de la combustión con

el aire a un 120%.

$PM_{PC} = 162,1412 \frac{\text{Kg}}{\text{Kmol}}$, peso molecular del Pennisetum Clandestinum.

$$RPC_{120\% \text{ aire}} = \frac{1150,9137}{162,1412}$$

$$RPcC_{120\% \text{ aire}} = 7,0982$$

En condiciones reales de aire, se determina que por la combustión de 1 Kg de Pennisetum Clandestinum en estado granulado se producen 7,0982 Kg de gases de producto de la combustión.

$$Qg = H_{\text{Productos}} \cdot F_{\text{moles}}$$

Dónde:

Qg , calor perdido por los gases de la combustión.

$F_{\text{moles}} = 0,086 \text{ Kmol}$, factor de corrección molar.

$$Qg = (5644) \cdot (0,086) \text{ KJ}$$

$$3,6 \cdot 10^6 \text{ J} = 1000 \text{ W}$$

$$Qg = 485,384 \text{ KJ} \cdot \frac{1000 \text{ Wh}}{3,6 \cdot 10^6 \text{ J}} \cdot \frac{1000 \text{ J}}{1 \text{ KJ}}$$

$$Qg = 134,82 \text{ Wh}$$

El calor perdido por los gases de la combustión, como resultado de la combustión del Pennisetum Clandestinum en estado granulado (granulometría inferior a 1 mm), con un contenido de humedad final inferior al 12% ($X_{wf} = 3,28\%$), es aproximadamente 0,13 KWh.

El calor perdido en las cenizas residuales producto de la combustión (Q_{cen}), se genera cuando se descarga la ceniza desde la cámara de combustión hacia la parte inferior de la cámara, esta lleva una cantidad de calor (ver figura 46).

$$\Delta T_{cen} = T_{cen} - T_{amb}$$

Dónde:

$T_{amb} = 22,21 \text{ }^\circ\text{C}$, es la temperatura de ambiente.

$T_{cen} = 149,67 \text{ }^\circ\text{C}$, es la temperatura de cenizas.

$$\Delta T_{cen} = 149,67 - 22,21$$

$$\Delta T_{cen} = 127,46 \text{ }^\circ\text{C}$$

De acuerdo al estudio realizado por Choi y Okos en 1986 Effects of temperature on the thermal properties of food. Vol 1, “se determinar el calor específico de los alimentos en función de su temperatura”, el mismo que está expresado en $\text{J/Kg}^\circ\text{C}$.

$$cp_{cen} = 1092,60 + 1889,60 \cdot 10^{-3} \cdot T_{cen} - 3681,70 \cdot 10^{-6} \cdot T_{cen}^2$$

Dónde:

cp_{cen} , calor específico la temperatura de las cenizas T_{cen} .

$$cp_{cen} = 1092,60 + 1889,60 \cdot 10^{-3} \cdot (149,67) - 3681,70 \cdot 10^{-6} \cdot (149,67)^2$$

$$cp_{cen} = 1292,945 \frac{J}{Kg.^{\circ}C}$$

$$Q_{cen} = m_{cen} \cdot cp_{cen} \cdot \Delta T_{cen}$$

Dónde:

Q_{cen} , calor perdido en las cenizas residuales producto de la combustión.

$m_{cen} = 1,524 \text{ Kg}$, masa promedio de las cenizas para el caso experimental.

$$Q_{cen} = (1,524) \cdot (1292,945) \cdot (127,46)$$

$$Q_{cen} = 251153,3250 \text{ J} \cdot \frac{1000 \text{ Wh}}{3,6 \cdot 10^6 \text{ J}}$$

$$Q_{cen} = 69,764 \text{ Wh}$$

El calor perdido en las cenizas residuales producto de la combustión del Pennisetum Clandestinum cuando se encuentra en estado granulado (granulometría inferior a 1 mm), con un contenido de humedad final inferior al 12% ($X_{wf} = 3,28\%$), es aproximadamente 0,0697 KWh.

El calor perdido por la combustión imperfecta mecánica (Q_{cim}), se lo determina a través del contenido medio de las sustancias inflamables ($Imed$) expresadas en tanto por ciento de la masa de los residuos generados en la combustión como son las cenizas y las escorias. Para simplificar su análisis se considera que estos se componen de carbono con un calor de combustión igual a 32,65 MJ/Kg. (Baskakov, 1985)

$$Q_{cim} = \frac{32,65 \cdot Fim \cdot Imed}{100 \cdot (100 - Imed)}$$

Dónde:

Q_{cim} , es el calor generado por la combustión imperfecta mecánica.

$Imed = 10,60\%$, es el contenido medio de las sustancias inflamables equivalentes al contenido de cenizas presentes en el Pennisetum Clandestinum (ver tabla 6.)

$Fim = 6,10$, factor de conversión de la combustión imperfecta mecánica.

$$Q_{cim} = \frac{32,65 \cdot (6,10) \cdot (10,60)}{100 \cdot (100 - 10,60)}$$

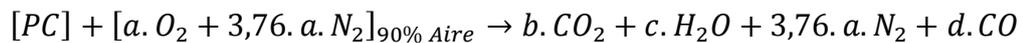
$$Q_{cim} = 0,23614 \text{ MJ} \cdot \frac{1000 \text{ Wh}}{3,6 \cdot 10^6 \text{ J}} \cdot \frac{1 \cdot 10^6 \text{ J}}{1 \text{ MJ}}$$

$$Q_{cim} = 65,596 \text{ Wh}$$

El calor perdido por la combustión imperfecta mecánica, como resultado de la combustión del Pennisetum Clandestinum en estado granulado (granulometría

inferior a 1 mm), con un contenido de humedad final inferior al 12% ($X_{wf} = 3,28\%$), es aproximadamente de 0,0655 KWh.

El calor perdido por la combustión incompleta (Q_{ci}), se genera por la presencia del monóxido de carbono (CO) en los productos de la combustión, cuando no se dispone del 100% de aire para la combustión. Para el caso experimental el Q_{ci} se lo determina considerando la combustión del Pennisetum Clandestinum con el 90% de aire.



Dónde:

$PC = C_6H_{10}O_5$, es fórmula empírica del Pennisetum Clandestinum.



$$m_{CO} = 1,2PM_{CO}$$

Dónde:

m_{CO} , es la masa del dióxido de carbono.

$PM_{CO} = 28,01$, es el peso molecular del dióxido de carbono.

$$m_{CO} = 1,2. (28,01)$$

$$\mathbf{m_{CO} = 33,612 \text{ g}}$$

$$M_{CO} = \text{moles} \cdot m_{CO}$$

Dónde:

M_{CO} , es la masa molecular del dióxido de carbono.

$$\text{moles} = 86$$

$$M_{CO} = 86. (36,612)$$

$$M_{CO} = 2890,632 \text{ g}$$

$$\mathbf{M_{CO} = 2,890 \text{ Kg}}$$

$$V_{CO} = \frac{M_{CO}}{\delta_{CO}}$$

Dónde:

V_{CO} , volumen que ocupa el dióxido de carbono en la cámara de combustión.

$\delta_{CO} = 1,145 \frac{Kg}{m^3}$, densidad del dióxido de carbono.

$$V_{CO} = \frac{2,890}{1,145}$$

$$\mathbf{V_{CO} = 2,524 \text{ m}^3}$$

De acuerdo a Baskakov (1985), “la temperatura teórica de combustión del dióxido de carbono (CO) es de 2643 °K” (p. 225).

$$h_{CO_1} = 88991 \frac{KJ}{Kmol}, \text{ entalpía del dióxido de carbono.}$$

La estequiometría del Pennisetum Clandestinum con un 90% de aire, determina que en la combustión de 1 Kmol de celulosa ($C_6H_{10}O_5$) que se producen 1,2 Kmol de CO, y para que 0,086 Kmol de celulosa se obtienen 0,1032 Kmol de CO.

$$Q_{ci1} = h_{CO_1} \cdot (0,1032)$$

$$Q_{ci1} = (88991) \cdot (0,1032)$$

$$Q_{ci1} = 9183,8712 \text{ KJ} \cdot \frac{1000 \text{ Wh}}{3,6 \cdot 10^6 \text{ J}} \cdot \frac{1000 \text{ J}}{1 \text{ KJ}}$$

$$Q_{ci1} = 2551,075 \text{ Wh}$$

El calor perdido por la combustión incompleta es aproximadamente de 2,5 KWh para la temperatura teórica de combustión de 2643 °K. Considerando que el Pennisetum Clandestinum se inflama a temperaturas mayores de 650 °C y que la temperatura de combustión de la cámara de combustión es de 850 °C, el calor perdido por la combustión incompleta real, a una temperatura real de combustión del CO de 1123,15 °K, de acuerdo por Baskakov (p. 225), se tiene:

$$h_{CO} = 34492,35 \frac{KJ}{Kmol}, \text{ es la entalpía del CO a la temperatura de 1123,15 °K.}$$

$$Q_{ci} = h_{CO} \cdot (0,1032)$$

Dónde:

Q_{ci} , es el calor perdido por la combustión incompleta.

$$Q_{ci} = (34492,35) \cdot (0,1032)$$

$$Q_{ci} = 3559,61 \text{ KJ} \cdot \frac{1000 \text{ Wh}}{3,6 \cdot 10^6 \text{ J}} \cdot \frac{1000 \text{ J}}{1 \text{ KJ}}$$

$$Q_{ci} = 988,78 \text{ Wh}$$

El calor perdido por la combustión incompleta del Pennisetum Clandestinum en estado granulado (granulometría inferior a 1 mm), con un contenido de humedad final inferior al 12% ($X_{wf} = 3,28\%$), es aproximadamente de 0,988 KWh.

El calor perdido por los cambios de aire en la cámara de combustión (Q_{pca}), se presenta durante la apertura y cierre de la compuerta de la cámara de combustión, debido, a que se deben realizar la respectiva toma de lectura de las temperaturas presentes en el proceso de la combustión. El Q_{pca} es la cantidad de

calor que se transfiere desde el interior de la cámara de combustión hacia el ambiente cuando se realiza la apertura de la puerta de la cámara de combustión.

$$\Delta T_{ca} = T_{hi} - T_{amb}$$

Dónde:

ΔT_{ca} , es el delta de temperatura generado por los cambios de aire.

$T_{amb} = 22,21 \text{ } ^\circ\text{C} = 295,36 \text{ } ^\circ\text{K}$, es la temperatura ambiente.

$T_{hi} = 273,30 \text{ } ^\circ\text{C} = 546,45 \text{ } ^\circ\text{K}$, es la temperatura interna del aire de la cámara.

$$\Delta T_{ca} = 546,45 - 295,36$$

$$\Delta T_{ca} = 251,09 \text{ } ^\circ\text{K}$$

$$V_a = \text{altura} \cdot \text{ancho} \cdot \text{profundidad}$$

Dónde:

V_a , volumen de la cámara de combustión.

$\text{altura} = 0,68 \text{ m}$, altura de la cámara de combustión.

$\text{ancho} = 0,58 \text{ m}$, ancho de la cámara de combustión.

$\text{profundidad} = 0,78 \text{ m}$, profundidad de la cámara de combustión.

$$V_a = (0,68) \cdot (0,58) \cdot (0,78)$$

$$V_a = 0,3076 \text{ m}^3$$

$$Q_{cpa} = N_{ca} \cdot \delta a \cdot V_a \cdot C_{pa} \cdot \Delta T_{ca}$$

Dónde:

Q_{cpa} , es el calor perdido por cambios de aire en la cámara de combustión.

$N_{ca} = 3$, es el número de cambios de aire por hora, caso experimental.

$\delta a = 1,1951 \frac{\text{Kg}}{\text{m}^3}$, es la densidad del aire a la temperatura ambiente.

$C_{pa} = 1007 \frac{\text{J}}{\text{Kg}^\circ\text{K}}$, es el calor específico del aire a la temperatura ambiente.

$$Q_{cpa} = (3) \cdot (1,1951) \cdot (0,3076) \cdot (1007) \cdot (251,09)$$

$$Q_{cpa} = 278850,04537 \text{ J} \cdot \frac{1000 \text{ Wh}}{3,6 \cdot 10^6 \text{ J}}$$

$$Q_{cpa} = 77,458 \text{ Wh}$$

El calor perdido por los cambios de aire en la cámara de combustión, como resultado de la combustión del Pennisetum Clandestinum en estado granulado (granulometría inferior a 1mm), con un contenido de humedad final inferior al 12% ($X_{wf} = 3,28\%$), es aproximadamente de 0,077 KWh.

El calor de la reacción por la combustión del Pennisetum Clandestinum en estado granulado ($Qr_{granulado}$), es el resultado del balance energético presente en la cámara de combustión cuando se combustiona el Pennisetum Clandestinum en estado granulado (granulometría inferior a 1 mm), con un contenido de humedad final inferior al 12% ($X_{wf} = 3,28\%$).

$$Qr_{granulado} = Qp + Qu + Qa + Qg + Qcen + Qcim + Qci + Qpca$$

Dónde:

$Qp = 1178,62 Wh$, calor perdido en las paredes de la cámara de combustión.

$Qu = 8174,86 Wh$, calor útil de la cámara de combustión.

$Qa = 4991,96 Wh$, calor almacenado en la cámara de combustión.

$Qg = 134,82 Wh$, calor perdido por los gases de la combustión.

$Qcen = 69,764 Wh$, calor perdido en las cenizas residuales producto de la combustión.

$Qcim = 65,596 Wh$, calor perdido por la combustión imperfecta mecánica.

$Qci = 988,78 Wh$, calor perdido por la combustión incompleta.

$Qpca = 77,458 Wh$, calor perdido por los cambios de aire en la cámara de combustión.

$$Qr_{granulado} = (1178,62) + (8174,86) + (4991,96) + (134,82) + (69,764) \\ + (65,596) + (988,78) + (77,458)$$

$$Qr_{granulado} = \mathbf{15681,858 Wh}$$

En condiciones estables para la combustión de 5,82 Kg/h del Pennisetum Clandestinum en estado granulado (granulometría inferior a 1 mm), con un contenido de humedad final inferior al 12% ($X_{wf} = 3,28\%$), el calor de la reacción es aproximadamente 15,68 KWh.

4.7.3 Combustión en estado natural

Se ha descrito que para biomasa de origen vegetal el coeficiente de humedad inicial es mayor al 60%, para el caso experimental, el contenido de humedad inicial (X_{wi}) de 76,64% considerando que el Pennisetum Clandestinum se encuentra en estado natural, el promedio de la masa quemada en la cámara de combustión es de 4,73 Kg por hora (ver tabla 66). Con un contenido de humedad inicial mayor al 60%, la combustión de la biomasa se torna lenta y genera una gran cantidad de

humo al interior de la cámara de combustión en su etapa inicial hasta que se alcance la combustión efectiva, el humo generado está conformado principalmente de monóxido de carbono (CO). El calor de la reacción de la combustión del Pennisetum Clandestinum en estado natural ($Q_{matural}$) se lo determina con el siguiente análisis cuantitativo.

Calor perdido en las paredes laterales de la cámara de combustión (Q_p), es el flujo de calor que atraviesa a las paredes de la cámara de combustión desde el interior de la cámara hacia el exterior y que se disipa en el ambiente. De la figura 43, se determina:

$A_t = 1,8496 \text{ m}^2$, área total de las paredes de la cámara de combustión.

En las condiciones ambientales para el caso experimental de la combustión en estado natural se tiene:

$$\Delta T = T_c - T_{amb}$$

Dónde:

ΔT , es la variación de la temperatura – ambiente.

$$T_{amb} = 23,11 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$T_c = 650 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$\Delta T = 650 - 23,11$$

$$\Delta T = \mathbf{626,89 \text{ } ^\circ\text{C}}$$

De acuerdo a la fórmula de Wattmuff se puede calcular el coeficiente de convección externa (h_o), con la siguiente expresión:

$$h_o = 2,8 + 3v$$

Dónde:

v , es la velocidad del viento en expresada m/s.

h_o , es el coeficiente de convección externa expresado en $\text{W}/\text{m}^2\text{ } ^\circ\text{C}$.

Se tiene que:

$v = 1,255 \frac{\text{m}}{\text{s}}$, velocidad promedio del viento externo a la cámara de combustión

$$h_o = 2,8 + 3 \cdot (1,255)$$

$$\mathbf{h_o = 6,565 \frac{W}{m^2 \cdot ^\circ C}}$$

De acuerdo con Vlassov (2001), “la velocidad de gases en el interior de una cámara de combustión se puede asumir de 1,00 m/s” (p.167).

Para el caso experimental se asumirá que la velocidad de gases al interior de la cámara es de 1,00 m/s, la temperatura promedio de los gases de salida (Thi) es de 146,20 °C, considerando que el Pennisetum Clandestinum se encuentra en estado natural y su temperatura del lecho varía entre 600°C y 800°C.

En éstas condiciones, de acuerdo con Cengel (2011), en la tabla A-15, a 140 °C la viscosidad cinemática del aire caliente es de $2,745 \cdot 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$, y a 160 °C la viscosidad cinemática del aire caliente es de $2,975 \cdot 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$. (Cengel, 2011)

La viscosidad del aire caliente (γg) a la temperatura de 146,20 °C se la determina utiliza la ecuación de interpolación lineal:

$$y(x_*) = y_{k-1} + \frac{x_* - x_{k-1}}{x_k - x_{k-1}} \cdot (y_k - y_{k-1})$$

Dónde:

$x_k = 160 \text{ °C}$, temperatura superior.

$x_{k-1} = 140 \text{ °C}$, temperatura inferior.

$x_* = 146,20 \text{ °C}$, temperatura de estudio.

$y_k = 2,975 \cdot 10^{-5} \frac{\text{m}^2}{\text{s}}$, viscosidad del aire a temperatura superior.

$y_{k-1} = 2,745 \cdot 10^{-5} \frac{\text{m}^2}{\text{s}}$, viscosidad del aire a temperatura inferior.

$y(x_*) = 2,745 \cdot 10^{-5} + \frac{(146,20-140)}{(160-140)} \cdot (2,975 \cdot 10^{-5} - 2,745 \cdot 10^{-5})$

$y(x_*) = 2,816 \cdot 10^{-5} \frac{\text{m}^2}{\text{s}}$

$\gamma g = 2,816 \cdot 10^{-5} \frac{\text{m}^2}{\text{s}}$, viscosidad del aire caliente a temperatura de 146,20 °C.

El número de Reynolds (Re), es un número adimensional utilizado para caracterizar el movimiento de los fluidos, para el caso experimental caracteriza el movimiento de los gases al interior de la cámara de combustión durante la transferencia de calor.

$$Ag = \text{ancho} \times \text{profundidad}$$

Dónde:

A_g , área de gases al interior de la cámara de combustión.

$\text{ancho} = 0,58 \text{ cm}$, ancho de la cámara de combustión.

$\text{profundidad} = 0,78 \text{ cm}$, profundidad de la cámara de combustión.

$Ag = (0,58) \cdot (0,78)$

$Ag = 0,4524 \text{ m}^2$

$$\text{Perímetro} = 2 \cdot \text{ancho} + 2 \cdot \text{profundidad}$$

Dónde:

Perímetro, es el perímetro interior de la cámara de combustión.

$$\text{Perímetro} = (2 \cdot 0,58) + (2 \cdot 0,78)$$

$$\text{Perímetro} = 2,72 \text{ m}$$

$$Dh = \frac{4 \cdot A_g}{\text{Perímetro}}$$

Dónde:

Dh, es el diámetro hidráulico de la cámara de combustión.

$$Dh = \frac{4 \cdot (0,4524)}{2,72}$$

$$Dh = 0,655 \text{ m}$$

$$Re = \frac{v_w \cdot Dh}{\gamma g}$$

Dónde:

$v_w = 1,00 \frac{\text{m}}{\text{s}}$, es la velocidad de los gases en la cámara de combustión.

$$Re = \frac{(1,00) \cdot (0,655)}{2,816 \cdot 10^{-5}}$$

$$Re = 23259,94 = 23,26 \times 10^3$$

Considerando que la velocidad de los gases dentro de la cámara de combustión es de 1,00 m/s, el proceso de combustión se encuentra en un régimen de transición por lo que mediante la variación de la velocidad del ventilador de la cámara de combustión se puede incrementar la velocidad de los gases de 2,00 m/s a 4,00 m/s, con lo que se consigue entrar en un régimen de convección forzada de flujo turbulento.

$$Re = \frac{v_w \cdot Dh}{\gamma g}$$

Dónde:

$v_w = 2,00 \frac{\text{m}}{\text{s}}$, es la velocidad de los gases en flujo turbulento.

$$Re = \frac{(2,00) \cdot (0,655)}{2,816 \cdot 10^{-5}}$$

$$Re = 46519,88 = 46,19 \times 10^3$$

El número de Nusselt (Nu_{Dh}) es un número adimensional que mide el aumento de la transmisión de calor desde una superficie, por lo que un fluido discurre (transferencia de calor por convección) comparada con la transferencia de calor si ésta ocurriera solamente por conducción, para el caso experimental caracteriza el

aumento de la transmisión de calor para el diámetro hidráulico de la cámara de combustión.

$$Nu_{Dh} = 0,023 \cdot Re^{0,8} \cdot Pr^n$$

Dónde:

Nu_{Dh} , número de Nusselt para el diámetro hidráulicos de la cámara combustión.

Re , número de Reynolds considerando un régimen de convección forzada de flujo turbulento.

Pr , número de Prandtl.

Esta correlación es válida para rangos $0,7 < Pr < 160$, $Re > 10000$.

n , el exponente de Pr tiene un valor de $n=0,3$ cuando el fluido se enfría y $n=0,4$ cuando el fluido se calienta.

Para el caso experimental, se determina que:

$Re = 46519,88$, con velocidad de gases de 2,00 m/s.

$Pr = 0,7$

$n = 0,4$

$Nu_{Dh} = 0,023 \cdot (46519,88)^{0,8} \cdot (0,7)^{0,4}$

$Nu_{Dh} = 108,11$

El número de Nusselt en función del coeficiente de convección interna hi , se lo determina relacionando el diámetro hidráulico y la conductividad térmica del gas.

$$Nu_{Dh} = \frac{hi \cdot Dh}{k_{gas}}$$

Dónde:

hi , es el coeficiente de convección interna expresada en $W/m^2 \cdot ^\circ C$.

k_{gas} , es la conductividad térmica del gas de la cámara de combustión expresada en $W/m \cdot ^\circ C$.

Dh , es el diámetro hidráulico de la cámara de combustión expresado en m^2 .

Nu_{Dh} , número de Nusselt para el diámetro hidráulico de la cámara de combustión.

$Dh = 0,655 \text{ m}$

$k_{gas} = 0,00722 \frac{W}{m \cdot ^\circ C}$

$Nu_{Dh} = 108,11$

$hi = \frac{Nu_{Dh} \cdot k_{gas}}{Dh}$

$$hi = \frac{(108,11) \cdot (0,0722)}{0,655}$$

$$hi = 11,916 \frac{W}{m^2 \cdot ^\circ C}$$

$\sigma = 5,67037 \cdot 10^{-8} \frac{W}{m^2 \cdot K^4}$, es la constante de Stefan – Boltzmann.

$\epsilon m = 0,9$, (Salvi; 2000, p. 145).

Considerando la combustión del Pennisetum Clandestinum en estado granulado con un contenido de humedad final de $X_{wf} = 3,28\%$, se determina:

$$hir = \frac{\sigma \cdot \epsilon m \cdot [(Thi+273,15)^4 - (Tpi+273,15)^4]}{(Thi+273,15) - (Tpi+273,15)}$$

Dónde:

hir , es el coeficiente de transferencia de calor por radiación.

$Tpi = 127,70 \text{ } ^\circ C$, es la temperatura promedio interna de pared.

$Thi = 146,20 \text{ } ^\circ C$, es la temperatura promedio salida de gases.

$$hir = \frac{(5,67037 \cdot 10^{-8}) \cdot (0,9) \cdot [(146,20+273,15)^4 - (127,70+273,15)^4]}{(146,20+273,15) - (127,70+273,15)}$$

$$hir = 14,08 \frac{W}{m^2 \cdot K} \cdot \frac{274,15 \text{ } ^\circ K}{1 \text{ } ^\circ C}$$

$$hir = 3861,82 \frac{W}{m^2 \cdot ^\circ C}$$

Para la pared plana compuesta de la cámara de combustión se define:

$$U = \frac{1}{\left(\frac{1}{hi+hir}\right) + \left(\frac{eR}{kR}\right) + \left(\frac{ea1}{ka1}\right) + \left(\frac{el}{kl}\right) + \left(\frac{ea2}{ka2}\right) + \left(\frac{1}{ho}\right)}$$

Dónde:

U , coeficiente global de transferencia de calor.

$hi = 11,916 \frac{W}{m^2 \cdot ^\circ C}$, coeficiente de convección interna.

$hir = 3861,82 \frac{W}{m^2 \cdot ^\circ C}$, coeficiente de transferencia de calor por radiación.

$ho = 6,565 \frac{W}{m^2 \cdot ^\circ C}$, coeficiente de convección externa.

$eR = 0,0650 \text{ m}$, espesor del ladrillo refractario.

$ea1 = 0,0003 \text{ m}$, espesor de acero 1.

$el = 0,0460 \text{ m}$, espesor de la lana de vidrio.

$ea2 = 0,0001 \text{ m}$, espesor de acero 2.

$kR = 0,850 \frac{W}{m^2 \cdot ^\circ C}$, conductividad del ladrillo refractario.

$ka1 = 48,80 \frac{W}{m^2 \cdot ^\circ C}$, conductividad del acero 1.

$kl = 0,043 \frac{W}{m^2 \cdot ^\circ C}$, conductividad de la lana de vidrio.

$ka2 = 48,80 \frac{W}{m^2 \cdot C}$, conductividad del acero 2.

$$U = \frac{1}{\left(\frac{1}{11,916+3861,82}\right) + \left(\frac{0,0650}{0,850}\right) + \left(\frac{0,0003}{48,80}\right) + \left(\frac{0,0460}{0,043}\right) + \left(\frac{0,0001}{48,80}\right) + \left(\frac{1}{6,565}\right)}$$

$$U = 0,7699 \frac{Wh}{m^2 \cdot C}$$

$$Qp = U \cdot At \cdot \Delta T$$

Dónde:

Qp , calor perdido en las paredes laterales de la cámara de combustión.

$At = 1,8496 m^2$, área total de las paredes de la cámara de combustión.

$U = 0,7699 \frac{Wh}{m^2 \cdot C}$, coeficiente global de transferencia de calor.

$\Delta T = 626,89 \text{ } ^\circ C$, es la variación de la temperatura – ambiente.

$$Qp = (0,7699) \cdot (1,8496) \cdot (626,89)$$

$$Qp = 892,69 Wh$$

El calor perdido en las paredes de la cámara de combustión, resultado de la combustión el Pennisetum Clandestinum en estado natural, con un contenido de humedad inicial (X_{wi}) del 76,64%, es aproximadamente de 0,89 KWh.

El calor útil de la cámara de combustión (Qu), se lo determina apoyándose en la teoría desarrollada por E.D. Grimson, para haces de tubos en flujo transversal. El intercambiador de calor del horno de combustión de biomasa, está constituido por tres pasos de aire de proceso por el sector de tubos y un paso de aire caliente por la carcasa. (Pitts & Sissom, 1979)

En la figura 45, se visualiza el intercambiador de calor de tubos escalonados del horno de combustión de biomasa. Para determinar el paso del aire en los tubos escalonados, se toma el valor entre las siguientes expresiones.

$$F_1 = \frac{a-D}{2}$$

$$F_2 = \sqrt{\left(\frac{a}{2}\right)^2 + b^2}$$

De acuerdo con el análisis de Baskakov (1985), en Termotecnia “las velocidades normales de llama en un proceso varían entre 0,3 m/s a 0,5 m/s”. Para el caso experimental se considera el valor de 0,5 m/s.

Dónde:

$$a = 0,0375 m$$

$$b = 0,0375 m$$

$$D = 0,0254 \text{ m}$$

$$F_1 = \frac{0,0375 - 0,0254}{2}$$

$$F_1 = 6,05 \cdot 10^{-3} \text{ m}$$

$$F_2 = \sqrt{\left(\frac{0,0375}{2}\right)^2 + (0,0375)^2}$$

$$F_2 = 17 \cdot 10^{-3} \text{ m}$$

$$v_{max} = \frac{V_{\infty} \cdot a}{2 \cdot F}$$

Dónde:

v_{max} , es la velocidad del aire caliente dentro del intercambiador.

$$F = F_1$$

$$V_{\infty} = 0,5 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

$$v_{max} = \frac{V_{\infty} \cdot a}{2 \cdot F_1} = \frac{(0,5) \cdot (0,0375)}{2 \cdot (6,05 \cdot 10^{-3})}$$

$$v_{max} = 1,55 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

Hay que considerar que el acero cuando su temperatura es superior a los 400 °C pierde sus propiedades mecánicas, para el caso experimental se han determinado que la temperatura promedio de los gases de salida (Th_i) de la cámara de combustión es de 146,20 °C, considerando que la combustión del Pennisetum Clandestinum se da en estado natural, con un contenido de humedad inicial $X_{wi} = 76,64\%$.

En éstas condiciones, las propiedades termo físicas del aire caliente que atraviesa los tubos escalonados del intercambiador de calor, se las determina apoyándose en la ecuación de interpolación lineal y con los datos termo físicos del aire descritos en la tabla A-15 de Cengel. (Cengel, 2011)

$$y(x_*) = y_{k-1} + \frac{x_* - x_{k-1}}{x_k - x_{k-1}} \cdot (y_k - y_{k-1})$$

Dónde:

$$x_k = 160 \text{ } ^\circ\text{C}, \text{ temperatura superior.}$$

$$x_{k-1} = 140 \text{ } ^\circ\text{C}, \text{ temperatura inferior}$$

$$x_* = 146,20 \text{ } ^\circ\text{C}, \text{ temperatura de estudio.}$$

Para γ gases

$$y_k = 2,975 \cdot 10^{-5} \frac{\text{m}^2}{\text{s}}$$

$$y_{k-1} = 2,745 \cdot 10^{-5} \frac{\text{m}^2}{\text{s}}$$

$$y(x_*) = 2,745 \cdot 10^{-5} + \frac{(146,20-140)}{(160-140)} \cdot (2,975 \cdot 10^{-5} - 2,745 \cdot 10^{-5})$$

$$y(x_*) = \mathbf{2,816 \cdot 10^{-5} \frac{m^2}{s}}, \text{ es la } \gamma_{gases} \text{ a la temperatura de estudio.}$$

Para C_p

$$y_k = 1016 \frac{J}{Kg^\circ K}$$

$$y_{k-1} = 1013 \frac{J}{Kg^\circ K}$$

$$y(x_*) = 1013 + \frac{(146,20-140)}{(160-140)} \cdot (1016 - 1013)$$

$$y(x_*) = \mathbf{1038,93 \frac{J}{Kg^\circ K}}, \text{ es el } C_p \text{ a la temperatura de estudio.}$$

Para k_{gases}

$$y_k = 0,03511 \frac{W}{m^\circ K}$$

$$y_{k-1} = 0,03374 \frac{W}{m^\circ K}$$

$$y(x_*) = 0,03374 + \frac{(146,20-140)}{(160-140)} \cdot (0,03511 - 0,03374)$$

$$y(x_*) = \mathbf{0,0341647 \frac{W}{m^\circ K}}, \text{ es la } k_{gases} \text{ a la temperatura de estudio.}$$

Para Pr

$$y_k = 0,7014$$

$$y_{k-1} = 0,7041$$

$$y(x_*) = 0,7041 + \frac{(146,20-140)}{(160-140)} \cdot (0,7014 - 0,7041)$$

$$y(x_*) = \mathbf{0,703263}, \text{ es el } Pr \text{ a la temperatura de estudio.}$$

En resumen se tiene:

$Th_i = 146,20 \text{ }^\circ C$, es la temperatura promedio de salida de los gases de cámara.

$\gamma_{gases} = 2,816 \cdot 10^{-5} \frac{m^2}{s}$, es la viscosidad cinemática del aire.

$C_p = 1038,93 \frac{J}{Kg^\circ K}$, es el calor específico del aire.

$k_{gases} = 0,0341647 \frac{W}{m^\circ K}$, es la conductividad térmica del aire.

$Pr = 0,703263$, es el número de Prandtl.

Determinando el número de Reynolds:

$$Re_{max} = \frac{v_{max} \cdot D}{\gamma_{gases}}$$

Dónde:

$v_{max} = 1,55 \frac{m}{s}$, es la velocidad del aire caliente dentro del intercambiador.

$$D = 0,0254 \text{ m}$$

$$Re_{max} = \frac{(1,55) \cdot (0,0254)}{2,816 \cdot 10^{-5}}$$

$$Re_{max} = 1398,08$$

De acuerdo con Pitts (1979) en la tabla 7.7, para tubos escalonados $C1 = 0,460$, $n2 = 0,562$ (p. 177). (Pitts & Sissom, 1979)

$$ho_i = \frac{C1 \cdot (Re_{max})^{n2} \cdot k_{gases}}{D}$$

Dónde:

ho_i , es el coeficiente de convección externa del intercambiador.

$$ho_i = \frac{(0,460) \cdot (1398,08)^{0,562} \cdot (0,0341647)}{0,0254}$$

$$ho_i = 36,248 \frac{W}{m^2 \cdot ^\circ C}$$

La ecuación de Grimson está definida para haces de tubos escalonados considerando mínimo 10 tubos de profundidad. En nuestro caso práctico el intercambiador del horno de combustión de biomasa tiene 8 tubos de profundidad, por lo que se realizará el ajuste al valor del coeficiente de convección. (Pitts & Sissom, 1979)

$$\frac{h(8 \text{ tubos})}{h(10 \text{ tubos})} = 0,98$$

Dónde:

$h(8 \text{ tubos}) = 0,98 \cdot ho_i$, es el coeficiente de convección del intercambiador.

$$h(10 \text{ tubos}) = ho_i$$

$$h(8 \text{ tubos}) = 0,98 \cdot (36,248)$$

$$h(8 \text{ tubos}) = 35,523 \frac{W}{m^2 \cdot ^\circ C}$$

En la figura 46, se representa el flujo de aire frío que ingresa al intercambiador de calor y el flujo de los gases calientes provenientes de la cámara de combustión que atraviesan al intercambiador de calor del horno de combustión de biomasa. Este flujo caliente – frío, se produce durante el proceso de la combustión siempre y cuando el ventilador axial ingrese el aire frío (aire a temperatura ambiente) al intercambiador de calor. En el intercambiador de calor se presentan cuatro temperaturas y velocidades, así:

- Temperatura y velocidad de aire frío que ingresa al intercambiador.
- Temperatura y velocidad de aire calentado que sale del intercambiador.

- Temperatura y velocidad de gases calientes provenientes de la cámara de combustión que atraviesan el intercambiador.
- Temperatura y velocidad de gases enfriados que salen por la chimenea una vez que atraviesan el intercambiador de calor.

En la figura 47, se representa a través de un diagrama las temperaturas y velocidades presentes en el intercambiador de calor descritas en la figura 46.

Dónde:

T_{hi} , es la temperatura de los gases de entrada al intercambiador de calor.

T_{ho} , es la temperatura de los gases de salida del intercambiador de calor.

T_{ci} , es la temperatura del aire de entrada al intercambiador de calor.

T_{co} , es la temperatura del aire de salida del intercambiador de calor.

V_{hi} , es la velocidad de los gases de entrada al intercambiador de calor.

V_{ho} , es la velocidad de los gases de salida del intercambiador de calor.

V_{ci} , es la velocidad del aire de entrada al intercambiador de calor.

V_{co} , es la velocidad del aire de salida del intercambiador de calor.

En la figura 48, se representa la variación de las temperaturas de entrada de los gases y del aire presentes en el intercambiador de calor descritas en la figura 47, de la cual, se generan dos deltas de temperaturas que permiten determinar la media logarítmica de la variación de la temperatura en el intercambiador de calor (IC), descrita por la siguiente expresión.

$$\Delta T_{ml} = \frac{\Delta T_2 - \Delta T_1}{\ln\left(\frac{\Delta T_2}{\Delta T_1}\right)}$$

Dónde.

$T_{hi} = 146,20 \text{ }^\circ\text{C}$, temperatura de ingreso de los gases al IC.

$T_{ho} = 40,80 \text{ }^\circ\text{C}$, temperatura de salida de los gases del IC.

$T_{ci} = T_{amb} = 23,11 \text{ }^\circ\text{C}$, temperatura de ingreso del aire al IC.

$T_{co} = 80,60 \text{ }^\circ\text{C}$, temperatura de salida del aire del IC.

$$\Delta T_1 = T_{hi} - T_{co}$$

$$\Delta T_1 = 146,20 - 80,60$$

$$\Delta T_1 = 65,60 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$\Delta T_2 = T_{ho} - T_{ci}$$

$$\Delta T_2 = 40,80 - 23,11$$

$$\Delta T_2 = 17,69 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$\Delta T_{ml} = \frac{\Delta T_2 - \Delta T_1}{\ln\left(\frac{\Delta T_2}{\Delta T_1}\right)}$$

Dónde:

ΔT_{ml} , es la media logarítmica de la variación de temperatura del IC.

$$\Delta T_{ml} = \frac{17,69 - 65,60}{\ln\left(\frac{17,69}{65,60}\right)}$$

$$\Delta T_{ml} = \mathbf{36,556} \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$ATubos = \#tubos \cdot \pi \cdot D \cdot Lo$$

Dónde:

$ATubos$, área de los tubos del intercambiador.

$$\#tubos = 384$$

$Lo = 0,78 \text{ m}$, longitud de los tubos del IC.

$D = 0,0254 \text{ m}$, diámetros de los tubos del IC.

$$ATubos = (384) \cdot \pi \cdot (0,0254) \cdot (0,78)$$

$$ATubos = \mathbf{23,90 \text{ m}^2}$$

El factor de corrección de la temperatura media logarítmica (F) para intercambiadores complejos de calor, se utiliza las siguientes expresiones.

$$R = \frac{T_{hi} - T_{ho}}{T_{co} - T_{ci}}$$

$$R = \frac{146,20 - 40,80}{80,60 - 23,11}$$

$$R = \mathbf{1,833}$$

$$P = \frac{T_{co} - T_{ci}}{T_{hi} - T_{ci}}$$

$$P = \frac{80,60 - 23,11}{146,20 - 23,11}$$

$$P = \mathbf{0,467}$$

$$F = \sqrt{\frac{R^2 + 1}{R - 1}} \cdot \frac{\ln\left(\frac{1 - P}{1 - PR}\right)}{\ln\left(\frac{2 - (PR) + 1 + \sqrt{R^2 + 1}}{2 - (PR) + 1 - \sqrt{R^2 + 1}}\right)}$$

Dónde:

F , factor de conversión de la temperatura media logarítmica para intercambiadores complejos de calor.

$$F = \sqrt{\frac{(1,833)^2 + 1}{(1,833) - 1}} \cdot \frac{\ln\left(\frac{1 - 0,467}{1 - 0,479 \cdot 1,833}\right)}{\ln\left(\frac{2 - (0,467 \cdot 1,833) + 1 + \sqrt{(1,833)^2 + 1}}{2 - (0,467 \cdot 1,833) + 1 - \sqrt{(1,833)^2 + 1}}\right)}$$

$$F = \mathbf{0,692}$$

En la figura 49, se representa el corte transversal de un tubo escalonado del intercambiador de calor del horno de combustión de biomasa. En la cual se describen las dimensiones del tubo de acero que forman el haz escalonado del horno de combustión.

Dónde:

$L_o = 0,78$, es la longitud de un tubo escalonado del IC.

$D = 0,0254 \text{ m}$, es el diámetro externo del tubo escalonado del IC.

$D_i = 0,0224 \text{ m}$, es el diámetro interno del tubo escalonado del IC.

$e = 0,0015 \text{ m}$, es el espesor del tubo escalonado del IC.

$$L \text{ tubo} = 3 \cdot L_o$$

Dónde:

$L \text{ tubo}$, es la longitud total del tubo escalonado del IC.

$$L \text{ tubo} = 3 \cdot (0,78)$$

$$L \text{ tubo} = 2,34 \text{ m}$$

De acuerdo con Corvalan (1992) en la Ingeniería del secado solar, secadores de convección forzada, “para ductos escalonados de diámetro menores a 0,05 m, la velocidad de aire entre ellos varía entre 5 a 10 m/s²” (p. 8-5).

Para el caso experimental, se considera que en el intercambiador de calor del horno de combustión, el aire atraviesa por el interior del haz de los tubos escalonados con una velocidad de 10 m/s².

$$Tb = \frac{T_{ci} + T_{co}}{2}$$

Dónde:

Tb , es la temperatura media volumétrica.

$$Tb = \frac{23,11 + 80,60}{2}$$

$$Tb = 51,855 \text{ } ^\circ\text{C}$$

En éstas condiciones, las propiedades termo físicas del aire frío que atraviesa los tubos escalonados del intercambiador de calor, se las determina apoyándose en la ecuación de interpolación lineal y con los datos termo físicos del aire descritos en la tabla A-15 de Cengel. (Cengel, 2011)

$$y(x_*) = y_{k-1} + \frac{x_* - x_{k-1}}{x_k - x_{k-1}} \cdot (y_k - y_{k-1})$$

Dónde:

$x_k = 60 \text{ } ^\circ\text{C}$, temperatura superior.

$x_{k-1} = 50\text{ }^{\circ}\text{C}$, temperatura inferior

$x_* = 51,855\text{ }^{\circ}\text{C}$, temperatura de estudio.

Para γ_{Tb}

$$y_k = 1,896 \cdot 10^{-5} \frac{m^2}{s}$$

$$y_{k-1} = 1,798 \cdot 10^{-5} \frac{m^2}{s}$$

$$y(x_*) = 1,798 \cdot 10^{-5} + \frac{(51,855-50)}{(60-50)} \cdot (1,896 \cdot 10^{-5} - 1,798 \cdot 10^{-5})$$

$y(x_*) = \mathbf{1,816 \cdot 10^{-5} \frac{m^2}{s}}$, es la γ_{Tb} a la temperatura de estudio.

Para Cp_{Tb}

$$y_k = 1007 \frac{J}{Kg^{\circ}K}$$

$$y_{k-1} = 1007 \frac{J}{Kg^{\circ}K}$$

$$y(x_*) = 1007 + \frac{(51,855-50)}{(60-50)} \cdot (1007 - 1007)$$

$y(x_*) = \mathbf{1007 \frac{J}{Kg^{\circ}K}}$, es el Cp_{Tb} a la temperatura de estudio.

Para $k_{gas\ Tb}$

$$y_k = 0,02808 \frac{W}{m^{\circ}K}$$

$$y_{k-1} = 0,02735 \frac{W}{m^{\circ}K}$$

$$y(x_*) = 0,02735 + \frac{(51,855-50)}{(60-50)} \cdot (0,02808 - 0,02735)$$

$y(x_*) = \mathbf{0,02748 \frac{W}{m^{\circ}K}}$, es la $k_{gas\ Tb}$ a la temperatura de estudio.

Para Pr_{Tb}

$$y_k = 0,7202$$

$$y_{k-1} = 0,7228$$

$$y(x_*) = 0,7228 + \frac{(51,855-50)}{(60-50)} \cdot (0,7202 - 0,7228)$$

$y(x_*) = \mathbf{0,722317}$, es el Pr_{Tb} a la temperatura de estudio.

En resumen se tiene:

$Tb = 51,855\text{ }^{\circ}\text{C}$, es la temperatura media volumétrica.

$\gamma_{Tb} = 1,816 \cdot 10^{-5} \frac{m^2}{s}$, es la viscosidad cinemática del aire en los tubos del IC.

$Cp_{Tb} = 1007 \frac{J}{Kg^{\circ}K}$, es el calor específico del aire en los tubos del IC.

$k_{gas\ Tb} = 0,02748 \frac{W}{m^{\circ}K}$, es la conductividad térmica del aire en los tubos del IC.

$Pr_{Tb} = 0,722317$, es el número de Prandtl para el aire en los tubos del IC.

Determinando el número de Reynolds:

$$Re_{Di} = \frac{v_{tubo} \cdot Di}{\gamma_{Tb}}$$

Dónde:

$v_{tubo} = 10 \frac{m}{s}$, es la velocidad del aire dentro del intercambiador.

$Di = 0,0224$ m, diámetro interno del tubo escalonado del IC.

$$Re_{Di} = \frac{(10) \cdot (0,0224)}{1,816 \cdot 10^{-5}}$$

$$Re_{Di} = \mathbf{12334,80}$$

El valor del número de Reynolds es de 12334,80, por lo que se tiene convección forzada en flujo turbulento. Para éste régimen el número de Nusselt se determina con la ecuación de Dittus-Boelter. (Pitts & Sissom, 1979)

$$Nu_{Di} = \frac{hi_{Tb} \cdot Di}{k_{gas\ Tb}}$$

Dónde:

hi_{Tb} , es el coeficiente de convección interna de los tubos escalonados en flujo turbulento expresado en $W/m^2 \cdot ^{\circ}C$.

$k_{gas\ Tb}$, es la conductividad térmica del aire en los tubos escalonados expresada en $W/m^{\circ}C$.

Di , es el diámetro interno de los tubos escalonados expresado en m^2 .

Nu_{Di} , es el número de Nusselt para el diámetro interno.

$$\frac{hi_{Tb} \cdot Di}{k_{gas\ Tb}} = 0,023 \cdot Re_{Di} \cdot Di^{0,8} \cdot Pr_{Tb}^{n1}$$

Dónde:

$n1 = 0,4$, para escenarios con calentamiento de fluido.

$$hi_{Tb} = \frac{[0,023 \cdot Re_{Di} \cdot Di^{0,8} \cdot Pr_{Tb}^{n1}] \cdot k_{gas\ Tb}}{Di}$$

$$hi_{Tb} = \frac{[(0,023) \cdot (12334,80) \cdot (0,0224)^{0,8} \cdot (0,722317)^{0,4}] \cdot (0,02748)}{0,0224}$$

$$hi_{Tb} = \mathbf{14,632 \frac{W}{m^2 \cdot ^{\circ}C}}$$

De acuerdo con Pitts (1979), en Transferencia de calor, “El rendimiento de los intercambiadores de calor depende de que las superficies de transferencia de calor se encuentren limpias y libres de corrosión” (p. 248).

En la figura 50, se describen las secciones de un tubo escalonado del intercambiador de calor del horno de combustión de biomasa, con incrustaciones en el interior y exterior del tubo por la suciedad producida por el ambiente.

Dónde:

R_{di} , es la resistencia térmica por acumulación de incrustaciones en el interior del tubo escalonado del intercambiador de calor.

R_{do} , es la resistencia térmica por acumulación de incrustaciones en el exterior del tubo escalonado del intercambiador de calor.

R_i , es el radio interior del tubo escalonado del intercambiador de calor.

R_o , es el radio exterior del tubo del intercambiador de calor.

hi_o , es el coeficiente de conversión interna corregido del tubo escalonado del intercambiador de calor.

$$hi_o = hi_{Tb} \cdot \frac{R_i}{R_o}$$

Dónde:

$$R_i = 0,0112 \text{ m}$$

$$R_o = 0,0127 \text{ m}$$

$$hi_{Tb} = 14,632 \frac{W}{m^2 \cdot ^\circ C}$$

$$hi_o = (14,632) \cdot \frac{0,0112}{0,0127}$$

$$hi_o = \mathbf{12,904} \frac{W}{m^2 \cdot ^\circ C}$$

$$Uc = \frac{hi_o \cdot ho_i}{hi_o + ho_i}$$

Dónde:

Uc , es el coeficiente global de transferencia de calor limpio.

$$ho_i = 36,248 \frac{W}{m^2 \cdot ^\circ C}, \text{ coeficiente de convección externa del intercambiador.}$$

$$hi_o = 12,904 \frac{W}{m^2 \cdot ^\circ C}, \text{ coeficiente de convección interna de los tubos del IC.}$$

$$Uc = \frac{(12,904) \cdot (36,248)}{12,904 + 36,248}$$

$$Uc = \mathbf{9,516} \frac{W}{m^2 \cdot ^\circ C}$$

$$Rd = R_{di} + R_{dc}$$

Dónde:

$$Rd = 0,004, \text{ de acuerdo con Pitts (1979), tabla 10.3, (p. 248).}$$

Considerando el aire industrial, se tiene:

$$\frac{1}{Ud} = \frac{1}{uc} + Rd$$

Dónde:

Ud , es el coeficiente global de transferencia de calor.

$$Ud = \frac{1}{\frac{1}{uc} + Rd}$$

$$Ud = \frac{1}{\frac{1}{9,516} + 0,04}$$

$$Ud = 6,892 \frac{Wh}{m^2 \cdot C}$$

$$Qu = Ud \cdot ATubos \cdot \Delta Tml \cdot F$$

Dónde:

Qu , es el calor útil de la cámara de combustión.

$Ud = 6,892 \frac{Wh}{m^2 \cdot C}$, es el coeficiente global de transferencia de calor.

$ATubos = 23,90 m^2$, es el área de los tubos escalonados.

$\Delta Tml = 36,556 \text{ } ^\circ C$, es la media logarítmica de la variación de temperatura.

$F = 0,692$, es el factor de conversión de la temperatura.

$$Qu = (6,892) \cdot (23,90) \cdot (36,556) \cdot (0,692)$$

$$Qu = 4166,85 Wh$$

El calor útil de la cámara de combustión, es igual al calor trasferido a los haces de los tubos escalonados del intercambiador de calor, resultado de la combustión del Pennisetum Clandestinum en estado natural, con un contenido de humedad final inicial (X_{wi}) del 76,64%, es aproximadamente de 4,16 KWh.

El calor almacenado en la cámara de combustión (Qa), se lo determina cuantificando el calor que se almacena en las paredes de la cámara de combustión, considerando las propiedades termo físicas de la pared compuesta de la cámara combustión descritas en la figura 44 y tabla 15, para el caso experimentales considerando la combustión del Pennisetum Clandestinum en estado natural, con un contenido de humedad inicial (X_{wi}) del 76,64%, se tiene:

$$Tm = \frac{Tpi + Tpo}{2}$$

Dónde:

Tm , es la temperatura media de la pared de la cámara de combustión.

$Tpi = 127,70 \text{ } ^\circ C$, es la temperatura promedio interna de pared.

$Tpo = 72,30 \text{ } ^\circ C$, es la temperatura promedio externa de pared.

$$Tm = \frac{127,70+72,30}{2}$$

$$Tm = 100,00 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$\Delta T_{pc} = T_{pi} - Tm$$

Dónde:

ΔT_{pc} , es la temperatura perdida en las paredes de la cámara de combustión.

$$\Delta T_{pc} = 127,70 - 100,00$$

$$\Delta T_{pc} = 27,70 \text{ } ^\circ\text{C}$$

Para el ladrillo refractario de la cámara de combustión, se determina:

$$mR = \delta R \cdot VR$$

Dónde:

mR , es la masa del ladrillo refractario de la cámara de combustión.

$\delta R = 2645 \frac{Kg}{m^3}$, densidad del ladrillo refractario de la cámara de combustión.

$VR = 0,120224 m^3$, volumen del ladrillo refractario en la cámara.

$$mR = (2645) \cdot (0,120224)$$

$$mR = 317,992 \text{ Kg}$$

$$QR = mR \cdot CpR \cdot \Delta T_{pc}$$

Dónde:

QR , calor almacenado en el ladrillo refractario de la cámara de combustión.

$CpR = 0,2294455 \frac{Kcal}{Kg \cdot ^\circ C}$, calor específico del ladrillo refractario.

$$QR = (317,992) \cdot (0,2294455) \cdot (27,70)$$

$$QR = 2021,042 \text{ Kcal}$$

Para el acero 1 de la pared de la cámara de combustión, se determina:

$$ma1 = \delta a1 \cdot Va1$$

Dónde:

$ma1$, es la masa del acero 1 de la cámara de combustión.

$\delta a1 = 7854 \frac{Kg}{m^3}$, densidad del acero 1 de la cámara de combustión.

$Va1 = 0,0055488 m^3$, volumen del acero 1 en la cámara de combustión.

$$ma1 = (7854) \cdot (0,0055488)$$

$$ma1 = 43,58 \text{ Kg}$$

$$Qa1 = ma1 \cdot Cpa1 \cdot \Delta T_{pc}$$

Dónde:

$Qa1$, calor almacenado en el acero 1 de la cámara de combustión.

$Cpa1 = 0,1037284 \frac{Kcal}{Kg.^{\circ}C}$, calor específico del acero 1.

$$Qa1 = (43,58). (0,1037284). (27,70)$$

$$\mathbf{Qa1 = 125,217 Kcal}$$

Para la lana de vidrio de la cámara de combustión, se determina:

$$ml = \delta l. Vl$$

Dónde:

ml , es la masa de la lana de vidrio de la cámara de combustión.

$\delta l = 105 \frac{Kg}{m^3}$, densidad de la lana de vidrio de la cámara de combustión.

$Vl = 0,0850816 m^3$, volumen de la lana de vidrio en la cámara de combustión.

$$ml = (150). (0,0850816)$$

$$\mathbf{ml = 12,76 Kg}$$

$$Ql = ml. Cpl. \Delta Tpc$$

Dónde:

Ql , calor almacenado en la lana de vidrio de la cámara de combustión.

$Cpl = 0,1900000 \frac{Kcal}{Kg.^{\circ}C}$, calor específico de la lana de vidrio.

$$Ql = (12,76). (0,1900000). (27,70)$$

$$\mathbf{Ql = 67,155 Kcal}$$

Para el acero 2 de la pared de la cámara de combustión, se determina:

$$ma2 = \delta a2. Va2$$

Dónde:

$ma2$, es la masa del acero 2 de la cámara de combustión.

$\delta a2 = 7854 \frac{Kg}{m^3}$, densidad del acero 2 de la cámara de combustión.

$Va2 = 0,0018496 m^3$, volumen del acero 2 en la cámara de combustión.

$$ma2 = (7854). (0,0018496)$$

$$\mathbf{ma2 = 14,526 Kg}$$

$$Qa2 = ma2. Cpa2. \Delta Tpc$$

Dónde:

$Qa2$, calor almacenado en el acero 2 de la cámara de combustión.

$Cpa2 = 0,1037284 \frac{Kcal}{Kg.^{\circ}C}$, calor específico del acero 2.

$$Qa2 = (14,526). (0,1037284). (27,70)$$

$$Q_{a2} = 41,737 \text{ Kcal}$$

$$Q_a = Q_R + Q_{a1} + Q_l + Q_{a2}$$

Dónde:

Q_a , calor almacenado en la cámara de combustión.

$$Q_a = 2021,042 + 125,217 + 67,155 + 41,737$$

$$Q_a = 2255,151 \text{ Kcal}$$

$$1 \text{ Kcal} = 4187 \text{ J}; 1 \text{ KWh} = 3,6 \cdot 10^6 \text{ J} = 1000 \text{ Wh}$$

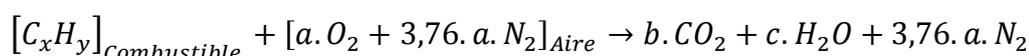
$$Q_a = 2255,151 \text{ Kcal} \cdot \frac{4187 \text{ J}}{1 \text{ Kcal}} \cdot \frac{1 \text{ KWh}}{3,6 \cdot 10^6 \text{ J}} \cdot \frac{1000 \text{ Wh}}{1 \text{ KWh}} = 2622,86 \text{ Wh}$$

$$Q_a = 2622,86 \text{ Wh}$$

El calor almacenado en la cámara de combustión, como resultado de la combustión del Pennisetum Clandestinum en estado natural, con un contenido de humedad inicial (X_{wi}) del 76,64%, es aproximadamente 2,62 KWh.

El calor perdido por los gases de la combustión (Q_g), es el calor transferido por los gases de la combustión del Pennisetum Clandestinum en estado natural, con un contenido de humedad inicial (X_{wi}) del 76,64%, se lo determina considerando las entalpias a la temperatura de salida de gases del intercambiador de calor ($T_{ho} = 40,80 \text{ }^\circ\text{C}$) y a la respectiva temperatura de ambiente ($T_{amb} = 23,11 \text{ }^\circ\text{C}$). Se deben determinar los productos de la combustión.

La ecuación química de la combustión de cualquier combustible del tipo C_xH_y , se la define con la siguiente expresión.



Dónde:

$a = \frac{x+y}{4}$, es la cantidad estequiométrica del oxígeno.

b y c , son los parámetros algebraicos que resultan del balance numéricos.

De la tablas 6, se describe que el Pennisetum Clandestinum se encuentra formado principalmente por Fibras en Detergente Neutro (FDN con un 58,10%), del cual el contenido de Celulosa representa el 26,90%, Hemicelulosa con un 26,20% y Lignina con un 5,88%.

La Hemicelulosa constituye un grupo heterogéneo de polisacáridos cuya composición varía marcadamente entre especies vegetales, en cambio la celulosa presenta un bajo contenido de pentosas estando constituida principalmente por glucosa. La Lignina es un polifenol con una estructura no definida, que no presenta

secuencias repetidas y cuyo tamaño no está bien definido. La lignina cuando es sometida a altas temperaturas desarrolla una propiedad aglomerante que para el caso del Pennisetum Clandestinum, se transforma en una pasta sólida “Grumo de Pasto vivo” difícil de romper. Uno de los elementos que aporta a la combustión del Pennisetum Clandestinum es la celulosa $(C_6H_{10}O_5)_n$ con un valor mínimo de $n=200$, siendo el componente principal de las fibras FDN. (Correa, Carulla, & Pabón, 2008)

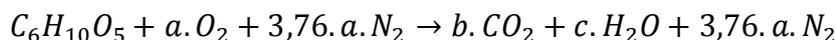
Para el experimental se empleará como fórmula empírica del Pennisetum Clandestinum la ecuación $C_6H_{10}O_5$.

Considerando una reacción química con el 100% de aire teórico, se tiene que:



Dónde:

$PC = C_6H_{10}O_5$, es fórmula empírica del Pennisetum Clandestinum.



Para O_2 : $5 + 2a = 2b + c$

Para H : $10 = 2c$

Para C : $6 = b$

Para N_2 : $3,76a = 3,76a$

Se determinan los valores de $a = 6$; $b = 6$; $c = 5$.

$C_6H_{10}O_5 + 6O_2 + 22,56N_2 \rightarrow 6CO_2 + 5H_2O + 22,56N_2$, es la combustión del Pennisetum Clandestinum con el 100% de aire.

$$n = \frac{m}{PM}$$

Dónde:

n , es el número de moles de la sustancia

m , es la masa del combustible expresada en Kg.

PM , es el peso molecular expresado en Kg/Kmol.

$$PM_{PC} = 6.PM_C + 10.PM_H + 5.PM_O$$

Dónde:

PM_{PC} , peso molecular del Pennisetum Clandestinum.

$PM_C = 12,0107$, peso molecular del carbono.

$PM_H = 1,008$, peso molecular del hidrógeno.

$PM_O = 15,9994$, peso molecular del oxígeno.

$$PM_{PC} = (6.12,0107) + (10.1,008) + (5.15,9994)$$

$$PM_{PC} = 162,1412 \frac{Kg}{Kmol}$$

$$PM_p = 6.PM_{CO_2} + 5.PM_{H_2O} + 22,56.PM_{N_2}$$

Dónde:

PM_p , peso molecular de los productos de la combustión del Pennisetum Clandestinum.

$$PM_{CO_2} = 44,01 \frac{Kg}{Kmol}, \text{ peso molecular del dióxido de carbono.}$$

$$PM_{H_2O} = 18,01528 \frac{Kg}{Kmol}, \text{ peso molecular del agua.}$$

$$PM_{N_2} = 28,0134 \frac{Kg}{Kmol}, \text{ peso molecular del nitrógeno.}$$

$$PM_p = (6.44,01) + (5.18,01528) + (22,56.28,0134)$$

$$PM_p = 986,1187 \frac{Kg}{Kmol}$$

$$PM_{aire} = 6.PM_{O_2} + 22,56.PM_{N_2}$$

Dónde:

PM_{aire} , peso molecular del 100% aire en la combustión del Pennisetum Clandestinum.

$$PM_{O_2} = 31,9988 \frac{Kg}{Kmol}, \text{ peso molecular del oxígeno.}$$

$$PM_{N_2} = 28,0134 \frac{Kg}{Kmol}, \text{ peso molecular del nitrógeno.}$$

$$PM_{aire} = (6.31,9988) + (22,56.28,0134)$$

$$PM_{aire} = 823,9751 \frac{Kg}{Kmol}$$

$$RAC = \frac{PM_{aire}}{PM_{Combustible}}$$

Dónde:

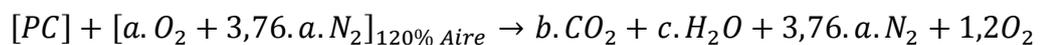
RAC , relación 100% aire – combustible.

$$RAC = \frac{823,9751}{162,1412}$$

$$RAC = 5,0818$$

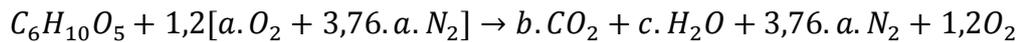
En condiciones teóricas con el 100% de aire, por la combustión de 1 Kg de Pennisetum Clandestinum se requieren 5,0818 Kg de aire.

Considerando un exceso del 20% de aire, en estas condiciones se asemejan a las condiciones reales de combustión del Pennisetum Clandestinum, se determina que:



Dónde:

$PC = C_6H_{10}O_5$, es fórmula empírica del Pennisetum Clandestinum.



$$PM_{p(120\%)} = 6.PM_{CO_2} + 5.PM_{H_2O} + 27,072.PM_{N_2} + 1,2.PM_{O_2}$$

Dónde:

$PM_{p(120\%)}$, peso molecular de los productos de la combustión del Pennisetum

Clandestinum considerando un 20% de exceso de aire.

$$PM_{CO_2} = 44,01 \frac{Kg}{Kmol}, \text{ peso molecular del dióxido de carbono.}$$

$$PM_{H_2O} = 18,01528 \frac{Kg}{Kmol}, \text{ peso molecular del dióxido de agua.}$$

$$PM_{N_2} = 28,0134 \frac{Kg}{Kmol}, \text{ peso molecular del dióxido de nitrógeno.}$$

$$PM_{O_2} = 31,9988 \frac{Kg}{Kmol}, \text{ peso molecular del dióxido de oxígeno.}$$

$$PM_{p(120\%)} = (6.44,01) + (5.18,01528) + (27,072.28,0134) + (1,2.31,9988)$$

$$PM_{p(120\%)} = 1150,9137 \frac{Kg}{Kmol}$$

$$PM_{120\% \text{ aire}} = 7,2.PM_{O_2} + 27,072.PM_{N_2}$$

Dónde:

PM_{aire} , peso molecular del 120% aire en la combustión del Pennisetum

Clandestinum.

$$PM_{N_2} = 28,0134 \frac{Kg}{Kmol}, \text{ peso molecular del dióxido de nitrógeno.}$$

$$PM_{O_2} = 31,9988 \frac{Kg}{Kmol}, \text{ peso molecular del dióxido de oxígeno.}$$

$$PM_{120\% \text{ aire}} = (7,2.31,9988) + (27,072.28,0134)$$

$$PM_{120\% \text{ aire}} = 988,7701 \frac{Kg}{Kmol}$$

$$RAC_{120\% \text{ aire}} = \frac{PM_{120\% \text{ aire}}}{PM_{PC}}$$

Dónde:

$RAC_{120\% \text{ aire}}$, relación 120% aire – combustible.

$$PM_{PC} = 162,1412 \frac{Kg}{Kmol}$$

$$RAC_{120\% \text{ aire}} = \frac{988,7701}{162,1412}$$

$$RAC_{120\% \text{ aire}} = 6,0982$$

En condiciones reales, con un exceso del 20% de aire, se determina que para combustionar de 1 Kg de Pennisetum Clandestinum se requieren 6,0982 Kg de aire.

En la Tabla 18, se describen las entalpías de los productos de combustión del Pennisetum Clandestinum en estado natural, considerando una combustión con el 120% de aire, a una temperatura de salida de gases del intercambiador de calor ($T_{ho} = 40,80 \text{ }^\circ\text{C}$) y a la temperatura de ambiente ($T_{amb} = 23,11 \text{ }^\circ\text{C}$).

Tabla 18**Entalpías de los productos de la combustión en estado natural**

Referencia	h a T_{amb} (KJ/Kmol)	h a T_{ho} (KJ/Kmol)
CO_2	9367	11886
H_2O	9908	11079
O_2	8684	9716
N_2	8672	9694

Fuente: (Potter & Somerton, 2004)

Con el 120% de aire, se ha definido la ecuación de la combustión del Pennisetum Clandestinum, como:



Dónde:

$6CO_2 + 5H_2O + 27,072N_2 + 1,2O_2$, son los productos de la combustión.

$T_{ho} = 313,95 \text{ }^\circ\text{K}$, es la temperatura de salida de gases del IC.

$T_{ci} = T_{amb} = 296,26 \text{ }^\circ\text{K}$, es la temperatura de ingreso de aire al IC.

$$H_{Productos} = H_{CO_2} + H_{H_2O} + H_{N_2} + H_{O_2}$$

Dónde:

$H_{Productos}$, es la entalpía de los productos de la combustión.

H_{CO_2} , es la entalpía del dióxido de carbono.

$$H_{CO_2} = H_{CO_2 \text{ a } T_{ho}} - H_{CO_2 \text{ a } T_{amb}}$$

$$H_{CO_2} = 11866 - 9367$$

$$H_{CO_2} = 2499 \frac{KJ}{Kmol}$$

H_{H_2O} , es la entalpía del agua.

$$H_{H_2O} = H_{H_2O \text{ a } T_{ho}} - H_{H_2O \text{ a } T_{amb}}$$

$$H_{H_2O} = 11079 - 9908$$

$$H_{H_2O} = 1171 \frac{KJ}{Kmol}$$

H_{N_2} , es la entalpía del nitrógeno.

$$H_{N_2} = H_{N_2 a T_{ho}} - H_{N_2 a T_{amb}}$$

$$H_{N_2} = 9694 - 8672$$

$$H_{N_2} = \mathbf{1022} \frac{KJ}{Kmol}$$

H_{O_2} , es la entalpía del oxígeno.

$$H_{O_2} = H_{O_2 a T_{ho}} - H_{O_2 a T_{amb}}$$

$$H_{O_2} = 9716 - 8684$$

$$H_{O_2} = \mathbf{1032} \frac{KJ}{Kmol}$$

$$H_{Productos} = 2499 + 1171 + 1022 + 1032$$

$$H_{Productos} = \mathbf{5724} \frac{KJ}{Kmol}$$

$$RPCC_{120\% \text{ aire}} = \frac{PM_p}{PM_{PC}}$$

Dónde:

$RPCC_{120\% \text{ aire}}$, relación gases de la combustión – combustible.

$PM_p = 986,1187 \frac{Kg}{Kmol}$, peso molecular de los productos de la combustión con el aire a un 120%.

$PM_{PC} = 162,1412 \frac{Kg}{Kmol}$, peso molecular del Pennisetum Clandestinum.

$$RPCC_{120\% \text{ aire}} = \frac{986,1187}{162,1412}$$

$$RPCC_{120\% \text{ aire}} = \mathbf{5,5267}$$

En condiciones reales de aire, se determina que por la combustión de 1 Kg de Pennisetum Clandestinum en estado natural se producen 5,5267 Kg de gases de producto de la combustión.

$$Qg = H_{Productos} \cdot F_{moles}$$

Dónde:

Qg , calor perdido por los gases de la combustión.

$F_{moles} = 0,086 \text{ Kmol}$, factor de corrección molar.

$$Qg = (5724) \cdot (0,086) \text{ KJ}$$

$$3,6 \cdot 10^6 \text{ J} = 1000 \text{ Wh}$$

$$Qg = 492,264 \text{ KJ} \cdot \frac{1000 \text{ Wh}}{3,6 \cdot 10^6 \text{ J}} \cdot \frac{1000 \text{ J}}{1 \text{ KJ}}$$

$$Qg = \mathbf{136,74 \text{ Wh}}$$

El calor perdido por los gases de la combustión, como resultado de la combustión del Pennisetum Clandestinum en estado natural, con un contenido de humedad final inicial (X_{wi}) del 76,64%, es aproximadamente 0,13 KWh.

El calor perdido en las cenizas residuales producto de la combustión (Q_{cen}), se genera cuando se descarga la ceniza desde la cámara de combustión hacia la parte inferior de la cámara, esta lleva una cantidad de calor (ver figura 46).

$$\Delta T_{cen} = T_{cen} - T_{amb}$$

Dónde:

$T_{amb} = 23,11 \text{ } ^\circ\text{C}$, es la temperatura de ambiente.

$T_{cen} = 130,80 \text{ } ^\circ\text{C}$, es la temperatura de cenizas.

$$\Delta T_{cen} = 130,80 - 23,11$$

$$\Delta T_{cen} = \mathbf{107,69 \text{ } ^\circ\text{C}}$$

De acuerdo al estudio realizado por Choi y Okos en 1986 Effects of temperature on the thermal properties of food. Vol 1, “se determinar el calor específico de los alimentos en función de su temperatura”, el mismo que está expresado en $\text{J/Kg}^\circ\text{C}$.

$$cp_{cen} = 1092,60 + 1889,60 \cdot 10^{-3} \cdot T_{cen} - 3681,70 \cdot 10^{-6} \cdot T_{cen}^2$$

Dónde:

cp_{cen} , calor específico la temperatura de las cenizas T_{cen} .

$$cp_{cen} = 1092,60 + 1889,60 \cdot 10^{-3} \cdot (130,80) - 3681,70 \cdot 10^{-6} \cdot (130,80)^2$$

$$cp_{cen} = \mathbf{1276,7708 \frac{J}{Kg \cdot ^\circ\text{C}}}$$

$$Q_{cen} = m_{cen} \cdot cp_{cen} \cdot \Delta T_{cen}$$

Dónde:

Q_{cen} , calor perdido en las cenizas residuales producto de la combustión.

$m_{cen} = 1,016 \text{ Kg}$, masa promedio de las cenizas para el caso experimental.

$$Q_{cen} = (1,016) \cdot (1276,7708) \cdot (107,69)$$

$$Q_{cen} = 139695,3746 \text{ J} \cdot \frac{1000 \text{ Wh}}{3,6 \cdot 10^6 \text{ J}}$$

$$Q_{cen} = \mathbf{38,804 \text{ Wh}}$$

El calor perdido en las cenizas residuales producto de la combustión del Pennisetum Clandestinum cuando se encuentra en natural, con un contenido de humedad inicial (X_{wi}) del 76,64%, es aproximadamente 0,0388 KWh.

El calor perdido por la combustión imperfecta mecánica (Q_{cim}), se lo determina a través del contenido medio de las sustancias inflamables ($Imed$)

expresadas en tanto por ciento de la masa de los residuos generados en la combustión como son las cenizas y las escorias. Para simplificar su análisis se considera que estos se componen de carbono con un calor de combustión igual a 32,65 MJ/Kg. (Baskakov, 1985)

$$Q_{cim} = \frac{32,65 \cdot Fim \cdot Imed}{100 \cdot (100 - Imed)}$$

Dónde:

Q_{cim} , es el calor generado por la combustión imperfecta mecánica.

$Imed = 10,60\%$, es el contenido medio de las sustancias inflamables equivalentes al contenido de cenizas presentes en el Pennisetum Clandestinum (ver tabla 6.)

$Fim = 6,10$, factor de conversión de la combustión imperfecta mecánica.

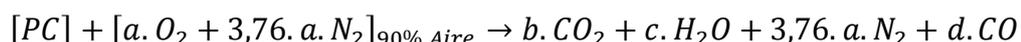
$$Q_{cim} = \frac{32,65 \cdot (6,10) \cdot (10,60)}{100 \cdot (100 - 10,60)}$$

$$Q_{cim} = 0,23614 \text{ MJ} \cdot \frac{1000 \text{ Wh}}{3,6 \cdot 10^6 \text{ J}} \cdot \frac{1 \cdot 10^6 \text{ J}}{1 \text{ MJ}}$$

$$Q_{cim} = 65,596 \text{ Wh}$$

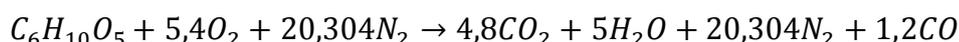
El calor perdido por la combustión imperfecta mecánica, como resultado de la combustión del Pennisetum Clandestinum en estado natural, con un contenido de humedad inicial (X_{wi}) del 76,64%, es aproximadamente de 0,0655 KWh.

El calor perdido por la combustión incompleta (Q_{ci}), se genera por la presencia del monóxido de carbono (CO) en los productos de la combustión, cuando no se dispone del 100% de aire para la combustión. Para el caso experimental el Q_{ci} se lo determina considerando la combustión del Pennisetum Clandestinum con el 90% de aire.



Dónde:

$PC = C_6H_{10}O_5$, es fórmula empírica del Pennisetum Clandestinum.



$$m_{CO} = 1,2PM_{CO}$$

Dónde:

m_{CO} , es la masa del dióxido de carbono.

$PM_{CO} = 28,01$, es el peso molecular del dióxido de carbono.

$$m_{CO} = 1,2 \cdot (28,01)$$

$$m_{CO} = 33,612 \text{ g}$$

$$M_{CO} = \text{moles} \cdot m_{CO}$$

Dónde:

M_{CO} , es la masa molecular del dióxido de carbono.

$$\text{moles} = 86$$

$$M_{CO} = 86 \cdot (36,612)$$

$$M_{CO} = 2890,632 \text{ g}$$

$$M_{CO} = 2,890 \text{ Kg}$$

$$V_{CO} = \frac{M_{CO}}{\delta_{CO}}$$

Dónde:

V_{CO} , volumen que ocupa el dióxido de carbono en la cámara de combustión.

$\delta_{CO} = 1,145 \frac{\text{Kg}}{\text{m}^3}$, densidad del dióxido de carbono.

$$V_{CO} = \frac{2,890}{1,145}$$

$$V_{CO} = 2,524 \text{ m}^3$$

De acuerdo a Baskakov (1985), “la temperatura teórica de combustión del dióxido de carbono (CO) es de 2643 °K” (p. 225).

$h_{CO_1} = 88991 \frac{\text{KJ}}{\text{Kmol}}$, entalpía del dióxido de carbono.

La estequiometría del Pennisetum Clandestinum con un 90% de aire, determina que en la combustión de 1 Kmol de celulosa ($C_6H_{10}O_5$) que se producen 1,2 Kmol de CO, y para que 0,086 Kmol de celulosa se obtienen 0,1032 Kmol de CO.

$$Q_{Ci1} = h_{CO_1} \cdot (0,1032)$$

$$Q_{Ci1} = (88991) \cdot (0,1032)$$

$$Q_{Ci1} = 9183,8712 \text{ KJ} \cdot \frac{1000 \text{ Wh}}{3,6 \cdot 10^6 \text{ J}} \cdot \frac{1000 \text{ J}}{1 \text{ KJ}}$$

$$Q_{Ci1} = 2551,075 \text{ Wh}$$

El calor perdido por la combustión incompleta es aproximadamente de 2,5 KWh para la temperatura teórica de combustión de 2643 °K. Considerando que el Pennisetum Clandestinum se inflama a temperaturas mayores de 650 °C y que la temperatura de combustión de la cámara de combustión es de 850 °C, el calor perdido por la combustión incompleta real, con una temperatura real de combustión del CO de 923,15 °K, de acuerdo por Baskakov (p. 225), se tiene:

$h_{CO} = 14275,32 \frac{KJ}{Kmol}$, es la entalpía del CO a la temperatura de 923,15 °K.

$$Q_{ci} = h_{CO} \cdot (0,1032)$$

Dónde:

Q_{ci} , es el calor perdido por la combustión incompleta.

$$Q_{ci} = (14275,32) \cdot (0,1032)$$

$$Q_{ci} = 1473,21 KJ \cdot \frac{1000 Wh}{3,6 \cdot 10^6 J} \cdot \frac{1000 J}{1 KJ}$$

$$Q_{ci} = 409,22 Wh$$

El calor perdido por la combustión incompleta del Pennisetum Clandestinum en estado natural, con un contenido de humedad inicial (X_{wi}) del 76,64%, es aproximadamente de 0,409 KWh.

El calor perdido por los cambios de aire en la cámara de combustión (Q_{pca}), se presenta durante la apertura y cierre de la compuerta de la cámara de combustión, debido, a que se deben realizar la respectiva toma de lectura de las temperaturas presentes en el proceso de la combustión. El Q_{pca} es la cantidad de calor que se transfiere desde el interior de la cámara de combustión hacia el ambiente cuando se realiza la apertura de la puerta de la cámara de combustión.

$$\Delta T_{ca} = T_{hi} - T_{amb}$$

Dónde:

ΔT_{ca} , es el delta de temperatura generado por los cambios de aire.

$T_{amb} = 23,11 \text{ } ^\circ C = 296,26 \text{ } ^\circ K$, es la temperatura ambiente.

$T_{hi} = 146,20 \text{ } ^\circ C = 419,35 \text{ } ^\circ K$, es la temperatura interna del aire de la cámara.

$$\Delta T_{ca} = 419,35 - 296,26$$

$$\Delta T_{ca} = 123,09 \text{ } ^\circ K$$

$$Va = altura \cdot ancho \cdot profundidad$$

Dónde:

Va , volumen de la cámara de combustión.

$altura = 0,68 \text{ m}$, altura de la cámara de combustión.

$ancho = 0,58 \text{ m}$, ancho de la cámara de combustión.

$profundidad = 0,78 \text{ m}$, profundidad de la cámara de combustión.

$$Va = (0,68) \cdot (0,58) \cdot (0,78)$$

$$Va = 0,3076 \text{ m}^3$$

$$Q_{cpa} = N_{ca} \cdot \delta a \cdot Va \cdot C_{pa} \cdot \Delta T_{ca}$$

Dónde:

Q_{cpa} , es el calor perdido por cambios de aire en la cámara de combustión.

$Nca = 3$, es el número de cambios de aire por hora, caso experimental.

$\delta a = 1,1951 \frac{Kg}{m^3}$, es la densidad del aire a la temperatura ambiente.

$Cpa = 1007 \frac{J}{Kg^{\circ}K}$, es el calor específico del aire a la temperatura ambiente.

$$Q_{cpa} = (3) \cdot (1,1915) \cdot (0,3076) \cdot (1007) \cdot (123,09)$$

$$Q_{cpa} = 136286,8252 J \cdot \frac{1000 Wh}{3,6 \cdot 10^6 J}$$

$$\mathbf{Q_{cpa} = 37,857 Wh}$$

El calor perdido por los cambios de aire en la cámara de combustión, como resultado de la combustión del Pennisetum Clandestinum en estado natural, con un contenido de humedad inicial (X_{wi}) del 76,64%, es aproximadamente de 0,037 KWh.

El calor de la reacción por la combustión del Pennisetum Clandestinum en estado natural ($Q_{r_{natural}}$), es el resultado del balance energético presente en la cámara de combustión cuando se combustiona el Pennisetum Clandestinum en estado natural, con un contenido de humedad inicial (X_{wi}) del 76,64%.

$$Q_{r_{natural}} = Q_p + Q_u + Q_a + Q_g + Q_{cen} + Q_{cim} + Q_{ci} + Q_{pca}$$

Dónde:

$Q_p = 892,69 Wh$, calor perdido en las paredes de la cámara de combustión.

$Q_u = 4166,85 Wh$, calor útil de la cámara de combustión.

$Q_a = 2622,86 Wh$, calor almacenado en la cámara de combustión.

$Q_g = 136,74 Wh$, calor perdido por los gases de la combustión.

$Q_{cen} = 38,804 Wh$, calor perdido en las cenizas residuales producto de la combustión.

$Q_{cim} = 65,596 Wh$, calor perdido por la combustión imperfecta mecánica.

$Q_{ci} = 409,22 Wh$, calor perdido por la combustión incompleta.

$Q_{pca} = 37,857 Wh$, calor perdido por los cambios de aire en la cámara de combustión.

$$Q_{r_{natural}} = (892,69) + (4166,85) + (2622,86) + (136,74) + (38,804) \\ + (65,596) + (409,22) + (37,857)$$

$$\mathbf{Q_{r_{natural}} = 8370,617 Wh}$$

En condiciones estables para la combustión de 4,73 Kg/h del Pennisetum Clandestinum en estado natural, con un contenido de humedad inicial (X_{wi}) del 76,64%, el calor de la reacción es aproximadamente 8,37 KWh.

4.7.4 Calores de las reacciones y emisiones de la combustión

Para normalizar el calor de la reacción del proceso de combustión del Pennisetum Clandestinum, se tomará como base los parámetros en estado natural, y compararla con los del estado granulado y compactado.

$$Q_{r_{granulado-normalizado}} = 15681,858 \text{ Wh} \cdot \left(\frac{4,73 \text{ Kg}}{5,82 \text{ Kg}}\right)$$

$$Q_{r_{granulado-normalizado}} = 12744,877 \text{ Wh}$$

$$Q_{r_{compactado-normalizado}} = 14690,818 \text{ Wh} \cdot \left(\frac{4,73 \text{ Kg}}{4,66 \text{ Kg}}\right)$$

$$Q_{r_{compactado-normalizado}} = 14911,49 \text{ Wh}$$

$$Q_{r_{natural-normalizado}} = 8370,617 \text{ Wh} \cdot \left(\frac{4,66 \text{ Kg}}{4,66 \text{ Kg}}\right)$$

$$Q_{r_{natural-normalizado}} = \mathbf{8370,617 \text{ Wh}}$$

Tabla 19

Calores de las reacciones por estado de combustión

Parámetro	Estado de combustión		
	Natural	Granulado	Compactado
% humedad (X_w)	76,64 %	3,28 %	2,86 %
Masa quemada	4,73 Kg/h	5,82 Kg/h	4,66 Kg/h
Q_p	892,69 Wh	1178,62 Wh	1177,01 Wh
Q_u	4166,85 Wh	8174,86 Wh	8081,91 Wh
Q_a	2622,86 Wh	4991,96 Wh	4085,34 Wh
Q_g	136,74 Wh	134,82 Wh	134,16 Wh
Q_{cen}	38,804 Wh	69,764 Wh	85,595 Wh
Q_{cim}	65,596 Wh	65,596 Wh	65,596 Wh
Q_{ci}	409,22 Wh	988,78 Wh	988,78 Wh
Q_{pca}	37,857 Wh	77,458 Wh	72,427 Wh
$Q_{reacción}$	8370,617 Wh	15681,858 Wh	14690,818 Wh
$Q_{reacción}$ normalizado a 4,73 Kg/h	8370,617 Wh	12744,877 Wh	14911,49 Wh
% $Q_{reacción}$ normalizado a 4,73 Kg/h	100%	152,25%	178,14%

De la tabla 19, se resumen los calores generados por la combustión del Pennisetum Clandestinum en sus diferentes estados de combustión natural, granulada y compactada, de la cual, normalizando el calor de reacción por estado en base al calor de reacción obtenido para el estado natural, se determina que la combustión del Pennisetum Clandestinum en estado granulado y compactado es mayor un 52,25% y 78,14% respectivamente mayor, que en comparación con la combustión en su estado natural. Esto se debe a que la combustión en estado natural se lo realiza con un contenido de humedad de la biomasa es superior al 60%, en tanto, la combustión en estado granulado y compactado se lo realiza el contenido de humedad de la biomasa es inferior al 12% favoreciendo a la combustión y generando una mayor cantidad de calor en el proceso.

En la combustión del Pennisetum Clandestinum se generan reacciones químicas y emisiones de volátiles, por lo que es importante determinar:

- La entalpía de la reacción química,
- La temperatura adiabática, y
- La emisión de los volátiles.

La entalpía de la reacción química (ΔHr), es diferencia entre la entalpia generado por los productos y la entalpía de los reactivos de la combustión del Pennisetum Clandestinum, considerando una combustión con un exceso del 20% de aires, donde la ecuación estequiométrica, es:



La entalpía de reacción se define como:

$$\Delta H_f^\circ = \sum n_p \cdot \Delta H_f^\circ [productos] - \sum n_r \cdot \Delta H_f^\circ [reactivos]$$

Dónde:

ΔH_f° , entalpía de la reacción.

$$\Delta H_{f_{CO_2}}^\circ = -393,52 \frac{KJ}{Kmol}, \text{ entalpía de formación del } CO_2 \text{ en estado gaseoso.}$$

$$\Delta H_{f_{H_2O}}^\circ = -241,60 \frac{KJ}{Kmol}, \text{ entalpía de formación del } H_2O \text{ en estado gaseoso.}$$

$$\Delta H_{f_{N_2}}^\circ = 0,00 \frac{KJ}{Kmol}, \text{ entalpía de formación del } N_2 \text{ en estado gaseoso.}$$

$$\Delta H_{f_{O_2}}^\circ = 0,00 \frac{KJ}{Kmol}, \text{ entalpía de formación del } O_2 \text{ en estado gaseoso.}$$

$$\Delta H_{f_{C_6H_{10}O_5}}^\circ = -67053,00 \frac{KJ}{Kmol}, \text{ entalpía de formación del } C_6H_{10}O_5 \text{ en estado}$$

sólido. (Tipanluisa, 2011)

n_p , número de moles de los productos de la combustión.

n_r , número de moles de los reactantes de la combustión.

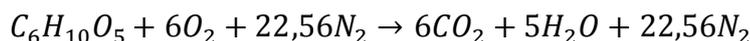
$$\Delta H_f^\circ = [(6 \cdot -393,52) + (5 \cdot -241,60) + (27,072 \cdot 0,00) + (1,2 \cdot 0,00)] \\ - [(1 \cdot -67053,00) + (7,2 \cdot 0,00) + (27,072 \cdot 0,00)]$$

$$\Delta H_f^\circ = \mathbf{63483,88 \frac{KJ}{Kmol}}$$

Se determina que la entalpía de la reacción de la combustión de un mol de Pennisetum Clandestinum es de 63483,88 KJ/Kmol.

La temperatura de combustión adiabática (TCA), es alcanzada cuando se quema un combustible en aire u oxígeno sin ganancia o pérdida de calor, es decir cuando no se transfiere calor desde la cámara de combustión y que los productos de la combustión completa no se disocian en otras especies químicas. Para estimar su valor teórico, se utiliza el método en el cual el número total de moles de los productos de la combustión completa equivalen al número total de moles de nitrógeno.

Considerando la relación estequiométrica de la combustión del Pennisetum Clandestinum se tiene:



El número de moles de los productos es:

$$n_{productos} = 6 + 5 + 22,56$$

$$n_{productos} = 33,56$$

De acuerdo a Potter (2004), en Termodinámica para ingenieros define la entalpía para el nitrógeno h_{N_2} (p. 303).

$$h_{N_2} = \frac{\Delta H_f^\circ C_6H_{10}O_5 + 6 \cdot (393520) + 5 \cdot (241820)}{n_{N_2}}$$

$$h_{N_2} = \frac{(-67053) + 6 \cdot (393520) + 5 \cdot (241820)}{33,56}$$

$$h_{N_2} = \mathbf{104385,19 \frac{KJ}{Kmol}}$$

De acuerdo a Cengel (2011), en la Tabla A18, “las propiedades para el nitrógeno se determina que la entalpía a una temperatura de 3000 °K, tiene un valor de 101407 KJ/Kmol” (p. 937).

Se determina que la temperatura diabática teórica para el Pennisetum Clandestinum es aproximadamente 3000 °K lo que equivale a **TCA = 2726,85 °C**.

Para determinar los volátiles de la combustión del Pennisetum Clandestinum, en cualquiera de las formas en que se encuentran (granulado, compactado o natural), se requieren tener un profundo conocimiento de los mecanismos de la combustión, que involucran:

- la alta eficiencia de la combustión,
- el diseño efectivo del sistema de combustión, y
- la operación efectiva del sistema de combustión.

Se considera que una partícula simple del Pennisetum Clandestinum en estado sólido durante su combustión, está sometida a diferentes eventos interrelacionados entre sí, como son:

- el calentamiento,
- el secado,
- la desvolatilización, y
- la generación de volátiles y cenizas.

La información fundamental que se necesita conocer sobre las características de los residuos generados en la combustión del Pennisetum Clandestinum son:

- la temperatura a la cual comienza la desvolatilización,
- la temperatura de inicio de la combustión de las cenizas,
- la influencia del secado sobre el proceso de desvolatilización,
- la composición de los productos de la desvolatilización, y
- el efecto de la liberación y combustión de los volátiles sobre el proceso de combustión total.

El Pennisetum Clandestinum tiene un elevado contenido de materia volátil, estos compuestos volátiles formados por largas cadenas del tipo C_nH_m , y presencia de CO_2 , CO y H_2 , son los que concentran una gran parte del poder calórico de la biomasa. Considerando que entre los 200 °C y 300 °C, las partículas del Pennisetum Clandestinum sufren una considerable pérdida en masa correspondiéndose con la liberación y combustión de los compuestos volátiles. Entre los 300 °C y 530 °C se produce la combustión de las cenizas, sin observarse cambios apreciables en la pérdida de peso de las partículas.

La emisión de los volátiles de la combustión de la cascarilla de arroz, la misma que de manera similar está constituida por celulosa (39,05%) y cenizas (17,50%) en comparación con el Pennisetum Clandestinum (contenido de celulosa 26,90% y

cenizas 10,60%), donde se describe que durante el proceso de desvolatilización las partículas de la biomasa están sometidas a la descomposición térmica con la subsiguiente liberación de los compuestos volátiles y a la formación de cenizas. La cantidad de estos compuestos dependen de la composición de la biomasa vegetal y de las condiciones de operación. Los constituyentes gaseosos combustibles (H_2 , CO , CH_4) pueden llegar a representar entre el 70 y 80 % en volumen, a altas temperaturas, por lo contrario el contenido de CO_2 , decrece con el aumento de la temperatura. (Valverde, 2007)

Considerando que la combustión del Pennisetum Clandestinum en estado granulado (granulometría inferior a 1 mm) o compactado (en forma de briqueta) se efectúa a una temperatura promedio de 850 °C (al interior de la cámara de combustión) y que la combustión en estado natural se lo realiza a una temperatura promedio de 650 °C (al interior de la cámara de combustión), el contenido del dióxido de carbono (CO_2) en el primer caso será menor.

4.7.5 Normalización del proceso de combustión

Con la finalidad de estandarizar el proceso de combustibles de cualquier tipo de biomasa vegetal sólida empleando el horno de combustión de la línea de combustión de biomasa del Laboratorio de Energías Renovables de la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, se propone seguir con la siguiente secuencia de actividades:

1. Verificar y determinar las condiciones ambientales antes de iniciar la etapa experimental, como son la temperatura ambiental, humedad relativa y velocidad del viento circundante.
2. Verificar las instalaciones eléctricas y mecánicas antes de su operación.
3. Realizar una limpieza de la cámara de combustión de ser necesario.
4. Realizar la medición del peso total del combustible (biomasa sólida) que será quemada, la misma que debe contener un contenido de humedad final inferior al 12% para garantizar una adecuada combustión.
5. Se debe realizar la calibración de todos los instrumentos de medida como son: balanza digital, termómetro laser, anemómetro digital, etc.
6. Encender los equipos eléctricos y medir sus parámetros de operación inicial (como motor reductor, ventiladores, etc.).

7. Identificar las condiciones físicas y funcionales del sistema de combustión, con el propósito de determinar algún tipo de riesgo que pueden presentarse durante su operación, entienda por riesgo toda acción que pueda afectar a la combustión como daños mecánicos, eléctricos y daños a la persona que realiza la operación del horno de combustión.
8. Encender la cámara de combustión con las medidas de seguridad para evitar afectación a la salud, por quemaduras, inhalación de monóxido de carbono.
9. Registrar las variables termo físicas a ser registradas en la etapa experimental durante el proceso de combustión, para este caso, las temperaturas de las paredes de la cámara de combustión, temperaturas de gases presentes en el intercambiador de calor y velocidad de entrada y salida del aire y gases presentes en la cámara e intercambiador de calor.
10. Realizar el registro de los datos de temperaturas de la cámara de combustión y del intercambiador de calor, de las velocidades de entrada y salida del aire y gases, en un intervalo entre 10 a 20 minutos.
11. Una vez finalizada las pruebas experimentales, se apaga los equipos eléctricos y mecánicos
12. Se apaga la cámara de combustión, con la debida precaución del caso.
13. Se realiza la limpieza integral del horno de combustión incluida la cámara de combustión (una vez que se ha enfriado la cámara), a fin de garantizar la vida útil del equipo.
14. Se finaliza el proceso de combustión con la generación del informe de los resultados de los parámetros registrados, en base al análisis cuantitativo descrito para la caracterización de la combustión.

CAPITULO V

5. ANÁLISIS DE RESULTADOS Y DISCUSIONES

Utilizando los equipos que conforman la línea de combustión de biomasa del Laboratorio de Energías Renovables de la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, se han recabado una determinada cantidad de datos de los procesos de secado y de combustión del Pennisetum Clandestinum en sus diferentes estados de utilización tanto natural, granulado y compactado.

Para el caso experimental, las variables termo físicas que permiten la caracterización de los procesos de secado y combustión, son registradas a intervalos de tiempo constante permitiendo su análisis y discusión.

5.1 Proceso de secado

Para el caso experimental, durante el proceso de secado del Pennisetum Clandestinum en estado granulado, con una granulometría inferior a 1 mm y compactado, en forma de briqueta, se registraron los siguientes resultados.

Tabla 20
Peso de secado en estado granulado

Hora	Muestra 1	Muestra 2	Muestra 3	Muestra 4	Muestra 5	Muestra 6	Muestra 7	MÁXIMO (Kg)	MÍNIMO (Kg)	PROMEDIO (Kg)
9am	22,65	25,66	19,02	15,33	20,10	17,80	22,86	25,66	15,33	20,49
10am	13,55	12,04	12,52	7,66	14,73	8,85	12,50	14,73	7,66	11,69
11am	8,65	6,45	9,39	5,80	8,35	5,84	6,08	9,39	5,80	7,22
12pm	8,25	4,82	7,15	5,18	4,68	5,52	5,10	8,25	4,68	5,81
13pm	7,56	4,46	5,92	4,83	3,82	5,28	4,47	7,56	3,82	5,19
14pm	7,15	4,34	5,65	4,62	3,47	5,08	4,15	7,15	3,47	4,92
15pm	6,96	4,30	5,47	4,53	3,32	4,99	3,94	6,96	3,32	4,79

Tabla 21

Temperatura ambiente del secado en estado granulado

Hora	Muestra 1	Muestra 2	Muestra 3	Muestra 4	Muestra 5	Muestra 6	Muestra 7	MÁXIMO (Kg)	MÍNIMO (Kg)	PROMEDIO (Kg)
9am	18,00	20,50	20,60	20,80	21,40	20,70	16,60	21,40	16,60	19,80
10am	19,00	22,20	22,30	22,40	22,40	22,50	18,30	22,50	18,30	21,30
11am	19,08	23,70	23,50	24,50	25,20	21,10	21,80	25,20	19,08	22,70
12pm	20,30	27,00	24,40	25,80	27,30	24,30	23,90	27,30	20,30	24,71
13pm	21,04	25,40	25,30	27,40	26,10	24,90	23,90	27,40	21,04	24,86
14pm	21,10	25,40	25,10	26,40	26,00	25,10	24,80	26,40	21,10	24,84
15pm	18,00	25,60	25,00	26,20	26,40	25,00	24,80	26,40	18,00	24,43

Tabla 22

Temperatura biomasa en el secado en estado granulado

Hora	Muestra 1	Muestra 2	Muestra 3	Muestra 4	Muestra 5	Muestra 6	Muestra 7	MÁXIMO (Kg)	MÍNIMO (Kg)	PROMEDIO (Kg)
9am	21,00	21,00	25,00	24,00	26,00	16,80	17,50	26,00	16,80	21,61
10am	21,00	24,00	30,00	61,00	36,00	43,50	41,00	61,00	21,00	36,64
11am	43,00	39,05	43,00	66,00	61,00	48,00	47,00	66,00	39,05	49,58
12pm	45,00	59,00	45,00	66,00	67,50	50,30	49,00	67,50	45,00	54,54
13pm	49,00	52,00	49,00	65,00	60,00	60,00	51,00	65,00	49,00	55,14
14pm	53,90	49,00	44,00	56,00	58,20	55,00	50,00	58,20	44,00	52,30
15pm	59,50	45,00	45,00	55,00	48,00	57,00	58,00	59,50	45,00	52,50

Tabla 23

Humedad relativa del secado en estado granulado

Hora	Muestra 1	Muestra 2	Muestra 3	Muestra 4	Muestra 5	Muestra 6	Muestra 7	MÁXIMO (Kg)	MÍNIMO (Kg)	PROMEDIO (Kg)
9am	64,00	57,00	62,00	58,00	66,00	56,00	68,00	68,00	56,00	61,57
10am	65,00	51,00	53,00	50,00	55,00	53,00	75,00	75,00	50,00	57,43
11am	67,00	47,00	56,00	44,00	46,00	53,00	56,00	67,00	44,00	52,71
12pm	64,00	36,00	51,00	43,00	38,00	48,00	54,00	64,00	36,00	47,71
13pm	61,00	39,00	44,00	36,00	36,00	42,00	48,00	61,00	36,00	43,71
14pm	58,00	38,00	46,00	35,00	36,00	37,00	42,00	58,00	35,00	41,71
15pm	55,00	37,00	47,00	39,00	36,00	36,00	41,00	55,00	36,00	41,57

Tabla 24

Combustible utilizado en el secado en estado granulado

Muestra	Peso inicial de la biomasa a secarse en Kg	Peso de la leña utilizada Kg
1	22,65	54,96
2	25,66	58,31
3	19,02	60,80
4	15,33	59,15
5	20,10	56,68
6	17,80	57,32
7	22,86	64,53
TOTAL	143,42	411,75

Tabla 25

Peso de secado en estado compactado

Hora	Muestra 1	Muestra 2	Muestra 3	Muestra 4	Muestra 5	Muestra 6	Muestra 7	Muestra 8	Muestra 9	MÁXIMO (Kg)	MÍNIMO (Kg)	PROMEDIO (Kg)
9am	23,63	22,18	20,22	21,33	20,01	19,22	18,99	21,18	20,18	23,63	18,99	20,77
10am	13,78	11,11	12,19	13,39	13,06	15,18	13,79	17,12	17,05	17,12	11,11	14,07
11am	8,94	6,53	9,02	11,44	10,95	11,28	11,22	14,20	13,88	14,20	6,53	10,83
12am	6,14	5,40	7,21	9,40	9,33	9,11	9,55	12,31	10,63	12,31	5,40	8,79
13pm	5,14	4,93	6,04	8,37	7,69	8,21	8,21	9,22	8,91	9,22	4,93	7,41
14pm	4,84	4,65	5,36	7,53	6,60	7,60	6,59	7,11	6,22	7,60	4,65	6,28
15pm	4,60	4,30	4,99	6,43	5,61	5,30	5,21	6,50	5,45	6,50	4,30	5,38

Tabla 26

Temperatura ambiente del secado en estado compactado

Hora	Muestra 1	Muestra 2	Muestra 3	Muestra 4	Muestra 5	Muestra 6	Muestra 7	Muestra 8	Muestra 9	MÁXIMO (Kg)	MÍNIMO (Kg)	PROMEDIO (Kg)
9am	17,20	20,90	23,70	20,50	18,40	22,30	21,90	21,20	21,40	23,70	17,20	20,83
10am	19,60	22,60	23,00	22,50	20,60	23,90	22,30	23,20	22,60	23,90	19,60	22,26
11am	20,70	24,70	25,00	24,00	23,60	26,10	25,10	22,60	23,20	26,10	20,70	23,89
12am	20,90	25,70	26,10	23,40	24,40	26,70	26,40	22,50	25,10	26,70	20,90	24,58
13pm	22,70	26,30	27,10	24,20	26,20	25,10	25,90	24,10	25,10	27,10	22,70	25,19
14pm	22,40	25,70	26,90	26,40	27,10	27,10	25,50	24,90	23,60	27,10	22,40	25,51
15pm	23,90	24,60	25,80	26,20	26,70	27,40	24,10	25,60	24,10	27,40	23,90	25,38

Tabla 27

Temperatura biomasa en el secado en estado compactado

Hora	Muestra 1	Muestra 2	Muestra 3	Muestra 4	Muestra 5	Muestra 6	Muestra 7	Muestra 8	Muestra 9	MÁXIMO (Kg)	MÍNIMO (Kg)	PROMEDIO (Kg)
9am	21,00	30,00	30,00	22,00	21,90	18,00	20,00	22,00	25,00	30,00	18,00	23,32
10am	40,00	35,00	37,00	38,00	41,00	25,00	38,00	45,00	39,00	45,00	25,00	37,56
11am	49,00	42,00	40,00	43,00	40,00	39,00	40,00	44,00	42,00	49,00	39,00	42,11
12am	52,00	45,00	45,00	42,00	42,00	41,00	42,00	45,00	43,00	52,00	41,00	44,11
13pm	50,00	43,00	44,00	45,00	43,00	40,00	45,00	47,00	45,00	50,00	40,00	44,67
14pm	49,00	45,00	43,00	44,00	45,00	42,00	44,00	45,00	43,00	49,00	42,00	44,44
15pm	46,00	42,00	42,00	45,00	44,00	40,00	41,00	42,00	41,00	46,00	40,00	42,56

Tabla 28

Humedad relativa del secado en estado compactado

Hora	Muestra 1	Muestra 2	Muestra 3	Muestra 4	Muestra 5	Muestra 6	Muestra 7	Muestra 8	Muestra 9	MÁXIMO (Kg)	MÍNIMO (Kg)	PROMEDIO (Kg)
9am	73,00	62,00	47,00	53,00	69,00	44,00	52,00	54,00	47,00	73,00	44,00	55,67
10am	68,00	54,00	48,00	46,00	63,00	43,00	51,00	43,00	46,00	68,00	43,00	51,33
11am	59,00	42,00	44,00	42,00	51,00	35,00	39,00	45,00	46,00	59,00	35,00	44,78
12am	61,00	37,00	40,00	42,00	42,00	32,00	37,00	48,00	43,00	61,00	32,00	42,44
13pm	55,00	35,00	35,00	43,00	34,00	34,00	37,00	42,00	37,00	55,00	34,00	39,11
14pm	54,00	36,00	35,00	39,00	31,00	39,00	33,00	35,00	44,00	54,00	31,00	38,44
15pm	52,00	37,00	33,00	37,00	31,00	30,00	40,00	36,00	43,00	52,00	30,00	37,67

Tabla 29

Combustible utilizado en el secado en estado compactado

Muestra	Peso inicial de la biomasa a secarse en Kg	Peso de la leña utilizada Kg
1	23,63	62,69
2	22,18	57,36
3	20,22	58,21
4	21,33	66,04
5	20,01	54,22
6	19,22	55,89
7	18,99	63,23
8	21,18	60,21
9	20,18	60,26
TOTAL	186,94	538,11

De las tablas 24 y 29., relacionando el peso total de la biomasa a secarse y el peso total del combustible (leña) utilizado para secar la biomasa húmeda, se determina:

$$X_{\text{granulado}} = \frac{143,42 \text{ Kg}}{411,75 \text{ Kg}_{\text{leña}}} \cdot 1,00 \text{ Kg}_{\text{leña}} = 0,348 \text{ Kg}_{\text{PC granulado}}$$

$$X_{\text{compactado}} = \frac{186,94 \text{ Kg}}{538,11 \text{ Kg}_{\text{leña}}} \cdot 1,00 \text{ Kg}_{\text{leña}} = 0,347 \text{ Kg}_{\text{PC compactado}}$$

Para el caso experimental al emplear 1,00 Kg de leña (combustible utilizado en la cámara de combustión de la secadora de biomasa) para secar 0,34 Kg de Pennisetum Clandestinum tanto estado compactado como en estado granulado.

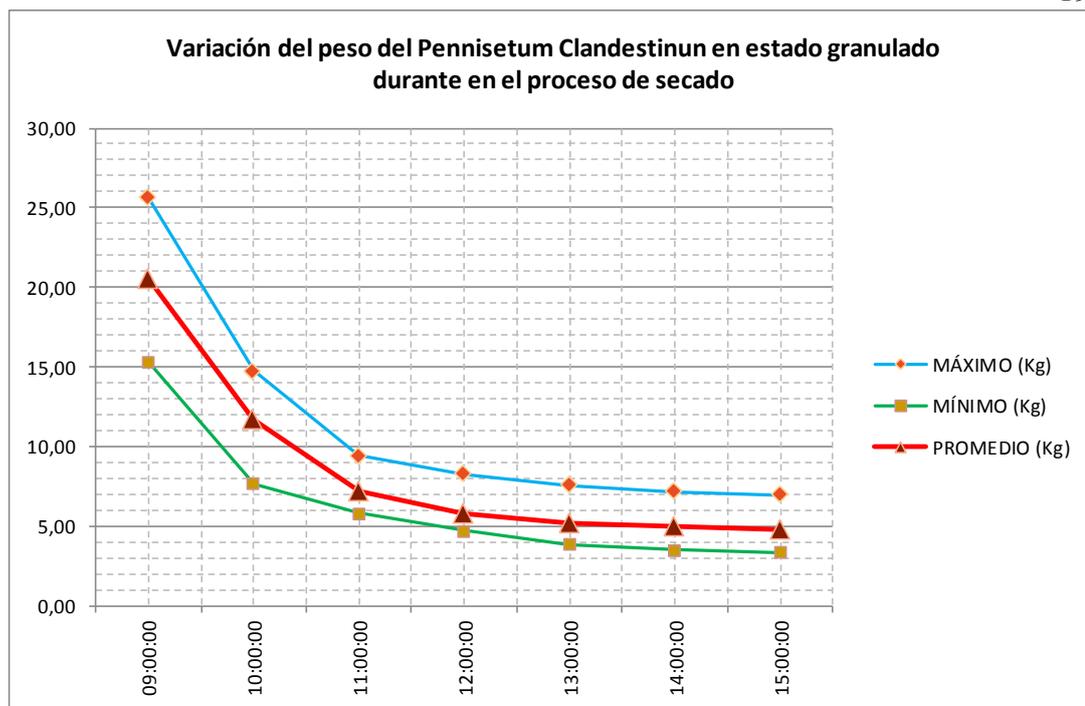


Figura 51 Variación del peso de secado en estado granulado

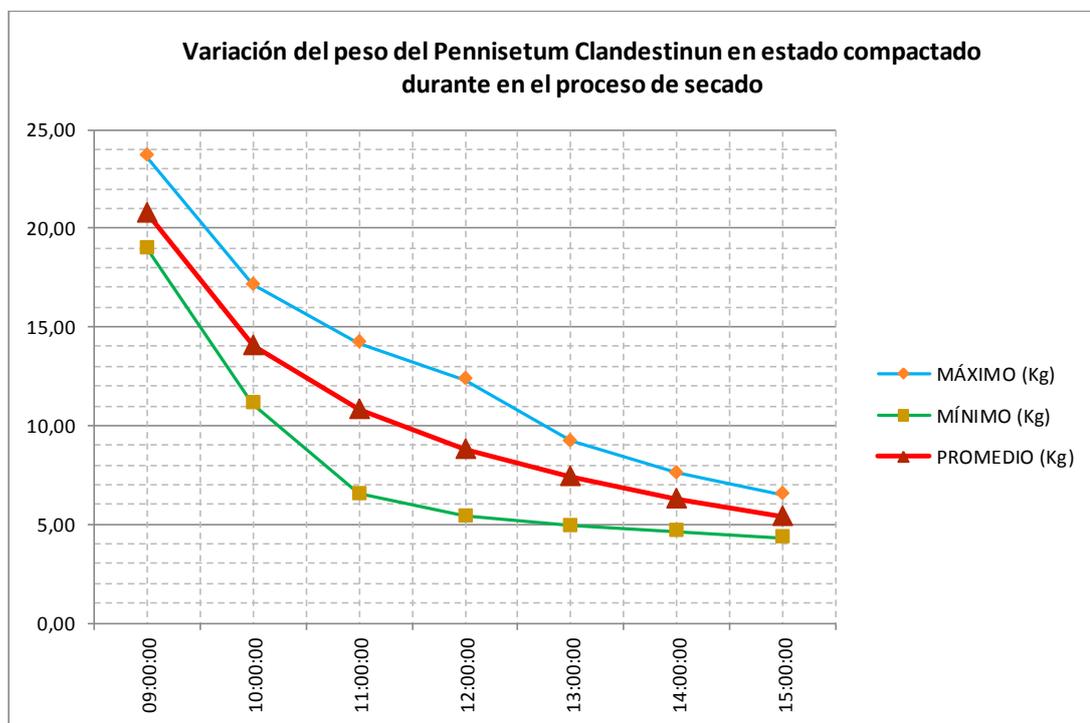


Figura 52 Variación del peso de secado en estado compactado

En la figura 51, se visualiza la tendencia lineal de la variación de peso del Pennisetum Clandestinun en estado granulado en función del tiempo de secado, resultado de los datos registrados descritos en la tabla 20. El proceso de secado

inicia a las 9 a.m. y finaliza a las 15 p.m. De los datos registrados se determina el peso promedio inicial de 20,49 Kg y el peso promedio final de 4,79 Kg. Estos valores son empleados en el proceso de caracterización del secado en estado granulado (ver tabla 9).

En la figura 52, se visualiza la tendencia lineal de la variación del peso del Pennisetum Clandestinum en estado compactado en función del tiempo de secado, resultado de los datos registrados descritos en la tabla 25. El proceso de secado inicia a las 9 a.m. y finaliza a las 15 p.m. Se determina que el peso promedio inicial de 20,77 Kg y el peso promedio final de 5,38 Kg. Estos valores son empleados en el proceso de caracterización del secado en estado granulado (ver tabla 12).

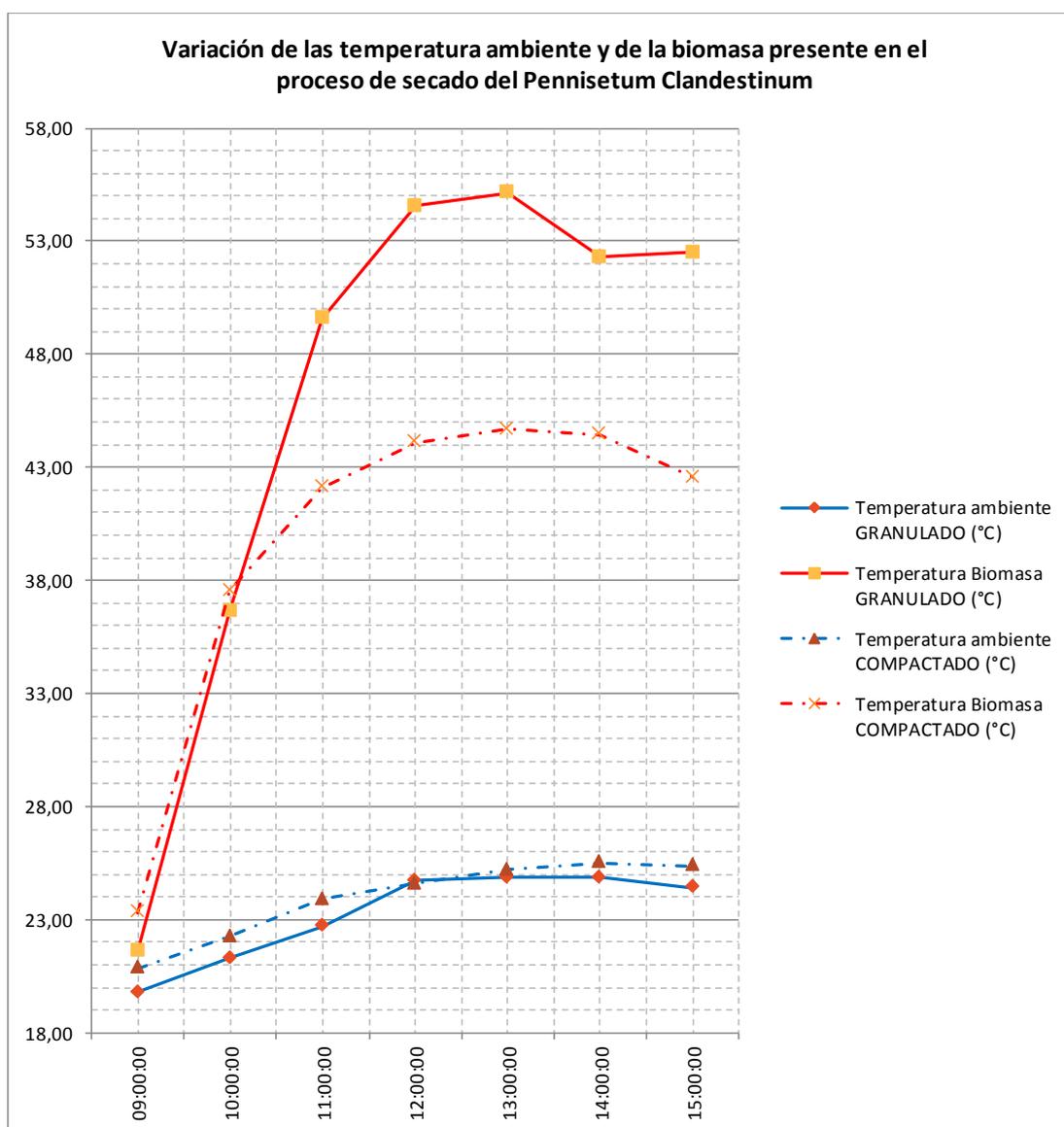


Figura 53 Variación de la temperatura de secado en estado compactado

En la figura 53, se describe la tendencia lineal de la variación de las temperaturas de ambiente y de la biomasa para el proceso de secado del *Pennisetum Clandestinum* en estado compactado y granulado, resultados de los datos registrados en las tablas 21, 22, 26 y 27. El proceso inicia a las 9:00 y finaliza a las 15:00. Las temperaturas tiene un rango creciente entre las 9:00 y 12:00, a partir de las 12:00 las temperaturas se estabilizan y mantienen una tendencia lineal. La temperatura del *Pennisetum Clandestinum* en estado granulado es mayor a la de estado compactado, debido a que en estado granulado, la biomasa alojada en la secadora retiene el aire caliente del secador lo que incrementa su temperatura, no así, cuando el *Pennisetum Clandestinum* está en estado compactado, el aire caliente del secador tiene mayor facilidad de disiparse en el ambiente debido a que entre las briqueta hay un mayor espacio, permitiendo el paso del aire caliente al exterior.

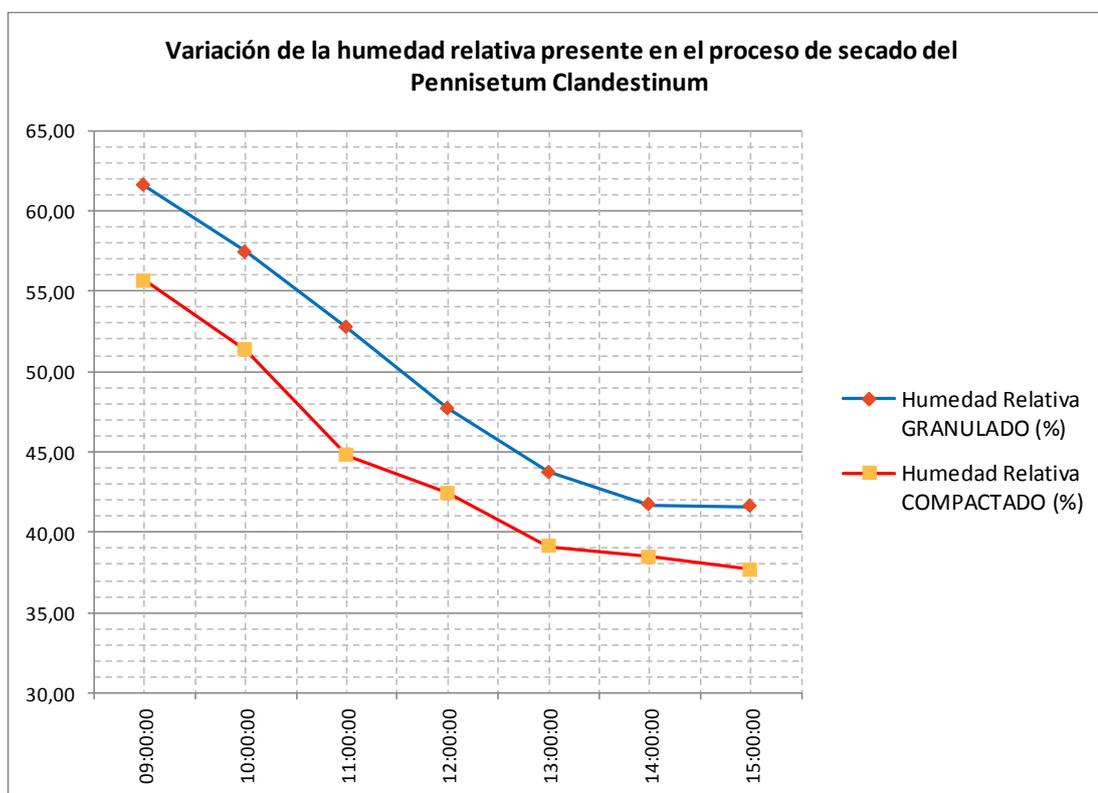


Figura 54 Variación de la humedad relativa en el proceso de secado

En la figura 54, se describe la tendencia lineal de la variación de la humedad relativa presente en el ambiente durante el proceso de secado del *Pennisetum Clandestinum*

para el estado granulado y compactado, determinado una variación decreciente entre las 9:00 y 15:00 que dura el proceso.

5.2 Proceso de combustión

Para el caso experimental, durante el proceso de combustión del Pennisetum Clandestinum en estado granulado, con una granulometría inferior a 1 mm y compactado, en forma de briqueta, se registraron los siguientes resultados.

Tabla 30

Thi en estado natural

Hora	Muestra 1	Muestra 2	Muestra 3	Muestra 4	Muestra 5	MÁXIMO (°C)	MÍNIMO (°C)	PROMEDIO (°C)
09:00	102,00	95,00	80,00	85,00	92,00	102,00	80,00	90,80
09:20	115,00	102,00	95,00	96,00	106,00	115,00	95,00	102,80
09:40	132,00	110,00	100,00	108,00	110,00	132,00	100,00	112,00
10:00	143,00	135,00	120,00	125,00	140,00	143,00	120,00	132,60
10:20	145,00	140,00	145,00	143,00	143,00	145,00	140,00	143,20
10:40	146,00	145,00	167,00	145,00	142,00	167,00	142,00	149,00
11:00	148,00	146,00	150,00	140,00	141,00	150,00	140,00	145,00
11:20	152,00	147,00	150,00	146,00	145,00	152,00	145,00	148,00
11:40	146,00	145,00	145,00	146,00	146,00	146,00	145,00	145,60
12:00	148,00	145,00	140,00	145,00	148,00	148,00	140,00	145,20
12:20	145,00	148,00	142,00	140,00	147,00	148,00	140,00	144,40
12:40	145,00	144,00	144,00	135,00	145,00	145,00	135,00	142,60
13:00	150,00	145,00	148,00	140,00	147,00	150,00	140,00	146,00
13:20	147,00	143,00	145,00	145,00	148,00	148,00	143,00	145,60
13:40	165,00	160,00	140,00	147,00	145,00	165,00	140,00	151,40
14:00	149,00	146,00	145,00	146,00	143,00	149,00	143,00	145,80
14:20	150,00	149,00	146,00	145,00	147,00	150,00	145,00	147,40
14:40	155,00	145,00	150,00	143,00	145,00	155,00	143,00	147,60
Thi promedio en estado NATURAL (°C)								138,06

Tabla 31

Tho en estado natural

Hora	Muestra 1	Muestra 2	Muestra 3	Muestra 4	Muestra 5	MÁXIMO (°C)	MÍNIMO (°C)	PROMEDIO (°C)
09:00	20,50	28,00	27,50	23,00	28,00	28,00	20,50	25,40
09:20	24,00	35,00	28,00	36,00	35,00	36,00	24,00	31,60
09:40	30,00	38,00	36,00	40,00	39,00	40,00	30,00	36,60
10:00	35,00	40,10	40,50	40,50	40,20	40,50	35,00	39,26
10:20	40,80	40,50	40,80	40,70	40,50	40,80	40,50	40,66
10:40	42,00	40,70	41,00	40,80	40,70	42,00	40,70	41,04
11:00	40,00	40,80	41,50	40,90	40,80	41,50	40,00	40,80
11:20	41,20	40,60	40,00	40,90	40,80	41,20	40,00	40,70
11:40	40,60	40,70	40,60	40,70	40,90	40,90	40,60	40,70
12:00	40,70	40,80	40,70	41,00	40,70	41,00	40,70	40,78
12:20	40,50	40,90	40,60	40,70	40,80	40,90	40,50	40,70
12:40	40,50	40,50	40,50	40,80	41,00	41,00	40,50	40,66
13:00	41,00	40,80	40,80	40,70	41,10	41,10	40,70	40,88
13:20	42,00	40,80	41,00	40,50	40,90	42,00	40,50	41,04
13:40	40,70	40,90	40,90	40,80	40,80	40,90	40,70	40,82
14:00	40,80	40,70	40,70	40,90	40,80	40,90	40,70	40,78
14:20	40,80	40,60	40,60	41,20	40,80	41,20	40,60	40,80
14:40	41,00	40,80	40,50	40,90	40,90	41,00	40,50	40,82
Tho promedio en estado NATURAL (°C)								39,11

Tabla 32

Tci en estado natural

Hora	Muestra 1	Muestra 2	Muestra 3	Muestra 4	Muestra 5	MÁXIMO (°C)	MÍNIMO (°C)	PROMEDIO (°C)
09:00	21,00	18,20	16,00	20,10	23,00	23,00	16,00	19,66
09:20	21,50	18,30	16,50	20,20	23,50	23,50	16,50	20,00
09:40	20,50	18,40	17,50	21,00	23,80	23,80	17,50	20,24
10:00	21,00	20,00	18,00	22,00	24,00	24,00	18,00	21,00
10:20	21,40	21,00	19,00	22,80	24,50	24,50	19,00	21,74
10:40	22,50	21,30	19,20	23,00	24,00	24,00	19,20	22,00
11:00	21,90	22,20	18,90	23,20	23,00	23,20	18,90	21,84
11:20	23,50	23,50	18,70	23,40	24,00	24,00	18,70	22,62
11:40	25,00	23,50	18,90	23,00	24,20	25,00	18,90	22,92
12:00	24,80	24,20	20,00	23,50	24,00	24,80	20,00	23,30
12:20	26,00	25,00	20,50	22,70	23,20	26,00	20,50	23,48
12:40	26,20	24,80	22,00	23,00	23,40	26,20	22,00	23,88
13:00	25,50	24,20	22,60	23,20	23,50	25,50	22,60	23,80
13:20	25,50	23,90	21,30	24,00	22,90	25,50	21,30	23,52
13:40	25,80	24,90	21,00	23,50	24,50	25,80	21,00	23,94
14:00	25,00	26,00	19,00	24,10	23,60	26,00	19,00	23,54
14:20	23,00	26,70	18,90	24,20	24,50	26,70	18,90	23,46
14:40	23,50	27,00	18,50	24,50	24,00	27,00	18,50	23,50
Tci promedio en estado NATURAL (°C)								22,47

Tabla 33

Tco en estado natural

Hora	Muestra 1	Muestra 2	Muestra 3	Muestra 4	Muestra 5	MÁXIMO (°C)	MÍNIMO (°C)	PROMEDIO (°C)
09:00	50,00	70,00	68,00	65,00	66,50	70,00	50,00	63,90
09:20	65,00	75,00	74,00	75,00	72,50	75,00	65,00	72,30
09:40	75,40	82,00	79,00	78,00	78,00	82,00	75,40	78,48
10:00	80,40	81,00	80,40	80,80	79,00	81,00	79,00	80,32
10:20	81,00	81,50	80,50	81,00	80,30	81,50	80,30	80,86
10:40	79,80	80,90	80,60	81,10	80,60	81,10	79,80	80,60
11:00	79,90	80,90	81,00	80,40	80,60	81,00	79,90	80,56
11:20	80,50	80,80	80,90	80,40	80,60	80,90	80,40	80,64
11:40	81,00	80,50	80,70	80,40	80,20	81,00	80,20	80,56
12:00	80,50	80,60	80,80	80,60	80,30	80,80	80,30	80,56
12:20	80,40	80,70	80,70	80,50	80,20	80,70	80,20	80,50
12:40	80,40	80,40	80,60	80,40	80,30	80,60	80,30	80,42
13:00	80,60	80,60	80,80	80,50	80,60	80,80	80,50	80,62
13:20	80,70	80,50	80,50	80,50	80,70	80,70	80,50	80,58
13:40	80,80	80,30	80,60	80,20	80,50	80,80	80,20	80,48
14:00	80,60	80,50	80,70	80,50	80,50	80,70	80,50	80,56
14:20	81,00	80,60	80,70	80,40	80,70	81,00	80,40	80,68
14:40	81,20	81,00	80,80	80,60	80,60	81,20	80,60	80,84
Tco promedio en estado NATURAL (°C)								79,08

Tabla 34

Thi en estado granulado

Hora	Muestra 1	Muestra 2	Muestra 3	Muestra 4	Muestra 5	Muestra 6	Muestra 7	MÁXIMO (°C)	MÍNIMO (°C)	PROMEDIO (°C)
09:00	245,00	140,00	90,00	207,00	243,00	192,00	195,00	245,00	90,00	187,43
09:20	226,00	247,00	155,00	224,00	361,00	277,00	278,00	361,00	155,00	252,57
09:40	294,00	270,00	201,00	255,00	299,00	300,00	209,00	300,00	201,00	261,14
10:00	340,00	241,00	299,00	283,00	289,00	291,00	223,00	340,00	223,00	280,86
10:20	303,00	192,00	329,00	208,00	301,00	299,00	282,00	329,00	192,00	273,43
10:40	413,00	198,00	301,00	204,00	299,00	302,00	291,00	413,00	198,00	286,86
11:00	283,00	205,00	322,00	303,00	279,00	288,00	288,00	322,00	205,00	281,14
11:20	328,00	225,00	300,00	227,00	300,00	277,00	257,00	328,00	225,00	273,43
11:40	311,00	272,00	298,00	221,00	293,00	279,00	304,00	311,00	221,00	282,57
12:00	292,00	213,00	271,00	271,00	291,00	267,00	281,00	292,00	213,00	269,43
12:20	230,00	300,00	303,00	294,00	259,00	303,00	293,00	303,00	230,00	283,14
12:40	244,00	255,00	295,00	297,00	255,00	288,00	303,00	303,00	244,00	276,71
13:00	328,00	271,00	291,00	301,00	249,00	299,00	248,00	328,00	248,00	283,86
13:20	258,00	250,00	300,00	291,00	245,00	233,00	222,00	300,00	222,00	257,00
13:40	208,00	261,00	275,00	230,00	300,00	264,00	288,00	300,00	208,00	260,86
14:00	258,00	233,00	283,00	222,00	297,00	293,00	258,00	297,00	222,00	263,43
14:20	240,00	245,00	271,00	250,00	278,00	280,00	262,00	280,00	240,00	260,86
14:40	259,00	301,00	255,00	300,00	265,00	256,00	278,00	301,00	255,00	273,43
Thi promedio en estado GRANULADO (°C)										267,12

Tabla 35

Tho en estado granulado

Hora	Muestra 1	Muestra 2	Muestra 3	Muestra 4	Muestra 5	Muestra 6	Muestra 7	MÁXIMO (°C)	MÍNIMO (°C)	PROMEDIO (°C)
09:00	27,50	26,00	28,50	25,00	28,00	20,00	26,00	28,50	20,00	25,86
09:20	35,00	33,00	32,50	30,00	35,00	28,00	30,00	35,00	28,00	31,93
09:40	42,00	41,00	42,00	40,00	42,00	40,00	40,00	42,00	40,00	41,00
10:00	51,00	51,00	53,00	52,00	55,00	49,50	50,00	55,00	49,50	51,64
10:20	54,60	54,60	55,00	55,00	53,00	52,00	50,00	55,00	50,00	53,46
10:40	55,00	55,00	55,50	56,00	54,00	55,00	55,00	56,00	54,00	55,07
11:00	53,00	53,00	53,00	52,00	54,00	53,00	51,00	54,00	51,00	52,71
11:20	52,00	51,00	57,00	52,50	53,00	56,00	52,00	57,00	51,00	53,36
11:40	51,00	54,00	56,00	54,50	52,00	51,00	51,00	56,00	51,00	52,79
12:00	56,00	56,00	58,00	53,50	55,00	52,00	56,00	58,00	52,00	55,21
12:20	57,00	57,00	57,00	56,00	55,00	53,00	52,00	57,00	52,00	55,29
12:40	55,50	56,00	54,00	54,00	55,50	57,00	51,00	57,00	51,00	54,71
13:00	54,40	54,40	56,00	53,00	54,40	53,00	50,00	56,00	50,00	53,60
13:20	54,30	57,00	58,00	54,00	54,30	54,00	52,00	58,00	52,00	54,80
13:40	56,00	58,00	56,00	55,00	56,00	52,00	56,00	58,00	52,00	55,57
14:00	58,00	58,00	57,00	58,00	54,00	53,00	54,00	58,00	53,00	56,00
14:20	59,00	59,00	53,00	56,00	52,00	53,00	57,00	59,00	52,00	55,57
14:40	57,50	57,50	58,00	59,00	53,00	52,50	56,00	59,00	52,50	56,21
Tho promedio en estado GRANULADO (°C)										50,82

Tabla 36

Tci en estado granulado

Hora	Muestra 1	Muestra 2	Muestra 3	Muestra 4	Muestra 5	Muestra 6	Muestra 7	MÁXIMO (°C)	MÍNIMO (°C)	PROMEDIO (°C)
09:00	20,30	17,30	15,40	19,30	21,10	15,50	16,50	21,10	15,40	17,91
09:20	20,50	18,00	15,40	19,50	21,10	16,20	17,40	21,10	15,40	18,30
09:40	20,50	18,40	15,20	20,30	21,50	17,10	18,60	21,50	15,20	18,80
10:00	20,70	19,50	15,70	20,50	21,60	17,50	19,30	21,60	15,70	19,26
10:20	21,30	20,60	16,00	20,30	21,90	17,90	21,40	21,90	16,00	19,91
10:40	22,20	21,30	16,20	20,80	21,90	16,90	21,90	22,20	16,20	20,17
11:00	22,80	22,20	17,10	21,10	22,50	16,60	22,40	22,80	16,60	20,67
11:20	23,50	23,30	18,10	21,30	23,70	17,40	23,10	23,70	17,40	21,49
11:40	24,20	23,50	18,90	21,40	23,90	17,50	24,00	24,20	17,50	21,91
12:00	24,20	24,20	20,00	21,60	24,90	18,40	23,60	24,90	18,40	22,41
12:20	25,50	23,50	20,50	22,70	24,90	18,60	23,90	25,50	18,60	22,80
12:40	25,30	24,40	21,60	23,00	25,10	19,10	24,80	25,30	19,10	23,33
13:00	25,40	24,20	22,60	23,20	25,30	19,40	24,20	25,40	19,40	23,47
13:20	25,30	23,90	21,30	23,90	23,20	21,20	24,50	25,30	21,20	23,33
13:40	25,70	24,90	19,80	23,10	23,20	22,30	23,10	25,70	19,80	23,16
14:00	24,90	26,00	18,40	24,10	23,50	23,10	23,00	26,00	18,40	23,29
14:20	22,80	26,70	18,10	24,20	23,90	20,10	23,10	26,70	18,10	22,70
14:40	22,00	27,00	18,20	24,10	22,00	19,90	23,30	27,00	18,20	22,36
Tci promedio en estado GRANULADO (°C)										21,40

Tabla 37

Tco en estado granulado

Hora	Muestra 1	Muestra 2	Muestra 3	Muestra 4	Muestra 5	Muestra 6	Muestra 7	MÁXIMO (°C)	MÍNIMO (°C)	PROMEDIO (°C)
09:00	80,00	67,00	75,00	81,00	78,00	79,50	66,00	81,00	66,00	75,21
09:20	105,00	90,00	98,00	110,00	100,00	110,50	89,00	110,50	89,00	100,36
09:40	120,00	117,00	112,00	126,50	109,00	122,80	192,00	192,00	109,00	128,47
10:00	135,00	132,50	129,00	142,60	129,00	136,70	117,00	142,60	117,00	131,69
10:20	142,40	145,00	140,00	144,00	140,00	143,50	135,00	145,00	135,00	141,41
10:40	143,00	143,00	143,00	143,00	140,00	143,00	140,00	143,00	140,00	142,14
11:00	144,00	144,00	145,00	142,10	141,00	145,00	144,00	145,00	141,00	143,59
11:20	142,00	142,00	142,00	142,00	142,00	142,00	139,00	142,00	139,00	141,57
11:40	141,00	141,00	141,00	141,00	141,00	141,00	141,00	141,00	141,00	141,00
12:00	145,00	145,00	145,00	146,00	145,00	140,00	145,00	146,00	140,00	144,43
12:20	149,00	149,00	145,50	146,00	138,50	138,00	149,00	149,00	138,00	145,00
12:40	150,00	150,00	143,00	145,50	136,50	140,00	140,00	150,00	136,50	143,57
13:00	143,00	147,00	142,00	143,00	143,00	143,00	143,00	147,00	142,00	143,43
13:20	139,00	139,00	139,00	143,00	139,00	139,00	139,00	143,00	139,00	139,57
13:40	140,00	140,00	137,00	140,00	137,00	140,00	140,00	140,00	137,00	139,14
14:00	142,00	142,00	142,00	142,00	142,00	142,00	142,00	142,00	142,00	142,00
14:20	145,40	145,40	145,40	145,40	138,00	145,40	145,00	145,40	138,00	144,29
14:40	142,00	142,00	142,00	142,00	142,00	142,00	145,00	145,00	142,00	142,43
Tco promedio en estado GRANULADO (°C)										134,96

Tabla 38

Thi en estado compactado

Hora	Muestra 1	Muestra 2	Muestra 3	Muestra 4	Muestra 5	Muestra 6	Muestra 7	Muestra 8	Muestra 9	Muestra 10	Muestra 11	Muestra 112	MÁXIMO (°C)	MÍNIMO (°C)	PROMEDIO (°C)
09:00	265,00	187,00	212,00	280,00	208,00	229,00	222,00	242,00	172,00	202,00	192,00	235,00	280,00	172,00	220,50
09:20	313,00	207,00	254,00	279,00	229,00	231,00	246,00	307,00	252,00	259,00	202,00	300,00	313,00	202,00	256,58
09:40	249,00	213,00	239,00	283,00	216,00	223,00	312,00	250,00	249,00	271,00	250,00	256,00	312,00	213,00	250,92
10:00	250,00	266,00	263,00	277,00	233,00	245,00	224,00	237,00	227,00	266,00	220,00	218,00	277,00	218,00	243,83
10:20	290,00	272,00	253,00	291,00	270,00	235,00	247,00	222,00	216,00	300,00	230,00	238,00	300,00	216,00	255,33
10:40	236,00	226,00	282,00	280,00	229,00	246,00	250,00	239,00	238,00	271,00	214,00	315,00	315,00	214,00	252,17
11:00	276,00	236,00	223,00	210,00	253,00	250,00	236,00	248,00	229,00	272,00	217,00	280,00	280,00	210,00	244,17
11:20	291,00	216,00	199,00	216,00	238,00	299,00	220,00	278,00	237,00	224,00	213,00	284,00	299,00	199,00	242,92
11:40	300,00	207,00	215,00	213,00	251,00	267,00	245,00	271,00	290,00	302,00	240,00	242,00	302,00	207,00	253,58
12:00	270,00	213,00	222,00	256,00	234,00	290,00	258,00	291,00	291,00	252,00	255,00	245,00	291,00	213,00	256,42
12:20	284,00	223,00	280,00	249,00	225,00	288,00	243,00	258,00	293,00	280,00	280,00	250,00	293,00	223,00	262,75
12:40	248,00	220,00	282,00	288,00	215,00	300,00	241,00	270,00	258,00	293,00	290,00	268,00	300,00	215,00	264,42
13:00	293,00	255,00	273,00	300,00	236,00	277,00	260,00	280,00	257,00	270,00	300,00	238,00	300,00	236,00	269,92
13:20	300,00	278,00	254,00	283,00	291,00	263,00	259,00	271,00	293,00	268,00	291,00	248,00	300,00	248,00	274,92
13:40	281,00	293,00	288,00	261,00	300,00	253,00	267,00	293,00	249,00	273,00	271,00	250,00	300,00	249,00	273,25
14:00	272,00	263,00	291,00	280,00	265,00	221,00	290,00	300,00	261,00	239,00	293,00	263,00	300,00	221,00	269,83
14:20	249,00	250,00	270,00	230,00	247,00	215,00	280,00	255,00	282,00	269,00	289,00	271,00	289,00	215,00	258,92
14:40	221,00	239,00	235,00	270,00	249,00	210,00	237,00	280,00	270,00	244,00	245,00	270,00	280,00	210,00	247,50
Thi promedio en estado COMPACTADO (°C)															255,44

Tabla 39

Tho en estado compactado

Hora	Muestra 1	Muestra 2	Muestra 3	Muestra 4	Muestra 5	Muestra 6	Muestra 7	Muestra 8	Muestra 9	Muestra 10	Muestra 11	Muestra 112	MÁXIMO (°C)	MÍNIMO (°C)	PROMEDIO (°C)
09:00	25,60	27,00	23,30	25,90	21,70	28,90	20,00	22,80	26,00	21,00	26,00	28,90	28,90	20,00	24,76
09:20	32,00	35,50	29,80	34,20	30,00	30,80	28,90	23,70	30,00	29,00	31,60	34,50	35,50	23,70	30,83
09:40	40,00	43,00	39,70	39,30	36,70	44,00	38,70	41,30	43,80	37,00	41,20	41,00	44,00	36,70	40,48
10:00	53,50	55,00	50,40	52,40	48,90	54,50	52,70	52,90	54,00	49,00	53,00	52,00	55,00	48,90	52,36
10:20	54,00	53,50	53,20	51,20	50,00	53,20	56,00	53,80	52,30	52,00	53,20	53,00	56,00	50,00	52,95
10:40	54,00	54,00	51,00	51,80	51,20	52,40	55,00	54,00	54,00	50,00	51,00	52,50	55,00	50,00	52,58
11:00	53,50	53,50	50,00	52,70	51,80	54,00	54,00	53,50	56,00	53,00	50,00	53,50	56,00	50,00	52,96
11:20	52,00	52,00	52,00	51,30	52,00	56,00	56,00	52,00	57,00	54,00	51,00	52,00	57,00	51,00	53,11
11:40	51,50	52,00	51,50	51,50	51,50	52,00	57,00	51,50	54,00	52,00	51,50	51,50	57,00	51,50	52,29
12:00	55,00	53,00	53,00	55,00	53,00	55,00	55,00	55,00	53,00	55,00	55,00	55,00	55,00	53,00	54,33
12:20	54,00	53,00	54,00	53,00	52,00	54,00	54,00	54,00	53,00	54,00	54,00	53,00	54,00	52,00	53,50
12:40	52,10	53,00	52,10	52,10	52,10	55,00	54,00	54,00	52,10	53,00	55,00	52,10	55,00	52,10	53,05
13:00	53,00	53,00	50,00	53,00	54,00	53,00	53,00	55,00	53,00	53,00	53,00	53,00	55,00	50,00	53,00
13:20	52,00	52,00	52,00	53,30	56,00	56,00	51,00	53,50	52,00	54,00	52,00	52,00	56,00	51,00	52,98
13:40	53,50	53,50	53,50	53,50	56,40	57,00	51,90	54,00	53,50	53,50	55,00	52,30	57,00	51,90	53,97
14:00	53,30	53,30	52,60	53,00	55,80	55,00	52,50	52,00	56,00	53,00	52,00	54,00	56,00	52,00	53,54
14:20	53,40	51,30	51,00	53,00	54,00	56,00	53,50	53,00	55,00	55,00	53,00	55,00	56,00	51,00	53,60
14:40	53,20	54,00	54,00	54,00	53,90	57,50	54,00	53,20	55,00	54,00	54,00	55,00	57,50	53,20	54,32
Tho promedio en estado COMPACTADO (°C)															49,70

Tabla 40

Tci en estado compactado

Hora	Muestra 1	Muestra 2	Muestra 3	Muestra 4	Muestra 5	Muestra 6	Muestra 7	Muestra 8	Muestra 9	Muestra 10	Muestra 11	Muestra 112	MÁXIMO (°C)	MÍNIMO (°C)	PROMEDIO (°C)
09:00	16,00	16,80	20,80	19,20	18,50	16,30	18,10	13,90	20,40	21,00	20,30	16,80	23,30	13,90	18,18
09:20	18,00	17,30	20,50	20,10	19,30	16,40	18,10	14,10	20,50	21,10	20,70	18,00	21,10	14,10	18,68
09:40	19,50	17,90	22,00	20,20	21,50	16,50	19,60	14,70	21,10	21,80	21,60	18,30	22,00	14,70	19,56
10:00	21,50	18,40	22,10	20,80	22,70	16,60	20,50	14,80	21,50	22,40	21,70	20,40	22,70	14,80	20,28
10:20	22,30	19,10	22,40	20,90	23,90	16,90	21,00	15,50	22,20	22,60	23,20	20,90	23,90	15,50	20,91
10:40	22,80	19,80	22,80	19,90	24,00	17,30	21,10	16,00	21,80	23,50	23,20	21,20	24,00	16,00	21,12
11:00	23,30	20,60	23,60	23,90	24,80	17,60	22,50	16,80	22,80	23,80	23,00	22,00	24,80	16,80	22,06
11:20	23,40	20,70	23,70	24,50	24,40	18,00	22,40	17,40	23,40	24,20	23,50	22,50	24,50	17,40	22,34
11:40	24,10	20,50	23,80	25,30	24,20	18,40	23,40	18,40	25,20	24,20	23,80	23,10	25,30	18,40	22,87
12:00	24,10	20,80	24,90	25,30	24,20	18,90	24,00	18,70	26,10	24,30	24,30	23,90	26,10	18,70	23,29
12:20	24,80	20,80	25,00	26,10	23,80	19,30	24,60	19,30	26,40	25,80	24,10	24,40	26,40	19,30	23,70
12:40	25,10	20,90	25,20	26,20	24,30	20,60	25,30	19,80	26,50	25,30	24,50	24,70	26,50	19,80	24,03
13:00	25,00	21,00	26,00	26,50	24,80	20,70	25,10	22,40	26,10	25,00	24,80	24,70	26,50	20,70	24,34
13:20	25,00	21,40	26,30	26,60	24,90	20,70	24,90	23,30	25,70	24,70	25,10	24,70	26,60	20,70	24,44
13:40	25,30	21,70	26,40	26,20	24,60	20,70	25,00	23,80	25,70	24,60	25,10	24,20	26,40	20,70	24,44
14:00	27,00	21,30	26,50	26,00	24,90	21,10	25,00	24,20	25,00	25,10	25,20	23,90	27,00	21,10	24,60
14:20	27,10	20,80	25,90	25,70	24,60	20,90	24,20	24,10	26,10	25,20	23,40	24,10	27,10	20,80	24,34
14:40	27,00	20,60	25,20	26,00	25,10	20,70	24,30	23,30	26,20	25,10	23,30	25,10	27,00	20,60	24,33
Tci promedio en estado COMPACTADO (°C)															22,42

Tabla 41

Tco en estado compactado

Hora	Muestra 1	Muestra 2	Muestra 3	Muestra 4	Muestra 5	Muestra 6	Muestra 7	Muestra 8	Muestra 9	Muestra 10	Muestra 11	Muestra 12	MÁXIMO (°C)	MÍNIMO (°C)	PROMEDIO (°C)
09:00	75,00	70,00	65,00	72,40	72,20	70,50	67,50	70,00	73,20	77,00	78,00	70,00	78,00	65,00	71,73
09:20	95,00	90,00	86,00	90,00	88,70	90,00	78,90	90,00	90,00	90,00	90,00	89,00	95,00	78,90	88,97
09:40	115,00	110,00	108,00	110,40	111,10	121,00	102,50	110,00	110,00	120,00	110,00	110,00	121,00	102,50	111,50
10:00	140,00	138,00	137,00	138,60	132,40	143,80	127,90	143,20	138,70	135,00	138,00	138,00	143,80	127,90	137,55
10:20	136,00	136,00	138,00	128,80	138,70	140,00	130,40	14,00	135,00	140,00	140,00	135,00	140,00	14,00	125,99
10:40	137,50	137,50	140,00	135,00	137,50	137,50	137,50	140,00	140,00	142,00	137,50	133,00	142,00	133,00	137,92
11:00	138,00	138,00	141,00	132,00	138,00	138,00	138,00	138,00	138,00	140,00	138,00	132,00	141,00	132,00	137,42
11:20	137,80	137,80	137,80	137,80	138,00	142,10	137,80	137,80	137,80	137,80	137,80	130,00	142,10	130,00	137,53
11:40	137,00	137,00	137,00	137,00	134,30	137,00	137,00	137,00	137,00	137,00	137,00	136,00	137,00	134,30	136,69
12:00	133,00	133,00	133,00	133,00	137,00	135,00	133,00	133,00	133,00	133,00	145,00	134,00	145,00	133,00	134,58
12:20	135,00	135,00	135,00	135,00	137,00	135,00	135,00	135,00	135,00	135,00	145,00	134,00	145,00	134,00	135,92
12:40	140,00	133,00	140,00	140,00	135,60	140,00	136,00	140,00	140,00	140,00	143,00	135,00	143,00	133,00	138,55
13:00	142,00	132,00	142,00	136,00	138,50	142,00	142,00	142,00	142,00	142,00	142,00	136,00	142,00	132,00	139,88
13:20	138,00	134,00	138,00	138,00	137,00	138,00	138,00	143,00	145,00	138,00	138,00	135,00	145,00	134,00	138,33
13:40	136,00	132,00	136,00	136,00	136,00	136,00	137,00	145,00	146,00	145,00	135,00	136,00	146,00	132,00	138,00
14:00	141,00	136,00	132,00	132,00	133,00	137,00	142,00	144,00	145,00	146,00	136,00	137,00	146,00	132,00	138,42
14:20	145,00	137,00	133,00	138,00	134,00	135,00	140,00	146,00	144,00	148,00	138,00	134,00	148,00	133,00	139,33
14:40	140,00	138,00	136,00	137,00	138,00	136,00	141,00	145,00	145,00	150,00	140,00	135,00	150,00	135,00	140,08
Tco promedio en estado COMPACTADO (°C)															129,35

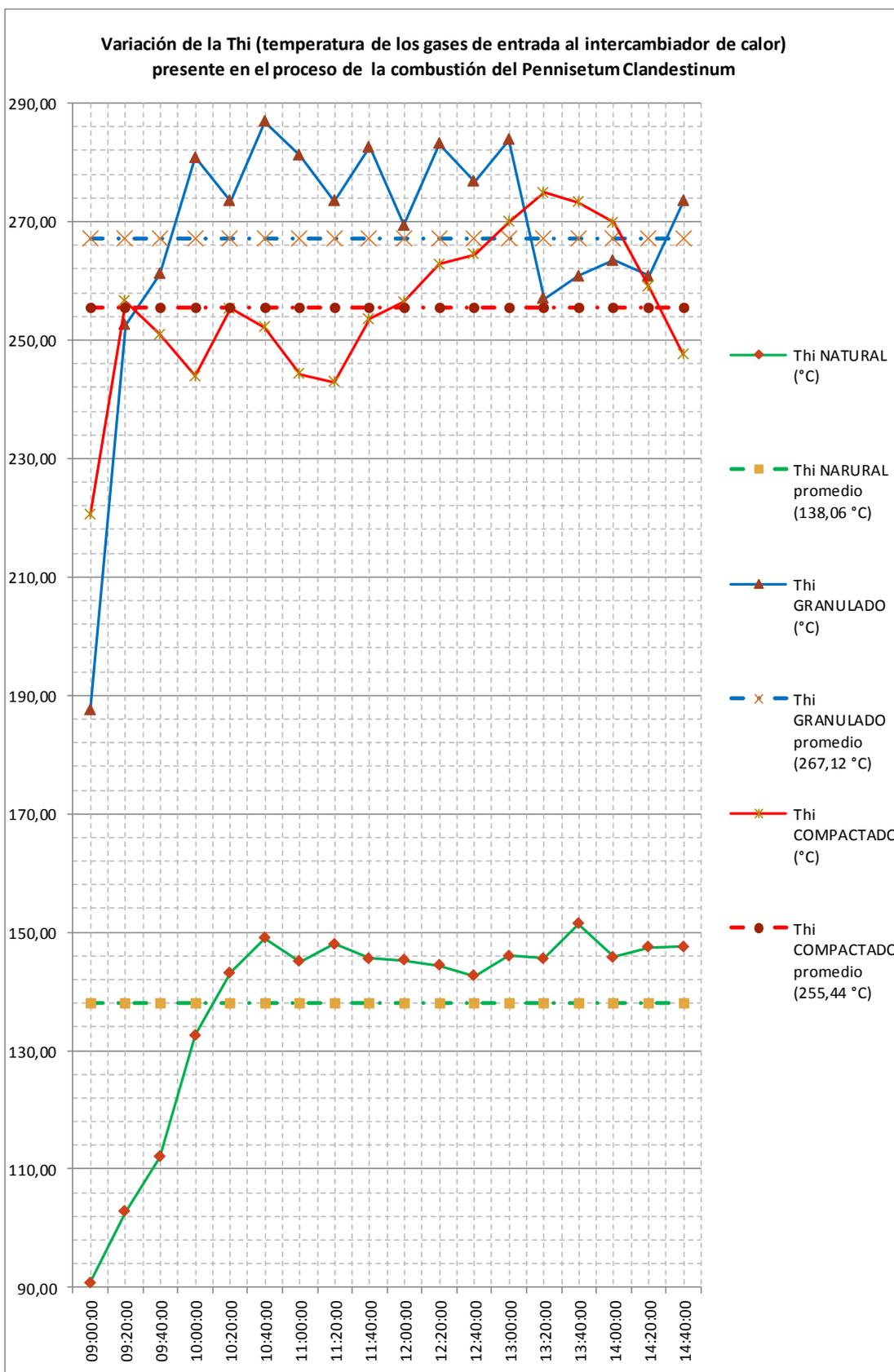


Figura 55 Thi en el proceso de combustión

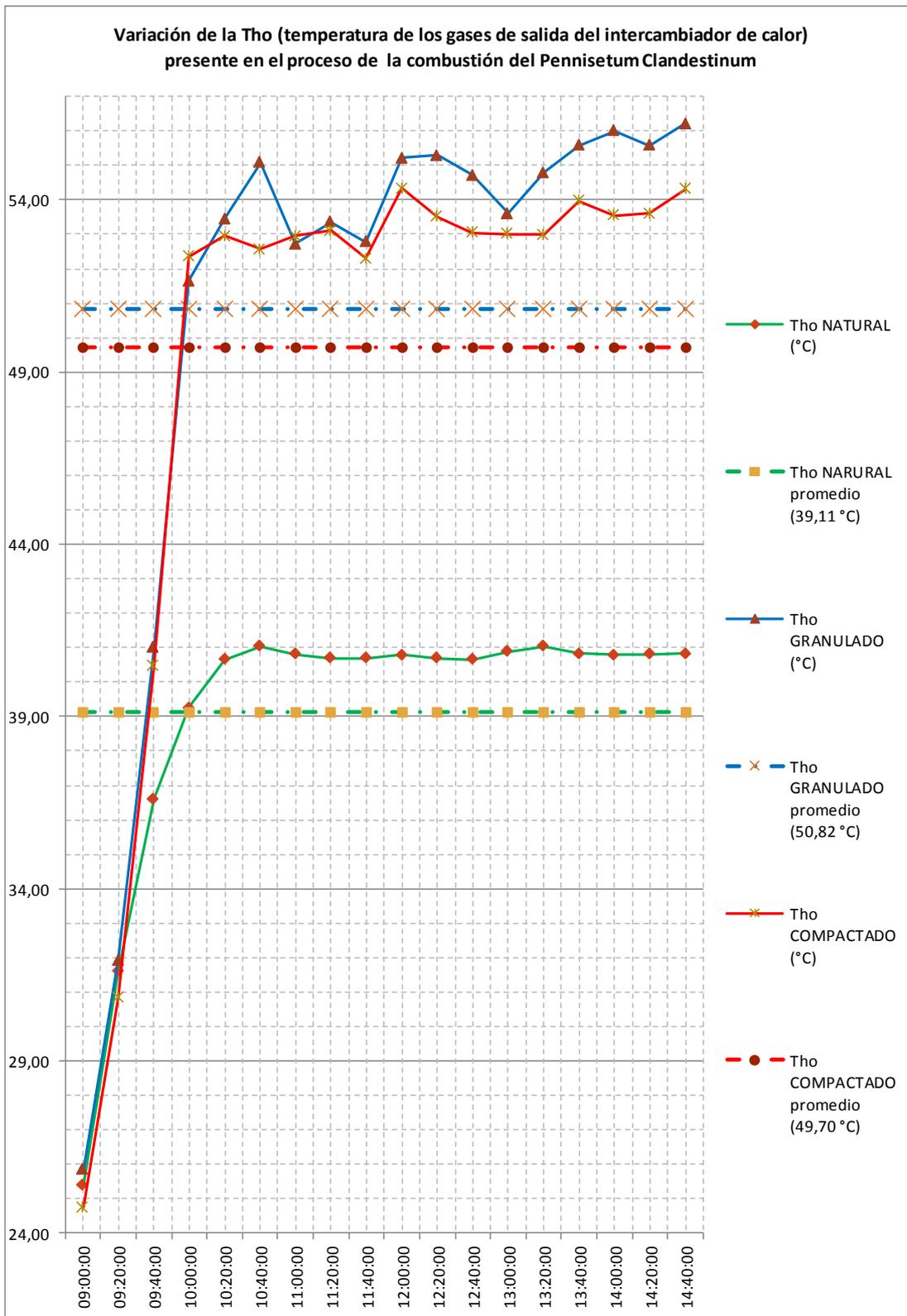


Figura 56 Tho en el proceso de combustión

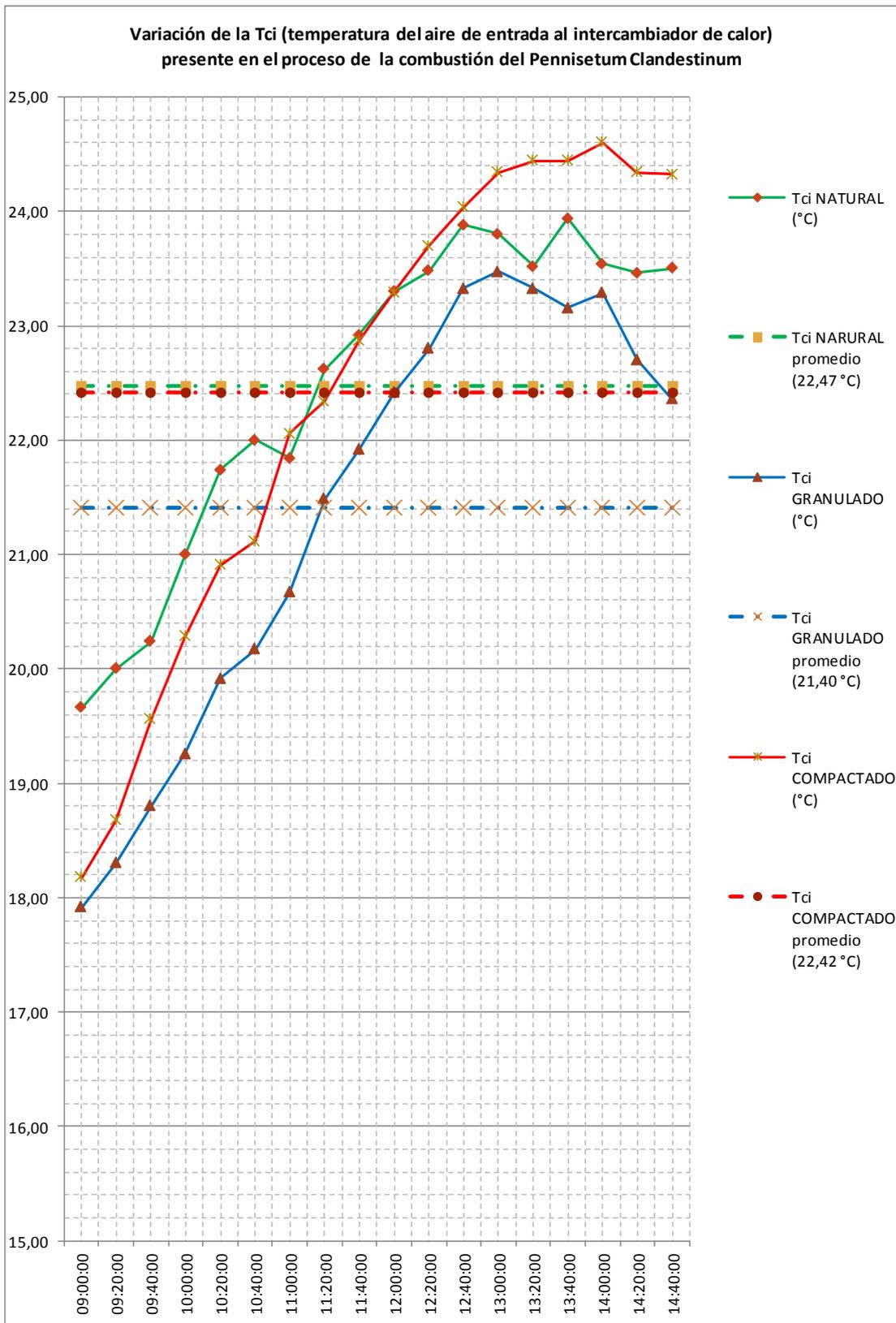


Figura 57 Tci en el proceso de combustión

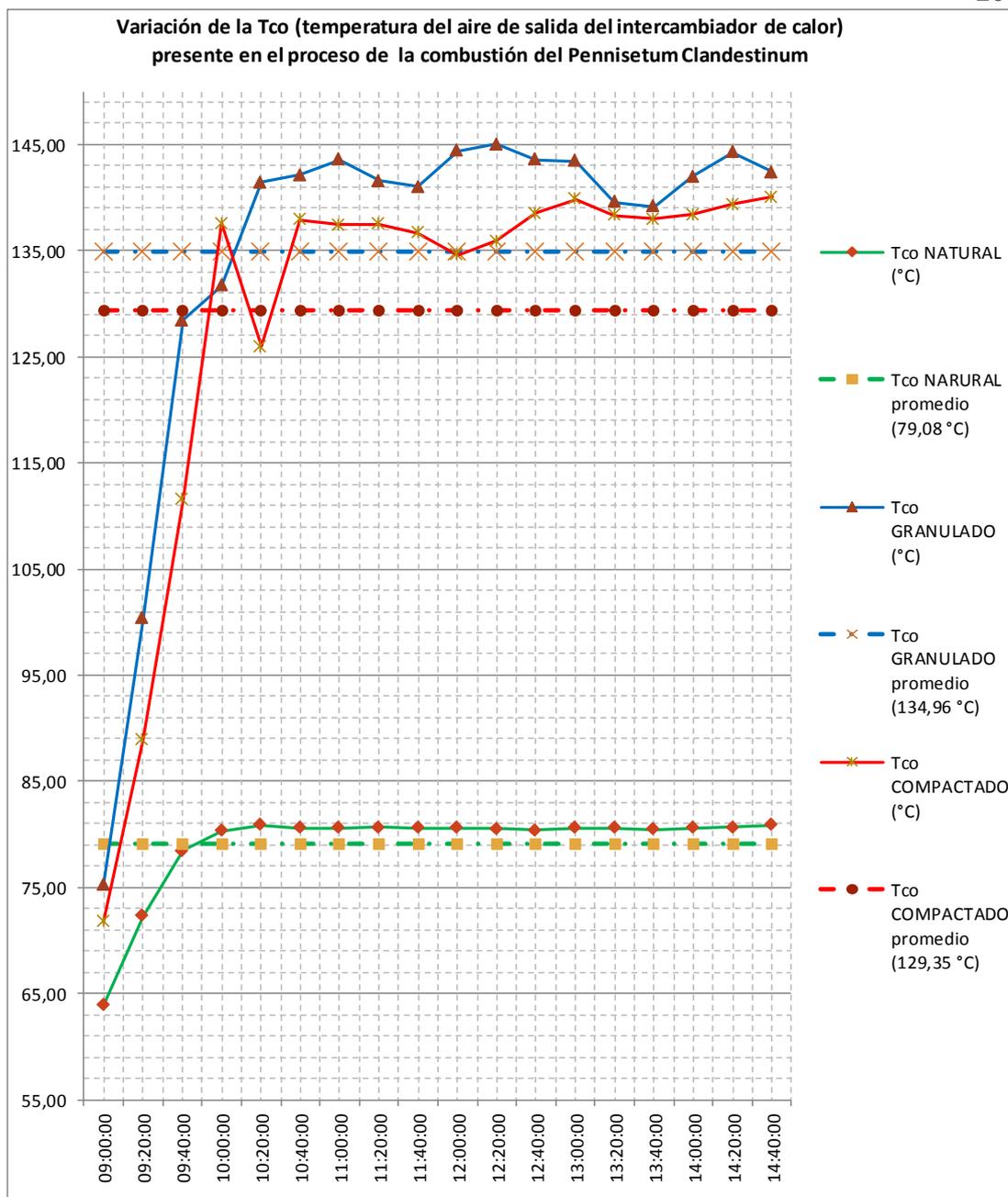


Figura 58 Tco en el proceso de combustión

En las figuras 55, 56, 57 y 58, se describen la variación lineal de las temperaturas presentes en el intercambiador de calor durante el proceso de combustión entre las 9am y las 14:40pm. La temperatura entre las 9am y 10am mantiene una tendencia creciente, en tanto, a partir de las 10:20am la variación se da dentro de un rango estable, esto puede interpretarse, diciendo en que la cámara de combustión entre las 9:00 y 10:00 se encuentra en un estado de calentamiento, y a partir de las 10:20 su temperatura de operación se estabiliza.

Asumir un valor promedio de las diferentes de temperaturas presentes en el intercambiador de calor entre las 9am y las 14:20pm generará un valor algebraico con una desviación del valor real. Para corregir esta desviación, y que los cálculos de la caracterización de la combustión se apegue a la realidad, para el caso experimental NO SERÁN CONSIDERADOS LOS DATOS REGISTRADOS PARA LAS DIFERENTES VARIABLES TERMO FÍSICAS DEL PROCESO DE LA COMBUSTIÓN ENTRE LAS 9AM Y 10AM.

Realizando la corrección los parámetros del intercambiador se tiene.

Tabla 42

Thi corregido en estado natural

Hora	Muestra 1	Muestra 2	Muestra 3	Muestra 4	Muestra 5	MÁXIMO (°C)	MÍNIMO (°C)	PROMEDIO (°C)
09:00								
09:20								
09:40								
10:00								
10:20	145,00	140,00	145,00	143,00	143,00	145,00	140,00	143,20
10:40	146,00	145,00	167,00	145,00	142,00	167,00	142,00	149,00
11:00	148,00	146,00	150,00	140,00	141,00	150,00	140,00	145,00
11:20	152,00	147,00	150,00	146,00	145,00	152,00	145,00	148,00
11:40	146,00	145,00	145,00	146,00	146,00	146,00	145,00	145,60
12:00	148,00	145,00	140,00	145,00	148,00	148,00	140,00	145,20
12:20	145,00	148,00	142,00	140,00	147,00	148,00	140,00	144,40
12:40	145,00	144,00	144,00	135,00	145,00	145,00	135,00	142,60
13:00	150,00	145,00	148,00	140,00	147,00	150,00	140,00	146,00
13:20	147,00	143,00	145,00	145,00	148,00	148,00	143,00	145,60
13:40	165,00	160,00	140,00	147,00	145,00	165,00	140,00	151,40
14:00	149,00	146,00	145,00	146,00	143,00	149,00	143,00	145,80
14:20	150,00	149,00	146,00	145,00	147,00	150,00	145,00	147,40
14:40	155,00	145,00	150,00	143,00	145,00	155,00	143,00	147,60
Thi promedio corregido en estado NATURAL (°C)								146,20

Tabla 43

Tho corregido en estado natural

Hora	Muestra 1	Muestra 2	Muestra 3	Muestra 4	Muestra 5	MÁXIMO (°C)	MÍNIMO (°C)	PROMEDIO (°C)
09:00								
09:20								
09:40								
10:00								
10:20	40,80	40,50	40,80	40,70	40,50	40,80	40,50	40,66
10:40	42,00	40,70	41,00	40,80	40,70	42,00	40,70	41,04
11:00	40,00	40,80	41,50	40,90	40,80	41,50	40,00	40,80
11:20	41,20	40,60	40,00	40,90	40,80	41,20	40,00	40,70
11:40	40,60	40,70	40,60	40,70	40,90	40,90	40,60	40,70
12:00	40,70	40,80	40,70	41,00	40,70	41,00	40,70	40,78
12:20	40,50	40,90	40,60	40,70	40,80	40,90	40,50	40,70
12:40	40,50	40,50	40,50	40,80	41,00	41,00	40,50	40,66
13:00	41,00	40,80	40,80	40,70	41,10	41,10	40,70	40,88
13:20	42,00	40,80	41,00	40,50	40,90	42,00	40,50	41,04
13:40	40,70	40,90	40,90	40,80	40,80	40,90	40,70	40,82
14:00	40,80	40,70	40,70	40,90	40,80	40,90	40,70	40,78
14:20	40,80	40,60	40,60	41,20	40,80	41,20	40,60	40,80
14:40	41,00	40,80	40,50	40,90	40,90	41,00	40,50	40,82
Tho promedio corregido en estado NATURAL (°C)								40,80

Tabla 44

Tci corregido en estado natural

Hora	Muestra 1	Muestra 2	Muestra 3	Muestra 4	Muestra 5	MÁXIMO (°C)	MÍNIMO (°C)	PROMEDIO (°C)
09:00								
09:20								
09:40								
10:00								
10:20	21,40	21,00	19,00	22,80	24,50	24,50	19,00	21,74
10:40	22,50	21,30	19,20	23,00	24,00	24,00	19,20	22,00
11:00	21,90	22,20	18,90	23,20	23,00	23,20	18,90	21,84
11:20	23,50	23,50	18,70	23,40	24,00	24,00	18,70	22,62
11:40	25,00	23,50	18,90	23,00	24,20	25,00	18,90	22,92
12:00	24,80	24,20	20,00	23,50	24,00	24,80	20,00	23,30
12:20	26,00	25,00	20,50	22,70	23,20	26,00	20,50	23,48
12:40	26,20	24,80	22,00	23,00	23,40	26,20	22,00	23,88
13:00	25,50	24,20	22,60	23,20	23,50	25,50	22,60	23,80
13:20	25,50	23,90	21,30	24,00	22,90	25,50	21,30	23,52
13:40	25,80	24,90	21,00	23,50	24,50	25,80	21,00	23,94
14:00	25,00	26,00	19,00	24,10	23,60	26,00	19,00	23,54
14:20	23,00	26,70	18,90	24,20	24,50	26,70	18,90	23,46
14:40	23,50	27,00	18,50	24,50	24,00	27,00	18,50	23,50
Tci promedio corregido en estado NATURAL (°C)								23,11

Tabla 45

Tco corregido en estado natural

Hora	Muestra 1	Muestra 2	Muestra 3	Muestra 4	Muestra 5	MÁXIMO (°C)	MÍNIMO (°C)	PROMEDIO (°C)
09:00								
09:20								
09:40								
10:00								
10:20	81,00	81,50	80,50	81,00	80,30	81,50	80,30	80,86
10:40	79,80	80,90	80,60	81,10	80,60	81,10	79,80	80,60
11:00	79,90	80,90	81,00	80,40	80,60	81,00	79,90	80,56
11:20	80,50	80,80	80,90	80,40	80,60	80,90	80,40	80,64
11:40	81,00	80,50	80,70	80,40	80,20	81,00	80,20	80,56
12:00	80,50	80,60	80,80	80,60	80,30	80,80	80,30	80,56
12:20	80,40	80,70	80,70	80,50	80,20	80,70	80,20	80,50
12:40	80,40	80,40	80,60	80,40	80,30	80,60	80,30	80,42
13:00	80,60	80,60	80,80	80,50	80,60	80,80	80,50	80,62
13:20	80,70	80,50	80,50	80,50	80,70	80,70	80,50	80,58
13:40	80,80	80,30	80,60	80,20	80,50	80,80	80,20	80,48
14:00	80,60	80,50	80,70	80,50	80,50	80,70	80,50	80,56
14:20	81,00	80,60	80,70	80,40	80,70	81,00	80,40	80,68
14:40	81,20	81,00	80,80	80,60	80,60	81,20	80,60	80,84
Tco promedio corregido en estado NATURAL (°C)								80.60

Tabla 50

Thi corregido en estado compactado

Hora	Muestra 1	Muestra 2	Muestra 3	Muestra 4	Muestra 5	Muestra 6	Muestra 7	Muestra 8	Muestra 9	Muestra 10	Muestra 11	Muestra 112	MÁXIMO (°C)	MÍNIMO (°C)	PROMEDIO (°C)
09:00															
09:20															
09:40															
10:00															
10:20	290,00	272,00	253,00	291,00	270,00	235,00	247,00	222,00	216,00	300,00	230,00	238,00	300,00	216,00	255,33
10:40	236,00	226,00	282,00	280,00	229,00	246,00	250,00	239,00	238,00	271,00	214,00	315,00	315,00	214,00	252,17
11:00	276,00	236,00	223,00	210,00	253,00	250,00	236,00	248,00	229,00	272,00	217,00	280,00	280,00	210,00	244,17
11:20	291,00	216,00	199,00	216,00	238,00	299,00	220,00	278,00	237,00	224,00	213,00	284,00	299,00	199,00	242,92
11:40	300,00	207,00	215,00	213,00	251,00	267,00	245,00	271,00	290,00	302,00	240,00	242,00	302,00	207,00	253,58
12:00	270,00	213,00	222,00	256,00	234,00	290,00	258,00	291,00	291,00	252,00	255,00	245,00	291,00	213,00	256,42
12:20	284,00	223,00	280,00	249,00	225,00	288,00	243,00	258,00	293,00	280,00	280,00	250,00	293,00	223,00	262,75
12:40	248,00	220,00	282,00	288,00	215,00	300,00	241,00	270,00	258,00	293,00	290,00	268,00	300,00	215,00	264,42
13:00	293,00	255,00	273,00	300,00	236,00	277,00	260,00	280,00	257,00	270,00	300,00	238,00	300,00	236,00	269,92
13:20	300,00	278,00	254,00	283,00	291,00	263,00	259,00	271,00	293,00	268,00	291,00	248,00	300,00	248,00	274,92
13:40	281,00	293,00	288,00	261,00	300,00	253,00	267,00	293,00	249,00	273,00	271,00	250,00	300,00	249,00	273,25
14:00	272,00	263,00	291,00	280,00	265,00	221,00	290,00	300,00	261,00	239,00	293,00	263,00	300,00	221,00	269,83
14:20	249,00	250,00	270,00	230,00	247,00	215,00	280,00	255,00	282,00	269,00	289,00	271,00	289,00	215,00	258,92
14:40	221,00	239,00	235,00	270,00	249,00	210,00	237,00	280,00	270,00	244,00	245,00	270,00	280,00	210,00	247,50
Thi promedio corregido en estado COMPACTADO (°C)															259,01

Tabla 51

Tho corregido en estado compactado

Hora	Muestra 1	Muestra 2	Muestra 3	Muestra 4	Muestra 5	Muestra 6	Muestra 7	Muestra 8	Muestra 9	Muestra 10	Muestra 11	Muestra 112	MÁXIMO (°C)	MÍNIMO (°C)	PROMEDIO (°C)
09:00															
09:20															
09:40															
10:00															
10:20	54,00	53,50	53,20	51,20	50,00	53,20	56,00	53,80	52,30	52,00	53,20	53,00	56,00	50,00	52,95
10:40	54,00	54,00	51,00	51,80	51,20	52,40	55,00	54,00	54,00	50,00	51,00	52,50	55,00	50,00	52,58
11:00	53,50	53,50	50,00	52,70	51,80	54,00	54,00	53,50	56,00	53,00	50,00	53,50	56,00	50,00	52,96
11:20	52,00	52,00	52,00	51,30	52,00	56,00	56,00	52,00	57,00	54,00	51,00	52,00	57,00	51,00	53,11
11:40	51,50	52,00	51,50	51,50	51,50	52,00	57,00	51,50	54,00	52,00	51,50	51,50	57,00	51,50	52,29
12:00	55,00	53,00	53,00	55,00	53,00	55,00	55,00	55,00	53,00	55,00	55,00	55,00	55,00	53,00	54,33
12:20	54,00	53,00	54,00	53,00	52,00	54,00	54,00	54,00	53,00	54,00	54,00	53,00	54,00	52,00	53,50
12:40	52,10	53,00	52,10	52,10	52,10	55,00	54,00	54,00	52,10	53,00	55,00	52,10	55,00	52,10	53,05
13:00	53,00	53,00	50,00	53,00	54,00	53,00	53,00	55,00	53,00	53,00	53,00	53,00	55,00	50,00	53,00
13:20	52,00	52,00	52,00	53,30	56,00	56,00	51,00	53,50	52,00	54,00	52,00	52,00	56,00	51,00	52,98
13:40	53,50	53,50	53,50	53,50	56,40	57,00	51,90	54,00	53,50	53,50	55,00	52,30	57,00	51,90	53,97
14:00	53,30	53,30	52,60	53,00	55,80	55,00	52,50	52,00	56,00	53,00	52,00	54,00	56,00	52,00	53,54
14:20	53,40	51,30	51,00	53,00	54,00	56,00	53,50	53,00	55,00	55,00	53,00	55,00	56,00	51,00	53,60
14:40	53,20	54,00	54,00	54,00	53,90	57,50	54,00	53,20	55,00	54,00	54,00	55,00	57,50	53,20	54,32
Tho promedio corregido en estado COMPACTADO (°C)															53,30

Tabla 52

Tci corregido en estado compactado

Hora	Muestra 1	Muestra 2	Muestra 3	Muestra 4	Muestra 5	Muestra 6	Muestra 7	Muestra 8	Muestra 9	Muestra 10	Muestra 11	Muestra 112	MÁXIMO (°C)	MÍNIMO (°C)	PROMEDIO (°C)
09:00															
09:20															
09:40															
10:00															
10:20	22,30	19,10	22,40	20,90	23,90	16,90	21,00	15,50	22,20	22,60	23,20	20,90	23,90	15,50	20,91
10:40	22,80	19,80	22,80	19,90	24,00	17,30	21,10	16,00	21,80	23,50	23,20	21,20	24,00	16,00	21,12
11:00	23,30	20,60	23,60	23,90	24,80	17,60	22,50	16,80	22,80	23,80	23,00	22,00	24,80	16,80	22,06
11:20	23,40	20,70	23,70	24,50	24,40	18,00	22,40	17,40	23,40	24,20	23,50	22,50	24,50	17,40	22,34
11:40	24,10	20,50	23,80	25,30	24,20	18,40	23,40	18,40	25,20	24,20	23,80	23,10	25,30	18,40	22,87
12:00	24,10	20,80	24,90	25,30	24,20	18,90	24,00	18,70	26,10	24,30	24,30	23,90	26,10	18,70	23,29
12:20	24,80	20,80	25,00	26,10	23,80	19,30	24,60	19,30	26,40	25,80	24,10	24,40	26,40	19,30	23,70
12:40	25,10	20,90	25,20	26,20	24,30	20,60	25,30	19,80	26,50	25,30	24,50	24,70	26,50	19,80	24,03
13:00	25,00	21,00	26,00	26,50	24,80	20,70	25,10	22,40	26,10	25,00	24,80	24,70	26,50	20,70	24,34
13:20	25,00	21,40	26,30	26,60	24,90	20,70	24,90	23,30	25,70	24,70	25,10	24,70	26,60	20,70	24,44
13:40	25,30	21,70	26,40	26,20	24,60	20,70	25,00	23,80	25,70	24,60	25,10	24,20	26,40	20,70	24,44
14:00	27,00	21,30	26,50	26,00	24,90	21,10	25,00	24,20	25,00	25,10	25,20	23,90	27,00	21,10	24,60
14:20	27,10	20,80	25,90	25,70	24,60	20,90	24,20	24,10	26,10	25,20	23,40	24,10	27,10	20,80	24,34
14:40	27,00	20,60	25,20	26,00	25,10	20,70	24,30	23,30	26,20	25,10	23,30	25,10	27,00	20,60	24,33
Tci promedio corregido en estado COMPACTADO (°C)															23,34

Tabla 53

Tco corregido en estado compactado

Hora	Muestra 1	Muestra 2	Muestra 3	Muestra 4	Muestra 5	Muestra 6	Muestra 7	Muestra 8	Muestra 9	Muestra 10	Muestra 11	Muestra 112	MÁXIMO (°C)	MÍNIMO (°C)	PROMEDIO (°C)
09:00															
09:20															
09:40															
10:00															
10:20	136,00	136,00	138,00	128,80	138,70	140,00	130,40	14,00	135,00	140,00	140,00	135,00	140,00	14,00	125,99
10:40	137,50	137,50	140,00	135,00	137,50	137,50	137,50	140,00	140,00	142,00	137,50	133,00	142,00	133,00	137,92
11:00	138,00	138,00	141,00	132,00	138,00	138,00	138,00	138,00	138,00	140,00	138,00	132,00	141,00	132,00	137,42
11:20	137,80	137,80	137,80	137,80	138,00	142,10	137,80	137,80	137,80	137,80	137,80	130,00	142,10	130,00	137,53
11:40	137,00	137,00	137,00	137,00	134,30	137,00	137,00	137,00	137,00	137,00	137,00	136,00	137,00	134,30	136,69
12:00	133,00	133,00	133,00	133,00	137,00	135,00	133,00	133,00	133,00	133,00	145,00	134,00	145,00	133,00	134,58
12:20	135,00	135,00	135,00	135,00	137,00	135,00	135,00	135,00	135,00	135,00	145,00	134,00	145,00	134,00	135,92
12:40	140,00	133,00	140,00	140,00	135,60	140,00	136,00	140,00	140,00	140,00	143,00	135,00	143,00	133,00	138,55
13:00	142,00	132,00	142,00	136,00	138,50	142,00	142,00	142,00	142,00	142,00	142,00	136,00	142,00	132,00	139,88
13:20	138,00	134,00	138,00	138,00	137,00	138,00	138,00	143,00	145,00	138,00	138,00	135,00	145,00	134,00	138,33
13:40	136,00	132,00	136,00	136,00	136,00	136,00	137,00	145,00	146,00	145,00	135,00	136,00	146,00	132,00	138,00
14:00	141,00	136,00	132,00	132,00	133,00	137,00	142,00	144,00	145,00	146,00	136,00	137,00	146,00	132,00	138,42
14:20	145,00	137,00	133,00	138,00	134,00	135,00	140,00	146,00	144,00	148,00	138,00	134,00	148,00	133,00	139,33
14:40	140,00	138,00	136,00	137,00	138,00	136,00	141,00	145,00	145,00	150,00	140,00	135,00	150,00	135,00	140,08
Tco promedio corregido en estado COMPACTADO (°C)															137,80

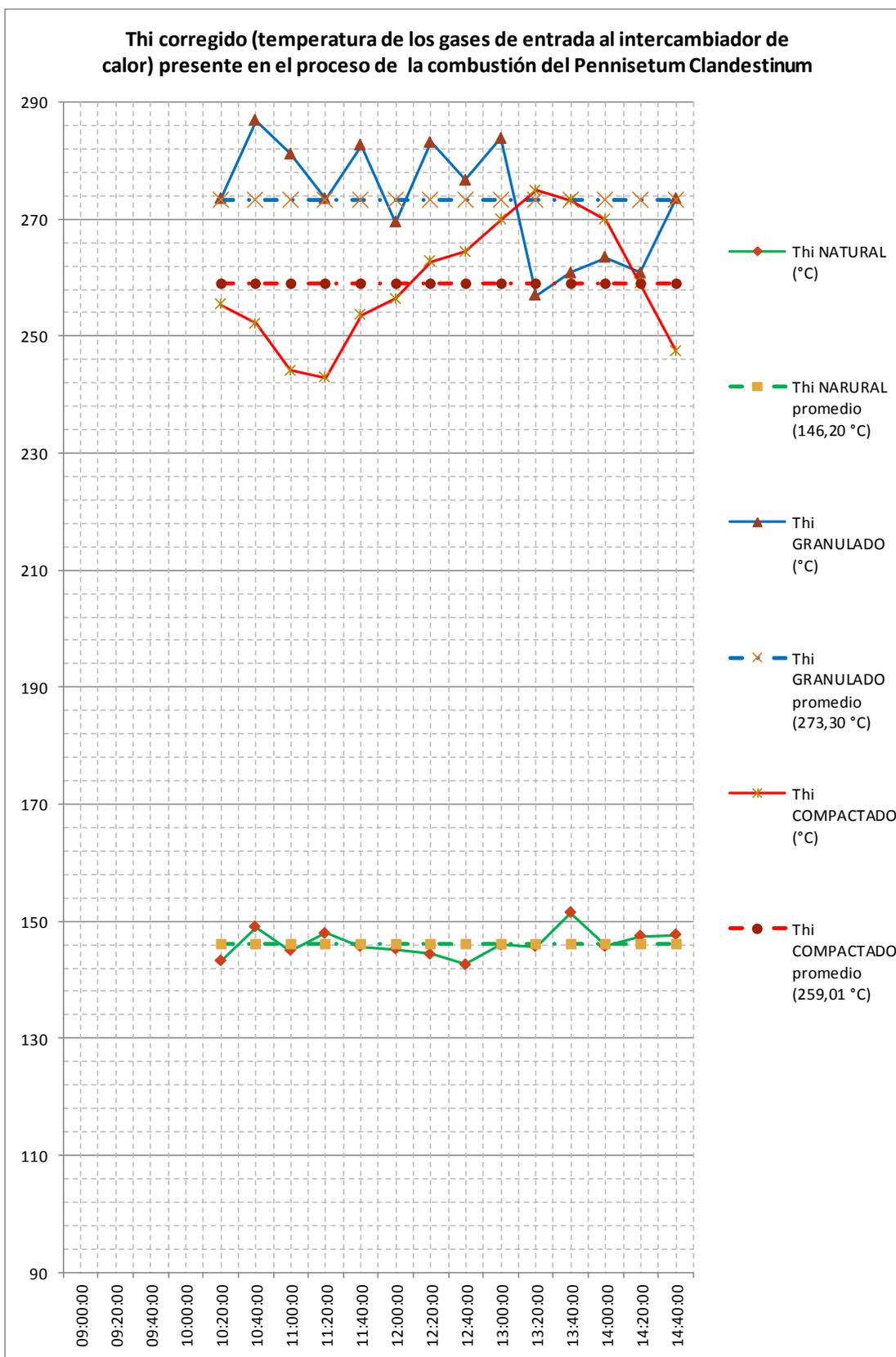


Figura 59 Thi corregido en el proceso de combustión

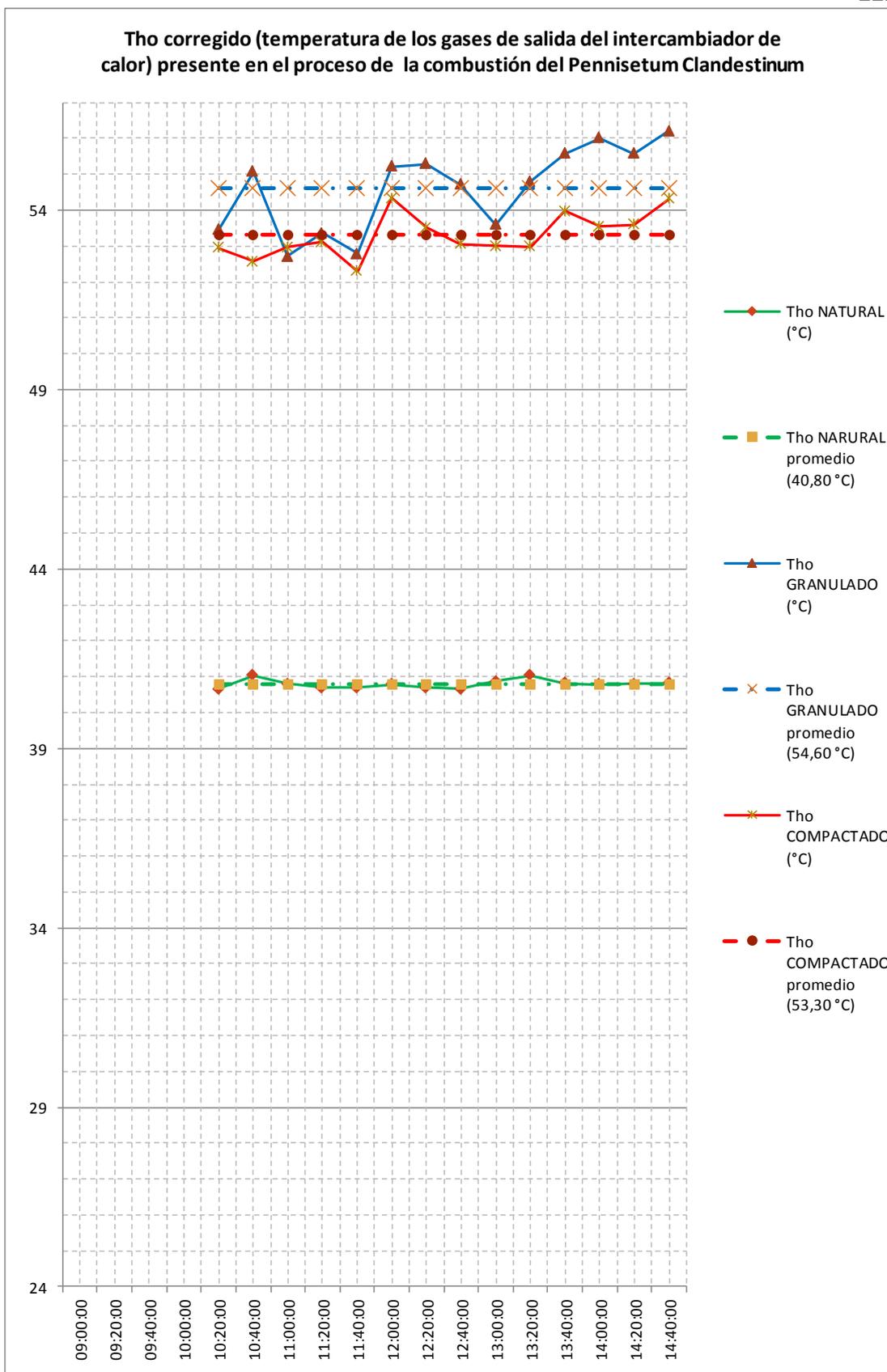


Figura 60 Tho corregido en el proceso de combustión

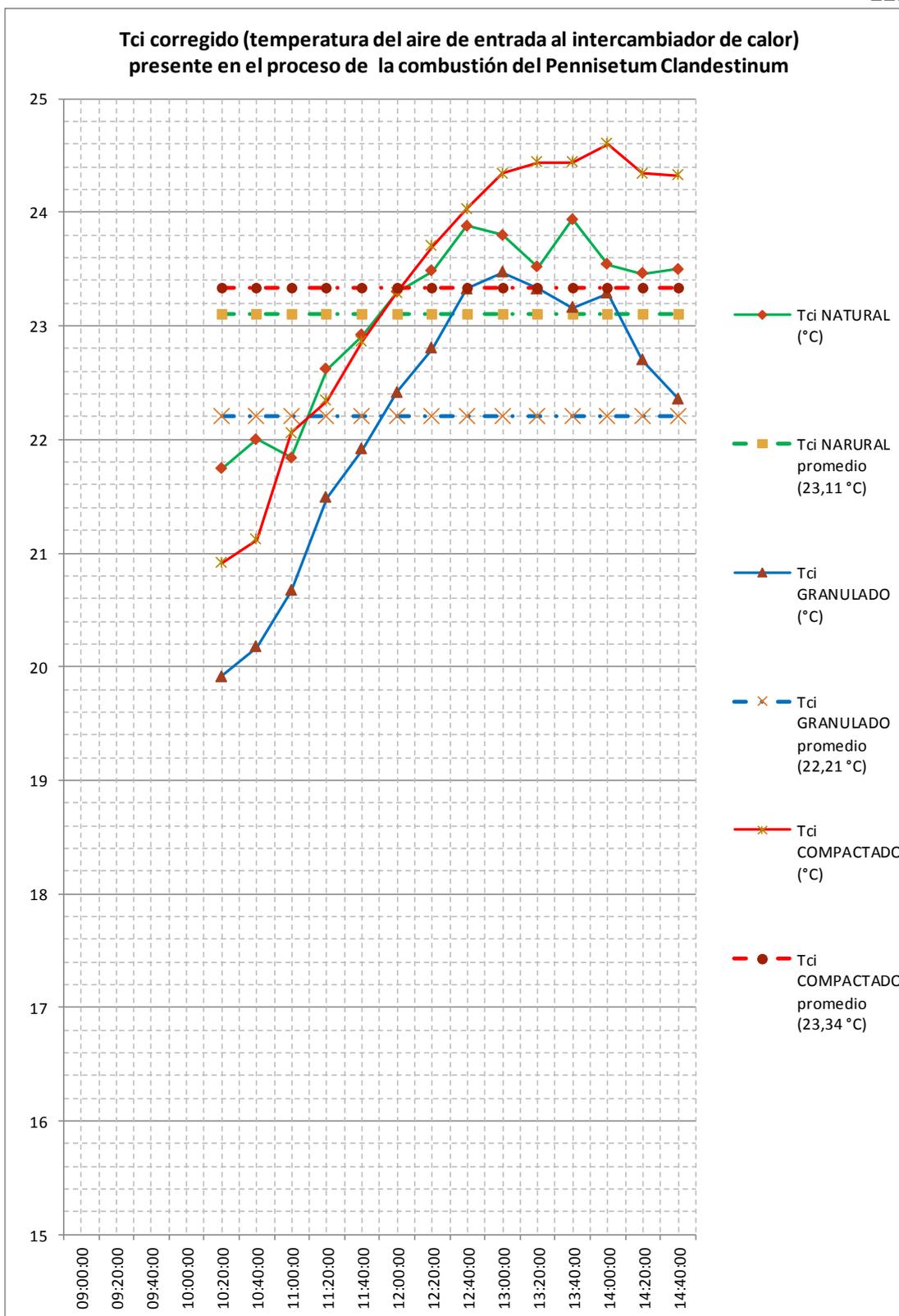
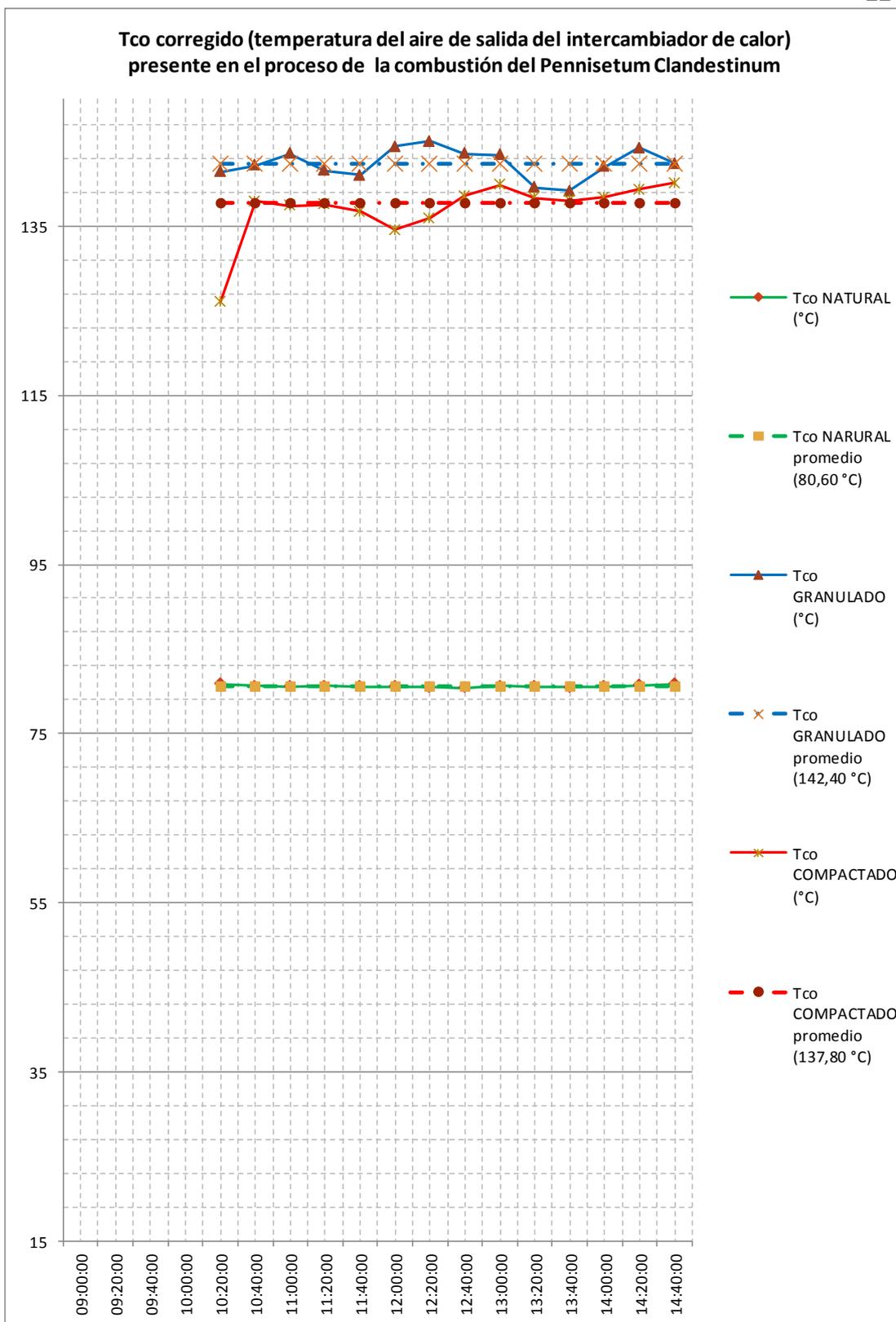


Figura 61 Tci corregido en el proceso de combustión



De las figuras 59 a la 62, se visualiza la variación lineal de las temperaturas en el intercambiador de calor en el periodo entre las 10:20am y las 14.40pm, periodo donde la variación de las temperaturas es constante dentro de un rango.

De las tablas 42 a la 53, una vez que se han realizado la corrección de la desviación generada el calentamiento de la cámara de combustión entre las 9am y 10 am, los valores de las temperaturas corregidas presentes en el intercambiador de calor (IC) que se utilizan para la caracterización del *Pennisetum Clandestinum* son:

En estado natural:

- $T_{hi} = 146,20$ °C, temperatura de los gases de entrada al IC.
- $T_{ho} = 40,80$ °C, temperatura de los gases de salida del IC.
- $T_{ci} = 23,11$ °C, temperatura del aire de entrada al IC.
- $T_{co} = 80,60$ °C, temperatura del aire de salida del IC.

En estado granulado:

- $T_{hi} = 273,30$ °C, temperatura de los gases de entrada al IC.
- $T_{ho} = 54,60$ °C, temperatura de los gases de salida del IC.
- $T_{ci} = 22,21$ °C, temperatura del aire de entrada al IC.
- $T_{co} = 142,40$ °C, temperatura del aire de salida del IC.

En estado compactado:

- $T_{hi} = 259,01$ °C, temperatura de los gases de entrada al IC.
- $T_{ho} = 53,30$ °C, temperatura de los gases de salida del IC.
- $T_{ci} = 23,34$ °C, temperatura del aire de entrada al IC.
- $T_{co} = 137,80$ °C, temperatura del aire de salida del IC.

Consecuentemente con el criterio de análisis cualitativo de los datos registrados en el proceso de combustión, para determinar los valores de los parámetros termo físicos de la cámara del horno de combustión, se eliminarán los valores registrados entre las 9am y la 10am, debido a que antes periodo de tiempo la cámara de combustión se encuentra en estado de calentamiento, los datos registrados a partir de las 10:20am será considerados en el análisis cuantitativo de la caracterización de la combustión del *Pennisetum Clandestinum*.

Tabla 54

Tpi en estado natural

	Hora	Muestra 1	Muestra 2	Muestra 3	Muestra 4	Muestra 5	MÁXIMO (°C)	MÍNIMO (°C)	PROMEDIO (°C)
Temperatura pared interna 1	09:00								
	09:20								
	09:40								
	10:00								
	10:20	127,00	130,00	125,00	126,00	125,00	130,00	125,00	126,60
	10:40	128,00	127,00	124,00	127,00	132,00	132,00	124,00	127,60
	11:00	127,00	128,00	127,00	125,00	129,00	129,00	125,00	127,20
	11:20	126,00	129,00	130,00	124,00	130,00	130,00	124,00	127,80
	11:40	130,00	130,00	131,00	127,00	127,00	131,00	127,00	129,00
	12:00	129,00	126,00	129,00	129,00	126,00	129,00	126,00	127,80
	12:20	127,00	125,00	128,00	128,00	128,00	128,00	125,00	127,20
	12:40	129,00	127,00	127,00	129,00	127,00	129,00	127,00	127,80
	13:00	130,00	129,00	125,00	130,00	129,00	130,00	125,00	128,60
	13:20	128,00	127,00	126,00	130,00	130,00	130,00	126,00	128,20
	13:40	126,00	128,00	124,00	129,00	128,00	129,00	124,00	127,00
	14:00	125,00	128,00	123,00	130,00	130,00	130,00	123,00	127,20
14:20	124,00	127,00	125,00	131,00	132,00	132,00	124,00	127,80	
14:40	130,00	130,00	127,00	128,00	133,00	133,00	127,00	129,60	
Tpi 1 promedio (°C)									127,81
Temperatura pared interna 2	09:00								
	09:20								
	09:40								
	10:00								
	10:20	126,00	128,00	128,00	128,00	125,00	128,00	125,00	127,00
	10:40	125,00	128,00	126,00	130,00	134,00	134,00	125,00	128,60
	11:00	127,00	127,00	128,00	129,00	129,00	129,00	127,00	128,00
	11:20	126,00	128,00	126,00	128,00	128,00	128,00	126,00	127,20
	11:40	129,00	127,00	125,00	127,00	127,00	129,00	125,00	127,00
	12:00	128,00	127,00	130,00	126,00	130,00	130,00	126,00	128,20
	12:20	128,00	127,00	131,00	125,00	127,00	131,00	125,00	127,60
	12:40	127,00	128,00	126,00	132,00	129,00	132,00	126,00	128,40
	13:00	126,00	127,00	127,00	130,00	128,00	130,00	126,00	127,60
	13:20	127,00	126,00	126,00	132,00	133,00	133,00	126,00	128,80
	13:40	125,00	125,00	125,00	126,00	124,00	126,00	124,00	125,00
	14:00	124,00	126,00	124,00	125,00	128,00	128,00	124,00	125,40
14:20	128,00	125,00	127,00	127,00	132,00	132,00	125,00	127,80	
14:40	127,00	129,00	129,00	128,00	135,00	135,00	127,00	129,60	
Tpi 2 promedio (°C)									127,59
Promedio total de Tpi en estado NATURAL (°C)									127,70

Tabla 55

Tpo en estado natural

	Hora	Muestra 1	Muestra 2	Muestra 3	Muestra 4	Muestra 5	MÁXIMO (°C)	MÍNIMO (°C)	PROMEDIO (°C)
Temperatura pared externa 1	09:00								
	09:20								
	09:40								
	10:00								
	10:20	72,00	73,00	71,50	72,00	68,00	73,00	68,00	71,30
	10:40	72,00	72,00	72,00	71,00	69,00	72,00	69,00	71,20
	11:00	75,00	71,00	72,50	70,50	70,00	75,00	70,00	71,80
	11:20	76,00	72,00	73,00	72,00	71,50	76,00	71,50	72,90
	11:40	72,30	72,50	74,00	73,00	70,00	74,00	70,00	72,36
	12:00	75,00	73,50	72,40	72,00	71,00	75,00	71,00	72,78
	12:20	72,00	74,00	72,00	71,00	72,00	74,00	71,00	72,20
	12:40	71,00	72,10	72,00	70,50	73,50	73,50	70,50	71,82
	13:00	75,00	72,40	73,00	70,00	70,00	75,00	70,00	72,08
	13:20	76,00	75,00	71,50	72,00	69,50	76,00	69,50	72,80
	13:40	77,00	70,00	70,00	70,00	72,00	77,00	70,00	71,80
	14:00	78,00	69,00	72,30	71,00	72,00	78,00	69,00	72,46
14:20	75,00	75,00	72,50	71,00	72,50	75,00	71,00	73,20	
14:40	73,40	72,00	74,00	69,00	70,00	74,00	69,00	71,68	
Tpo 1 promedio (°C)									72,17
Temperatura pared externa 2	09:00								
	09:20								
	09:40								
	10:00								
	10:20	73,00	77,00	72,00	71,50	67,50	77,00	67,50	72,20
	10:40	75,00	72,50	71,00	72,00	68,50	75,00	68,50	71,80
	11:00	78,00	73,00	72,00	71,00	70,00	78,00	70,00	72,80
	11:20	74,00	72,00	73,50	71,00	72,00	74,00	71,00	72,50
	11:40	76,00	74,00	73,50	71,50	69,80	76,00	69,80	72,96
	12:00	74,00	75,00	73,00	71,50	70,50	75,00	70,50	72,80
	12:20	73,00	73,00	72,00	72,00	72,00	73,00	72,00	72,40
	12:40	70,00	71,00	71,80	71,00	71,00	71,80	70,00	70,96
	13:00	71,00	74,50	72,00	71,00	70,00	74,50	70,00	71,70
	13:20	74,00	75,00	72,60	71,20	70,00	75,00	70,00	72,56
	13:40	74,00	72,00	72,00	70,00	71,50	74,00	70,00	71,90
	14:00	75,00	70,00	73,00	70,00	72,00	75,00	70,00	72,00
14:20	77,00	77,00	74,00	71,00	73,00	77,00	71,00	74,40	
14:40	76,00	74,00	73,50	70,00	71,50	76,00	70,00	73,00	
Tpo 2 promedio (°C)									73,43
Promedio total de Tpo en estado NATURAL (°C)									72,30

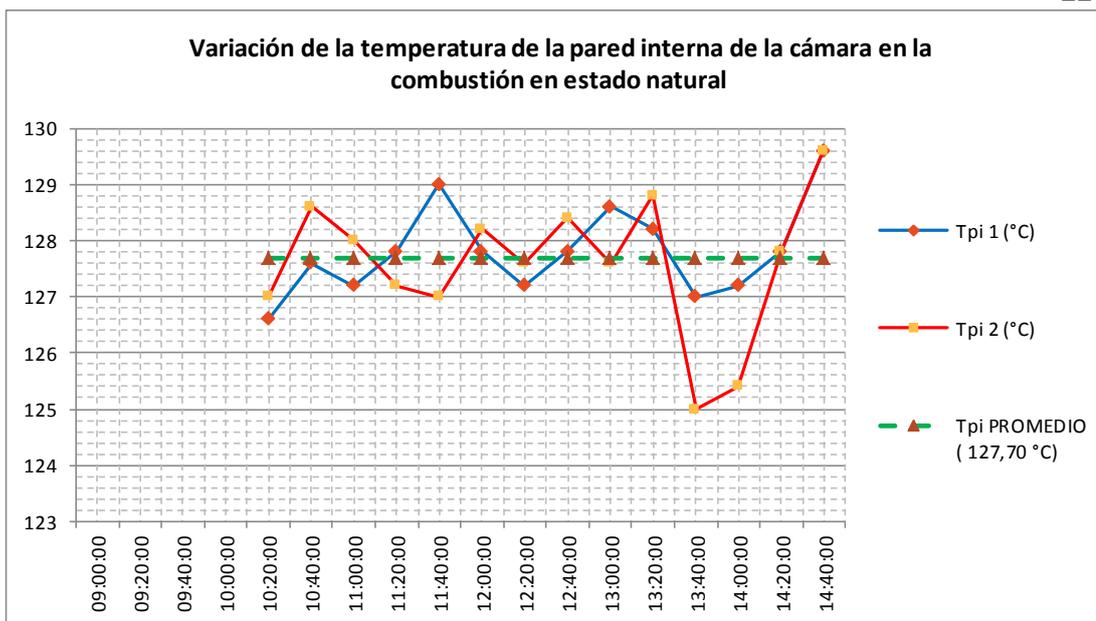


Figura 63 Tpi en la combustión en estado natural

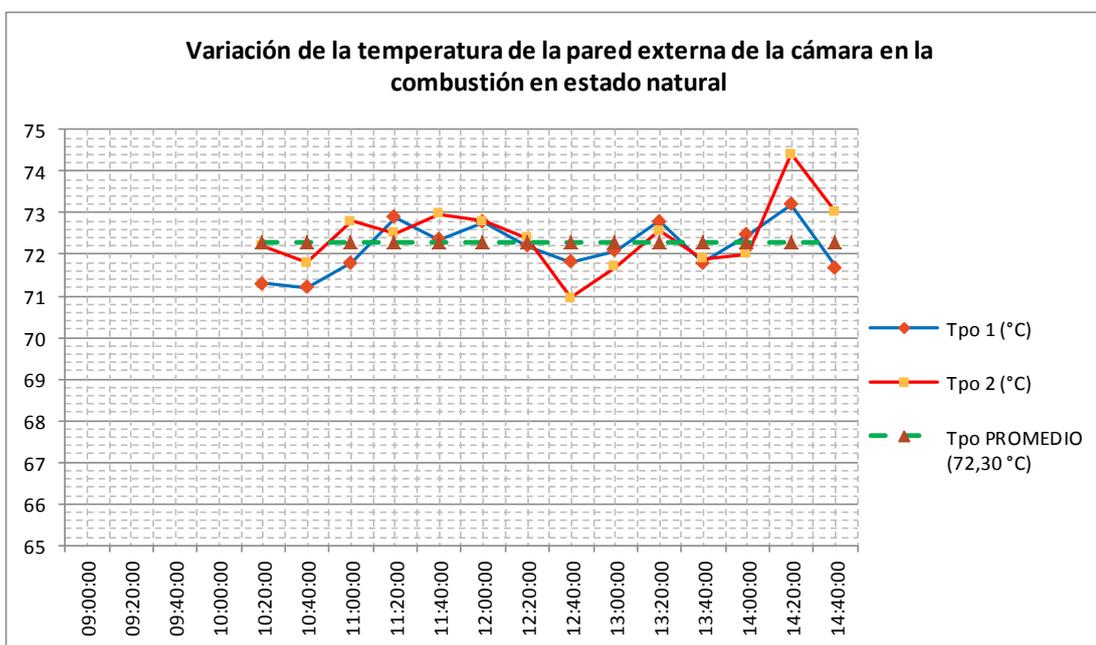


Figura 64 Tpo en la combustión en estado natural

De las tablas 54 y 55, se termina que en el proceso de combustión en estado natural, las temperaturas en las paredes de la cámara de combustión son:

- Tpi = 127,59 °C, temperatura de la pared interna de la cámara.
- Tpo = 72,30 °C, temperatura de la pared externa de la cámara.

Tabla 56

Tpi en estado granulado

	Hora	Muestra 1	Muestra 2	Muestra 3	Muestra 4	Muestra 5	Muestra 6	Muestra 7	MÁXIMO (°C)	MÍNIMO (°C)	PROMEDIO (°C)
Temperatura pared interna 1	09:00										
	09:20										
	09:40										
	10:00										
	10:20	230,00	226,00	211,00	167,00	211,00	193,00	196,00	230,00	167,00	204,86
	10:40	271,00	213,00	205,00	212,00	210,00	202,00	201,00	271,00	201,00	216,29
	11:00	237,00	210,00	201,00	237,00	199,00	215,00	200,00	237,00	199,00	214,14
	11:20	221,00	209,00	213,00	249,00	207,00	204,00	179,00	249,00	179,00	211,71
	11:40	210,00	222,00	215,00	220,00	211,00	200,00	183,00	222,00	183,00	208,71
	12:00	212,00	204,00	204,00	215,00	198,00	207,00	173,00	215,00	173,00	201,86
	12:20	213,00	197,00	199,00	201,00	195,00	203,00	191,00	213,00	191,00	199,86
	12:40	202,00	189,00	203,00	213,00	202,00	198,00	200,00	213,00	189,00	201,00
	13:00	213,00	225,00	215,00	203,00	207,00	204,00	189,00	225,00	189,00	208,00
	13:20	216,00	217,00	203,00	200,00	209,00	201,00	176,00	217,00	176,00	203,14
	13:40	221,00	215,00	217,00	194,00	215,00	176,00	184,00	221,00	176,00	203,14
	14:00	235,00	211,00	207,00	183,00	193,00	199,00	176,00	235,00	176,00	200,57
	14:20	193,00	203,00	201,00	189,00	199,00	184,00	169,00	203,00	169,00	191,14
14:40	215,00	200,00	194,00	201,00	182,00	173,00	175,00	215,00	173,00	191,43	
		Tpi 1 promedio (°C)									203,99

Continúa



09:00												
09:20												
09:40												
10:00												
Temperatura pared interna 2	10:20	202,00	166,00	221,00	155,00	213,00	199,00	199,00	221,00	155,00	193,57	
	10:40	210,00	243,00	207,00	157,00	210,00	215,00	213,00	243,00	157,00	207,86	
	11:00	207,00	250,00	215,00	173,00	203,00	211,00	203,00	250,00	173,00	208,86	
	11:20	261,00	255,00	208,00	186,00	211,00	213,00	187,00	261,00	186,00	217,29	
	11:40	222,00	225,00	223,00	188,00	215,00	195,00	200,00	225,00	188,00	209,71	
	12:00	219,00	215,00	213,00	205,00	203,00	213,00	169,00	219,00	169,00	205,29	
	12:20	258,00	186,00	206,00	191,00	183,00	209,00	183,00	258,00	183,00	202,29	
	12:40	282,00	181,00	215,00	205,00	201,00	203,00	179,00	282,00	179,00	209,43	
	13:00	228,00	201,00	217,00	200,00	186,00	217,00	174,00	228,00	174,00	203,29	
	13:20	239,00	202,00	201,00	213,00	191,00	198,00	184,00	239,00	184,00	204,00	
	13:40	263,00	195,00	198,00	198,00	205,00	203,00	199,00	263,00	195,00	208,71	
	14:00	252,00	201,00	203,00	175,00	175,00	187,00	201,00	252,00	175,00	199,14	
	14:20	222,00	194,00	195,00	177,00	162,00	163,00	174,00	222,00	162,00	183,86	
	14:40	243,00	208,00	181,00	215,00	143,00	160,00	191,00	243,00	143,00	191,57	
	Tpi 2 promedio (°C)											203,20
	Promedio total de Tpi en estado GRANULADO (°C)											203,60

Tabla 57

Tpo en estado granulado

	Hora	Muestra 1	Muestra 2	Muestra 3	Muestra 4	Muestra 5	Muestra 6	Muestra 7	MÁXIMO (°C)	MÍNIMO (°C)	PROMEDIO (°C)
Temperatura pared externa 1	09:00										
	09:20										
	09:40										
	10:00										
	10:20	89,00	77,00	109,00	99,00	100,00	92,00	63,00	109,00	63,00	89,86
	10:40	99,00	91,00	102,00	89,00	99,00	95,00	69,00	102,00	69,00	92,00
	11:00	103,00	104,00	110,00	92,00	109,00	100,00	84,00	110,00	84,00	100,29
	11:20	109,00	111,00	108,00	88,00	98,00	98,00	82,00	111,00	82,00	99,14
	11:40	103,00	109,00	111,00	101,00	111,00	99,00	84,00	111,00	84,00	102,57
	12:00	122,00	106,00	106,00	94,00	99,00	102,00	86,00	122,00	86,00	102,14
	12:20	105,00	99,00	98,00	100,00	89,00	98,00	90,00	105,00	89,00	97,00
	12:40	102,00	103,00	107,00	93,00	93,00	104,00	88,00	107,00	88,00	98,57
	13:00	108,00	101,00	113,00	107,00	97,00	101,00	93,00	113,00	93,00	102,86
	13:20	111,00	98,00	102,00	85,00	98,00	99,00	91,00	111,00	85,00	97,71
	13:40	106,00	110,00	99,00	91,00	99,00	98,00	95,00	110,00	91,00	99,71
	14:00	110,00	107,00	100,00	88,00	101,00	103,00	93,00	110,00	88,00	100,29
	14:20	105,00	109,00	94,00	89,00	107,00	93,00	90,00	109,00	89,00	98,14
14:40	107,00	99,00	88,00	93,00	89,00	90,00	92,00	107,00	88,00	94,00	
		Tpo 1 promedio (°C)									98,16

Continúa



09:00												
09:20												
09:40												
10:00												
Temperatura pared externa 2	10:20	89,00	77,00	109,00	99,00	100,00	92,00	63,00	109,00	63,00	89,86	
	10:40	99,00	91,00	102,00	89,00	99,00	95,00	69,00	102,00	69,00	92,00	
	11:00	103,00	104,00	110,00	92,00	109,00	100,00	84,00	110,00	84,00	100,29	
	11:20	109,00	111,00	108,00	88,00	98,00	98,00	82,00	111,00	82,00	99,14	
	11:40	103,00	109,00	111,00	101,00	111,00	99,00	84,00	111,00	84,00	102,57	
	12:00	122,00	106,00	106,00	94,00	99,00	102,00	86,00	122,00	86,00	102,14	
	12:20	105,00	99,00	98,00	100,00	89,00	98,00	90,00	105,00	89,00	97,00	
	12:40	102,00	103,00	107,00	93,00	93,00	104,00	88,00	107,00	88,00	98,57	
	13:00	108,00	101,00	113,00	107,00	97,00	101,00	93,00	113,00	93,00	102,86	
	13:20	111,00	98,00	102,00	85,00	98,00	99,00	91,00	111,00	85,00	97,71	
	13:40	106,00	110,00	99,00	91,00	99,00	98,00	95,00	110,00	91,00	99,71	
	14:00	110,00	107,00	100,00	88,00	101,00	103,00	93,00	110,00	88,00	100,29	
	14:20	105,00	109,00	94,00	89,00	107,00	93,00	90,00	109,00	89,00	98,14	
	14:40	107,00	99,00	88,00	93,00	89,00	90,00	92,00	107,00	88,00	94,00	
	Tpo 2 promedio (°C)											98,16
	Promedio total de Tpo en estado GRANULADO (°C)											98,16

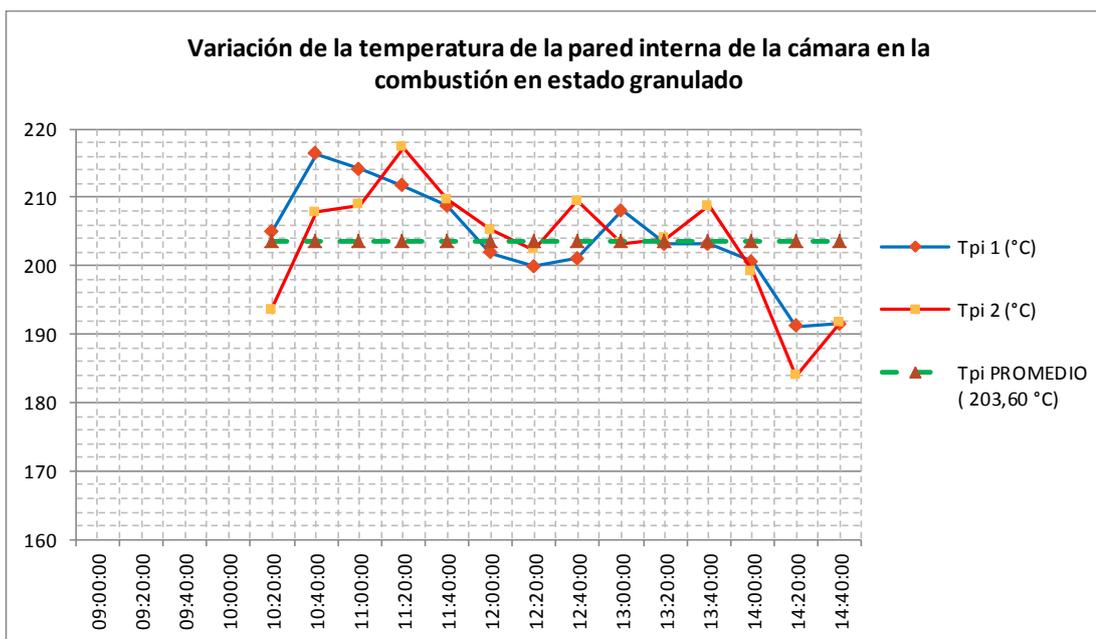


Figura 65 Tpi en la combustión en estado granulado

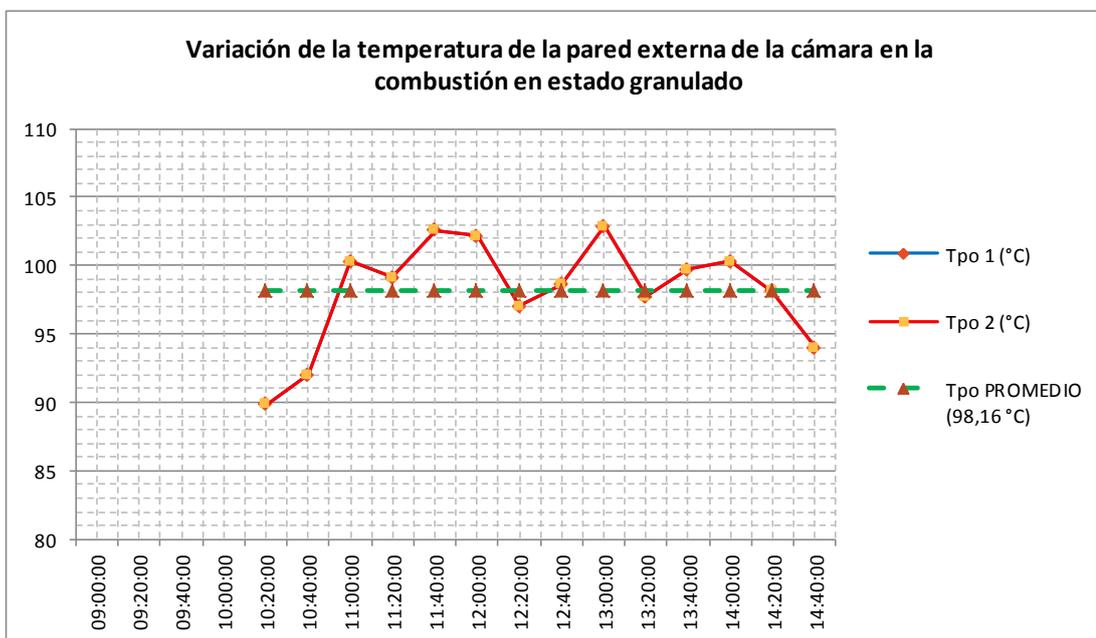


Figura 66 Tpo en la combustión en estado granulado

De las tablas 56 y 57, se termina que en el proceso de combustión en estado granulado, las temperaturas en las paredes de la cámara de combustión son:

- Tpi = 203,60 °C, temperatura de la pared interna de la cámara.
- Tpo = 98,16 °C, temperatura de la pared externa de la cámara.

Tabla 58

Tpi en estado compactado

Hora	Muestra 1	Muestra 2	Muestra 3	Muestra 4	Muestra 5	Muestra 6	Muestra 7	Muestra 8	Muestra 9	Muestra 10	Muestra 11	Muestra 12	MÁXIMO (°C)	MÍNIMO (°C)	PROMEDIO (°C)
	09:00														
09:20															
09:40															
10:00															
10:20	176,00	125,00	148,00	113,00	204,00	141,00	114,00	157,00	133,00	126,00	109,00	125,00	204	109	139,25
10:40	182,00	145,00	127,00	115,00	213,00	135,00	122,00	161,00	171,00	124,00	120,00	141,00	213	115	146,33
11:00	169,00	142,00	134,00	154,00	180,00	151,00	134,00	180,00	167,00	143,00	136,00	191,00	191	134	156,75
11:20	170,00	139,00	133,00	147,00	200,00	205,00	138,00	156,00	165,00	138,00	139,00	161,00	205	133	157,58
11:40	190,00	171,00	142,00	143,00	169,00	166,00	133,00	159,00	181,00	135,00	153,00	142,00	190	133	157,00
12:00	183,00	163,00	140,00	199,00	211,00	171,00	125,00	162,00	171,00	135,00	139,00	161,00	211	125	163,33
12:20	215,00	180,00	158,00	150,00	198,00	159,00	155,00	183,00	168,00	145,00	140,00	169,00	215	140	168,33
12:40	150,00	161,00	167,00	149,00	197,00	191,00	138,00	164,00	169,00	148,00	159,00	164,00	197	138	163,08
13:00	176,00	152,00	168,00	147,00	196,00	189,00	140,00	168,00	159,00	145,00	163,00	160,00	196	140	163,58
13:20	181,00	150,00	171,00	160,00	182,00	180,00	150,00	171,00	150,00	135,00	160,00	172,00	182	135	163,50
13:40	174,00	185,00	166,00	155,00	158,00	181,00	155,00	180,00	147,00	140,00	155,00	185,00	185	140	165,08
14:00	184,00	172,00	169,00	150,00	180,00	180,00	160,00	165,00	140,00	142,00	170,00	190,00	190	140	166,83
14:20	190,00	154,00	149,00	148,00	173,00	165,00	163,00	160,00	150,00	138,00	149,00	176,00	190	138	159,58
14:40	170,00	140,00	140,00	145,00	170,00	159,00	160,00	163,00	145,00	130,00	145,00	188,00	188	130	154,58
Tpi 1 promedio (°C)															158,92

Continúa



09:00																	
09:20																	
09:40																	
10:00																	
Temperatura pared interna 2	10:20	181,00	129,00	171,00	105,00	120,00	174,00	152,00	126,00	156,00	177,00	128,00	172,00	181	105	149,25	
	10:40	169,00	126,00	160,00	108,00	146,00	189,00	150,00	142,00	155,00	189,00	117,00	200,00	200	108	154,25	
	11:00	175,00	136,00	159,00	105,00	158,00	178,00	162,00	163,00	143,00	195,00	141,00	186,00	195	105	158,42	
	11:20	183,00	194,00	165,00	133,00	161,00	191,00	165,00	146,00	181,00	176,00	166,00	178,00	194	133	169,92	
	11:40	168,00	169,00	155,00	125,00	150,00	160,00	151,00	143,00	162,00	194,00	185,00	177,00	194	125	161,58	
	12:00	171,00	160,00	152,00	134,00	166,00	167,00	163,00	170,00	166,00	188,00	160,00	193,00	193	134	165,83	
	12:20	193,00	191,00	151,00	146,00	193,00	163,00	168,00	167,00	155,00	190,00	166,00	176,00	193	146	171,58	
	12:40	165,00	158,00	159,00	143,00	177,00	179,00	142,00	150,00	164,00	197,00	166,00	169,00	197	142	164,08	
	13:00	191,00	145,00	153,00	141,00	158,00	166,00	161,00	145,00	171,00	189,00	178,00	158,00	191	141	163,00	
	13:20	179,00	149,00	163,00	135,00	146,00	163,00	167,00	160,00	163,00	184,00	176,00	170,00	184	135	162,92	
	13:40	169,00	191,00	153,00	137,00	161,00	169,00	169,00	164,00	160,00	177,00	168,00	178,00	191	137	166,33	
	14:00	176,00	153,00	160,00	143,00	149,00	171,00	167,00	152,00	158,00	155,00	180,00	186,00	186	143	162,50	
	14:20	181,00	147,00	150,00	150,00	135,00	158,00	160,00	147,00	163,00	150,00	160,00	192,00	192	135	157,75	
	14:40	160,00	136,00	137,00	144,00	141,00	155,00	155,00	150,00	160,00	142,00	139,00	199,00	199	136	151,50	
															Tpi 2 promedio (°C)		161,35
															Promedio total de Tpi en estado COMPACTADO (°C)		160,13

Tabla 59

Tpo en estado compactado

	Hora	Muestra 1	Muestra 2	Muestra 3	Muestra 4	Muestra 5	Muestra 6	Muestra 7	Muestra 8	Muestra 9	Muestra 10	Muestra 11	Muestra 12	MÁXIMO (°C)	MÍNIMO (°C)	PROMEDIO (°C)
Temperatura pared externa 1	09:00															
	09:20															
	09:40															
	10:00															
	10:20	65,00	53,00	48,00	46,00	48,00	55,00	54,00	59,00	54,00	74,00	41,00	69,00	74	41	55,50
	10:40	82,00	60,00	59,00	47,00	61,00	60,00	58,00	60,00	66,00	75,00	46,00	80,00	82	46	62,83
	11:00	80,00	59,00	75,00	49,00	70,00	64,00	61,00	64,00	73,00	74,00	60,00	88,00	88	49	68,08
	11:20	82,00	61,00	81,00	61,00	80,00	71,00	62,30	68,00	82,00	80,00	65,00	78,00	82	61	72,61
	11:40	89,00	65,00	80,00	63,00	77,00	69,00	66,00	65,00	83,00	82,00	82,00	100,00	100	63	76,75
	12:00	90,00	75,00	79,00	67,00	75,00	70,00	70,00	68,00	88,00	78,00	83,00	89,00	90	67	77,67
	12:20	90,00	65,00	80,00	65,00	76,00	74,00	80,00	70,00	92,00	87,00	85,00	93,00	93	65	79,75
	12:40	78,00	60,00	81,00	68,00	85,00	80,00	75,00	72,00	90,00	90,00	81,00	80,00	90	60	78,33
	13:00	75,00	58,00	78,00	70,00	82,00	78,00	79,00	75,00	85,00	85,00	85,00	80,00	85	58	77,50
	13:20	77,00	55,00	80,00	65,00	84,00	75,00	80,00	80,00	90,00	83,00	83,00	86,00	90	55	78,17
	13:40	70,00	58,00	81,00	70,00	84,00	77,00	82,00	82,00	82,00	80,00	80,00	92,00	92	58	78,17
	14:00	70,00	61,00	80,00	72,00	82,00	75,00	80,00	80,00	80,00	82,00	82,00	90,00	90	61	77,83
	14:20	74,00	60,00	78,00	70,00	80,00	70,00	81,00	79,00	79,00	80,00	78,00	87,00	87	60	76,33
14:40	72,00	55,00	72,00	70,00	75,00	69,00	80,00	80,00	75,00	78,00	75,00	89,00	89	55	74,17	
		Tpo 1 promedio (°C)														73,84

Continúa



09:00																
09:20																
09:40																
10:00																
Temperatura pared externa 2	10:20	65,00	53,00	48,00	46,00	48,00	55,00	54,00	59,00	54,00	74,00	41,00	69,00	74	41	55,50
	10:40	82,00	60,00	59,00	47,00	61,00	60,00	58,00	60,00	66,00	75,00	46,00	80,00	82	46	62,83
	11:00	80,00	59,00	75,00	49,00	70,00	64,00	61,00	64,00	73,00	74,00	60,00	88,00	88	49	68,08
	11:20	82,00	61,00	81,00	61,00	80,00	71,00	62,30	68,00	82,00	80,00	65,00	78,00	82	61	72,61
	11:40	89,00	65,00	80,00	63,00	77,00	69,00	66,00	65,00	83,00	82,00	82,00	100,00	100	63	76,75
	12:00	90,00	75,00	79,00	67,00	75,00	70,00	70,00	68,00	88,00	78,00	83,00	89,00	90	67	77,67
	12:20	90,00	65,00	80,00	65,00	76,00	74,00	80,00	70,00	92,00	87,00	85,00	93,00	93	65	79,75
	12:40	78,00	60,00	81,00	68,00	85,00	80,00	75,00	72,00	90,00	90,00	81,00	80,00	90	60	78,33
	13:00	75,00	58,00	78,00	70,00	82,00	78,00	79,00	75,00	85,00	85,00	85,00	80,00	85	58	77,50
	13:20	77,00	55,00	80,00	65,00	84,00	75,00	80,00	80,00	90,00	83,00	83,00	86,00	90	55	78,17
	13:40	70,00	58,00	81,00	70,00	84,00	77,00	82,00	82,00	82,00	80,00	80,00	92,00	92	58	78,17
	14:00	70,00	61,00	80,00	72,00	82,00	75,00	80,00	80,00	80,00	82,00	82,00	90,00	90	61	77,83
	14:20	74,00	60,00	78,00	70,00	80,00	70,00	81,00	79,00	79,00	80,00	78,00	87,00	87	60	76,33
	14:40	72,00	55,00	72,00	70,00	75,00	69,00	80,00	80,00	75,00	78,00	75,00	89,00	89	55	74,17
Tpo 2 promedio (°C)																73,84
Promedio total de Tpo en estado COMPACTADO (°C)																73,84

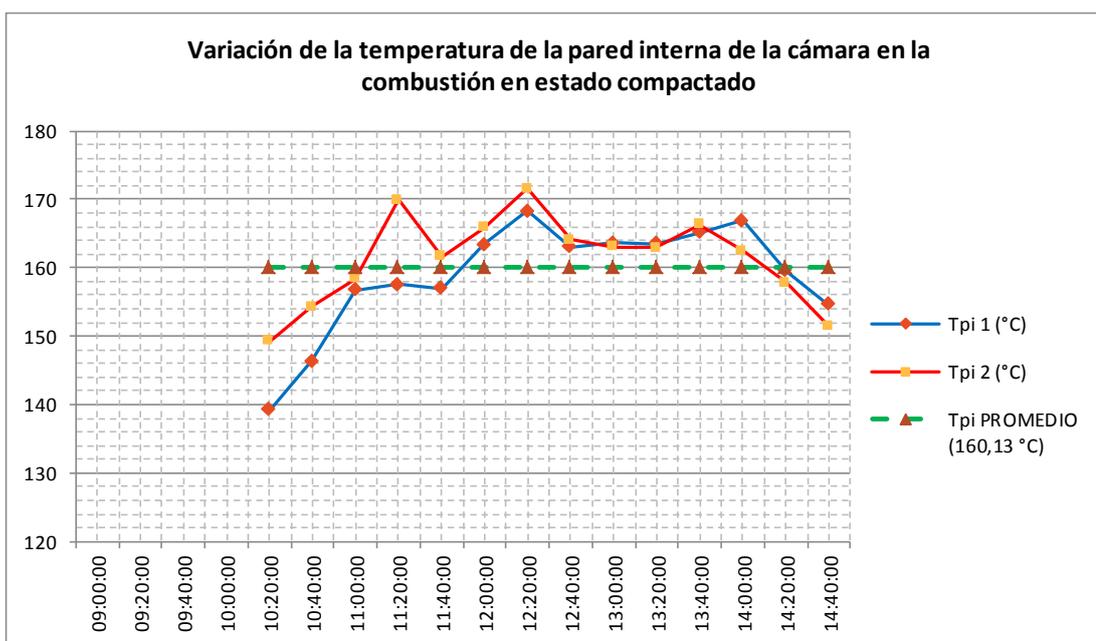


Figura 67 Tpi en la combustión en estado compactado

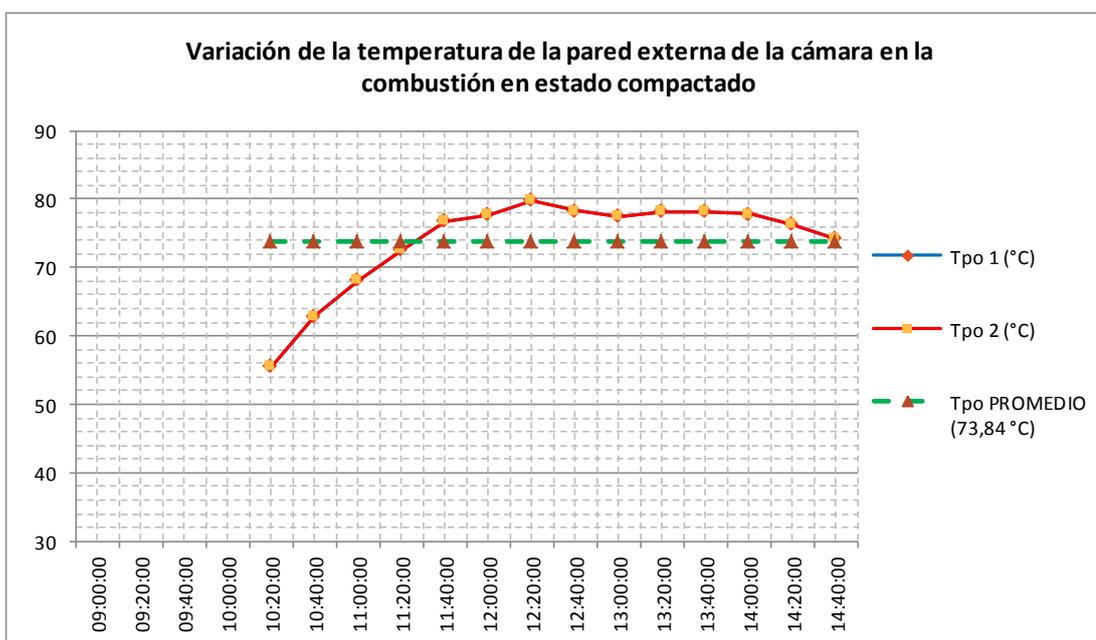


Figura 68 Tpo en la combustión en estado compactado

De las tablas 58 y 59, se termina que en el proceso de combustión en estado compactado, las temperaturas en las paredes de la cámara de combustión son:

- Tpi = 160,13 °C, temperatura de la pared interna de la cámara.
- Tpo = 73,84 °C, temperatura de la pared externa de la cámara.

Tabla 60

Tcen en estado natural

Hora	Muestra 1	Muestra 2	Muestra 3	Muestra 4	Muestra 5	MÁXIMO (°C)	MÍNIMO (°C)	PROMEDIO (°C)
09:00								
09:20								
09:40								
10:00								
10:20	135,00	130,00	130,00	128,00	129,00	135,00	128,00	130,40
10:40	145,00	145,00	130,00	125,00	135,00	145,00	125,00	136,00
11:00	140,00	135,00	128,00	130,00	130,00	140,00	128,00	132,60
11:20	138,00	133,00	132,00	128,00	131,00	138,00	128,00	132,40
11:40	133,00	132,00	125,00	127,00	130,00	133,00	125,00	129,40
12:00	129,00	128,00	128,00	125,00	129,00	129,00	125,00	127,80
12:20	130,00	130,00	129,00	136,00	128,00	136,00	128,00	130,60
12:40	132,00	131,00	127,00	134,00	127,00	134,00	127,00	130,20
13:00	140,00	127,00	130,00	132,00	130,00	140,00	127,00	131,80
13:20	135,00	132,00	125,00	130,00	130,00	135,00	125,00	130,40
13:40	140,00	135,00	129,00	128,00	128,00	140,00	128,00	132,00
14:00	128,00	128,00	132,00	129,00	129,00	132,00	128,00	129,20
14:20	130,00	128,00	131,00	125,00	132,00	132,00	125,00	129,20
14:40	135,00	122,00	126,00	130,00	133,00	135,00	122,00	129,20
Tcen promedio en estado NATURAL (°C)								130,80

Tabla 62

Tcen en estado compactado

Hora	Muestra 1	Muestra 2	Muestra 3	Muestra 4	Muestra 5	Muestra 6	Muestra 7	Muestra 8	Muestra 9	Muestra 10	Muestra 11	Muestra 112	MÁXIMO (°C)	MÍNIMO (°C)	PROMEDIO (°C)
09:00															
09:20															
09:40															
10:00															
10:20	176,00	162,00	166,00	171,00	197,00	193,00	147,00	161,00	147,00	158,00	190,00	169,00	197,00	147,00	169,75
10:40	149,00	177,00	129,00	169,00	186,00	181,00	162,00	170,00	199,00	186,00	198,00	194,00	199,00	129,00	175,00
11:00	135,00	185,00	198,00	114,00	188,00	191,00	154,00	194,00	170,00	160,00	162,00	197,00	198,00	114,00	170,67
11:20	168,00	158,00	183,00	156,00	128,00	190,00	146,00	153,00	136,00	185,00	150,00	168,00	190,00	128,00	160,08
11:40	172,00	152,00	190,00	164,00	135,00	152,00	159,00	173,00	175,00	154,00	187,00	143,00	190,00	135,00	163,00
12:00	167,00	162,00	176,00	173,00	140,00	174,00	171,00	169,00	179,00	159,00	152,00	166,00	179,00	140,00	165,67
12:20	180,00	191,00	162,00	168,00	143,00	164,00	197,00	173,00	168,00	165,00	178,00	168,00	197,00	143,00	171,42
12:40	189,00	154,00	170,00	193,00	191,00	184,00	151,00	157,00	171,00	181,00	169,00	149,00	193,00	149,00	171,58
13:00	192,00	163,00	144,00	199,00	184,00	174,00	183,00	167,00	163,00	172,00	190,00	169,00	199,00	144,00	175,00
13:20	183,00	171,00	157,00	199,00	159,00	169,00	177,00	181,00	159,00	159,00	176,00	170,00	199,00	157,00	171,67
13:40	177,00	168,00	163,00	193,00	149,00	172,00	181,00	191,00	193,00	163,00	163,00	168,00	193,00	149,00	173,42
14:00	168,00	180,00	177,00	168,00	162,00	180,00	179,00	171,00	184,00	153,00	180,00	175,00	184,00	153,00	173,08
14:20	191,00	141,00	149,00	179,00	159,00	161,00	169,00	180,00	174,00	160,00	160,00	173,00	191,00	141,00	166,33
14:40	176,00	139,00	139,00	180,00	169,00	158,00	158,00	163,00	167,00	169,00	158,00	176,00	180,00	139,00	162,67
Tcen promedio en estado COMPACTADO (°C)															169,24

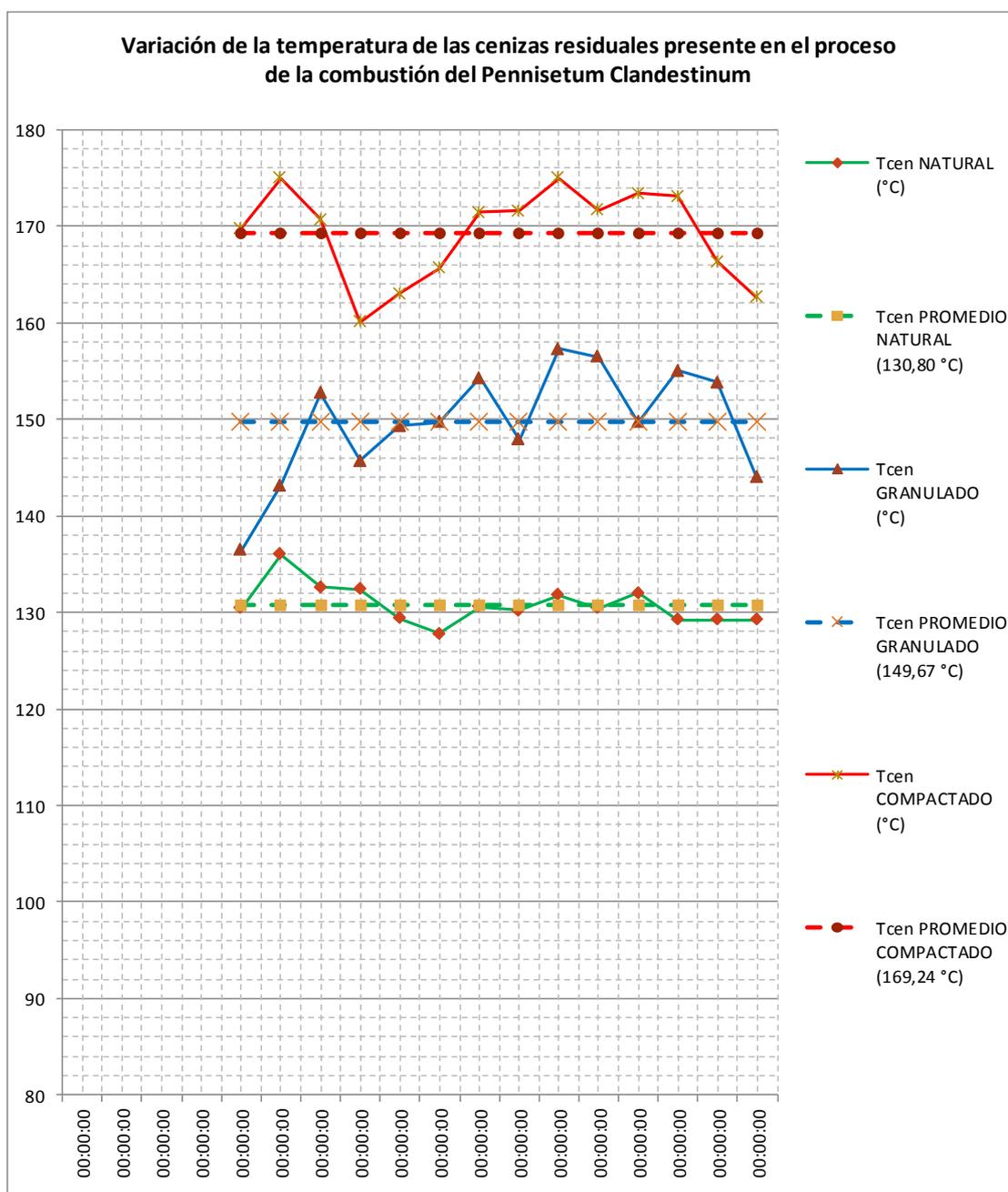


Figura 69 Tcen en el proceso de la combustión

De las tablas 60, 61 y 62, se termina que en el proceso de combustión las temperaturas de las cenizas residuales del proceso de combustión son:

- Tcen = 130,80 °C, en estado natural del Pennisetum Clandestinum.
- Tcen = 149,67 °C, en estado granulado del Pennisetum Clandestinum.
- Tcen = 169,24 °C, en estado compactado del Pennisetum Clandestinum.

Tabla 63

Tamb en estado natural

Hora	Muestra 1	Muestra 2	Muestra 3	Muestra 4	Muestra 5	MÁXIMO (°C)	MÍNIMO (°C)	PROMEDIO (°C)
09:00								
09:20								
09:40								
10:00								
10:20	21,40	21,00	19,00	22,80	24,50	24,50	19,00	21,74
10:40	22,50	21,30	19,20	23,00	24,00	24,00	19,20	22,00
11:00	21,90	22,20	18,90	23,20	23,00	23,20	18,90	21,84
11:20	23,50	23,50	18,70	23,40	24,00	24,00	18,70	22,62
11:40	25,00	23,50	18,90	23,00	24,20	25,00	18,90	22,92
12:00	24,80	24,20	20,00	23,50	24,00	24,80	20,00	23,30
12:20	26,00	25,00	20,50	22,70	23,20	26,00	20,50	23,48
12:40	26,20	24,80	22,00	23,00	23,40	26,20	22,00	23,88
13:00	25,50	24,20	22,60	23,20	23,50	25,50	22,60	23,80
13:20	25,50	23,90	21,30	24,00	22,90	25,50	21,30	23,52
13:40	25,80	24,90	21,00	23,50	24,50	25,80	21,00	23,94
14:00	25,00	26,00	19,00	24,10	23,60	26,00	19,00	23,54
14:20	23,00	26,70	18,90	24,20	24,50	26,70	18,90	23,46
14:40	23,50	27,00	18,50	24,50	24,00	27,00	18,50	23,50
Tamb promedio en estado NATURAL (°C)								23,11

Tabla 64

Tamb en estado granulado

Hora	Muestra 1	Muestra 2	Muestra 3	Muestra 4	Muestra 5	Muestra 6	Muestra 7	MÁXIMO (°C)	MÍNIMO (°C)	PROMEDIO (°C)
09:00										
09:20										
09:40										
10:00										
10:20	21,30	20,60	16,00	20,30	21,90	17,90	21,40	21,90	16,00	19,91
10:40	22,20	21,30	16,20	20,80	21,90	16,90	21,90	22,20	16,20	20,17
11:00	22,80	22,20	17,10	21,10	22,50	16,60	22,40	22,80	16,60	20,67
11:20	23,50	23,30	18,10	21,30	23,70	17,40	23,10	23,70	17,40	21,49
11:40	24,20	23,50	18,90	21,40	23,90	17,50	24,00	24,20	17,50	21,91
12:00	24,20	24,20	20,00	21,60	24,90	18,40	23,60	24,90	18,40	22,41
12:20	25,50	23,50	20,50	22,70	24,90	18,60	23,90	25,50	18,60	22,80
12:40	25,30	24,40	21,60	23,00	25,10	19,10	24,80	25,30	19,10	23,33
13:00	25,40	24,20	22,60	23,20	25,30	19,40	24,20	25,40	19,40	23,47
13:20	25,30	23,90	21,30	23,90	23,20	21,20	24,50	25,30	21,20	23,33
13:40	25,70	24,90	19,80	23,10	23,20	22,30	23,10	25,70	19,80	23,16
14:00	24,90	26,00	18,40	24,10	23,50	23,10	23,00	26,00	18,40	23,29
14:20	22,80	26,70	18,10	24,20	23,90	20,10	23,10	26,70	18,10	22,70
14:40	22,00	27,00	18,20	24,10	22,00	19,90	23,30	27,00	18,20	22,36
Tamb promedio en estado GRANULADO (°C)										22,21

Tabla 65

Tamb en estado compactado

Hora	Muestra 1	Muestra 2	Muestra 3	Muestra 4	Muestra 5	Muestra 6	Muestra 7	Muestra 8	Muestra 9	Muestra 10	Muestra 11	Muestra 112	MÁXIMO (°C)	MÍNIMO (°C)	PROMEDIO (°C)
09:00															
09:20															
09:40															
10:00															
10:20	22,30	19,10	22,40	20,90	23,90	16,90	21,00	15,50	22,20	22,60	23,20	20,90	23,90	15,50	20,91
10:40	22,80	19,80	22,80	19,90	24,00	17,30	21,10	16,00	21,80	23,50	23,20	21,20	24,00	16,00	21,12
11:00	23,30	20,60	23,60	23,90	24,80	17,60	22,50	16,80	22,80	23,80	23,00	22,00	24,80	16,80	22,06
11:20	23,40	20,70	23,70	24,50	24,40	18,00	22,40	17,40	23,40	24,20	23,50	22,50	24,50	17,40	22,34
11:40	24,10	20,50	23,80	25,30	24,20	18,40	23,40	18,40	25,20	24,20	23,80	23,10	25,30	18,40	22,87
12:00	24,10	20,80	24,90	25,30	24,20	18,90	24,00	18,70	26,10	24,30	24,30	23,90	26,10	18,70	23,29
12:20	24,80	20,80	25,00	26,10	23,80	19,30	24,60	19,30	26,40	25,80	24,10	24,40	26,40	19,30	23,70
12:40	25,10	20,90	25,20	26,20	24,30	20,60	25,30	19,80	26,50	25,30	24,50	24,70	26,50	19,80	24,03
13:00	25,00	21,00	26,00	26,50	24,80	20,70	25,10	22,40	26,10	25,00	24,80	24,70	26,50	20,70	24,34
13:20	25,00	21,40	26,30	26,60	24,90	20,70	24,90	23,30	25,70	24,70	25,10	24,70	26,60	20,70	24,44
13:40	25,30	21,70	26,40	26,20	24,60	20,70	25,00	23,80	25,70	24,60	25,10	24,20	26,40	20,70	24,44
14:00	27,00	21,30	26,50	26,00	24,90	21,10	25,00	24,20	25,00	25,10	25,20	23,90	27,00	21,10	24,60
14:20	27,10	20,80	25,90	25,70	24,60	20,90	24,20	24,10	26,10	25,20	23,40	24,10	27,10	20,80	24,34
14:40	27,00	20,60	25,20	26,00	25,10	20,70	24,30	23,30	26,20	25,10	23,30	25,10	27,00	20,60	24,33
Tamb promedio en estado COMPACTADO (°C)															23,34

Tabla 66

Pennisetum Clandestinum quemado en estado natural

Muestra	Hora	Peso en (Kg)	Peso en (Kg/h)
1	09:00	1,60	4,80
	09:20	1,65	
	09:40	1,55	
	10:00	1,53	4,68
	10:20	1,50	
	10:40	1,65	
	11:00	1,58	4,81
	11:20	1,63	
	11:40	1,60	
	12:00	1,54	4,59
	12:20	1,50	
	12:40	1,55	
	13:00	1,62	4,76
	13:20	1,58	
	13:40	1,56	
	14:00	1,51	4,78
	14:20	1,63	
	14:40	1,64	
2	09:00	1,57	4,66
	09:20	1,55	
	09:40	1,54	
	10:00	1,56	4,71
	10:20	1,55	
	10:40	1,60	
	11:00	1,45	4,60
	11:20	1,55	
	11:40	1,60	
	12:00	1,65	5,05
	12:20	1,70	
	12:40	1,70	
	13:00	1,50	4,45
	13:20	1,45	
	13:40	1,50	
	14:00	1,55	4,87
	14:20	1,65	
	14:40	1,67	
3	09:00	1,58	4,72
	09:20	1,59	
	09:40	1,55	
	10:00	1,75	4,90
	10:20	1,50	
	10:40	1,65	
	11:00	1,58	4,75
	11:20	1,60	
	11:40	1,57	
	12:00	1,80	5,05
	12:20	1,75	
	12:40	1,50	
	13:00	1,50	4,72
	13:20	1,55	
	13:40	1,67	
	14:00	1,57	4,62
	14:20	1,55	
	14:40	1,50	

Continúa
→

4	09:00	1,56	
	09:20	1,65	4,97
	09:40	1,76	
	10:00	1,80	
	10:20	1,95	5,55
	10:40	1,80	
	11:00	1,60	
	11:20	1,50	4,55
	11:40	1,45	
	12:00	1,35	
	12:20	1,38	4,13
	12:40	1,40	
	13:00	1,57	
	13:20	1,60	4,71
	13:40	1,54	
	14:00	1,46	
14:20	1,40	4,43	
14:40	1,57		
5	09:00	1,58	
	09:20	1,56	4,73
	09:40	1,59	
	10:00	1,60	
	10:20	1,57	4,72
	10:40	1,55	
	11:00	1,54	
	11:20	1,58	4,52
	11:40	1,40	
	12:00	1,50	
	12:20	1,63	4,78
	12:40	1,65	
	13:00	1,55	
	13:20	1,60	4,71
	13:40	1,56	
	14:00	1,50	
14:20	1,60	4,66	
14:40	1,56		
TOTAL		141,98	141,98
MAXIMO			5,55
MÍNIMO			4,13
PROMEDIO			4,73

De las tablas 66, se termina que en el proceso de secado del Pennisetum Clandestinum en estado natural se determina:

- Peso total secado = 141,98 Kg.
- Peso promedio por hora = 4,73 Kg

Tabla 67

Pennisetum Clandestinum quemado en estado granulado

Muestra	Hora	Peso en (Kg)	Peso en (Kg/h)
1	09:00	2,01	5,73
	09:20	1,22	
	09:40	2,50	6,83
	10:00	2,70	
	10:20	1,98	5,63
	10:40	2,15	
	11:00	1,95	5,82
	11:20	1,79	
	11:40	1,89	6,10
	12:00	1,95	
	12:20	1,99	6,26
	12:40	1,88	
	13:00	2,11	5,80
	13:20	2,02	
	13:40	1,97	5,39
	14:00	1,89	
14:20	2,22	5,43	
14:40	2,15		
2	09:00	2,40	5,80
	09:20	1,90	
	09:40	1,50	5,39
	10:00	1,79	
	10:20	1,95	5,43
	10:40	1,65	
	11:00	1,70	5,38
	11:20	1,75	
	11:40	1,98	5,10
	12:00	1,69	
	12:20	1,93	5,88
	12:40	1,76	
	13:00	1,69	5,78
	13:20	1,58	
	13:40	1,83	5,52
	14:00	1,78	
14:20	1,99	6,20	
14:40	2,11		
3	09:00	1,97	5,78
	09:20	2,02	
	09:40	1,79	6,20
	10:00	2,09	
	10:20	1,50	6,07
	10:40	1,93	
	11:00	2,02	6,12
	11:20	2,21	
	11:40	1,97	6,12
	12:00	1,89	
12:20	1,99	6,12	
12:40	2,19		
13:00	2,04	6,12	
13:20	1,95		
13:40	2,13	6,12	

Continúa



4	14:00	2,07	
	14:20	1,78	5,86
	14:40	2,01	
	09:00	1,89	
	09:20	1,93	5,81
	09:40	1,99	
	10:00	2,17	
	10:20	2,03	5,97
	10:40	1,77	
	11:00	1,93	
	11:20	2,10	5,82
	11:40	1,79	
	12:00	1,93	
	12:20	2,05	6,30
12:40	2,32		
13:00	1,97		
13:20	2,15	5,81	
13:40	1,69		
14:00	1,73		
14:20	2,02	5,97	
14:40	2,22		
5	09:00	2,33	
	09:20	1,93	6,13
	09:40	1,87	
	10:00	1,77	
	10:20	2,03	5,93
	10:40	2,13	
	11:00	1,91	
	11:20	2,17	5,87
	11:40	1,79	
	12:00	2,05	
	12:20	1,73	5,79
	12:40	2,01	
	13:00	1,89	
	13:20	2,07	6,19
13:40	2,23		
14:00	1,95		
14:20	1,72	5,38	
14:40	1,71		
6	09:00	1,93	
	09:20	2,19	6,22
	09:40	2,10	
	10:00	2,23	
	10:20	1,94	6,34
	10:40	2,17	
	11:00	1,79	
	11:20	1,91	5,83
	11:40	2,13	
	12:00	1,83	
	12:20	2,01	5,71
	12:40	1,87	
	13:00	2,11	
	13:20	1,93	6,09
13:40	2,05		
14:00	1,69		
14:20	2,21	5,48	
14:40	1,58		

Continúa →

7	09:00	1,97	
	09:20	1,78	5,34
	09:40	1,59	
	10:00	2,11	
	10:20	1,62	5,64
	10:40	1,91	
	11:00	2,03	
	11:20	1,58	5,11
	11:40	1,50	
	12:00	1,88	
	12:20	2,13	5,82
	12:40	1,81	
	13:00	2,05	
	13:20	1,58	5,56
	13:40	1,93	
	14:00	1,77	
	14:20	1,81	5,27
14:40	1,69		
TOTAL	244,28	244,28	
	MAXIMO	6,83	
	MÍNIMO	5,10	
	PROMEDIO	5,82	

De las tablas 67, se termina que en el proceso de secado del Pennisetum
Clandestinum en estado granulado se determina:

- Peso total secado = 244,28 Kg.
- Peso promedio por hora = 5,82 Kg

Tabla 68

Pennisetum Clandestinum quemado en estado compactado

Muestra	Hora	Peso en (Kg)	Peso en (Kg/h)
1	09:00:00	2,07	5,45
	09:20:00	1,65	
	09:40:00	1,73	
	10:00:00	1,91	5,73
	10:20:00	1,69	
	10:40:00	2,13	
	11:00:00	1,56	5,27
	11:20:00	1,78	
	11:40:00	1,93	
	12:00:00	2,13	5,97
	12:20:00	1,87	
	12:40:00	1,97	
	13:00:00	1,67	5,26
	13:20:00	1,58	
	13:40:00	2,01	
	14:00:00	1,61	4,72
	14:20:00	1,58	
	14:40:00	1,53	
2	09:00:00	1,60	5,05
	09:20:00	1,53	
	09:40:00	1,92	
	10:00:00	2,01	5,01
	10:20:00	1,51	
	10:40:00	1,49	
	11:00:00	1,55	5,19
	11:20:00	1,93	
	11:40:00	1,71	
	12:00:00	1,44	4,50
	12:20:00	1,59	
	12:40:00	1,47	
	13:00:00	1,51	5,38
	13:20:00	1,92	
	13:40:00	1,95	
	14:00:00	1,41	4,62
	14:20:00	1,82	
	14:40:00	1,39	
3	09:00:00	1,41	4,30
	09:20:00	1,39	
	09:40:00	1,50	
	10:00:00	1,76	5,67
	10:20:00	1,90	
	10:40:00	2,01	
	11:00:00	1,45	4,46
	11:20:00	1,61	
	11:40:00	1,40	
	12:00:00	1,69	5,19
	12:20:00	1,43	
	12:40:00	2,07	
	13:00:00	1,59	4,87
	13:20:00	1,79	
	13:40:00	1,49	

Continúa →

4	14:00:00	1,67			
	14:20:00	1,88		4,90	
	14:40:00	1,35			
	09:00:00	1,62			
	09:20:00	1,43		4,97	
	09:40:00	1,92			
	10:00:00	1,57			
	10:20:00	1,44		4,84	
	10:40:00	1,83			
	11:00:00	1,47			
	11:20:00	1,39		4,76	
	11:40:00	1,90			
	12:00:00	1,93			
	12:20:00	1,61		4,95	
	12:40:00	1,41			
	13:00:00	1,70			
	13:20:00	1,37		4,54	
	13:40:00	1,47			
	14:00:00	1,89			
	14:20:00	1,93		5,74	
14:40:00	1,92				
5	09:00:00	1,42			
	09:20:00	1,37		4,28	
	09:40:00	1,49			
	10:00:00	1,71			
	10:20:00	1,60		4,64	
	10:40:00	1,33			
	11:00:00	1,44			
	11:20:00	1,50		4,41	
	11:40:00	1,47			
	12:00:00	1,41			
	12:20:00	1,37		4,37	
	12:40:00	1,59			
	13:00:00	1,73			
	13:20:00	1,36		4,48	
	13:40:00	1,39			
	14:00:00	1,53			
	14:20:00	1,91		5,34	
	14:40:00	1,90			
	6	09:00:00	1,37		
		09:20:00	1,43		4,09
09:40:00		1,29			
10:00:00		1,41			
10:20:00		1,33		4,23	
10:40:00		1,49			
11:00:00		1,80			
11:20:00		1,30		4,36	
11:40:00		1,26			
12:00:00		1,47			
12:20:00		1,38		4,38	
12:40:00		1,53			
13:00:00		1,69			
13:20:00		1,47		4,75	
13:40:00		1,59			
14:00:00		1,68			
14:20:00		1,29		4,35	
14:40:00		1,38			

Continúa →

7	09:00:00	1,32	
	09:20:00	1,43	4,26
	09:40:00	1,51	
	10:00:00	1,49	
	10:20:00	1,61	4,54
	10:40:00	1,44	
	11:00:00	1,40	
	11:20:00	1,90	4,63
	11:40:00	1,33	
	12:00:00	1,80	
	12:20:00	1,29	4,50
	12:40:00	1,41	
	13:00:00	1,74	
	13:20:00	1,39	4,81
13:40:00	1,68		
14:00:00	1,81		
14:20:00	1,29	4,43	
14:40:00	1,33		
8	09:00:00	1,43	
	09:20:00	1,30	4,44
	09:40:00	1,71	
	10:00:00	1,67	
	10:20:00	1,69	4,77
	10:40:00	1,41	
	11:00:00	1,73	
	11:20:00	1,91	5,03
	11:40:00	1,39	
	12:00:00	1,50	
	12:20:00	1,77	5,19
	12:40:00	1,92	
	13:00:00	1,71	
	13:20:00	1,53	4,60
13:40:00	1,36		
14:00:00	1,40		
14:20:00	1,78	4,79	
14:40:00	1,61		
9	09:00:00	1,28	
	09:20:00	1,33	4,11
	09:40:00	1,50	
	10:00:00	1,61	
	10:20:00	1,30	4,71
	10:40:00	1,80	
	11:00:00	1,53	
	11:20:00	1,37	4,67
	11:40:00	1,77	
	12:00:00	1,44	
	12:20:00	1,39	4,19
	12:40:00	1,36	
	13:00:00	1,69	
	13:20:00	1,61	4,57
13:40:00	1,27		
14:00:00	1,58		
14:20:00	1,70	4,71	
14:40:00	1,43		
10	09:00:00	1,29	
	09:20:00	1,31	4,13
	09:40:00	1,53	

Continúa →

	10:00:00	1,41	
	10:20:00	1,49	4,34
	10:40:00	1,44	
	11:00:00	1,33	
	11:20:00	1,28	4,31
	11:40:00	1,70	
	12:00:00	1,63	
	12:20:00	1,57	4,80
	12:40:00	1,60	
	13:00:00	1,37	
	13:20:00	1,49	4,20
	13:40:00	1,34	
	14:00:00	1,73	
	14:20:00	1,34	4,32
	14:40:00	1,25	
	09:00:00	1,23	
	09:20:00	1,41	3,94
	09:40:00	1,30	
	10:00:00	1,34	
	10:20:00	1,58	4,17
	10:40:00	1,25	
	11:00:00	1,37	
	11:20:00	1,44	4,20
	11:40:00	1,39	
11	12:00:00	1,50	
	12:20:00	1,49	4,72
	12:40:00	1,73	
	13:00:00	1,51	
	13:20:00	1,34	4,14
	13:40:00	1,29	
	14:00:00	1,38	
	14:20:00	1,33	4,32
	14:40:00	1,61	
	09:00:00	1,24	
	09:20:00	1,31	3,84
	09:40:00	1,29	
	10:00:00	1,39	
	10:20:00	1,47	4,39
	10:40:00	1,53	
	11:00:00	1,26	
	11:20:00	1,70	4,36
	11:40:00	1,40	
12	12:00:00	1,47	
	12:20:00	1,35	4,18
	12:40:00	1,36	
	13:00:00	1,48	
	13:20:00	1,52	4,62
	13:40:00	1,62	
	14:00:00	1,58	
	14:20:00	1,52	4,75
	14:40:00	1,65	
	TOTAL	335,70	335,70
	MAXIMO		5,97
	MÍNIMO		3,84
	PROMEDIO		4,66

De las tablas 68, se termina que en el proceso de secado del Pennisetum Clandestinum en estado compactado se determina:

- Peso total secado = 335,70 Kg.
- Peso promedio por hora = 4,66 Kg

Tabla 69

Ceniza residual generada en estado natural

Muestra	Peso en (Kg)
1	1,040
2	1,020
3	1,030
4	1,040
5	0,950
TOTAL	5,08*
MÁXIMO	1,040
MÍNIMO	0,950
PROMEDIO	1,016

* El peso de la ceniza aún puede contener restos de material no completamente oxidados, por la presencia de restos de carbono.

Tabla 70

Ceniza residual generada en estado granulado

Muestra	Peso en (Kg)
1	1,390
2	1,550
3	1,490
4	1,600
5	1,530
6	1,490
7	1,620
TOTAL	10,67*
MÁXIMO	1,620
MÍNIMO	1,390
PROMEDIO	1,524

* El peso de la ceniza aún puede contener restos de material no completamente oxidados, por la presencia de restos de carbono.

Tabla 71

Ceniza residual generada en estado compactado

Muestra	Peso en (Kg)
1	1,550
2	1,570
3	1,420
4	1,610
5	1,430
6	1,500
7	1,490
8	1,610
9	1,540
10	1,490
11	1,600
12	2,578
TOTAL	19,388*
MÁXIMO	2,578
MÍNIMO	1,420
PROMEDIO	1,616

* El peso de la ceniza aún puede contener restos de material no completamente oxidados, por la presencia de restos de carbono.

$$\%Cenizas_{producidas} = \frac{Masa\ total\ de\ cenizas}{Masa\ total\ quemada} \cdot 100$$

De la tabla 66 y 69, relacionando la cantidad de masa de Pennisetum Clandestinum quemada y la cantidad total de ceniza residual generada considerando que la combustión se realiza en estado natural, se puede determinar:

$$\% Cenizas_{producidas} = \frac{Masa\ total\ de\ cenizas\ producidas\ natural}{Masa\ total\ quemada\ natural} \cdot 100$$

$$\% Cenizas_{producidas\ en\ estado\ natural} = \frac{5,08}{141,98} \cdot 100$$

$$\% **Cenizas**_{producidas\ en\ estado\ natural} = **3,57\%**$$

De la tabla 67 y 70, relacionando la cantidad de masa de Pennisetum Clandestinum en estado granulado quemada y la cantidad total de ceniza residual generada considerando que la combustión se realiza en estado granulado, se puede determinar:

$$\% \text{ Cenizas}_{\text{producidas}} = \frac{\text{Masa total de cenizas producidas}_{\text{granulado}}}{\text{Masa total quemada}_{\text{granulado}}} \cdot 100$$

$$\% \text{ Cenizas}_{\text{producidas en estado granulado}} = \frac{10,67}{244,28} \cdot 100$$

$$\% \text{ **Cenizas}_{\text{producidas en estado granulado}} = 4,36\%**$$

De la tabla 68 y 71, relacionando la cantidad de masa de Pennisetum Clandestinum quemada y la cantidad total de ceniza residual generada considerando que la combustión se realiza en estado compactado, se puede determinar:

$$\% \text{ Cenizas}_{\text{producidas}} = \frac{\text{Masa total de cenizas producidas}_{\text{compactado}}}{\text{Masa total quemada}_{\text{compactado}}} \cdot 100$$

$$\% \text{ Cenizas}_{\text{producidas en estado compactado}} = \frac{19,388}{355,70} \cdot 100$$

$$\% \text{ **Cenizas}_{\text{producidas en estado compactado}} = 5,45\%**$$

En el proceso de combustión del Pennisetum Clandestinum en sus diferentes estados de presentación natural, granulado y compactado, del 100% de masa quemada se obtienen cenizas residuales en una cantidad menor al 6%, obteniendo menores porcentajes en la combustión en estado natural y mayores en estado compactado, debido a que se dispone un mayor volumen de biomasa, por el mismo hecho de estar compactada, generan una mayor cantidad de cenizas residuales.

Tabla 72

Parámetros termo físicos de la combustión

Parámetro	Natural	Granulado	Compactado
Thi (°C)	146,20	273,30	259,01
Tho (°C)	40,80	54,60	53,30
Tci (°C)	23,11	22,21	23,34
Tco (°C)	80,60	142,40	137,80
Tpi (°C)	127,70	203,60	160,13
Tpo (°C)	72,30	98,16	73,84
Tcen (°C)	130,80	149,67	169,24
Tamb (°C)	23,11	22,21	23,34
Masa promedio quemada (Kg/h)	4,73	5,82	4,66
Masa total quemada (Kg/h)	141,98	244,28	335,70
Masa promedio total de ceniza (Kg)	1,016	1,524	1,616
Masa total cenizas residuales (Kg/h)	5,08*	10,67*	19,388*

* El peso de la ceniza aún puede contener restos de material no completamente oxidados, por la presencia de restos de carbono.

En la tabla 72, se resumen los parámetros termo físicos del Pennisetum Clandestinum para cada uno de sus diferentes estados de presentación natural, granulado (granulometría inferior a 1 mm) y compactado (en forma de briqueta), que se han utilizado para describir la caracterización de la combustión.

5.3 Densidad energética

El Pennisetum Clandestinum en su composición química en porcentajes está conformado por (ver tabla 6).

$$\%C = 33,30$$

$$\%H = 4,60$$

$$\%O = 20,10$$

$$\%S = 0,20$$

El poder calórico teórico se lo determina empleando la ecuación de Dulong.

$$PCS = \frac{8100.\%C + 34000.\left(\%H - \frac{\%O}{8}\right) + 2500.\%S}{100}$$

$$PCS = \frac{8100.(33,30) + 34000.\left((4,60) - \frac{(20,10)}{8}\right) + 2500.(0,20)}{100}$$

$$PCS = 3412,05 \frac{Kcal}{Kg}, \text{ poder Calórico Superior del Pennisetum Clandestinum.}$$

$$Q_{H2O} = \frac{9.\%H.600}{100}$$

$$Q_{H2O} = \frac{9.(4,60).600}{100}$$

$$Q_{H2O} = 248,40 \frac{Kcal}{Kg}, \text{ calor de evaporación del agua de constitución.}$$

$$PCI(0\%) = PCS - Q_{H2O}$$

$$PCI(0\%) = 3412,05 - 248,40$$

$$PCI(0\%) = 3163,65 \frac{Kcal}{Kg}, \text{ calor de evaporación del agua de constitución en}$$

base seca.

Considerando un porcentaje de humedad final del 12%, el poder PCS es:

$$PCI(h\%) = PCI(0\%) \cdot \left(1 - \frac{h\%}{100}\right) - \frac{h\%}{100} \cdot 600$$

$$PCI(76,64\%) = 3163,65 \cdot \left(1 - \frac{76,64}{100}\right) - \frac{76,64}{100} \cdot 600$$

$$PCI(76,64\%) = 279,19 \frac{Kcal}{Kg}, \text{ calor de evaporación del agua de constitución}$$

con un coeficiente de humedad final del 76,64%.

$$PCI(3,28\%) = 3163,65 \cdot \left(1 - \frac{3,28}{100}\right) - \frac{3,28}{100} \cdot 600$$

$$PCI(3,28\%) = 3040,20 \frac{Kcal}{Kg}, \text{ calor de evaporación del agua de constitución}$$

con un coeficiente de humedad final del 76,64%.

$$PCI(2,86\%) = 3163,65 \cdot \left(1 - \frac{2,86}{100}\right) - \frac{2,86}{100} \cdot 600$$

$$PCI(2,86\%) = 3163,65 \frac{Kcal}{Kg}, \text{ calor de evaporación del agua de constitución}$$

con un coeficiente de humedad final del 2,86%.

Tabla 73

Poder calórico inferior teórico del Pennisetum Clandestinum

% del contenido de humedad	PCI	Estado
76,64	279,19	Natural
3,28	3040,20	Granulado
2,86	3056,01	Compactado
0,00	3163,65	Base seca

En la tabla 73, se describen los valores del Poder Calórico Inferior (PCI) teórico del Pennisetum Clandestinum empleando la ecuación de Dulong, para distintos porcentajes de contenido humedad, los porcentajes de humedad seleccionados son los determinados en el proceso de secado para el estado natural, granulado y compactado.

Se determinar la densidad energética del Pennisetum Clandestinum se emplean las siguientes expresiones:

$$Q = mc \cdot HR$$

Dónde:

mc , es la masa combustible en kilogramos expresado en Kg.

HR , es equivalente al PCI del Pennisetum Clandestinum expresado en kilocalorías sobre kilogramo expresado en Kcal/Kg.

Q , es el calor de combustión del Pennisetum Clandestinum.

Para la combustión del Pennisetum Clandestinum en estado natural, quemado un promedio por hora de 4,73 Kg, con un contenido de humedad inicial (X_{wi}) igual a 76,64%, se obtiene analíticamente:

$$Q = (4,73). (279,19)$$

$$Q = 1320,5687 \text{ Kcal}$$

$$1 \text{ Kcal} = 4187 \text{ J}$$

$$1 \text{ KWh} = 3,6. 10^6 \text{ J}$$

$$QE = 1320,5687 \text{ Kcal} \cdot \frac{4187 \text{ J}}{1 \text{ Kcal}} \cdot \frac{1000 \text{ Wh}}{3,6.10^6 \text{ J}}$$

$$\mathbf{QE = 1535,90 \text{ Wh}}$$

La densidad energética (QE) producida por la combustión de 4,73 Kg/h de Pennisetum Clandestinum en estado natural, con un contenido de humedad inicial (X_{wi}) del 76,64% y un Poder Calórico Inferior (PCI) teórico de 279,19 Kcal/Kg, es de 1535,90 Wh.

Para la combustión del Pennisetum Clandestinum en estado granulado, quemado un promedio por hora de 5,82 Kg, con un contenido de humedad final (X_{wf}) igual a 3,28%, se obtiene analíticamente:

$$Q = (5,82). (3040,20)$$

$$Q = 17693,964 \text{ Kcal}$$

$$1 \text{ Kcal} = 4187 \text{ J}$$

$$1 \text{ KWh} = 3,6. 10^6 \text{ J}$$

$$QE = 17693,964 \text{ Kcal} \cdot \frac{4187 \text{ J}}{1 \text{ Kcal}} \cdot \frac{1000 \text{ Wh}}{3,6.10^6 \text{ J}}$$

$$\mathbf{QE = 20579,06 \text{ Wh}}$$

La densidad energética (QE) producida por la combustión de 5,82 Kg/h de Pennisetum Clandestinum en estado granulado, con un contenido de humedad final (X_{wi}) del 3,28% y un Poder Calórico Inferior (PCI) teórico de 3040,20 Kcal/Kg, es de 20579,06 Wh.

Para la combustión del Pennisetum Clandestinum en estado compactado, quemado un promedio por hora de 4,66 Kg, con un contenido de humedad final (X_{wf}) igual a 2,86%, se obtiene analíticamente:

$$Q = (4,66). (3056,01)$$

$$Q = 14241,007 \text{ Kcal}$$

$$1 \text{ Kcal} = 4187 \text{ J}$$

$$1 \text{ KWh} = 3,6 \cdot 10^6 \text{ J}$$

$$QE = 14241,007 \text{ Kcal} \cdot \frac{4187 \text{ J}}{1 \text{ Kcal}} \cdot \frac{1000 \text{ Wh}}{3,6 \cdot 10^6 \text{ J}}$$

$$QE = 16563,08 \text{ Wh}$$

La densidad energética (QE) producida por la combustión de 4,66 Kg/h de Pennisetum Clandestinum en estado compactado, con un contenido de humedad final (X_{wi}) del 2,86% y un Poder Calórico Inferior (PCI) teórico de 3056,01 Kcal/Kg, es de 16563,08 Wh.

Tabla 74

Densidad energética vs Calor de Reacción

Parámetro termo físico		Natural	Granulado	Compactado
% contenido de humedad		76,64 %	3,28 %	2,86 %
Masa quemada (Kg/h)		4,73	5,82	4,66
Análisis teórico	Poder Calórico Inferior (Kcal/Kg)	279,19	3040,20	3056,01
	Densidad energética (Wh)	1535,89	20579,063	16563,082
	Densidad energética (Wh) normalizado a 4,73 Kg/h	1535,89	16724,908	16811,88
Análisis práctico	Calor de reacción (Wh)	8370,423	15681,858	14690,818
	Calor de reacción (Wh) normalizado a 4,73 Kg/h	8370,423	12744,877	14911,49
	% del calor de reacción normalizado a 4,73 Kg/h	100%	152,27%	178,15%

En la tabla 74, se describen los valores teóricos de la densidad energética y prácticos del calor de reacción para el caso experimental en la combustión del Pennisetum Clandestinum en sus diferentes estados de combustión. Se determina que la densidad energética teórica (QE) obtenida considerando la combustión de

4,73 Kg/h en estado natural es de 1535,89 Wh, en estado granulado 16724,908 Wh y en estado compactado 16811,88 Wh.

El calor de reacción generado en estado granulado es 152,27% mayor en comparación con el calor de reacción generado en estado natural. El calor de reacción generado en estado compactado es 178,15% mayor en comparación con el calor de reacción generado en estado natural.

Se afirma que la combustión del Pennisetum Clandestinum en sus dos formas de presentación (natural y compactada), la primera de una granulometría inferior a 1 mm y la segunda en forma de briqueta, se obtiene una densidad energética que supera por lo menos el 50% al compararla con un proceso de combustión en su estado natural (sin secado $X_{wi} > 60\%$) al quemarlo con un contenido de humedad final (X_{wf}) inferior al 12%.

Al comparar el valor de la densidad energética teórica con la práctica, se determina que la variación de resultado, se debe, a las condiciones operativas de la cámara del horno de combustión utilizado, de las condiciones ambientales (temperatura ambiente, humedad relativa, etc.), de la cantidad variable de la biomasa quemada y de la exactitud de los datos registrados, los mismos que se lo realizó por intervalos periódicos de tiempo (cada 20 minutos).

Para el caso experimental, se evidencia que se obtiene mejores resultados de una densidad energética mayor cuando se combustiona el Pennisetum Clandestinum en estado compactado (en forma de briqueta) que en estado granulado (granulometría inferior a 1 mm) y aún más evidente cuando se combustiona en estado natural.

CAPÍTULO VI

6. ANALISIS DE COSTOS DE INVERSIÓN

Los costos que se exponen se encuentran actualizados a la fecha, y reflejan los trabajos ejecutados durante el montaje y adecuación de la línea de combustión de biomasa del Laboratorio de Energías Renovables de la Universidad de la Fuerzas Armadas ESPE campus Sangolquí

6.1 Montaje de la línea de combustión

Tabla 75

Costos montaje de la línea de combustión

Descripción	Cantidad	Unidad	Precio Unitario	Precio Total
Mantenimiento integral secadora	1,00	Unidad	\$ 950,00	\$ 950,00
Mantenimiento integral briquetadora	1,00	Unidad	\$ 550,00	\$ 550,00
Mantenimiento integral horno de combustión	1,00	Unidad	\$ 1.250,00	\$ 1.250,00
Adecuación del sitio (trabajos eléctricos, civiles)	1,00	Unidad	\$ 750,00	\$ 750,00
Letrero	1,00	Unidad	\$ 150,00	\$ 150,00
Subtotal 1				\$ 3.650,00

Los costos asociados al montaje de la línea de combustión de biomasa, se enfocan al mantenimiento integral de los equipos que conforman la línea de combustión y su reubicación en la zona asignada (ver tabla 75).

6.2 Desarrollo experimental

Los costos asociados al desarrollo experimental, se enfocan cubrir los gastos del personal de investigación, gastos operativos, equipos especiales y suministros de oficina (ver tabla 76).

Tabla 76

Costos recurso humano

Descripción	Cantidad	Unidad	Precio Unitario	Precio Total
Investigador	150,00	Horas	\$ 10,00	\$ 1.500,00
Ayudante de investigación	20,00	Horas	\$ 20,00	\$ 400,00
Asesor técnico	10,00	Horas	\$ 35,00	\$ 350,00
Director	20,00	Horas	\$ 45,00	\$ 900,00
Subtotal 2				\$ 3.150,00

Tabla 77

Costos equipos especializados

Descripción	Cantidad	Unidad	Precio Unitario	Precio Total
Balanza digital	192,00	Horas de uso	\$ 1,50	\$ 288,00
Termómetro infrarrojo	192,00	Horas de uso	\$ 1,50	\$ 288,00
Anemómetro	192,00	Horas de uso	\$ 1,50	\$ 288,00
Subtotal 3				\$ 864,00

Tabla 78

Suministros de oficina

Descripción	Cantidad	Unidad	Precio Unitario	Precio Total
Computador	200,00	Horas de uso	\$ 0,50	\$ 100,00
Impresiones blanco/negro	1.000,00	Hojas	\$ 0,05	\$ 50,00
Impresiones color	1.500,00	Hojas	\$ 0,10	\$ 150,00
CD biblioteca	1,00	Unidad	\$ 10,00	\$ 10,00
Reproducción de textos	2.500,00	Hojas	\$ 0,04	\$ 100,00
Subtotal 4				\$ 410,00

El costo total asociado al desarrollo de la investigación es de \$ 8074,00 el mismo que incluyen los impuestos de ley.

CAPÍTULO VII

7. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Finalizada la etapa investigativa para la caracterización energética del Pennisetum Clandestinum, mediante la utilización de la línea de combustión de biomasa adecuada en el Laboratorio de Energías Renovables, de la Escuela Politécnica de Ejército, campus Sangolquí, se puede concluir y recomendar, las siguientes citas.

7.1 Conclusiones

- Con un tiempo de secado de seis horas el porcentaje de humedad final del Pennisetum Clandestinum es menor al 12%, considerando que en su estado inicial el porcentaje de humedad es superior al 60%.
- El calor de reacción generado en estado granulado es 152,27% mayor en comparación con el calor de reacción generado en estado natural.
- El calor de reacción generado en estado compactado es 178,15% mayor en comparación con el calor de reacción generado en estado natural.
- Se afirma que la combustión del Pennisetum Clandestinum en sus dos formas de presentación (natural y compactada), la primera de una granulometría inferior a 1 mm y la segunda en forma de briqueta, se obtiene una densidad energética que supera por lo menos el 50% al compararla con un proceso de combustión en su estado natural (sin secado $X_{wi} > 60\%$) al quemarlo con un contenido de humedad final (X_{wf}) inferior al 12%.
- El Poder Calorífico Superior del Pennisetum Clandestinum (3412,05 Kcal/Kg) es mayor que el Poder Calorífico Superior de la cascarilla de arroz (3183 Kcal/Kg) y menor que el Poder Calorífico Superior (4500 - 5300 Kcal/Kg) de la madera, por lo tanto tiene las condiciones de un combustible biomásico.
- Su aplicación práctica de este combustible sólido es para producir el confort térmico de hogares.

7.2 Recomendaciones

- Aplicar los procedimientos operacionales elaborados para cada etapa de la línea de combustión de biomasa.
- Antes de iniciar la lectura de parámetros en la cámara de combustión, previamente debe calentarse el horno hasta la temperatura de las paredes laterales estén en el rango de 120 °C – 200 °C, es decir, en estado estable.
- Implementar una red de centros de acopio en la región interandina del pasto Kikuyo, para luego transportarlo, consolidarlo y utilizarlo como combustible biomásico.

BIBLIOGRAFÍA

- ARCONEL. (20 de Abril de 2016). *Reporte estadísticas del sector eléctrico ecuatoriano*. Obtenido de Reporte estadísticas del sector eléctrico ecuatoriano: <http://www.regulacionelectrica.gob.ec/estadistica-del-sector-electrico/balance-nacional/>
- Baskakov, A. (1985). *Termotecnia*. Moscú: Mir.
- BP. (10 de Junio de 2015). *BP Statical Review of World Energy*. Obtenido de BP Statical Review of World Energy: <https://www.bp.com/content/dam/bp/pdf/energy-economics/statistical-review-2015/bp-statistical-review-of-world-energy-2015-full-report.pdf>
- Calero, R. (2009). *Centrales de energías renovables*. Madrid: Prentice Hall.
- Cengel, Y. (2011). *Transferencia de calor y masa, fundamentos y aplicaciones*. México: McGraw-Hill.
- Correa, H., Carulla, J., & Pabón, M. (1 de Abril de 2008). *Valor nutricional del pasto Kikuyo para la producción de leche en Colombia*. Obtenido de Valor nutricional del pasto Kikuyo para la producción de leche en Colombia: https://www.researchgate.net/publication/266317145_Valor_nutricional_del_pasto_kikuyo_Pennisetum_clandestinum_Hoechst_Ex_Chiov
- ESPOL. (20 de Octubre de 2015). *Apuntes de la combustión*. Obtenido de Apuntes de la combustión: <http://cdts.espol.edu.ec>
- EXTECH 407113. (10 de Enero de 2016). *407113: Anemómetro de paletas metálicas CFM para trabajos pesados*. Obtenido de 407113: Anemómetro de paletas metálicas CFM para trabajos pesados: <http://www.extech.com.es/instruments/product.asp?catid=1&prodid=41>
- EXTECH 42545. (10 de Enero de 2016). *42545: Termómetro de infrarrojos de alta temperatura*. Obtenido de 42545: Termómetro de infrarrojos de alta temperatura: <http://www.extech.com.es/instruments/product.asp?catid=62&prodid=376>
- FOCER. (20 de Septiembre de 2002). *Manuales sobre energías renovables BIOMASA*. Obtenido de Manuales sobre energías renovables BIOMASA: [http://www2.congreso.gob.pe/sicr/cendocbib/con4_uibd.nsf/5EA2E564AF6F41D405257CC1005B2354/\\$FILE/Manuales_sobre_energ%C3%ADa_renova_bleBIOMASA.pdf](http://www2.congreso.gob.pe/sicr/cendocbib/con4_uibd.nsf/5EA2E564AF6F41D405257CC1005B2354/$FILE/Manuales_sobre_energ%C3%ADa_renova_bleBIOMASA.pdf)
- Franco, H., Cardona, L., & Mendoza, N. (10 de Diciembre de 2015). *Pasto Kikuyo*. Obtenido de Pasto Kikuyo: <http://publimvz.galeon.com/>

- Global Carbon Atlas. (30 de Diciembre de 2016). *Global Carbon Atlas Emisiones CO2*. Obtenido de Global Carbon Atlas Emisiones CO2: <http://www.globalcarbonatlas.org/?q=es/emissions>
- IDAE. (30 de 12 de 2011). *Evaluación del potencial de energía de la biomasa*. Obtenido de Evaluación del potencial de energía de la biomasa: <http://www.idae.es>
- Incopera, F., & DeWiit, D. (20 de Agosto de 1996). *Fundamentos de transferencia de calor*. México: Prentice Hall.
- INEC. (30 de Diciembre de 2012). *Encuesta de superficie y producción agropecuaria continua*. Obtenido de Encuesta de superficie y producción agropecuaria continua: http://www.ecuadorencifras.gob.ec/documentos/web-inec/Estadisticas_agropecuarias/espac/espac_2012/InformeEjecutivo.pdf
- IRENA. (30 de Diciembre de 2015). *Reporte de la situación mundial de las energías renovables 2015*. Obtenido de Reporte de la situación mundial de las energías renovables 2015: http://www.ren21.net/wp-content/uploads/2015/07/GSR2015_Key-Findings_SPANISH.pdf
- Martín, F. M. (20 de Octubre de 2015). *Pélets y briquetas*. Obtenido de Pélets y briquetas: http://infomadera.net/uploads/articulos/archivo_2293_9990.pdf
- MECALUX. (30 de Enero de 2016). *Prensa briquetadora RUF 1500*. Obtenido de Prensa briquetadora RUF 1500: <https://www.logismarket.es/solving-machinery/prensa-briquetadora/2140071258-2863610694-p.html>
- MEER. (30 de Abril de 2016). *Ministerio de Electricidad y Energías Renovables*. Obtenido de Ministerio de Electricidad y Energías Renovables: <http://www.energia.gob.ec/proyectos-emblematicos-2/>
- MICSE. (30 de Diciembre de 2015). *Balance Energético Nacional 2015, año base 2014*. Obtenido de Balance Energético Nacional 2015, año base 2014: <http://www.sectoresestrategicos.gob.ec>
- Nogués, F. (2010). *Energía de Biomasa Vol. I*. Zaragoza: Prensas Universitarias de Zaragoza. Obtenido de Energía de Biomasa.
- OLADE. (14 de Abril de 2014). *Panorama actual de las Energías Renovables en América Latina y El Caribe*. Obtenido de Panorama actual de las Energías Renovables en América Latina y El Caribe: <http://www.olade.org/sites/default/files/misiones/Ampliacion%20Proyectos%20ER-ALC-OLADE.pdf>
- Ortega, M. (2000). *Energías Renovables*. Madrid: Paraninfo.

- Osorio, & Roldan. (2006). *Volvamos al campo. Cultivos de pastos y forrajes*. Bogota: Grupo Latino .
- Pitts, D., & Sissom, E. (1979). *Transferencia de calor*. Bogota: Mc Graw Hill.
- Potter, M., & Somerton, C. (2004). *Termodinámica para Ingenieros*. Madrid: Mc Graw Hill.
- Secretaría de Energía de Argentina. (30 de 12 de 2008). *EB Energías Renovables*. Obtenido de EB Energías Renovables: <http://www.energia.gov.ar>
- Tipanluisa, L. (2011). *Caracterización de los productos de combustión de la cascarilla de arroz, utilizando un sistema térmico con capacidad de 60000 Kcal/h*. Sangolquí: Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE.
- Valverde, A. (2007). *Análisis comparativo de las características físico químicas de la cascarilla de arroz*. Pereira: Universidad Tecnológica de Pereira.
- Villavicencio, A., & Gutierrez, R. (2015). *Análisis y caracterización de biomasa residual agrícola de arroz, cacao y madera mediante dos métodos de gasificación para aplicaciones energéticas*. Sangolquí: Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE.