



**VICERRECTORADO DE INVESTIGACIÓN Y VINCULACIÓN  
CON LA COLECTIVIDAD.**

**TESIS DE GRADO MAESTRÍA EN ENERGÍAS RENOVABLES.**

**TEMA: “DETERMINACIÓN DE LAS CARACTERÍSTICAS  
ENERGÉTICAS DE LA TUSA DE MAÍZ CON VARIACIÓN DEL  
CONTENIDO DE HUMEDAD, DENSIDAD Y RELACIÓN AIRE-  
COMBUSTIBLE”**

**AUTORES:**

**ESPINOZA ALMACHE CÉSAR RAFAEL.**

**TORRES RODRÍGUEZ GABRIELA DEL CARMEN.**

**DIRECTOR: DR. REYNALDO DELGADO.**

**SANGOLQUÍ 9 DE JULIO, 2015**

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

El proyecto "DETERMINACIÓN DE LAS CARACTERÍSTICAS ENERGÉTICAS DE LA TUSA DE MAÍZ CON VARIACIÓN DEL CONTENIDO DE HUMEDAD, DENSIDAD Y RELACIÓN AIRE-COMBUSTIBLE", fue realizado en su totalidad por RAFAEL ESPINOZA ALMACHE y GABRIELA TORRES RODRÍGUEZ, como requerimiento parcial para la obtención del título de Magister en Energías Renovables.



---

Dr. Reynaldo Delgado

DIRECTOR

## DECLARACIÓN DE RESPONSABILIDAD

GABRIELA DEL CARMEN TORRES RODRIGUEZ

CESAR ESPINOZA ALMACHE

### DECLARA QUE:

El proyecto de posgrado denominado “**DETERMINACIÓN DE LAS CARACTERÍSTICAS ENERGÉTICAS DE LA TUSA DE MAÍZ CON VARIACIÓN DEL CONTENIDO DE HUMEDAD, DENSIDAD Y RELACIÓN AIRE-COMBUSTIBLE**”, ha sido desarrollado con base a una investigación exhaustiva, respetando derechos intelectuales de terceros, conforme las citas que constan al pie de las páginas correspondientes, cuyas fuentes se incorporan en la bibliografía.

Consecuentemente este trabajo es de nuestra autoría.

En virtud de esta declaración, nos responsabilizamos del contenido, veracidad y alcance científico del proyecto de grado en mención.

Sangolquí, 09 de julio de 2015



ING. GABRIELA DEL CARMEN TORRES RODRIGUEZ

**AUTOR**



ING. CESAR ESPINOZA ALMACHE

**AUTOR**

## AUTORIZACIÓN

Nosotros: César Rafael Espinosa Almache y Gabriela del Carmen Torres Rodríguez. Autorizamos a la Universidad de las Fuerzas Armadas-ESPE la publicación, en la biblioteca virtual de la institución del proyecto de grado titulado: "DETERMINACIÓN DE LAS CARACTERÍSTICAS ENERGÉTICAS DE LA TUSA DE MAÍZ CON VARIACIÓN DEL CONTENIDO DE HUMEDAD, DENSIDAD Y RELACIÓN AIRE-COMBUSTIBLE", cuyo contenido, ideas y criterios son de nuestra exclusiva responsabilidad y autoría.



Rafael Espinoza Almache



Gabriela Torres Rodríguez

## **DEDICATORIA**

A la memoria de mis difuntos padres, Juanita y Rigoberto, su recuerdo, preceptos y enseñanzas permanecerán en mí durante toda mi existencia.

Rafael

## **DEDICATORIA**

A mis hijos Carlos, Hylan y Aylen que son mi inspiración, mi fuerza y mi vida, a mis Padres Carmen y Alberto por la ayuda incondicional brindada por los principios y valores impartidos, A mi querido Esposo porque ha sido mi pilar mi compañero, mi amigo, por su apoyo y su amor, a mi abuelita, a mis tías, a mi Hermana, mis tíos, primos y a la memoria de mis abuelitos y mi tío.

## **AGRADECIMIENTOS**

A Dios: porque siempre he sentido su mano amiga extendida hacia mí, durante todos estos años de estudiante y docente.

Al Ing. Reynaldo Delgado, PhD, por su acertada dirección en esta investigación.

Al Ing. Leonardo Goyos, PhD, por su trabajo de revisión del presente proyecto.

A Roberto Gutiérrez: por su invaluable ayuda como amigo y profesional.

Al Ing. Francisco Navas por su ayuda en el laboratorio de resistencia de materiales

Al Ing. Alberto Naranjo por su ayuda con la bomba calorimétrica

Rafael Espinoza

## **AGRADECIMIENTOS**

A Dios: porque en todo momento, lugar y circunstancia me guía, siempre está junto a mí con su bendición.

Al Ing. Reynaldo Delgado, PhD, por su orientación y guía en esta investigación.

Al Ing. Leonardo Goyos, PhD, por su trabajo de revisión del presente proyecto.

A mi amado Roberto Gutiérrez, por su gran aporte profesional, su apoyo incondicional en la vida y presente investigación.

A mí siempre estimado y recordado Alberto Naranjo por su apoyo absoluto y su aporte profesional.

Al Ing. Francisco Navas por su valiosa colaboración en el presente proyecto.



## ÍNDICE DE CONTENIDOS

CERTIFICACIÓN DE LA ELABORACIÓN DEL PROYECTO	ii
DECLARACIÓN DE RESPONSABILIDAD	iii
AUTORIZACIÓN	iv
DEDICATORIA	v
DEDICATORIA	vi
AGRADECIMIENTOS	vii
AGRADECIMIENTOS	viii
ÍNDICE DE CONTENIDOS	ix
ÍNDICE DE FIGURAS	xii
ÍNDICE DE TABLAS	xv
GLOSARIO	xvii
RESUMEN	xix
ABSTRACT	xx
CAPÍTULO 1. GENERALIDADES	1
1.1. ANTECEDENTES	1
1.2. DEFINICIÓN DEL PROBLEMA	7
1.3. OBJETIVOS	8
1.3.1. OBJETIVO GENERAL	8
1.3.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS	8
1.4. ALCANCE	8
CAPÍTULO 2. MARCO TEÓRICO Y ESTADO DEL ARTE	10
2.1. RECURSO ENERGÉTICO BIOMÁSICO EN ECUADOR	10
2.2. COMBUSTIÓN DE LA BIOMASA	18
2.2.1. PIRÓLISIS.	24
2.2.2. GASIFICACIÓN	27
2.2.3. TERMÓLISIS	34

		X
2.2.4.	FERMENTACIÓN	34
2.2.5.	COMBUSTIÓN DE LA TUSA DE MAÍZ.	35
2.3.	BOMBA CALORIMÉTRICA ADIABÁTICA	36
2.4.	ESTADO DEL ARTE DEL PODER CALORÍFICO DE LA BIOMASA	40
CAPÍTULO 3. DISEÑO DE LA EXPERIMENTACIÓN Y PROCEDIMIENTO		44
3.1.	DISEÑO DE LA EXPERIMENTACIÓN	44
3.2.	EXPERIMENTACIÓN Y METODOLOGIA	45
3.2.1.	RECOLECCIÓN DE LA MUESTRA Y MEDICIÓN DE LA HUMEDAD	45
3.2.2.	PREPARACIÓN DE LA MUESTRA	48
3.2.3.	AUTOMATIZACIÓN DE LA TOMA DE DATOS EN BOMBA CALORIMÉTRICA	58
3.2.4.	PROCEDIMIENTO PARA LA EXPERIMENTACIÓN EN LA BOMBA CALORIMÉTRICA	67
3.3.	PUNTOS DE CONTROL	69
3.4.	MÉTODOS ESTADÍSTICOS	69
CAPÍTULO 4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN		75
4.1.	ANÁLISIS	75
4.1.1.	HUMEDAD	75
4.1.2.	FUERZA DE COMPACTACIÓN (DENSIFICACIÓN)	79
4.1.3.	PODER CALÓRICO	80
4.1.4.	CANTIDAD DE OXÍGENO DOSIFICADO (RELACIÓN AIRE-COMBUSTIBLE)	84
4.1.5.	EFECTO COMBINADO DE LOS FACTORES FUERZA DE COMPACTACIÓN Y CANTIDAD DE OXÍGENO DOSIFICADO	88
4.2.	ANÁLISIS ECONÓMICO DEL PROYECTO	90
4.2.1.	PRESUPUESTO REFERENCIAL PARA LA INVESTIGACIÓN	90
4.2.1.1.	COSTOS INDIRECTOS	90
4.2.1.2.	MISCELÁNEOS	91
4.2.1.3.	COSTOS DIRECTOS	91
4.2.1.4.	MATERIALES Y EQUIPOS	92

4.2.1.5. OTROS COSTOS DIRECTOS	93
4.2.1.6. RESUMEN DE COSTOS	93
CAPÍTULO 5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	94
5.1. CONCLUSIONES	94
5.2. RECOMENDACIONES	95
BIBLIOGRAFÍA	97
ANEXOS	112

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Biocalefón de biomasa.....	3
Figura 2. Secador de Madera con Cámara de Combustión de Biomasa .....	4
Figura 3. Gasificador tipo downdraft con motor de combustión interna .....	4
Figura 4. Gasificador tipo lecho fluidizado .....	5
Figura 5. Cocina eficiente de tiro natural y calentador de agua .....	5
Figura 6. Calorímetro adiabático.....	6
Figura 7. Ciclo energético de la biomasa.....	10
Figura 8. Desecho agrícola de caña (bagazo). .....	11
Figura 9. Caldero de cuezco de palma. ....	11
Figura 10. Deshechos agrícolas en Ecuador. ....	12
Figura 11. Gasificador downdraft. La Concordia.....	13
Figura 12. Fotografía Satelital del Ecuador.....	14
Figura 13. Sembríos de Maíz en la costa ecuatoriana.....	15
Figura 14. Trituración de la caña y obtención del bagazo.....	16
Figura 15. Fogón Antiguo. ....	18
Figura 16. Cocina de leña eficiente.....	19
Figura 17. Sistema de alta temperatura para secado de biomasa.....	20
Figura 18. Chimenea de un sistema de combustión doble. ....	21
Figura 19. Sistema de combustión catalítico. ....	21
Figura 20. Combustor de pellets. ....	22
Figura 21. Planta de pirólisis.....	24
Figura 22. Horno mufla de pirólisis. ....	25
Figura 23. Planta para pirólisis rápida.....	26
Figura 24. Esquema de un gasificador tipo Downdraft. ....	28
Figura 25. Procesos termoquímicos de un gasificador .....	29
Figura 26. Gasificador Tipo Downdraft. ....	30
Figura 27. Gasificador tipo Updraft. ....	32
Figura 28. Sistema de gasificación de lecho fluidizado.....	33
Figura 29. Proceso de termólisis en plásticos.....	34

Figura 30. Fermentación de biomasa. ....	35
Figura 31. Bomba Calorimétrica Adiabática.....	38
Figura 32. Modelación de variables .....	44
Figura 33. Higrómetro DUSIEC.....	46
Figura 34. Pre-trituración manual de la tusa .....	47
Figura 35. Molino harinero utilizado para pulverizar la tusa.....	47
Figura 36. Polvo de tusa .....	48
Figura 37. Máquina de Ensayos Universales.....	49
Figura 38. Disco de medición de fuerza y presión .....	49
Figura 39. Pulido de la superficie del émbolo .....	51
Figura 40. Geometría de Probetas.....	51
Figura 41. Balanza Digital.....	52
Figura 42. Bomba Calorimétrica Adiabática.....	54
Figura 43. Bomba calorimétrica, componentes internos .....	55
Figura 44. Esquema interno de la bomba calorimétrica .....	55
Figura 45. Termómetro Principal y Termómetro B .....	56
Figura 46. Recipiente interno, Carcasa metálica .....	57
Figura 47. Tarjeta de adquisición de datos ARDUINO.....	58
Figura 48. Diagrama de flujo del hardware (ARDUINO) .....	60
Figura 49. Algoritmo del programa en Labview.....	61
Figura 50. Diagrama de bloques, interface ARDUINO.....	62
Figura 51. Display Interface ARDUINO.....	62
Figura 52. Conexión de sensores. ....	64
Figura 53. Elementos de la caja de almacenaje del módulo ARDUINO .....	65
Figura 54. Código fuente en software LABVIEW .....	66
Figura 55. Visualización de pantalla del programa de automatización en funcionamiento	67
Figura 56. Combustión de la tusa de maíz .....	68
Figura 57. Densidad de puntos de humedad vs. Tipos de Tusa.....	78
Figura 58. Distribución quantil- quantil de la humedad relacionada con el tipo de tusa ..	79
Figura 59. Gráfico de Cajas: Poder calórico relacionado con la fuerza de compactación .	83

Figura 60. Distribución quantil- quantil del poder calórico para una fuerza de compactación de 1T y 2T.....	84
Figura 61. Gráfico de cajas: Poder calórico relacionado con la cantidad de oxígeno dosificado .....	87
Figura 62. Distribución quantil-quantil del poder calórico inferior relacionado con la cantidad de oxígeno dosificada .....	88

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Proporción de los diferentes componentes de una planta de maíz	17
Tabla 2. Tecnologías posibles a aplicar para el aprovechamiento de la biomasa residual de maíz. ....	23
Tabla 3. Diseño Experimental .....	45
Tabla 4. Especificaciones técnicas .....	53
Tabla 5. Número de tusas empleadas para evaluar la humedad.....	69
Tabla 6. Número de pellets utilizados según la fuerza de compactación....	69
Tabla 7. Resultados estadísticos de humedad relacionados con el tipo de tusa .	76
Tabla 8. Prueba de normalidad de humedad relacionada con el tipo de tusa .....	76
Tabla 9. Análisis de varianza de la humedad relacionada con el tipo de tusa .....	77
Tabla 10. Análisis de varianza SC tipo III de la humedad relacionada con el tipo de tusa ..	77
Tabla 11. Resultados estadísticos de la densidad de la pastilla en relación con la presión de compactación.....	80
Tabla 12. Resultados estadísticos del poder calórico inferior relacionado con la fuerza de compactación .....	81
Tabla 13. Análisis de normalidad del poder calórico inferior relacionado con la fuerza de compactación .....	81
Tabla 14. Análisis de varianza del poder calórico inferior relacionado con la fuerza de compactación .....	82
Tabla 15. Prueba de Duncan del PCI en relación a la Fuerza de Compactación .....	82
Tabla 16. Análisis de varianza del poder calórico inferior relacionado con la cantidad de oxígeno dosificada.....	86
Tabla 17. Prueba de Duncan de la relación entre el poder calórico y la cantidad de oxígeno dosificada.....	86
Tabla 18. Análisis de varianza del poder calórico inferior relacionado con la fuerza de compactación, cantidad de oxígeno y efecto combinado.....	89

Tabla 19. Prueba de Duncan del poder calórico inferior relacionado con la fuerza de compactación, cantidad de oxígeno y efecto combinado.....	89
Tabla 20. Costos indirectos .....	90
Tabla 21. Misceláneos .....	91
Tabla 22. Costos Directos.....	91
Tabla 23. Materiales y Equipos.....	92
Tabla 24. Otros costos directos .....	93
Tabla 25. Resumen de costos .....	93



## GLOSARIO

**Combustible:** Todo combustible –sólido, líquido o gaseoso– producido a partir de la biomasa.

**Biomasa forestal:** Toda biomasa existente en los bosques, comprendidos los árboles, hojas, ramas y raíces. Entre los tipos específicos de biomasa seleccionados para su uso en sistemas energéticos están las copas y ramas de árboles remanentes tras la cosecha de la madera, los árboles de mala calidad que se encuentran en bosques sujetos a ordenación, los árboles que se cortan durante las operaciones de aclareo del terreno, los desechos madereros procedentes de zonas urbanas y los residuos madereros producidos en los aserraderos.

**Biomasa sólida:** Madera, desechos de madera y otros desechos sólidos. Biomasa tradicional: Combustibles leñosos, subproductos agrícolas y estiércol que son quemados para cocinar los alimentos y calentarse. En los países en desarrollo, están aún muy difundidos la producción de biomasa y su uso insostenible y nocivo. El negocio de biomasa es en su mayor parte informal y no obedece a principios comerciales.

**Densidad:** Reducción del volumen sobre un gramo de muestra a diferentes presiones por efecto de la fuerza de compactación en el área de la probeta.

**Materia prima:** Toda biomasa que se destina a ser convertida en energía o en biocombustible. Por ejemplo, el maíz es una materia prima para la producción de etanol; y el aceite de soja, una materia prima para la producción de biogasóleo. La biomasa celulósica podría llegar a ser una materia prima de gran importancia para la producción de biocombustibles.

**Cogeneración:** Producción simultánea de trabajo y calor.

**Combustibles fósiles:** Sustancias combustibles procedentes de residuos vegetales o animales almacenados en periodos de tiempo muy

grandes. Son el petróleo, gas natural, carbón, esquistos bituminosos, pizarras y arenas asfálticas.

**Combustibles sólidos:** Productos combustibles que se presentan en forma sólida. Fundamentalmente los carbones minerales (antracita, hulla, lignito negro, lignito pardo, coque, turba) y carbones "naturales" (de residuos vegetales), aglomerados, briquetas, pellets.

**Combustión:** Reacción química del oxígeno (comburente) con una sustancia (combustible).

**Bomba Calorimétrica:** La Bomba Calorimétrica se usa para determinar el Poder Calorífico de un Combustible cuando se quema a volumen constante.

**Poder calorífico superior:** El que se expresa cuando el agua resultante de la combustión se supone condensada.

**Calentamiento global:** es el aumento observado en los últimos siglos de la temperatura media del sistema climático de la Tierra.

**Energía limpia:** Se denomina energía renovable a la energía que se obtiene de fuentes naturales virtualmente inagotables.

**Fuentes de energía:** son los recursos o medios naturales capaces de producir algún tipo de energía.

**Ciclo de carbono:** Las plantas lo absorben desde el aire a través de las hojas y, en su interior, lo procesan hasta transformarlo en una sustancia vegetal, durante la fotosíntesis. De allí la importancia de este vital elemento y su rol en el equilibrio eco sistémico

**Bromatología:** La Bromatología es la ciencia que se ocupa del estudio de los alimentos, esta disciplina permite conocer la composición cualitativa y cuantitativa de aquellos alimentos que comemos.

## RESUMEN

En el presente proyecto de titulación se estudió las condiciones para caracterizar energéticamente la tusa de maíz mediante el método de la bomba de calor adiabática. Las tusas fueron recolectadas en su estado natural con 39% de humedad y previo a la experimentación las tusas fueron aisladas en un ambiente cerrado durante un año hasta reducir su humedad a un valor cercano al 12%. El diseño experimental se basó en un análisis bi-factorial, se utilizó como variable respuesta el poder calórico inferior y como variables de proceso (factores) la fuerza de compactación del pellet (densificación) y la cantidad de oxígeno suministrada para la combustión. En el caso de la fuerza de compactación se estudiaron dos parámetros, fuerza de compactación de una tonelada y dos toneladas y para el oxígeno dosificado se utilizaron tres parámetros, cantidad de oxígeno mayor al estequiométrico, igual al estequiométrico y menor al estequiométrico. El poder calórico óptimo promedio obtenido fue de 16.07 kJ/g, para una tusa con 13.71% de humedad, fuerza de compactación de una tonelada y cantidad de oxígeno suministrada igual al estequiométrico este valor es ligeramente superior al publicado por la bibliografía especializada que es alrededor de 15kJ/g. La tusa húmeda presentó problemas al momento de la compactación, con pérdidas no cuantificables de cantidad de agua perdida y una consistencia débil para ser manipulada razón por la cual su estudio no se consideró en este proyecto

### **PALABRAS CLAVE:**

- PODER CALÓRICO
- TUSA DE MAÍZ
- FUERZA DE COMPACTACIÓN
- REACCIÓN DE COMBUSTIÓN
- BIOMASA

## **ABSTRACT**

In the present project it was studied the conditions for characterize energetically the corn cob using the method of the adiabatic heat pump. The cobs where collected in their natural state with 39 % of humidity and previous to the experiment the cobs where isolated during a year in a closed environment until it reduced the humidity to a value close to 12 %.

The experimented design was based on a bi-factorial analysis it was used like variable response, the inferior caloric power and like variable process the force of compaction pellet (densification) and the quantity of oxygen supplied for the combustion.

In the case of the compaction force it was studied two parameters, force of compaction of one ton and two tons and for the oxygen dispenser we used three parameters, higher quantify of oxygen stoichiometric equal to the stoichiometric and lesser to the stoichiometric.

The Calorific Power optimal average obtained was 16.07 kJ/g for the cob with 13.71 % of humidity, force of compression of a ton and the quantify of oxygen supplied same as the stoichiometric this amount is slightly superior to the published bibliography that is around 15 kJ/g

The humid cob, presented problems the moment of compaction with losses quantifiable of amount of water loss and a weak consistency to be manipulated reason why the study was not considered in this project.

### **KEY WORDS:**

- CALORIC POWER
- CORNCOB
- COMPACTING FORCE
- COMBUSTION REACCION
- BIOMASS

## CAPÍTULO 1. GENERALIDADES

### 1.1. ANTECEDENTES

Las variedades tradicionales de maíces ecuatorianos constituyen un rico patrimonio de tradiciones agrícolas, alimenticias y poco ha tomado en cuenta que sus residuos como la tusa poseen también un alto contenido energético desperdiciado. En el Ecuador el maíz se cultiva en todo el país sin considerar los páramos y sub-páramos (encima de los 3,000 m de altitud), con siembras concentradas en las provincias de Loja, Azuay y Pichincha, y en menor medida en Bolívar, Chimborazo, Tungurahua e Imbabura (región de Sierra). Este cultivo está presente mayoritariamente en provincias de la costa Manabí, seguida por Esmeraldas y Guayas mientras que en la región oriental en la provincia de Pastaza. (Carrera Carrillo, 2012).

El afinamiento / evolución de las variedades tradicionales de maíces ecuatorianos se han desarrollado como sigue: (Brandolini, 2005).

- Acondicionamiento en las altitudes bajas y medias de los Andes orientales,
- Formación de razas primitivas y extensión de los límites de acondicionamiento,
- Introgresión hibridativa de *Tripsacum*,
- Introducciones limitadas de maíces de otras regiones,
- Hibridación interracial y formación de razas híbridas para la Sierra,
- Selección cualitativa basadas en la composición del endospermo, el tamaño de los granos, sabor y la posibilidad de utilizarlos para la fermentación (chicha y chicha morada), así como la productividad y la facilidad de desgrane.

El grano de maíz utilizado en la dieta ecuatoriana deriva de cultivos de variedades que pertenecen a los siguientes grupos varietales descritos por E. Lewis Sturtevant:

- Zea mayseverta, canguiles (popcorn).
- Zea maysamylosaccharata, maíz dulce, chullpi.
- Zea mays indurada, maíz morocho.
- Zea maysamylacea, maíz suave.

En el Ecuador el consumo promedio per cápita al año es de 82,8 kg según el INEC. El consumo también está directamente vinculado a la producción de balanceados, los principales tipos de maíz que se producen son: 717940 toneladas métricas de maíz duro seco en la Costa y 43284 toneladas métricas de maíz duro suave en la Sierra. Según un estudio de las empresas del sector agrícola, este compra el 100% de la producción de maíz no exportable. A su vez, es el sector avícola el mayor consumidor y adquiere el 76% de los productos balanceados producidos en el país.

Según este mismo informe del INEC, en los últimos 20 años la producción de maíz se ha incrementado gracias a la importación de semillas híbridas. Pero el incremento de la producción ha generado también el aumento de la insatisfacción entre los productores. Ahora el Gobierno reactiva el Plan Tierras en espera de terminar con los conflictos de este y otros sectores productivos. (INEC, ECUADOR, 2012).

Al incrementarse la producción de maíz, es una realidad que los residuos agrícolas también se incrementarán y como todo residuo este causará muchos inconvenientes en su desalojo y recolección.

En función de la existencia de este tipo de desechos agrícolas sólidos, en las diferentes universidades no solo del país sino del contexto mundial, se han realizado muchos proyectos de investigación, con uso en hornos, gasificadores y biorreactores, se tomó en cuenta la utilización de este vector energético, que es amigable con el ambiente, cumple con el ciclo de carbono, y con tecnología eficiente se podría contribuir en el cambio de la matriz energética del país.

En la Universidad de las Fuerzas Armadas – ESPE, se han desarrollado proyectos del uso de biomasa, se cuenta con un laboratorio de energías renovables y con una maestría en el área, la producción de proyectos en el ámbito de la biomasa se ha llevado acabo al punto de construir equipos como Biocalefones Figura 1, secadores de granos Figura 2, gasificadores tanto del tipo downdraft, Figura 3, como de lecho fluidizado Figura 4, cocinas eficientes de tiro natural Figura 5, proyectos que reposan en el campus politécnico para investigaciones futuras.



**Figura 1. Biocalefón de biomasa**



**Figura 2. Secador de Madera con Cámara de Combustión de Biomasa**



**Figura 3. Gasificador tipo downdraft con motor de combustión interna**





**Figura 4. Gasificador tipo lecho fluidizado**



**Figura 5. Cocina eficiente de tiro natural y calentador de agua**

Además, para la caracterización del Poder calórico de combustibles sólidos y líquidos se cuenta con dos bombas calorimétricas adiabáticas tanto en el laboratorio de Conversión de la Energía como en el de Motores. Cabe recalcar que en la Bomba calorimétrica Adiabática ubicada en el Laboratorio de Conversión de la Energía se realizó un proyecto de pregrado para lograr su certificación bajo la norma NTE INEN- ISO/ IEC 17 025 con fines de presentación de servicios en el ámbito de la determinación del Poder Calórico de combustibles. El proyecto se realizó en la Bomba Calorimétrica del Laboratorio de Motores, la misma que tiene características similares a la primera y pertenecen a la misma casa comercial Figura 6.



**Figura 6. Calorímetro adiabático**

## 1.2. DEFINICIÓN DEL PROBLEMA

En el Ecuador, existen investigaciones escasas sobre la cantidad de biomasa producida como desecho en los diferentes cultivos, menos aún del poder calórico que estos pueden aportar, de hecho solo la biomasa cañera es utilizada como vector energético para generación de electricidad (Calle & Ulloa, 2010).

A nivel nacional el maíz duro seco presenta una tasa de crecimiento del 1.89%, que en el año 2012 alcanzó una producción total de 717940 Tm (Garcés, 2012).

La tusa de maíz se obtiene luego de desgranar la mazorca, este tipo de biomasa será tratada mayoritariamente como basura o despojo, en una encuesta realizada entre sus usos comunes figuran poderes curativos, cosmética, entretenimiento infantil, como tapón, actividades recreativas e incluso como higiene personal (Fondeur, 2009).

Según la investigación detallada anteriormente no existe aplicación técnica de la tusa de maíz, a pesar de que su producción es importante y creciente, es por esta razón que en el presente trabajo se investigará un recurso energético sustentable enmarcado a aumentar el uso técnico de los recursos biomásicos de segunda generación y su presunta irrelevancia en la matriz energética.

El Ecuador es muy rico en recursos biomásicos, entre ellos la tusa de maíz, pero no existen levantamientos técnicos energéticos de biomasa producida y eso es parte de la problemática, ya que no se tienen bases de datos suficientes para emprender un proyecto de importancia. (Corporación para la Investigación Energética, 2013).

## **1.3. OBJETIVOS**

### **1.3.1. OBJETIVO GENERAL**

Determinar las características energéticas de la tusa de maíz con variación del contenido de humedad, densidad y relación aire-combustible

### **1.3.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

- Caracterizar el contenido de humedad de la tusa de maíz mediante el Higrómetro.
- Evaluar la influencia de los tres parámetros de estudio (humedad, densidad y relación aire combustible), en la obtención del poder calórico de la tusa de maíz.
- Determinar la combinación óptima de las variables para producir energía de la tusa de maíz con la mayor eficiencia.
- Promover el uso adecuado de residuos agrícolas para la producción de energía limpia y el cuidado del ambiente

## **1.4. ALCANCE**

En el presente proyecto se estudiará el aprovechamiento eficiente de un recurso biomásico de segunda generación como es la tusa de maíz al reducir su contenido de humedad y variar la densidad de la muestra a experimentar, al igual que la relación aire combustible (cantidad de oxígeno dosificado) , con la finalidad de optimizar el proceso de combustión, mejorar el rendimiento y contribuir con información científica para considerar la biomasa como una fuente energética relevante y orientar las políticas energéticas hacia este importante recurso renovable. No se incursionará en el estudio de la peletización de la biomasa ya que el balance energético del

mismo tiene cuestionamientos, pues para este proceso es necesaria la generación de altas presiones que van en el rango de los 200 MPa, esto incrementa la temperatura de 100 a 150 °C. (LIPPEL, 2013).

Las muestras necesarias para la experimentación, serán tomadas de los cultivos de maíz existentes en las provincias de la costa del Ecuador, donde se genera la mayor producción de este tipo de biomasa (90% aproximadamente) de la producción total, (INEC, ECUADOR, 2012)

El proyecto concluirá al encontrar la mejor combinación de parámetros, para obtener del poder calórico inferior en condiciones eficientes, mediante el uso del calorímetro adiabático Gallenhanp, el mismo que está diseñado para utilizar ácido benzoico como patrón de referencia energética, el cuyo poder calórico es conocido. (Peralta & Tobar Vaca, 2006).

## CAPÍTULO 2. MARCO TEÓRICO Y ESTADO DEL ARTE

### 2.1. RECURSO ENERGÉTICO BIOMÁSICO EN ECUADOR

La biomasa posee una gran cantidad de energía absorbida por medio del proceso conocido como fotosíntesis, fenómeno en el cual el reino vegetal absorbe y almacena gran parte de la energía del sol que se distribuye a lo largo del globo terráqueo, como se puede observar en la Figura 7

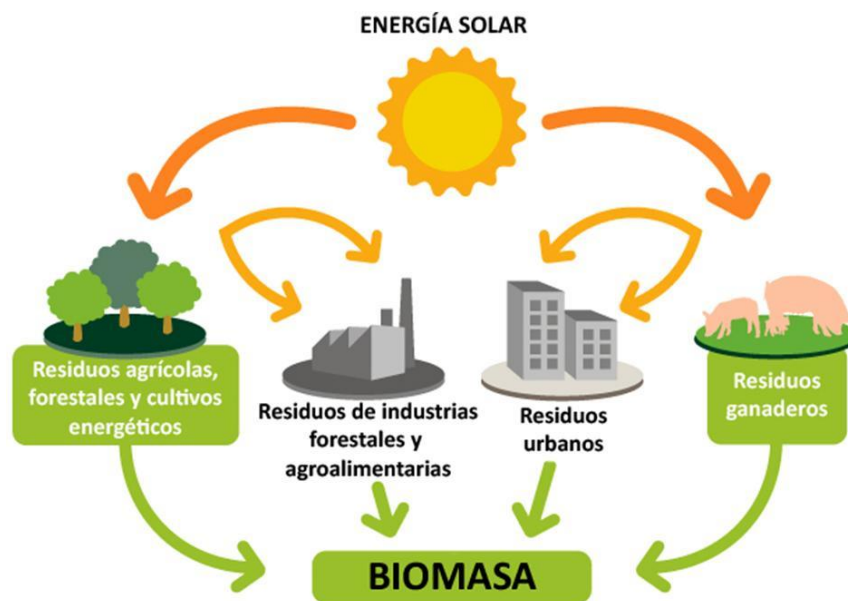


Figura 7. Ciclo energético de la biomasa.

Fuente Proyecto latino org

En investigaciones realizadas por la empresa agroindustrial se ha podido constatar que la inmensa cantidad de bagazo existente en los ingenios azucareros Figura 8, es equivalente a los residuos agrícolas que existen en la industria del aceite de palma, Figura 9, como son Fibra, cuesco, raquis o tuza y que son utilizados no necesariamente para su transformación en

energía térmica sino también en energía eléctrica mediante sistemas de cogeneración de última tecnología. (Corporación para la Investigación Energética, 2013)



**Figura 8. Desecho agrícola de caña (bagazo).**

**Fuente: Ingenio Valdez**



**Figura 9. Caldero de cuezco de palma.**

**Fuente Skinner del Ecuador.**



Alfredo Mena, ingeniero eléctrico y presidente de la Corporación para la Investigación Energética, destaca el valor energético de la biomasa y señala que la producción de electricidad a partir de fuentes renovables de biomasa no contribuye al efecto invernadero. De hecho, el dióxido de carbono liberado por la biomasa es después absorbido por las plantas durante su crecimiento. (Corporación para la Investigación Energética, 2013)

Según La Corporación citada en el país, los residuos agrícolas abundantes son el banano, café, cacao, flores, palmito, maíz duro, maíz blando, cascarilla de arroz, papas y otros. Como se ha explicado tanto en antecedentes como en la justificación del proyecto estas fuentes energéticas biomásico no han sido explotadas aun, Figura 10.



**Figura 10. Deshechos agrícolas en Ecuador.**



Como Plan piloto de investigación la corporación para la Investigación energética en cooperación con el INIAP regional la Concordia, implemento una planta de gasificación de residuos de arroz, café y palma africana, el gas de síntesis producto del proceso Figura 11, es empleado en un generador con capacidad de 30kW, accionado por un motor de combustión interna. (Corporación para la Investigación Energética, 2013), esta planta puede brindar energía a unas 30 familias del sector, y su vida útil será también prolongada ya que el gas utilizado como biocombustible pasa por un proceso de filtrado en cinco estaciones, la procedencia de este tipo de tecnología es Indú.

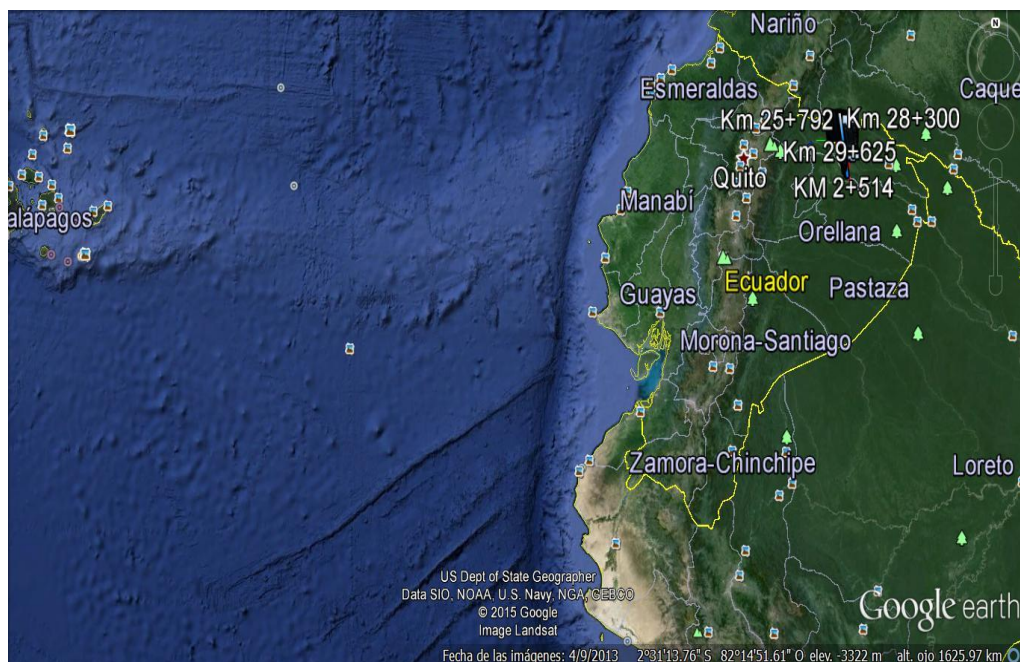


**Figura 11. Gasificador downdraft. La Concordia.**

**Fuente: CIE**

Gracias a su ubicación geográfica privilegiada, y su variedad climática que va desde los glaciares al calor de la sabana costera, Figura 12, el Ecuador ha desarrollado una naturaleza agrícola arraigada a su población rural, donde se puede encontrar un alto número de hectáreas de tierra

cultivadas con plantaciones principalmente de todas las variedades de Plátano, Palma Africana, Caña de Azúcar, Cacao, Arroz y Maíz, en la costa, en la Sierra una producción agrícola basada en tubérculos como la papa, cebolla, ajo, remolacha, toda clase de leguminosas, estas al momento de su preparación para la venta generan un gran porcentaje de residuo el mismo que por su alta humedad es desechado en los mercados. En la región Oriental o amazónica la producción de madera, yuca inclusive en la actualidad la plantación de palma africana en desmedro de los bosques primarios y la actividad maderera han generado un gran impacto ambiental, que ha determinado incluso un cambio en la cultura ancestral de sus pobladores nativos.



**Figura 12. Fotografía Satelital del Ecuador.**

**Fuente: Google Earth**

Según el INEC, en la encuesta realizada en el año 2010 sobre las superficies de Producción Agropecuaria se reveló que el Ecuador posee 7,3

Millones de hectáreas cultivadas concentradas principalmente en las provincias Manabí, Guayas, Loja, Los Ríos y Esmeraldas. De estas 280 000 hectáreas son utilizadas para el cultivo de Maíz con una producción de 1,7 millones de toneladas por año hasta el 2014 como se indica en la Figura 13. (INEC,ECUADOR, 2012).



**Figura 13. Sembríos de Maíz en la costa ecuatoriana.**

**Fuente: El Comercio**

Realizada la cosecha de los diferentes productos agrarios los residuos sobrantes, al separar los frutos son de gran magnitud y generalmente existen agroindustrias que se encargaran de realizar una separación última antes de que los frutos entren a su proceso final, todas estas fases generan gran cantidad de residuos en este caso orgánicos los que se constituyen en biomasa residual, la misma que podría utilizarse como un vector energético como se puede observar en la Figura 14.





**Figura 14. Trituración de la caña y obtención del bagazo.**

**Fuente: Ingenio San Carlos**

En la actualidad en el Ecuador, son los ingenios azucareros ubicados en distintas provincias, los que utilizan la biomasa de caña es decir el bagazo, con fines de generación energética, tanto térmica como eléctrica, en párrafos anteriores se informa que existe gran cantidad de biomasa residual entre ellos la tusa de maíz, la cual se quema a cielo abierto lo que emite al ambiente el CO<sub>2</sub> acumulado durante la vida de la planta. (Barriga & Balseca, Deposito de documentos de la FAO, ECUADOR, 2013)

Según el MAGAP referente a los cultivos en el país, mantiene una base de datos detallada sobre información productiva por hectárea con esta información es posible determinar los diferentes lugares con mayor o menor producción agrícola con lo que indirectamente se cuenta con cifras sobre biomasa residual tanto de los otros cultivos como los del maíz, motivo de estudio del proyecto.

La CIE ha efectuado un levantamiento adicional y complementario para generar reportes como inventarios de biomasa en las provincias de Los Ríos, El Oro y Pichincha, que proporciona cifras reales sobre biomasa existente en cada una de estas provincias, los diferentes cultivos, la cantidad de residuos y propiedades físico-químicas. (Corporación para la Investigación Energética, 2013).

El cultivo del maíz en general produce una gran cantidad de biomasa, de la cual el grano representa el 50%, el resto corresponde al tamo de maíz. La proporción entre las diferentes componentes del tamo (cañas, hojas, chalas y tusas), depende principalmente de la variedad, nivel de fertilización y tipo de cultivo, como se puede ver en Tabla 1 la tusa en promedio representa el 11.8% del total de la espiga. (Pasturas de América, 2011).

**Tabla 1.**

**Proporción de los diferentes componentes de una planta de maíz**

<b>Componente</b>	<b>Porcentaje del peso seco del maíz</b>
Panoja	12.0
Tallos	17.6
Chalas	8.9
Total caña	38.5
Mazorca	11.8
Grano	49.7
Total espiga	61.5

**Fuente: (Pasturas de América, 2011)**

Para la realización de un estudio serio del Poder Calorífico de la biomasa seleccionada, un factor a considerar es el contenido de humedad, ya que el agua presente en la biomasa se encuentra en dos formas: como agua ligada y como agua libre o absorbida.

El agua ligada se encuentra en la biomasa como agua de cristalización (en los hidratos) o ligadas a las a las proteínas.

El agua libre se encuentra absorbida en la biomasa sostenida por fuerzas capilares. Esta agua es la que se va a remover pues ella representa el contenido de humedad. (FAO, 1993).

## 2.2. COMBUSTIÓN DE LA BIOMASA

En tiempos ancestrales la combustión de la biomasa tradicional como es la leña, bagazo, tusa, etc. se la realizaba de una manera muy artesanal mediante fogones (ver Figura 15); en donde se observa que la quema de la biomasa es ineficiente, con desperdicio de energía ya que la transferencia de calor por convección es la pérdida de energía con mayor peso en el proceso, el área de contacto para una transferencia de calor por conducción que es la calentará los alimentos o el agua, se reduce al piso de la olla y una parte lateral de la misma. En la actualidad se comercializan ya dispositivos tecnificados que han aumentado su eficiencia y también sirven para el uso de biomasa tratada como son las briquetas y los pellets, tecnología para una combustión limpia Figura 16. (Barriga, Aplicaciones de Biomasa, 2007)



**Figura 15. Fogón Antiguo.**

**Fuente: Teorema ambiental**



**Figura 16. Cocina de leña eficiente.**

**Fuente: PinStake**

Al realizar un análisis de los métodos tradicionales de combustión se verifica su baja eficiencia ya que el desperdicio de calor generado en un caso y su aplicación en el calentamiento de aire en otro, dio paso a modificaciones sucesivas de cada dispositivo para enmendar estas pérdidas energéticas irreversibles. (Biomass Users Network, 2002).

Lo expuesto en el párrafo anterior se puede verificar a simple vista al realizar un análisis técnico de los dos modelos de consumo biomásico, en el segundo caso existe un aprovechamiento energético muy amplio, es decir la eficiencia del sistema es muy elevada, traduciéndose esto inclusive en un menor consumo de materia prima, sea esta cualquier tipo de biomasa.

Para ayudar a evitar las pérdidas energéticas se debe realizar una combustión rica en oxígeno, mediante la entrada de mayor cantidad de aire al quemador, así la tusa o cualquier tipo de biomasa se combustionara de mejor manera, y se tendrán subproductos como ceniza, con una menor cantidad de emisión de gases productos de la transformación termoquímica y material particulado. (Barriga & Balseca, Deposito de documentos de la FAO, ECUADOR, 2013).

Los diseñadores e ingenieros que construyen y desarrollan sistemas eficientes de combustión para evitar la contaminación han perfeccionado algunos tipos de sistemas mediante modelos de transferencia de calor y conceptos convectivos para la quema de combustibles biomásicos sólidos que generen la cantidad necesaria de calor incluso para quemar también los gases producto de la combustión. Estos sistemas se detallan a continuación:

- Sistemas de alta temperatura, en las que se alcanzan temperaturas lo suficientemente altas como para quemar inclusive los gases de combustión. Ver Figura 17.



**Figura 17. Sistema de alta temperatura para secado de biomasa.**

**Fuente: LIPPEL.**



- Sistemas de doble combustión, en donde se vuelve a inyectar a la cámara los gases producto de la primera combustión (Figura 18), es decir se recupera calor por mediante el principio de regeneración.



**Figura 18. Chimenea de un sistema de combustión doble.**

**Fuente: Blog sobre Energías Renovables**

- En la Figura 19 se observa un sistema de combustión Catalítico, en donde se utiliza un catalizador el mismo que obliga a los gases de combustión a quemarse a temperatura más baja.



**Figura 19. Sistema de combustión catalítico.**

**Fuente: Universidad de Oviedo**

- Sistema de quema de pellets, que también puede ser utilizado en el caso de la tusa, aquí se permite una mayor cantidad de entrada de aire lo que causa el inconveniente de no poder controlar la generación de calor en la cámara como se indica en la Figura 20, esto hace que se introduzca la menor cantidad de biomasa y se queme a más alta temperatura. (Instituto Nacional de tecnología industrial, 2011)



**Figura 20. Combustor de pellets.**

**Fuente: Eurofontanilla**

Las tecnologías desarrolladas para la combustión y aprovechamiento de la tusa de maíz se describen a continuación en la Tabla 2

Tabla 2.

**Tecnologías posibles a aplicar para el aprovechamiento de la biomasa residual de maíz.**

<b>Tecnología</b>	<b>Descripción</b>
<b>Pirólisis</b>	Proceso de descomposición térmica de materia orgánica, causado por el calentamiento en ausencia de oxígeno u otros reactivos
<b>Gasificación</b>	Es la reacción de combustibles sólidos con aire, vapor, hidrógeno, etc.; para dar un producto gaseoso que se utiliza como fuente de energía o como materia prima para síntesis orgánicas
<b>Termólisis</b>	Proceso en el cual se utiliza calor indirecto para convertir los materiales sólidos en orgánicos
<b>Combustión</b>	Secuencia de reacciones químicas entre combustible y un oxidante generalmente aire, por las cuales se libera energía calórica y luminosa en un ambiente confinado. La zona donde tiene efecto se denomina cámara, hogar u horno de combustión
<b>Fermentación</b>	Es un proceso catabólico de oxidación incompleto, totalmente anaeróbico, el producto final es un compuesto orgánico. Estos productos finales son los que caracterizan los diversos tipos de fermentaciones
<b>Digestión Anaerobia</b>	Es un proceso de degradación de materia orgánica en ausencia de aire. Este proceso lo llevan a cabo microorganismos anaerobios que actúan en el interior de un biodigestor

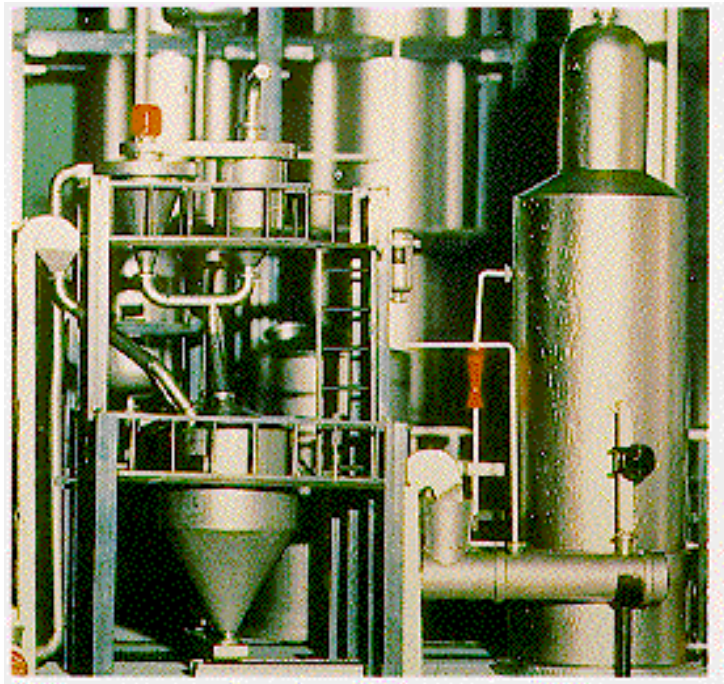
**Fuente: (Guerrero Contreras & Gamboa Niño, 2009)**

A continuación se detalla las tecnologías descritas en la Tabla 2:

### 2.2.1. PIRÓLISIS.

El proceso de pirólisis mediante el cual la biomasa se carboniza con escasa o nula presencia de oxígeno, en el que se alcanza temperaturas que pueden llegar hasta los 500°C.

Al realizar este proceso se obtienen dos subproductos importantes, el gas pobre o llamado Syngas y el carbón, este último puede poseer un poder calórico o densidad energética mayor al de la biomasa usada como materia prima para el proceso, el Syngas si se lo recupera de una manera tecnificada puede utilizarse para la obtención de calor o electricidad en motores de combustión interna o quemadores que generan potencias de hasta 10 MW y eficiencias que van entre el 60% - 70%, en turbinas a gas, donde por el proceso, en si del ciclo Brayton estas eficiencias serán más altas y aumentaran si se utilizan ciclos combinados de alta eficiencia. Figura 21. (International Energy Agency , 2008)



**Figura 21. Planta de pirólisis.**

Para obtener una combustión anaerobia, en donde se produzca el proceso termoquímico de pirólisis se utiliza una caldera o mufla (Figura 22), con este procedimiento se obtiene como se explicó en el párrafo anterior Syngas cuyos componentes principales son hidrógeno con hidrocarburos diferentes al metano y la generación de cenizas se reduce a un rango del 2% al 4%. (International Energy Agency , 2008) .



**Figura 22. Horno mufla de pirólisis.**

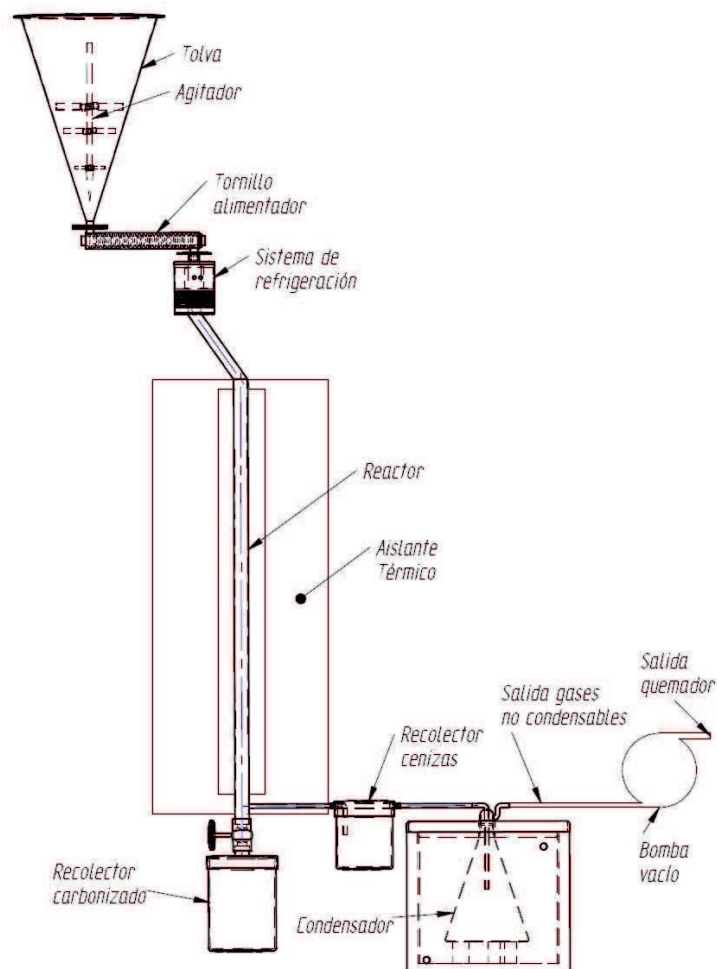
**Fuente: Direct Industry**

El uso del proceso de pirólisis como se sabe no es nuevo y su uso es ya conocido desde épocas atrás en la producción de carbón vegetal, con el inconveniente del empleo de mucho tiempo y recursos energéticos para su obtención. En la actualidad se habla ya de un sistema de pirólisis rápida el mismo que tiene un alto rendimiento en la conversión de líquidos ya que facilitan su almacenamiento y transporte y esta es la diferencia entre la pirólisis lenta vs a la pirólisis rápida. (Arteaga, Arenas, Lopez, Sanchez, & Zapata, 2012)

Según los mismos autores las características principales de la pirólisis rápida son las siguientes:

- Altas tasas de calentamiento
- Alta transferencia de calor
- Calentamiento rápido a 500° C
- Enfriamiento rápido de vapores para obtener bio aceite

En la Figura 23 se puede observar el diagrama del equipo utilizado por los autores Arteaga et al.



**Figura 23. Planta para pirólisis rápida.**

**Fuente: Revista Biotecnología en el Sector Agropecuario y Agroindustrial**

### 2.2.2. GASIFICACIÓN

Los sistemas de gasificación se usan ya desde muchos años atrás por que han demostrado ser una alternativa para resolver los diferentes problemas energéticos sobre todo en sectores rurales y comunidades aisladas del sistema eléctrico, si se adiciona a esto la continua oscilación de los precios del petróleo, fuente energética principal en el mundo globalizado y principal causante de los problemas ambientales, como el calentamiento global, contaminación de ríos, mares, lagos y tierra, no solo en el país sino también en el orbe, se ha producido un crecimiento del interés por las fuentes renovables de energía, de las cuales, la biomasa en general como residuos de madera, residuos agrícolas, es el más disponible en muchos países en desarrollo de estas vías de energías alternativas (Jácome & Lanas, 2015).

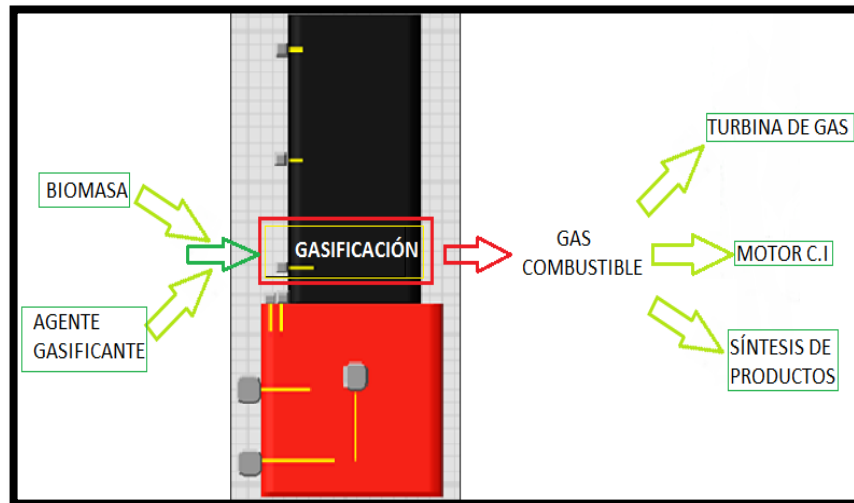
En el Ecuador el sector energético proporciona al Estado cerca del 50% de ingresos presupuestarios. La dotación de biomasa (leña más residuos vegetales) fluctúa entre 5 y 6% del total de las fuentes primarias de energía según datos recientes de CELEC EP - Corporación Eléctrica del Ecuador.

La gasificación es otro proceso termoquímico que utiliza a la pirólisis, en el que un residuo orgánico (biomasa) es transformado en un gas combustible de bajo poder calórico llamado gas pobre o syngas, mediante una serie de reacciones químicas que ocurren a una temperatura determinada en presencia de un agente gasificante como se puede observar en la Figura 24 (aire, oxígeno y/o vapor de agua). (Tamayo, 2012)

El proceso de gasificación esta en dependencia de varios factores físicos, geométricos e inclusive químicos, y se enlistan a continuación:

- Tamaño de partículas
- Forma del residuo
- Componentes químicos como la lignocelulosa
- Aprovechamiento energético (proceso)
- Condicionantes económicos. (Espinoza, 2011)





**Figura 24. Esquema de un gasificador tipo Downdraft.**

**Fuente: (Jácome & Lanas, 2015)**

### **Clasificación de los procesos de gasificación.**

Uno de los parámetros importantes para mejorar la densidad energética del gas producto de la gasificación, es el agente gasificante, entendiéndose como el gas que se utiliza en el proceso termoquímico para la producción de un gas combustible a partir de un sustrato carbonoso como la biomasa

Basándose en el agente gasificante empleado se puede establecer una primera clasificación de los procesos de gasificación (Basu, 2010):

**Con aire:** La combustión parcial con el aire da lugar a una reacción exotérmica cuyo producto es un gas de bajo poder calorífico, susceptible de ser aprovechado con fines de carácter energético.

**Con oxígeno:** Se produce un gas de poder calorífico medio, de mayor calidad al no estar diluido con  $N_2$ . Además de aplicaciones de carácter energético, puede utilizarse como gas de síntesis para la obtención de metanol.



**Con vapor de agua y/o oxígeno (o aire):** Se produce un gas enriquecido en  $H_2$  y CO que se puede utilizar como gas de síntesis para diversos compuestos (amoníaco, metanol, gasolinas, etc.).

**Con hidrógeno:** Se produce un gas de alto contenido energético que, por tener altos porcentajes de metano, puede utilizarse como sustituto del gas natural.

En los sistemas de gasificación se tiene varias zonas, donde se producen los diferentes procesos termoquímicos, estos se exponen en la Figura 25 a continuación:



**Figura 25. Procesos termoquímicos de un gasificador**

Existe otra clasificación de los procesos de gasificación y es la que utiliza como criterio el movimiento entre el agente gasificante y el sólido gasificado en el interior del gasificador. Al basarse en este criterio los principales tipos de gasificadores son:

### **Lecho móvil en corrientes paralelas.**

Este tipo de gasificador es el llamado Downdraft, el gas y el sólido fluyen a través del lecho, sostenido de una disminución del diámetro denominada garganta, a la altura del cual viene introducido el agente oxidante el cual es generalmente aire. En la zona de alrededor de la garganta se alcanzan temperaturas de alrededor 1000 C, y aquí es donde se produce el craqueo del tar, el mismo que se produce por efecto de la pirólisis (Proenza, Cala, Silveira, & Zansi, 2006).

El gasificador expuesto en la Figura 26 es diseñado por la firma estadounidense ALL POWER LABS, la misma que realiza investigación de esta tecnología y ha desarrollado algunos prototipos, de los cuales uno de ellos se encuentra en los patios del Laboratorio de Motores de la Universidad de las Fuerzas Armadas –ESPE.

La ventaja principal de este tipo de gasificador radica en la poca producción de alquitranes, mientras que la desventaja primordial es que no puede trabajar con biomasa con rangos de humedad muy altos, generalmente trabaja en forma óptima entre un 12% y un 20%



**Figura 26. Gasificador Tipo Downdraft.**

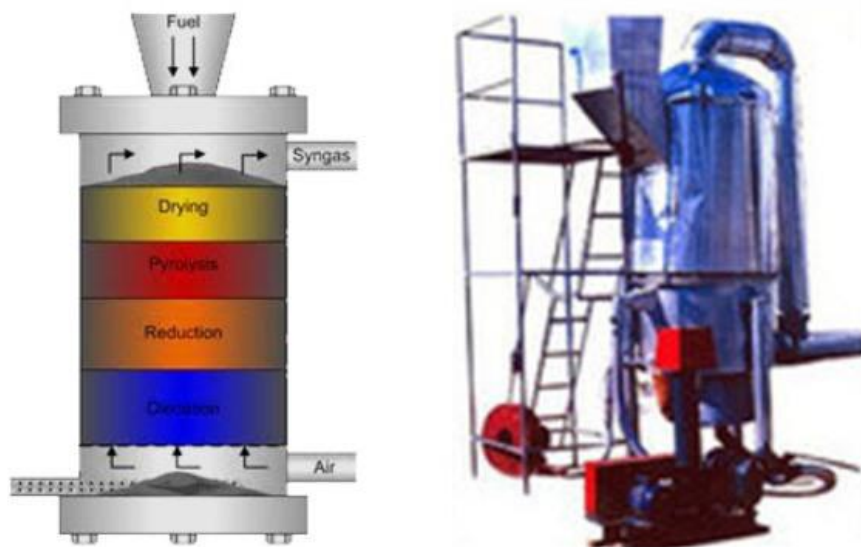
**Fuente: All Power Labs.**

### **Lecho móvil en contracorriente.**

Este tipo de gasificador es llamado de tipo Updraft, la biomasa ingresa por la parte superior del reactor y descendiente a través de él, se somete al igual que en el tipo de gasificador anterior a los procesos termoquímicos de secado, pirólisis, reducción y oxidación. El aire entra por la parte inferior del gasificador, asciende para salir finalmente el gas pobre producto de la descomposición termoquímica, por la parte superior, este gas es forzado para que salga del gasificador mediante un sistema de presión negativa que genera depresión en la parte más baja del sistema de acondicionamiento del gas, Todo esto es necesario para evitar obstrucciones de las líneas que transportan el gas.

Al igual que en el sistema “downdraft”, el sistema “updraft” es un proceso termoquímico para la transformación termoquímica de la biomasa en un combustible gaseoso de bajo poder calórico como se representa en la Figura 27, que puede sustituir a otros de origen fósil. Por ser un gas, su combustión será de elevado rendimiento, bajas emisiones a la atmósfera y fácil control.

Esta tecnología presenta la ventaja de que no requiere un pretratamiento excesivo de la biomasa a emplear, es válida para un amplio intervalo de tamaños, elevados porcentajes de humedad (hasta con el 50% de humedad en base húmeda) y bajo punto de fusión de cenizas como la paja de cereal, ya que se puede controlar la temperatura de la zona de oxidación mediante la humidificación del agente de gasificación. (BIOENERGY INTERNATIONAL, 2010)



**Figura 27. Gasificador tipo Updraft.**

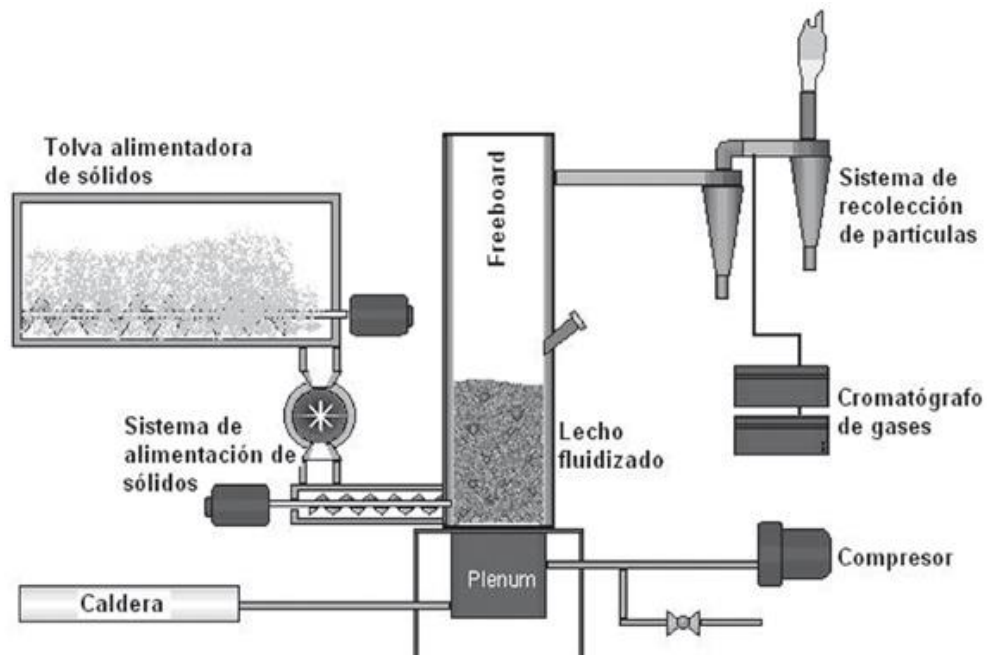
**Fuente: Albiz**

### **Gasificador de lecho fluidizado.**

La fluidización es un fenómeno que se conoce en el área energética y tuvo su inicio en la industria a comienzos de los años cuarenta, con los procesos termoquímico de craqueo catalítico por lo que desde aquella época, se ha empleado en muchas otras áreas. En el trayecto de su desarrollo, la fluidización ha congregado esfuerzos de gran cantidad de investigadores, de tal manera que son muchos los estudios y artículos que se han sido publicados sobre el tema (Gomez, 2010).

De lo expuesto se desprende que hoy en día una de las aplicaciones en lo referente a investigación es la gasificación de combustibles, como biomasa o carbón, en lechos fluidizados con el fin de obtener combustibles menos contaminantes (Gomez, 2010).

En la Figura 28 se observa una planta típica de gasificación de biomasa por lecho fluido



**Figura 28. Sistema de gasificación de lecho fluidizado.**

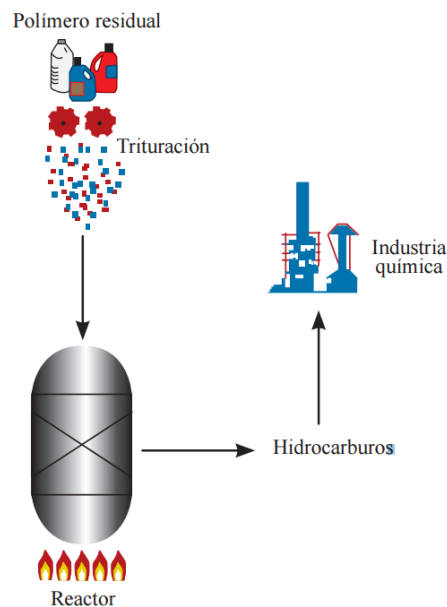
**Fuente: (Yepez & Chejine, 2012)**

Los sistemas de gasificación de biomasa permiten convertir la energía química de la biomasa en energía eléctrica, al accionar motores de combustión interna o turbinas de gas. Además, el calor que se produce en el proceso (especialmente en la refrigeración y limpieza del gas y refrigeración del motor) pueden ser recuperados y utilizados por medio de un sistema de cogeneración, puesto que están normalmente en rangos de temperatura del orden de los 80~100°C energía que sería ideal para calentamiento de agua sanitaria. (Jácome & Lanas, 2015)

Los costos de inversión para esta tecnología están entre 1.200 y 3.700 USD/kW, con costos de operación del orden de 894 USD/kW al año. El costo medio de la energía es del rango de 14,8 a 21,8 centavos USD/kWh. (International Energy Agency , 2008)

### 2.2.3. TERMÓLISIS

Los tratamientos termolíticos degradan los polímeros para dar lugar a mezclas de hidrocarburos que puedan utilizarse como materias primas en la industria química o como combustibles. La Figura 29 muestra un Esquema general de este tipo de procesos, que se comentan a continuación. (Aguado, Serrano, Escola, & Briones, 2011)



**Figura 29. Proceso de termólisis en plásticos.**

**Fuente: (Aguado, Serrano, Escola, & Briones, 2011)**

### 2.2.4. FERMENTACIÓN

Este proceso consiste en la transformación química del carbono acumulado en las plantas, como consecuencia de la fotosíntesis que absorbe energía solar, en alcohol por medio de fermentación en diferentes fases según el tipo de biomasa. La fase de costo energético más elevado es la de destilación que contribuye a que el balance energético de la técnica puede o no cumplir los parámetros renovables. Los productos obtenidos son

biocarburantes como se muestra en la Figura 30, como el bioetanol o el biodiesel, utilizados como combustibles alternativos a los fósiles (Avila, 2009).



**Figura 30. Fermentación de biomasa.**

**Fuente: Bgreenproject**

### 2.2.5. COMBUSTIÓN DE LA TUSA DE MAÍZ.

Investigaciones realizadas por investigadores como Keener, por el año de 1981 demostraron que la tusa de maíz es un excelente combustible y contribuye a reducir las necesidades energéticas para una parte del proceso de secado del grano de maíz.

La energía proveniente de la tusa seca se emplea, también, para secar las tusas húmedas. La tecnología utilizada para la quema de las tusas se basa en un horno especial, de dos etapas (gasificación y combustión), aquí los gases de combustión son utilizados para mezclarse con el aire de secado, y se alcanzan temperaturas de 90 a 110°C en la secadora de granos.

En una investigación, Keener propone un consumo específico de energía de unas 1 500 kcal/kg de agua en fase gaseosa, y una eficiencia de combustión entre 80 y 85%. (Keener, 1981)

En párrafos anteriores se mencionó que el rendimiento de una hectárea de maíz, 6000 kg de grano producirá una tonelada de tusas; como el calor de combustión de las tusas secas es de unas 3 600 kcal/kg (15,1 kJ/kg), la capacidad térmica de las tusas será de 3 600 000 kcal, suficiente para secar dos o más hectáreas de maíz con 20% de humedad inicial (El poder calorífico de la tusa de maíz con 20% de humedad reportado en la bibliografía es 15.1 kJ/g) (Food and Agriculture Organization for de United Nation, 1998).

Otro tipo de biomasa importante es la cascarilla de arroz la cual tiene una forma cariósida y su tamaño puede variar, aproximadamente se encuentra entre 4 a 14 mm de longitud, de 2 a 4 mm de ancho y un espesor de 50µm; Figura 7. Tiene una apariencia uniforme en el exterior pero microscópicamente denota una superficie rugosa con crestitas, esto influye a que el aire quede atrapado en los intersticios e interviene en la humedad de la cáscara. El rango de peso de la cascarilla se encuentra entre 2.9 a 3.5 mg en una base seca. (Echeverría Cruz & López Mena, 2010).

### **2.3. BOMBA CALORIMÉTRICA ADIABÁTICA**

La tecnología existente tanto en dispositivos como en equipos comerciales, industriales y/o de laboratorio para operar utilizan un combustible en cualquiera de sus tres fases, esto es sólida líquida o gaseosa, como fuente principal de energía del cual su característica primogénea es el llamado Poder Calórico definido como la cantidad de calor liberado cuando se quema por completo una cantidad unitaria de combustible y los productos de combustión se enfrían a temperatura ambiente (Cengel, 2009)

En consecuencia se puede decir que cada combustible poseerá un poder calorífico característico, sin quedar exenta la biomasa de este precepto ya que en la literatura estudiada se ubica información referente a los Poderes Calóricos de muchos combustibles, tanto fósiles como orgánicos; lo que no



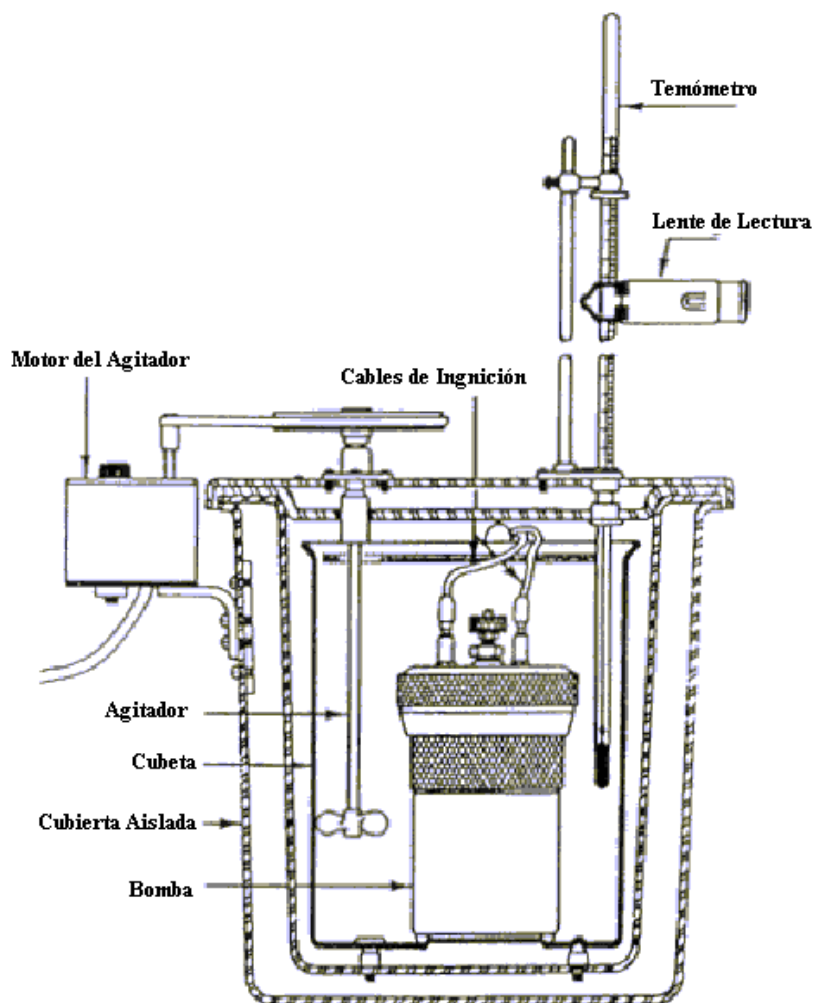
quita la posibilidad de que el valor de este parámetro característico, pueda variar al depender de algunos factores, como son (Cengel, 2009):

- El proceso de producción del combustible
- La materia prima usada para obtenerlos.
- Condiciones ambientales
- Humedad.

Con la variación de estos parámetros es posible por ejemplo que la gasolina expendida en las diferentes gasolineras no tenga el mismo Poder Calorífico, o más aun la leña extraída de un lugar no tenga el mismo Poder Calorífico que el extraído en un bosque. Por estas razones se vuelven muy importantes las mediciones del Poder Calorífico de las distintas materias primas utilizadas como combustibles, y para su determinación se usa la llamada Bomba Calorimétrica Adiabática

El principio de funcionamiento de la Bomba Calorimétrica Adiabática es la transferencia de calor y es con este equipo que se puede determinar el calor de combustión de una sustancia líquida o sólida, sus elementos principales se muestran en la Figura 31 y son los siguientes:

- Recipiente Adiabático
- Vaso cilíndrico
- Dos válvulas para entrada de oxígeno y salida de gases combustión.
- Crisol para la muestra
- Termistores
- Termómetros
- Agitador
- Bomba
- Cables de ignición



**Figura 31. Bomba Calorimétrica Adiabática**

**Fuente: Escuela de Ingeniería Química, Universidad de Costa Rica**

La Bomba Calorimétrica es un instrumento que utiliza una transferencia de calor como principio de funcionamiento, se la utiliza para la determinación del calor de combustión de una sustancia al quemarse a volumen constante.

La bomba calorimétrica se compone de un recipiente adiabático que contiene una cuba metálica con una cantidad conocida de agua que constituye el ambiente del calorímetro, esta sirve para proteger de cambios de calor y mantener la adiabaticidad, en el interior se introduce el vaso de reacción, conocido como bomba calorimétrica, el cual es un cilindro provisto

de una tapa atornillada. En la tapa se encuentran dos válvulas, una de ellas se emplea para llenar la bomba con oxígeno, mientras que la otra se utiliza para dar salida a los gases de combustión después de realizada la prueba, en el interior de la bomba se encuentra el crisol donde se coloca la cápsula o pastilla con un peso determinado de la sustancia que se va a probar posee, un alambre de ignición (aleación de níquel-cobre) el cual sirve para hacer la conexión de los electrodos con la pastilla. La bomba se llena con oxígeno proveniente de un cilindro, provisto de un manómetro regulador de presión este se adapta a las aberturas de llenado de la bomba, el recipiente adiabático va montado en un soporte que sostiene los mecanismos de accionamiento del agitador, así como al termómetro

El balance energético que se realiza en el calorímetro es mediante la aplicación de la Primera ley de la termodinámica al proceso de combustión a volumen constante y con los factores anteriores, donde se obtiene la siguiente ecuación:

$$H = \frac{M_s C_{vs} \Delta T - e_1 - e_2}{M_c}$$

$$e_2 = mh$$

Donde:

$M_s$  = masa de la bomba calorimétrica

$C_{vs}$  = Calor específico promedio de la bomba

$\Delta T$  = variación de temperatura

$H$  = Poder Calórico del combustible.

$e_1$  = corrección de calor que libera la formación de ácidos

$e_2$  = corrección de calor generado por la combustión

$m$  = masa del filamento

$M_c$  = masa del combustible.

## **2.4. ESTADO DEL ARTE DEL PODER CALORÍFICO DE LA BIOMASA**

A continuación se detallan cronológicamente varios trabajos de investigación relacionados a la biomasa en general y a la Biomasa producto de los residuos de maíz. Estos estudios ponen especial énfasis en diferentes aspectos de la biomasa como son: análisis fisicoquímico, análisis energético, peletización y manejo.

Harold Keener en 1981 realiza un estudio en el que se determina el poder calórico de la tuza de maíz y que es muy eficaz al ser usado como fuente energética para el secado de los granos cosechados, aquí se determina que su poder calórico es de 15,1 MJ/kg.

En el informe presentado por Maslatón, se presentan normas para la fabricación de pellets para la madera entre los cuales se puede citar diámetros de 4 a 10 mm, longitud menor que cinco veces el diámetro, densidad volumétrica menor que 1.12 kg/m<sup>3</sup>, aditivos menor al 2%, y con humedad menor al 10% todo esto con el objetivo de normalizar y facilitar el transporte y manipulación. También se presenta tecnologías utilizadas para el diseño y construcción de sistemas eficientes para combustión de biomasa.

Según Willaipon la biomasa constituye una de las fuentes primarias energéticas que puede constituirse como parte importante de las soluciones ambientales viables ya que representa aproximadamente el 14% del consumo total de energía en el mundo. Se recalca que la biomasa cumple con el ciclo de carbono por lo tanto no contamina ni aumenta el CO<sub>2</sub> en la atmósfera. Entre los varios tipos de biomasa, los residuos agrícolas se han convertido en una prometedora alternativa como fuente energética (Wilaipon, 2007).

En un estudio realizado en los EEUU por Graham, se desarrollan técnicas para una utilización sostenible de los residuos de maíz. EEUU con una producción anual 196 millones de toneladas de granos de maíz, produciría 196 millones de toneladas de residuo para lo cual se desarrollan

cinco técnicas de recolección sostenible, la primera considera la cantidad de residuo por hectárea, la segunda calcula la cantidad de residuos necesarios para mantener la sostenibilidad y los tiempos de rotación del maíz en las prácticas de labranza, la tercera calcula la cantidad de residuos aptos para recolección, la cuarta calcula el costo de recolección y la quinta la cantidad de residuos en base a la producción. (Graham, Shehan, & Wright, 2007).

Lopatinsky en el año 2008 realiza un estudio sobre la factibilidad de obtener un biocombustible a partir del maíz mediante una reacción que convierte los almidones en alcohol etílico a partir de una enzima hidrolítica (alfa amilasas) y fermentación posterior con levaduras donde obtuvo por destilación un alcohol de 96 grados. (Lopatinsky Prado, 2008).

En la Universidad Industrial de Santander, Guerrero y Gamboa realizan un análisis fisicoquímico comparativo de los diferentes tipos de residuos provenientes de maíz, de los cuales para la tusa los más relevantes son: humedad inicial 29,41%, contenido de azufre 0,22%. De los diferentes residuos de maíz estudiados en este proyecto la tusa tiene el menor poder calórico inferior, 14,73 kJ/g. y la hoja seca el mayor con 18,58 kJ/g. Mediante una ecuación matemática (HVMST) evalúa tres tecnologías energéticas, pirólisis, gasificación y combustión, y concluye que la mejor tecnología para aprovechar los residuos de maíz es la combustión (Guerrero Contreras & Gamboa Niño, 2009).

En Cali en la Universidad Autónoma de Occidente Villada y Mosquera en su proyecto de titulación realizan un estudio de combustión de biomasa en un dispositivo de lecho fluidizado, con utilización de cascarilla de arroz, y concluyen que este método presenta ventajas sobre la combustión tradicional como por ejemplo: temperatura uniforme en el lecho, mejor eficiencia en la transmisión de calor, mayor inercia térmica del reactor, mejor superficie de contacto aire-sólido y mejor aprovechamiento de la biomasa. También realizan un estudio comparativo entre la gasificación, pirólisis y combustión. (Quinceno Villada & Mosquera Gutierrez, 2010).

Las características químicas encontradas mediante un análisis bromatológico arrojan como resultado que existe 1,22 % de cenizas, 56,13% de fibra en detergente ácido y 85,34 % de fibra en detergente neutro, 7,39 % lignina, con contenidos de celulosa 48,74% y 29,21% de hemicelulosa respectivamente, según el método Van Soest (Moreno, 2012).

Novoa Casares y un equipo de investigación de UPB de Montería realizan ensayos de briquetaje, con una mezcla de tusa y carbón y obtienen un aumento considerable del poder calórico de la mezcla pero por otra parte un aumento en la emisión de compuestos azufrados, debido al carbón utilizado, razón por la cual se investiga en briquetas con alto porcentaje de tusa y poco porcentaje de carbón para no bajar el valor del poder calórico significativamente. (Novoa Casares, 2012)

En un estudio de fuentes renovables energéticas se determina que la utilización de biomasa en calderos puede ahorrar hasta un 50% de las energías tradicionales, se cita además que en un estudio realizado en Alemania en el año 2012 se concluyó que el 70% de la energía producida por las fuentes primarias renovables proviene de la biomasa. En este informe también se cuantifica el coeficiente de residuos de varias biomásas, el maíz se sitúa entre 0.55-1,2, este valor está por encima del arroz y de la caña de azúcar y por debajo de la soya, del algodón y del trigo. (Barriga Rivera, et al., 2014)

De lo anterior expuesto se puede resumir:

- La biomasa es actualmente un recurso importante y se afianzará en el futuro como fuente de recursos energéticos.
- Las características fisicoquímicas de los diferentes tipos de biomasa son similares.
- Las características energéticas de los diferentes tipos de biomasa difiere sustancialmente y reflejan que el rastrojo de maíz está entre los valores más altos.

- Existe poca información sobre los diferentes factores que pueden influir en la combustión de los residuos de maíz y menos aún de la tusa (elote o merlo).
- Cuando se estudian factores como densificación se refiere exclusivamente a la formación de briquetas o pellets los cuales utilizan aglutinante en su fabricación.

Con todo este bagaje bibliográfico y científico se propone el presente estudio para considerar factores como la fuerza de compactación (densificación) de la pastilla que se utilizará como probeta en la determinación del poder calórico, pues cuando se expresan valores al respecto no se repara en aclarar este importante factor.

Por otro lado al tratarse de una reacción de combustión es importante el análisis de la relación aire-combustible utilizada es decir la dosificación del oxígeno, pues este agente es el componente oxidante en este proceso y la reacción no se produciría sin él.

Se espera que con este estudio se contribuya a llenar éstos vacíos existentes hasta la presente fecha.

## CAPÍTULO 3. DISEÑO DE LA EXPERIMENTACIÓN Y PROCEDIMIENTO

### 3.1. DISEÑO DE LA EXPERIMENTACIÓN

La organización del experimento activo para la elaboración de un buen resultado en la experimentación se basa en la obtención de la ecuación de regresión y ésta se realiza generalmente, por el método de planificación del experimento, un diagrama sencillo se muestra en la Figura 33. (Arzola Ruiz, 2000)

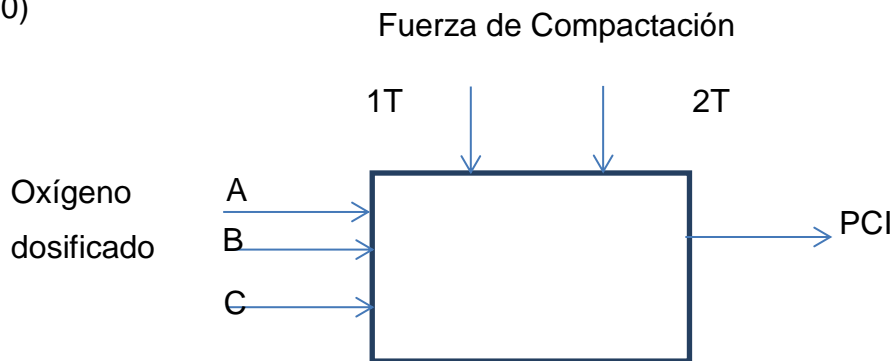


Figura 32. Modelación de variables



Las variables dependientes a utilizar son:

**Tabla 3.**  
**Diseño Experimental**

F[1T]		
[O2]<Esteq	Humedad 13,7%	PCI
[O2]=Esteq		
[O2]>Esteq		
F[2T]		
[O2]<Esteq	Humedad 13,7%	PCI
[O2]=Esteq		
[O2]>Esteq		

[O2]<Esteq Cantidad de Oxígeno dosificada menor al estequiométrico.

[O2]=Esteq Cantidad de Oxígeno dosificada igual al estequiométrico.

[O2]>Esteq Cantidad de Oxígeno dosificada mayor al estequiométrico.

## 3.2. EXPERIMENTACIÓN Y METODOLOGIA

### 3.2.1. RECOLECCIÓN DE LA MUESTRA Y MEDICIÓN DE LA HUMEDAD

En el presente proyecto se desarrolló en el campus Politécnico de Sangolquí perteneciente a la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, Sangolquí es Capital del cantón Rumiñahui y es aquí donde se encuentra el

llamado Valle de los Chillos, el mismo que toma el nombre por el cultivo ancestral de la variedad de maíz llamada Chillo (*Zea Mays L.*). De la cercanía a las fuentes de cultivo se obtuvo la biomasa para la investigación.

La biomasa para la experimentación se secó durante un año, la tusa tierna se adquirió en el momento de la experimentación, la humedad se midió con el higrómetro marca DUSIEC, modelo MD 812 con un rango del 5 al 40%, con una resolución de 1% . Figura 33.



**Figura 33. Higrómetro DUSIEC**

En el medio, existen otros tipos de muestras con un grado de humedad más alto, pero al momento de molerlas y compactar la biomasa para obtener la pastilla donde ocurre un efecto de escurrimiento con pérdida de humedad y masa.

Previa una trituración manual, Figura 34, las muestras se pulverizaron en un molino de harina de fabricación artesanal de la zona. Figura 35



**Figura 34. Pre-trituración manual de la tusa**



**Figura 35. Molino harinero utilizado para pulverizar la tusa**

El resultado es un polvo de grano muy fino y homogéneo que facilita la formación del pellet al momento de la compactación. Figura 36



**Figura 36. Polvo de tusa**

### **3.2.2. PREPARACIÓN DE LA MUESTRA**

Para obtener las pastillas se utilizaron 4 cilindros para el proceso de prensado con una fuerza de una y dos toneladas, este proceso se realizó en el laboratorio de resistencia de materiales en la máquina de ensayos universal MTS TK /T5002, como se puede apreciar en las Figura 37 y Figura 38.



**Figura 37. Máquina de Ensayos Universales**



**Figura 38. Disco de medición de fuerza y presión**

En este equipo se realizó la compactación de las muestras, se aplicó los parámetros para ensayos de compresión, de manera lenta y regular para que las matrices no se dañen, ya que los machos utilizados para la compactación fueron previamente pulidos en el laboratorio de metalurgia,

Este ensayo de compresión es poco frecuente en la realización de probetas o pastillas de biomasa para pruebas energéticas, y consiste en aplicar a la probeta, en la dirección de su eje longitudinal, una carga estática en este caso, como se explicó, de 1 tonelada y 2 toneladas, que provoca una reducción en el volumen de la biomasa de prueba, con incremento paulatino de la fuerza hasta llegar a la presión mencionada.

Se debe anotar que en el caso del material con el que fue construida las probetas y algunos otros materiales exhiben un comportamiento diferente en compresión que en tensión y en algunos casos estos materiales se utilizan principalmente para resistir esfuerzos de compresión.

Los cilindros matrices se construyeron en el laboratorio de procesos de manufactura según los requisitos de diámetro y altura para que cumpla con la geometría de la pastilla, las superficies fueron pulidas en varios pasos hasta obtener una superficie espejo, Figura 39, los cilindros se los puede observar en la Figura 40.





**Figura 39. Pulido de la superficie del émbolo**



**Figura 40. Geometría de Probetas**

Una vez elaboradas las pastillas se procede a rebajarlas y ajustarlas al peso de un gramo según el requerimiento para pruebas en la bomba calorimétrica adiabática, este proceso se realizó en la balanza de laboratorio de Física con una apreciación de 0,01 gramos como la que se observa en la Figura 41.



**Figura 41. Balanza Digital**

Elaboradas las pastillas, se las guardó en un lugar hermético ya que por el proceso de compactado, estas quedan ávidas por humedad y esto produce que las pastillas se destruyan al manipularlas

El siguiente paso fue preparar el equipo en el que se realizará la combustión en forma adiabática de las diferentes muestras preparadas. Este equipo se denomina Bomba Calorimétrica Adiabática, pertenece al laboratorio de Motores y sus especificaciones técnicas se presentan en la Tabla 4



**Tabla 4.**  
**Especificaciones técnicas**

Descripción	Especificación
<b>Voltaje</b>	110/120 V
<b>Frecuencia</b>	60 Hz.
<b>Amperaje</b>	20 Amp.

Para la utilización de la Bomba Adiabática, Figura 42, Figura 43 Y Figura 44, primero se calibra el equipo, para lo cual se prepara una pastilla de ácido benzoico, esta debe estar en condiciones normales, es decir, que su peso exacto sea de un gramo, peso que debe ser verificado en la balanza digital de apreciación 0.01 gramos. Posteriormente se introduce la pastilla antes preparada previamente en el porta muestras.

Al montar la pastilla en el porta muestras del calorímetro se cuelga un pedazo de piola en el alambre, el cual debe topar la muestra que va a ser experimentada, luego se coloca un alambre entre los dos terminales de los termistores de la tapa del cilindro de la bomba adiabática, para cerrar el circuito de la resistencia. Seguidamente se procede a limpiar el cilindro adiabático para colocar una gota de agua y se cierra la bomba adiabática.

A continuación se inyecta 15 Bares de Oxígeno durante 40 segundos en el cilindro, de esta manera se podrá mantener en cada prueba la misma cantidad de oxígeno en la combustión. Se introduce el vaso calorimétrico en un recipiente porta muestras con agua destilada la cual debe estar a 21°C de forma exacta, de manera que se cubra la tapa del cilindro y luego introducir el recipiente en una camisa que contiene agua destilada con bicarbonato con una disolución al 5%. Entre el balde y la camisa queda un espacio, el cual debe ser llenado también con agua a 21°C.

A continuación se coloca dos termómetros, el primero va a la camisa de agua destilada, el segundo va sumergido en el agua del balde y se enciende el equipo.

Después que las temperaturas de los 2 termómetros se nivelen, se cierra el circuito el cual hace que se realice la combustión en el vaso calorimétrico, se realizan vibraciones al termómetro del balde con un timbre para provocar que el nivel del mercurio suba hasta que se detenga y empiece a bajar, así cuando la temperatura llega a su punto más alto y comienza a bajar, procedemos a la toma de datos de las muestras, para realizar posteriormente los cálculos.



**Figura 42. Bomba Calorimétrica Adiabática**



Figura 43. Bomba calorimétrica, componentes internos

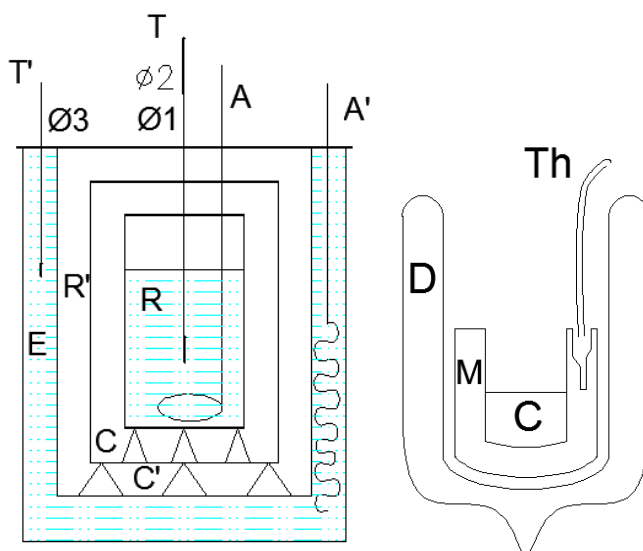


Figura 44. Esquema interno de la bomba calorimétrica

**TERMÓMETRO PRINCIPAL.** Mide la temperatura del agua que rodea al calorímetro

**TERMÓMETRO B.** Este permite conocer la temperatura del agua que se encuentra en la camisa interna de la bomba. Figura 45.



**Figura 45. Termómetro Principal y Termómetro B**

**RESISTENCIA Y TERMISTOR.** La bomba está provista de un circuito interno que permite que al cerrar el circuito el termistor se encienda y ayude a nivelar las temperaturas de los dos termómetros.

**CAMISA.** Está fabricada en acero inoxidable y su función es contener agua a 21 °C. Figura 46.

**PAREDES EXTERNAS DE LA BOMBA.** Estas paredes están fabricadas en acero inoxidable, y el momento de realizarse el cierre hermético del recipiente interno y la tapa que contiene a los termómetros, ayuda a que se produzca en equilibrio térmico del sistema.



**Figura 46. Recipiente interno, Carcasa metálica**

**CARCASA METÁLICA.** La carcasa metálica está fabricada también de acero inoxidable, sobre su panel frontal se ubican los mandos de encendido, cierre del circuito y termistor, así como el botón del vibrador eléctrico montado sobre el termómetro, el cual ayuda a subir el mercurio dentro del mismo, por las pulsaciones eléctricas del aparato.

**CALORÍMETRO.** Este es un vaso hermético de acero donde se realiza la combustión tanto de la pastilla de ácido benzoico y la biomasa. Tiene en su tapa dos conectores eléctricos, los cuales al cerrarse el circuito ayudan a transmitir la corriente eléctrica. En su parte interna está el porta muestras, donde se montan los alambres de estaño y el hilo que al entrar en contacto con el oxígeno y la corriente se produce la combustión de la muestra.

### 3.2.3. AUTOMATIZACIÓN DE LA TOMA DE DATOS EN BOMBA CALORIMÉTRICA

#### Automatización del calorímetro

Este proyecto se realizó con el fin de automatizar el calorímetro adiabático que se encuentra en el laboratorio de motores, mediante sensores de temperatura y una interfaz gráfica en Labview.

Se utilizó una tarjeta Arduino el cual es una plataforma de hardware libre, que se basa en una placa con un microcontrolador y un entorno de desarrollo, esta plataforma está diseñada para facilitar el uso de la electrónica en proyectos multidisciplinarios Figura 47



**Figura 47. Tarjeta de adquisición de datos ARDUINO.**

**Fuente: [www.arduino.com](http://www.arduino.com)**

El hardware consiste en una placa con un microcontrolador Atmel AVR y puertos de entrada/salida 4 Los microcontroladores más usados son el Atmega168, Atmega328, Atmega1280, y Atmega8 por su sencillez y bajo coste que permiten el desarrollo de múltiples diseños. (WIKIPEDIA, 2015)

Por otro lado el software consiste en un entorno de desarrollo que implementa el lenguaje de programación Processing/Wiring y el cargador de arranque que es ejecutado en la placa.<sup>4</sup>

En el mes de octubre de 2012, Arduino empezó a ser utilizado con microcontroladoras CortexM3 de ARM de 32 bits,<sup>5</sup> que coexistirán con las más limitadas, pero también económicas AVR de 8 bits. ARM y AVR no son plataformas compatibles a nivel binario, pero se pueden programar con el mismo IDE de Arduino con lo cual se podrá realizar programas que compilen sin cambios en las dos plataformas. Es importante tomar en cuenta que las microcontroladoras CortexM3 usan 3,3 V, a diferencia de la mayoría de las placas con AVR, que generalmente usan 5 V. Sin embargo, ya anteriormente se lanzaron placas Arduino con Atmel AVR a 3,3 V como la Arduino Fio y existen compatibles de Arduino Nano y Pro como Meduino en que se puede conmutar el voltaje. Como módulo de adquisición de datos y ésta a la vez es un receptor, pues recibe la señal de los 3 sensores de temperatura que se instalaron y la archiva en la memoria de la tarjeta, mostrándolas en tiempo real en una computadora que se conecta a través de una interfaz, al mismo tiempo esta información se grafica en tiempo real. (WIKIPEDIA, 2015)

Un diagrama de flujo del hardware utilizado se muestra en Figura 48 y los algoritmos utilizados en la plataforma Labview en la Figura 49

Un diagrama de bloques de la simulación electrónica y una captura de la interfase de Arduino se esquematizan en las Figura 50 y Figura 51 respectivamente.

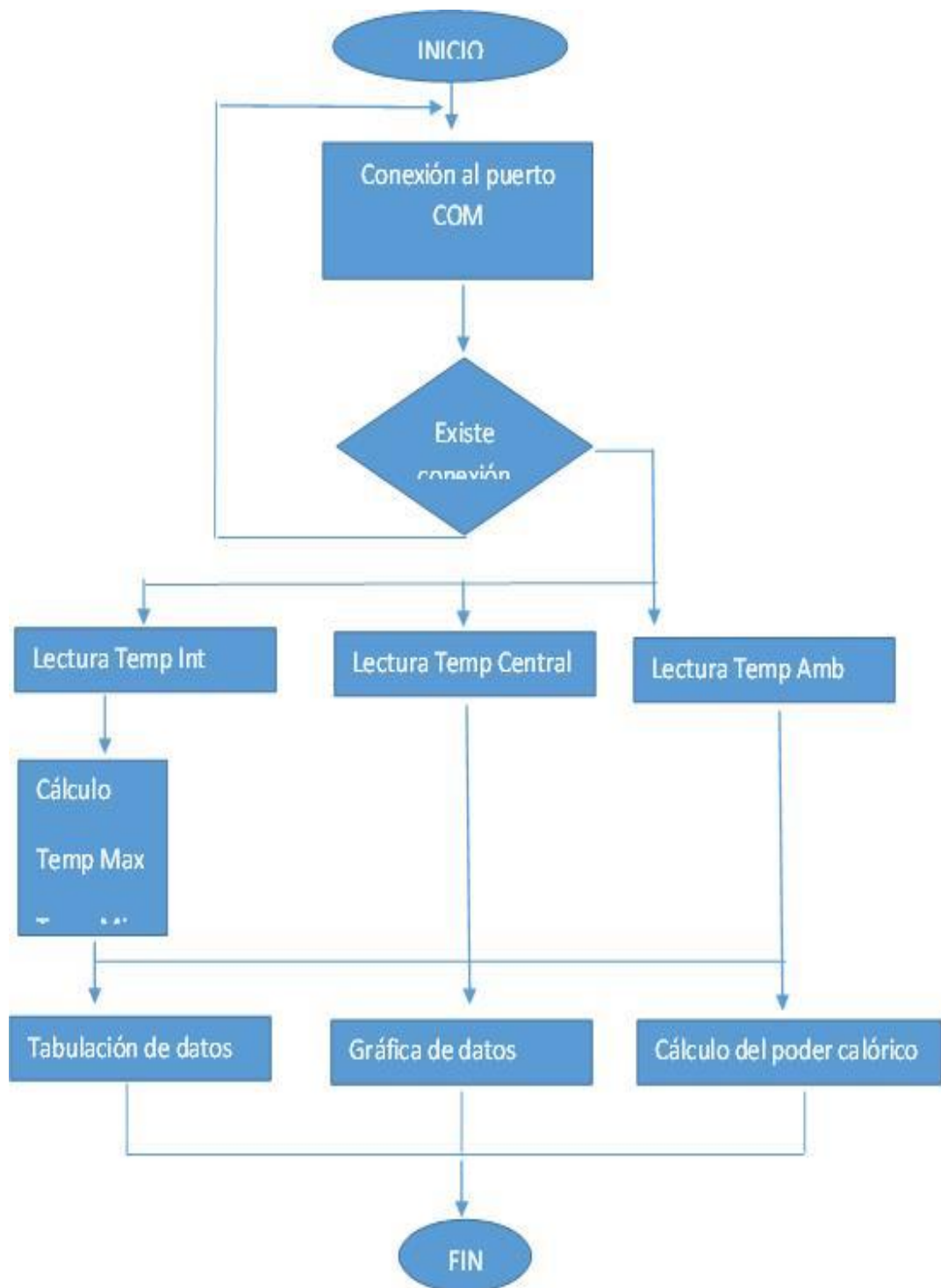


Figura 48. Diagrama de flujo del hardware (ARDUINO)



Los algoritmos utilizados y el flujo de la información se pueden apreciar en el siguiente diagrama:

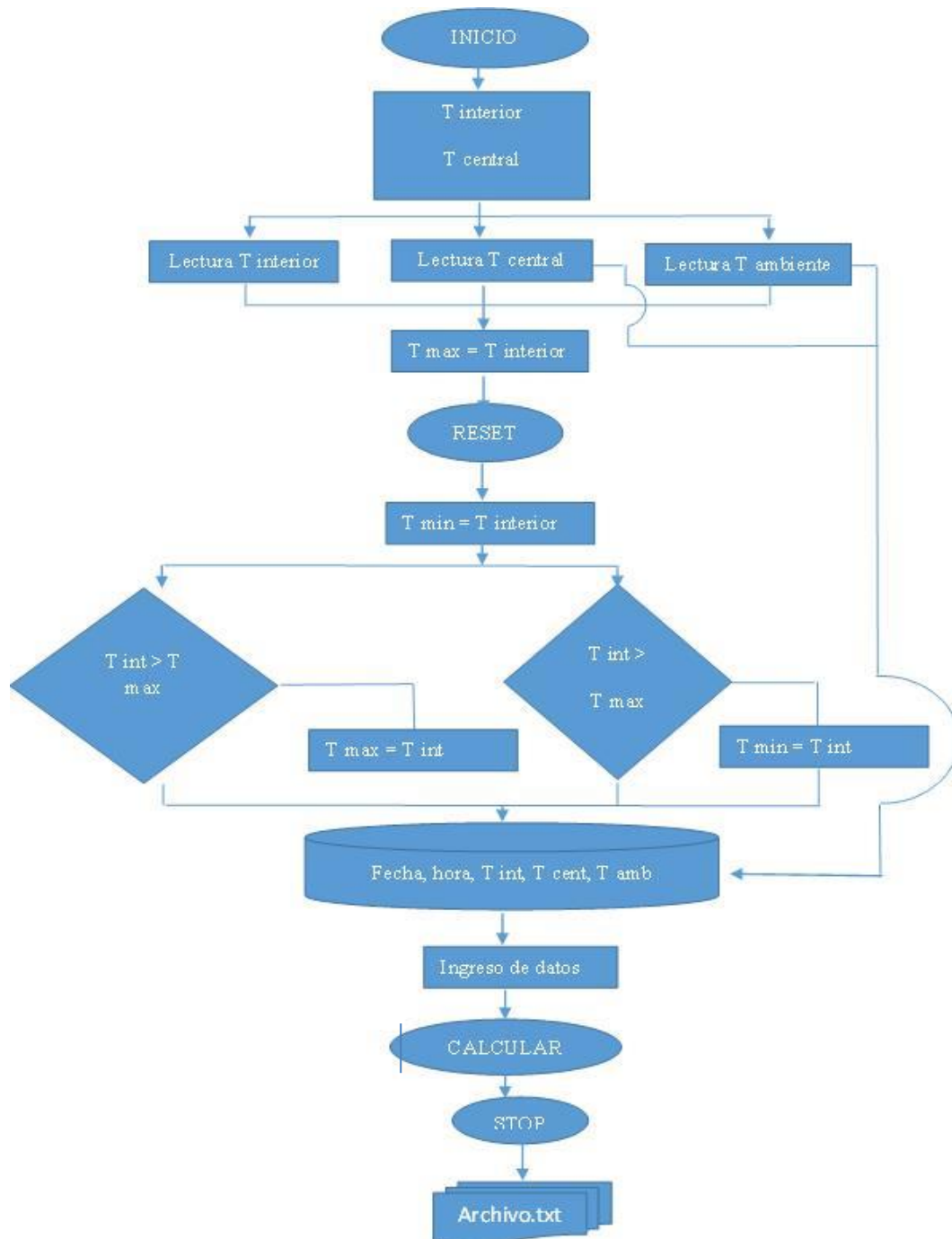


Figura 49. Algoritmo del programa en Labview

SIMULACIÓN ELECTRÓNICA

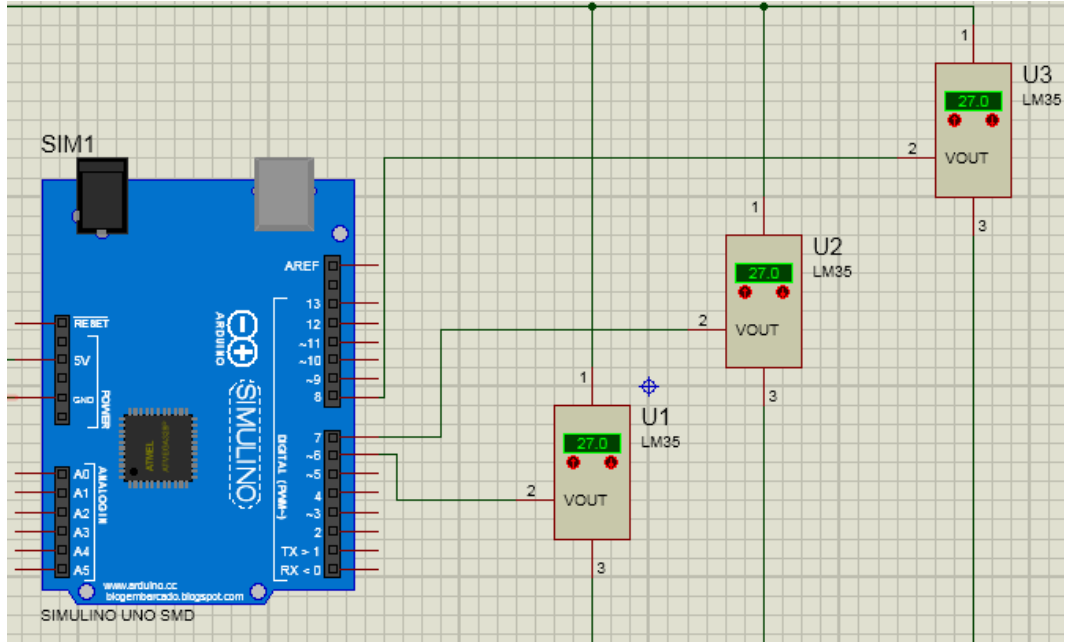


Figura 50. Diagrama de bloques, interface ARDUINO

DISPLAY

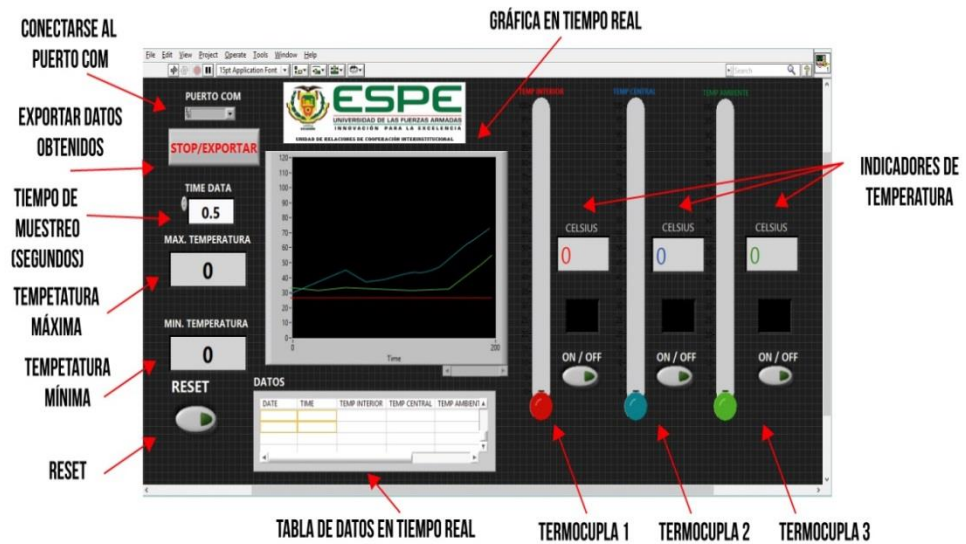


Figura 51. Display Interface ARDUINO

## **FUNCIONAMIENTO**

El control de temperatura, se lo realizó mediante sensores analógicos LM35, que miden la variación de temperatura y la transforman en una variación de voltaje que se registra en la tarjeta Arduino UNO, esta tarjeta actúa como un módulo de adquisición de datos, los cuales se envían a través del puerto COM a la computadora, además se realizó una interfaz gráfica en el software de NATIONAL INSTRUMENTS llamado LABVIEW, en esta interfaz se observa en tiempo real, los datos obtenidos de los 3 sensores de temperatura tanto en indicadores numéricos como en indicadores gráficos, y además el operador elige activar o no la gráfica de cada sensor de temperatura.

Esta gráfica es manipulable, pues se puede cambiar el rango de los ejes, y desplazar por toda la gráfica, también en dicha interfaz se observa la temperatura máxima y mínima que ha alcanzado la camisa interna del calorímetro, por otro lado todos los datos de cada sensor de temperatura son tabulados en tiempo real, en dicha tabla tenemos como datos la fecha, hora, y las temperaturas de cada sensor, estos valores se obtienen con un tiempo de muestreo a elección del operador mediante el botón correspondiente, el botón RESET permite establecer el valor de temperatura mínima del calorímetro, ya que el software establece el valor máximo de temperatura en el proceso, y mediante este botón se registra el valor mínimo de temperatura, después de ser accionado una vez, se actualizara automáticamente.

En el programa también permite la exportación de datos, esto se ejecuta al pulsar el botón STOP/EXPORTAR, al hacerlo se detiene el programa y aparece una ventana que nos pide que ingresemos un nombre y la extensión del archivo, que para mejor comprensión y fácil edición se recomienda la extensión .txt que después puede ser pasada a formato .xlsx, de esta manera podemos administrar y guardar nuestros datos que nos ayudaran a

entender y realizar experimentos con un mejor control de los datos de cada sensor.

Los sensores de temperatura LM35, fueron afectados por las condiciones externas o perturbaciones, como resultado generaban valores erróneos de temperatura, por este motivo se implementó un filtro a cada sensor, para filtrar el ruido externo, que generalmente se generan por las bobinas del motor del propio calorímetro, estos filtros tuvieron un efecto parcial.

Para una fácil conexión de los sensores de temperatura se adoptaron estos a conectores banana y conectores hembra, como se ve en la Figura 52 y estos sensores de temperatura se aislaron para evitar que el agua los dañe, esto se lo logró colocándolos dentro de camisas cilíndricas de aluminio y aislados con silicona de alta temperatura.

Finalmente todas las conexiones se encuentran dentro de una caja de MDF, cortada en laser herméticamente cerrada para evitar que algún agente externo la afecte.

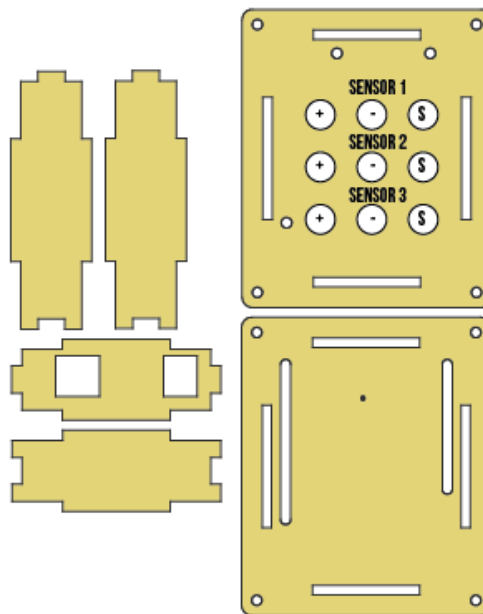


**Figura 52. Conexión de sensores.**

## CONSTRUCCIÓN

Se puede ver en la Figura 53 el diseño y construcción de una caja tallada en impresora 3D, para almacenar al módulo ARDUINO y facilitar las conexiones, el material de la caja es MDF.

También se observa el plano de la caja para las termocupas, se observaron detalles como, orificios de forma cuadrada, los cuales alimentan a la tarjeta ARDUINO, y cargan o modifican el programa base, respectivamente



**Figura 53. Elementos de la caja de almacenaje del módulo ARDUINO**

En la Figura 54 se observa el código fuente en Labview, este es el código donde se aprecian como los diferentes bloques activan o desactivan las diferentes etapas de la interfaz gráfica

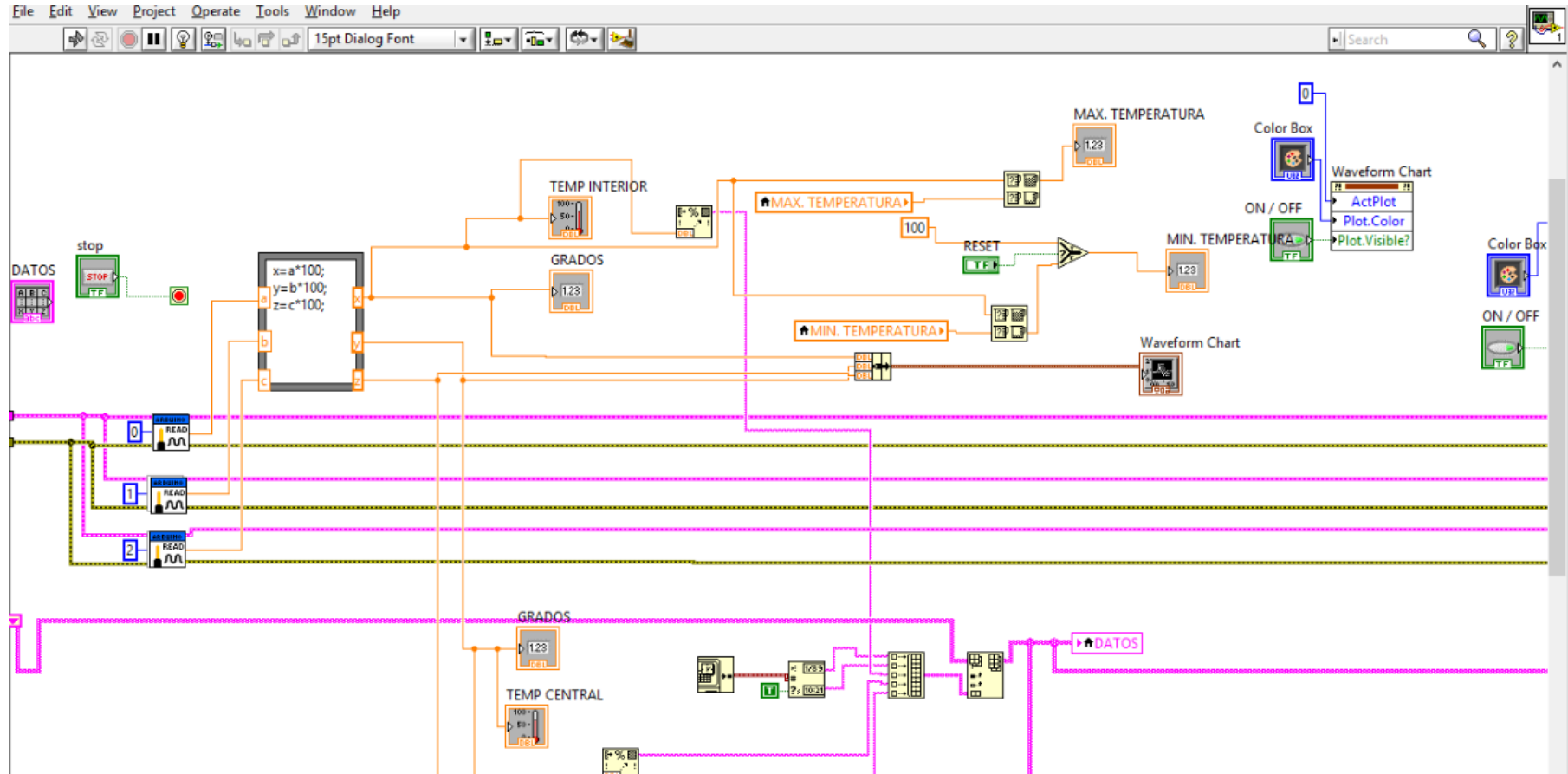
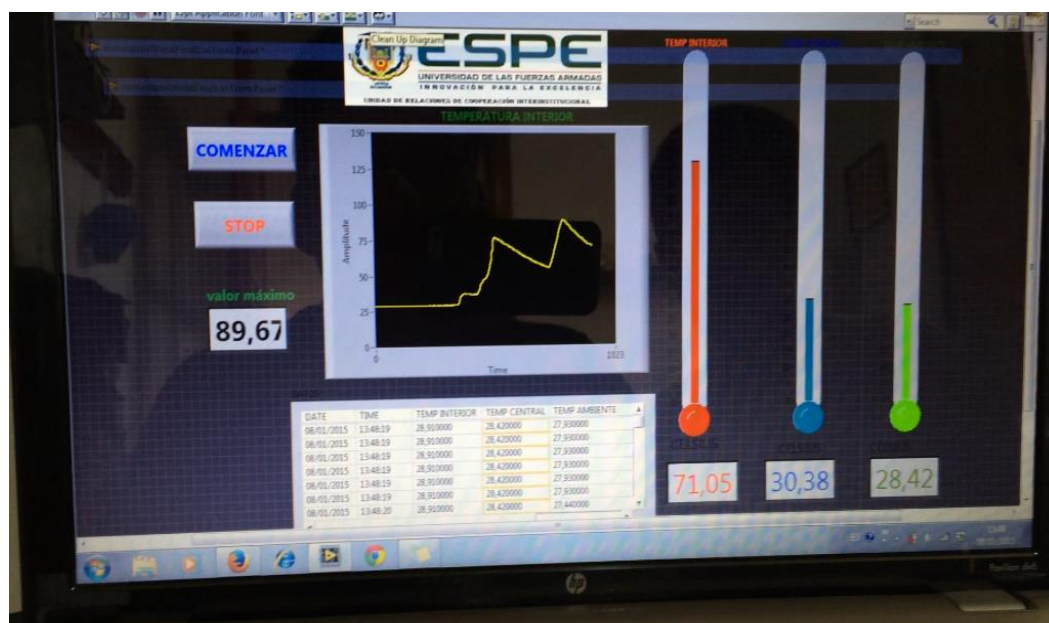


Figura 54. Código fuente en software LABVIEW

Finalmente se puede apreciar en la Figura 55 el funcionamiento del dispositivo cuando el software se encontraba en operación, se observan los valores de temperatura y el gráfico en tiempo real, muestra además el valor de la temperatura máxima, y la adquisición de datos.



**Figura 55. Visualización de pantalla del programa de automatización en funcionamiento**

### 3.2.4. PROCEDIMIENTO PARA LA EXPERIMENTACIÓN EN LA BOMBA CALORIMÉTRICA

Se coloca la muestra previamente compactada y se ajusta su peso a un gramo.

Posteriormente se arma la bomba y se coloca la pastilla dentro del crisol, la pastilla debe estar sobre la mecha y colocado el caucho de seguridad.

Se debe hermetizar el acople que va a la bomba, mediante ajuste y presurización, girar 3 vueltas a la llave de oxígeno hasta llegar a 21 bares de presión en el manómetro y esperar aproximadamente 1 minuto.

Posteriormente se cierra la llave de oxígeno y se coloca el agua destilada en la camisa externa y el termómetro.

Luego que se alcanza la temperatura inicial (21 a 21.5 grados), se calienta el agua a 21.5 grados en la camisa interna y en la camisa intermedia.

Se debe colocar el agua primero en el recipiente porta bomba con el objetivo que gane peso y cuando el recipiente porta bomba tenga suficiente peso, se coloca el resto de la misma en la camisa intermedia.

Se procede luego a colocar los termómetros en la camisa interior y exterior y se enciende el calorímetro, se registra la temperatura inicial y los valores de temperatura cada minuto.

Al terminar la prueba se abre el calorímetro, se despresuriza la bomba y se verifica el resultado de la combustión en el crisol. Figura 56



**Figura 56. Combustión de la tusa de maíz**

La población tanto para tusa como para peletes se detallan en las Tabla 5 y Tabla 6



Tabla 5.

**Número de tusas empleadas para evaluar la humedad**

Humedad	N
Tusa de maíz seca	21
Tusa de maíz húmeda	21

Tabla 6.

**Número de pellets utilizados según la fuerza de compactación**

Fuerza de compactación (Toneladas)	N	Área de compactación (cm <sup>2</sup> )	Presión (MPa)
1	56	0.7854	124.866
2	50	0.7854	249.682

**3.3. PUNTOS DE CONTROL**

Se realizaron 106 muestras de pellets de tusa de maíz para la experimentación, los resultados se procesaron en INFOSTAT versión libre, el mismo que proporciona la información que será discutida posteriormente.

**3.4. MÉTODOS ESTADÍSTICOS**

El método estadístico utilizado para evaluar los resultados es el análisis de varianza conocido por sus siglas ANOVA, este método permite evaluar si un factor tiene un efecto estadísticamente significativo sobre una variable respuesta.

Este método se basa en la suma de cuadrados con el fin de descomponer la variabilidad de la variable respuesta, en este caso el poder calórico y considera los factores que afectan o no la variable respuesta. Los factores estudiados son la fuerza de compactación (densificación) y la cantidad de oxígeno dosificada.

Los factores analizados en este estudio son:

- Fuerza de compactación (con 2 niveles, 1 y 2 toneladas)
- Cantidad de Oxígeno dosificado (con 3 niveles, cantidad menor al estequiométrico, igual al estequiométrico y mayor al estequiométrico)

La variable respuesta es el poder calórico.

Un diseño estructurado con dos Factores (A y B) con una media  $\mu$  y un error  $\epsilon$  tendría la siguiente fórmula:

$$Y_{ij} = \mu + A_i + B_{ij} + AB + \epsilon sc_{ij}$$

#### Suma de cuadrados tipo I

Se utiliza para probar una hipótesis sobre medidas ponderadas, ajustadas o no, su aplicación es común en diseños balanceados donde cada tratamiento se ha replicado igual número de veces.

La suma de cuadrados tipo I considera la interacción de factores, esta suma es de la forma  $R(\mu, \alpha, \beta, \gamma)$

#### Suma de cuadrados tipo II

Este método está asociado con la suma de cuadrados tipo I, sin embargo aquí se toman las hipótesis asociadas con medias ponderadas ajustadas. La suma tipo II es de la forma  $R(\alpha / \mu, \beta)$  y  $R(\beta / \mu, \alpha)$ , aquí se pueden analizar interacciones multifactorial con interacciones combinadas.

#### Suma de cuadrados tipo III

La suma de cuadrados tipo III maneja diferentes algoritmos para la suma de cuadrados por ejemplo a través de los cuadrados de las medias ponderadas o por el método de los mínimos cuadrados completos. Este método sirve para modelos restringidos o no balanceados.

Si los datos fueran completos y balanceados los resultados son iguales a la suma tipo II. (Restrepo, 2007)

Un modelo aleatorio simple cumple con el siguiente modelo:

$$y_{ij} = \mu_{ij} + \alpha_i + \varepsilon_{ij}$$

$$\varepsilon_{ij} = N(0, \sigma_\varepsilon)$$

Donde  $\mu_{ij}$  es la media de la variable respuesta  $i$  bajo la acción del factor  $j$ ,  $\alpha_i$  es 5% y  $\varepsilon_{ij}$  el error aleatorio

Los siguientes términos se definen en todo análisis estadístico:

Hipótesis (H1): Los factores afectan la variable respuesta

La fuerza de compactación afecta el poder calórico

Hipótesis nula (Ho): Es la negación de la hipótesis

La cantidad de oxígeno dosificada no afecta el poder calórico

Hipótesis alternativa: Al menos un factor está involucrado en el rechazo de la hipótesis nula

Al menos un nivel de oxígeno afecta el poder calórico

Para el análisis de varianza se calculan variables intermedias como son:

- Variabilidad entre las medias de los grupos (SC inter)
- Variabilidad respecto a la media del grupo (SC intra)
- Media cuadrática (MC)
- Cociente de Fisher (F)

Con estas variables se calcula el p-valor con lo cual se acepta o se rechaza la hipótesis nula.

Las fórmulas de estas variables se describen a continuación:

$$SC_{inter} = \sum_{i=1}^i \sum_{j=1}^j (\bar{y}_i - \bar{y})^2$$

$$SC_{intra} = \sum_{i=1}^i \sum_{j=1}^j (y_{ij} - \bar{y}_i)^2$$

$$SC_{total} = \sum_{i=1}^i \sum_{j=1}^j (y_{ij} - \bar{y})^2$$

$$SCT = SC_{inter} + SC_{intra}$$

Los grados de libertad se calculan mediante las siguientes expresiones:

GL Total = n-1 (n es el número total muestras en todos los grupos)

GL Inter = k-1 (k es el número de niveles del factor)

GL Intra = GL Total – GL Inter

Si la Ho es cierta la varianza inter debería ser similar a la varianza intra

MC = SC/GL (es un estimado de la varianza)

El cociente sigue una F de Fisher si Ho es cierta y  $p < 0,001$  y por lo tanto existen diferencias significativas entre las medias de cada factor.  
(Introducción al Análisis de Varianza)

#### Prueba Estadística de Duncan

Este método se utiliza para comparar todas las medias de los diferentes factores agrupadas en pares. Fue desarrollado por primera vez por Duncan en 1951 y posteriormente modificado por él mismo.

La estadística de Prueba es denotado, por  $q_p$

$$q = \frac{\bar{y}_i - \bar{y}_j}{\sqrt{CM/r}}$$

Donde  $p$  es el número de medias entre las dos medias a comparar para diseños balanceados. Para aplicar esta prueba a un nivel de significancia  $\alpha$  (que en general se acepta 5%) se debe realizar

1. Determinar el error estándar (desviación estándar) que viene dado por la siguiente expresión:

$$Sy_i = \sqrt{\frac{CM_{EE}}{r}}$$

$CM_{EE}$  se obtiene de las tablas Anova.

2. Con los grados de libertad del error y el nivel de significancia  $\alpha$  se determina  $r_p$  (intervalo o amplitud estandarizada significativa) mediante las tablas de amplitudes estandarizadas de Duncan dadas por Harter (1960) y que se encuentran en el libro de Miller (1992). Para encontrar estos valores, se requieren los grados de libertad del error y el valor de  $p=2,3, \dots, t$ , donde  $t$  es el número de niveles del factor.
3. A continuación se determinan las amplitudes mínimas significativas denotadas por  $R_p$ ,  $p=2,3, \dots, t$   
Calculados por la expresión:  
 $R = r_p s_{\bar{y}_i}$  para  $p=2,3, \dots, t$
4. Se ordenan de manera creciente los resultados promedios del experimento  $\mu_1, \mu_2, \mu_3, \dots, \mu_t$
5. Se comparan las medias ordenadas  $\mu_{(i)}$  de la siguiente manera:

**a)** El promedio más alto, con el más bajo,  $\mu_1$  y se compara esta diferencia con el intervalo mínimo significativo  $R_t$ . Si es no significativa entonces todas las otras diferencias son no significativas. Si la diferencia es significativa, entonces:

**b)** Posteriormente se calcula la diferencia entre el valor más alto  $\mu_t$  y el penúltimo  $\mu_2$  y se compara con el intervalo mínimo significativo  $R_{t-1}$

**c)** Este procedimiento se continúa hasta que todas las medias se han comparado con la media más grande  $\mu_t$ .

**d)** Se compara entonces la segunda media más grande  $\mu_{t-1}$  con la más pequeña  $\mu_1$  y se compara con el intervalo mínimo significativo  $R_{t-1}$ .

$\mu_{(t-1)}$  vs  $\mu_{(1)}$

$\mu_{(t-1)}$  vs  $\mu_{(2)}$

$\mu_{(t-1)}$  vs  $\mu_{(t-2)}$

Y así se continúa hasta que se han comparado todas las diferencias entre todos los  $t(t-1)/2$  posibles pares.

Si una diferencia observada es mayor que el intervalo mínimo significativo, se concluye que la pareja de medias comparadas son significativamente diferentes.

Para evitar contradicciones, ninguna diferencia entre una pareja de medias se considera significativamente diferente si éstas se encuentran entre otras dos que no difieren significativamente.

Para diseños desbalanceados este método difiere marcadamente, se han propuesto nuevos algoritmos que utilizan las medias armónicas. (Mendoza Rivera, 2002)

## **CAPÍTULO 4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN**

### **4.1. ANÁLISIS**

En el diseño experimental planteado en este proyecto se utilizó como variable respuesta el poder calórico inferior que es el comúnmente referido como poder calórico en la bibliografía especializada. Se utilizó como variable respuesta el poder calórico inferior y como factores de estudio fuerza de compactación (densificación) y cantidad de oxígeno dosificada, se utilizó un análisis bi-factorial aleatorio es decir un factor de incidencia a la vez y además el análisis factorial combinado.

El análisis estadístico de humedad se realizó bajo dos factores descriptivos: tusa húmeda y tusa seca.

#### **4.1.1. HUMEDAD**

Se realizó una medida de humedad sobre base húmeda en una población de 42 muestras, 21 para tusa de maíz secado durante un año en condiciones ambientales naturales y en ambiente cerrado y 21 para tusa de maíz tierno (choclo recién cosechado).

En la Tabla 7 se observa una humedad media de 13.71% y 38.52% para la tusa seca y tusa húmeda respectivamente.

El valor de la humedad para tusa seca es similar al reportado por Martínez (Martínez 2000) que es del 12% si se considera que este último valor es un promedio para los diferentes tipos de biomasa, también se observa que la varianza para la tusa húmeda fue de 2.06, mientras que para la tusa seca fue de 12.21, lo cual muestra que los datos de humedad de tusa seca tienen mayor dispersión.

**Tabla 7.****Resultados estadísticos de humedad relacionados con el tipo de tusa**

Tusa	Variable	n	Media	D.E.	Var(n-1)	Mín	Máx
<b>Húmeda</b>	Humedad	21	38,52	1,44	2,06	33,00	39,00
<b>Seca</b>	Humedad	21	13,71	3,49	12,21	9,00	20,00

Previo al análisis de varianza se realizó un test de normalidad de Shapiro Wilks. Al interpretar el valor de la columna P(Unilateral D) que se expresa en la Tabla 8 se muestra que la humedad de la tusa no se ajusta a una curva normal, lo cual es aceptable pues se trabajó con muestras de origen vegetal y en ellas influyen factores como la variación del clima, altitud del terreno, presión y temperatura.

Sin embargo se puede anotar que el software utilizado para el cálculo de estas variables utiliza un nivel de confianza del 95%.

**Tabla 8.****Prueba de normalidad de humedad relacionada con el tipo de tusa**

Tusa	Variable	N	Media	D.E.	W*	P (Uni lateral D)
<b>Húmeda</b>	Humedad	21	38.51	1.44	0.42	0.0001
<b>Seca</b>	Humedad	21	13.71	3.49	0.88	0.0390

El análisis de varianza presentado en la Tabla 9 reflejó un coeficiente de variabilidad (CV) de 10.23, valor aceptable según la estadística descriptiva.



**Tabla 9.****Análisis de varianza de la humedad relacionada con el tipo de tusa**

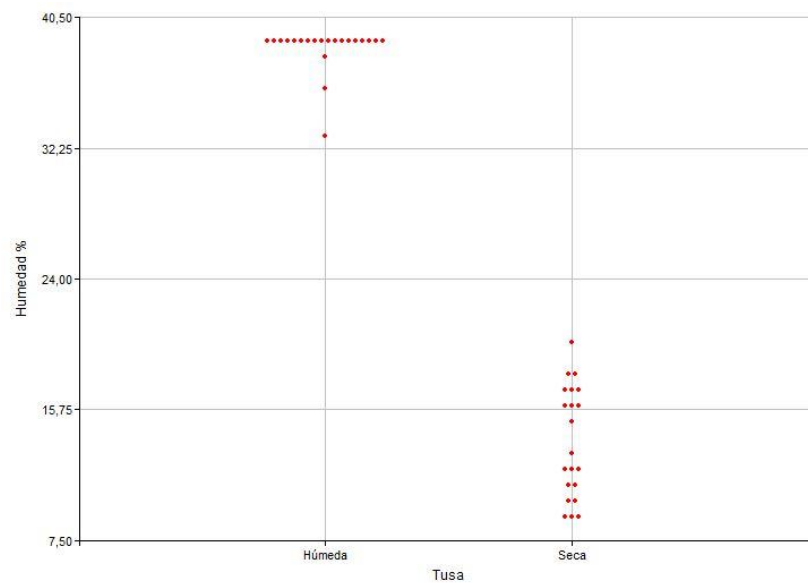
<b>Variable</b>	<b>N</b>	<b>R1</b>	<b>R2 Aj</b>	<b>CV</b>
<b>Humedad</b>	42	0.96	0.96	10.23

En el cuadro complementario del análisis de varianza, Tabla 10, la columna p-valor muestra valores menores a 0.05 lo cual indica que el factor “tipo de tusa” es estadísticamente representativo en el contenido de humedad de la misma. Éste sería un resultado esperado pues refleja la pérdida de humedad de la tusa después de un año de secado a condiciones ambientales del Valle de los Chillos cuyo promedio de humedad relativa y temperatura ambiente son 78% y 12°C respectivamente (Moreira, 2013).

**Tabla 10.****Análisis de varianza SC tipo III de la humedad relacionada con el tipo de tusa**

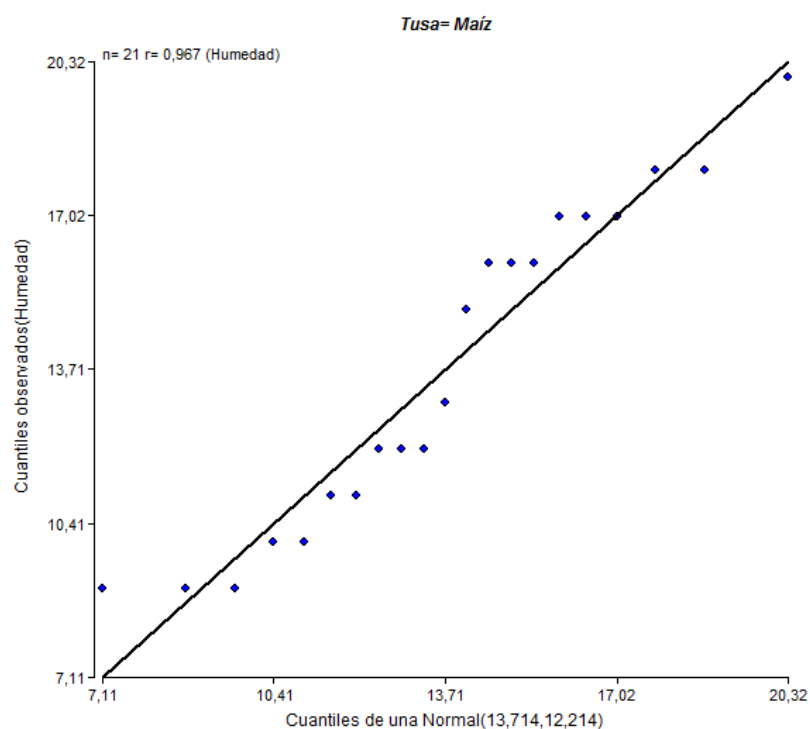
<b>F.V.</b>	<b>SC</b>	<b>GI</b>	<b>CM</b>	<b>F</b>	<b>p-valor</b>
Tusa	6462.88	1	6462.88	905.41	0.0001
Error	285.52	40	7.14		
Total	6748.4	41			

En el gráfico de densidad de puntos de la Figura 57 se observa la diferente dispersión de los datos para la tusa húmeda y seca, lo cual ratifica la discusión de la varianza realizada anteriormente.



**Figura 57. Densidad de puntos de humedad vs. Tipos de Tusa**

En la Figura 58, se muestra que los datos de la población para tusa seca no se ajustan a la idealidad (puntos por debajo y encima de la recta) lo cual ya se discutió en el test de Shapiro Wilks.



**Figura 58. Distribución cuantil- cuantil de la humedad relacionada con el tipo de tusa**

Para los ensayos posteriores se utilizó únicamente tusa seca pues la tusa húmeda presentó problemas el momento de la compactación, por una parte la pérdida de agua al compactar, lo que resultó difícil de cuantificar y por otra el pellet se volvió inmanejable por su blanda consistencia.

#### 4.1.2. FUERZA DE COMPACTACIÓN (DENSIFICACIÓN)

La fuerza de compactación se refiere a la fuerza necesaria para aglomerar la biomasa y formar la pastilla que se utilizará en la bomba calorimétrica adiabática.

La fuerza de compactación determinó la densidad del pellet los valores de densidad obtenidos se detalla en la Tabla 11.

Se obtuvo una densidad de  $909.115 \text{ kg/m}^3$  para una presión de compactación de 124 MPa (1 Tonelada) y  $1088.439 \text{ Kg/m}^3$  para una presión

de 249 MPa (2 Toneladas), estos valores son superiores a los reportados en la bibliografía para pellets con una presión de 150 MPa con densidades de 210 kg/m<sup>3</sup>. Se debe aclarar que en los trabajos realizados de densificación se refiere al briquetaje y peletización, debido a que en los pellets y briquetas se utiliza aglutinantes y aditivos como carbón componentes influyen en la densidad final.

Debido a que en esta investigación no se utilizaron aditivos en la peletización, se utilizaron en cambio altas presiones para compactar los pellets, 124 y 249 Mpa. Esto produjo pellets con alta densidad.

**Tabla 11.**

**Resultados estadísticos de la densidad de la pastilla en relación con la presión de compactación.**

Compac, n	Media (kg/m <sup>3</sup> )	D.E.	Var(n-1)	Mín	Máx	Mediana	
1T	11	909,115	50,987	2599,651	843,362	1030,977	909,599
2T	11	1088,439	39,201	1536,756	1021,701	1189,794	1083,817

#### 4.1.3. PODER CALÓRICO

Los valores reportados de poder calórico para pellets y briquetas están entre 18.3 y 18.8 KJ/g (Nalladurai Kaliyan, 2010) lo cual representa un incremento del 15% sobre los valores de tusa sin aditivos.

Al analizar el poder calórico relacionado a la fuerza de compactación particionado por cantidad de oxígeno dosificado se observa en la Tabla 12 que la media del poder calórico inferior del pellet compactado con una fuerza de 1 Tonelada es en general mayor que la de su homóloga compactada a 2 Toneladas, para el caso de la dosificación estequiométrica de oxígeno se obtuvieron los valores de 16.07 y 14.83 kJ/g respectivamente, lo cual evidencia que un pellet menos compactado se

combustiona con mejor eficiencia, pues el valor de PCI se incrementó en 8.36%.

El poder calórico obtenido resulta comparable con el reportado por Keener de 15.1 kJ/g (Keener, 1981) y superior al de otros tipos de biomasa como cascarilla de arroz, cascarilla de café, bagazo de caña, bagacillo (Quinceno Villada & Mosquera Gutierrez, 2010)

**Tabla 12.**

**Resultados estadísticos del poder calórico inferior relacionado con la fuerza de compactación**

OXÍGENO	COMPAC.	Variable	n	Media	D.E.	Var(n-1)	Mín	Máx	Mediana
O IGUAL	1T	PC [kj/g]	32	16,07	0,59	0,34	14,76	17,07	16,07
O IGUAL	2T	PC [kj/g]	38	14,83	0,58	0,34	13,30	15,92	14,71
O MAYOR	1T	PC [kj/g]	12	15,62	0,36	0,13	14,76	16,02	15,81
O MAYOR	2T	PC [kj/g]	6	14,85	0,63	0,40	13,88	15,49	14,94
O MENOR	1T	PC [kj/g]	12	13,99	0,27	0,07	13,72	14,66	13,98
O MENOR	2T	PC [kj/g]	6	13,71	0,13	0,02	13,55	13,83	13,74

También se observa que la columna P(Unilateral D) en el test de Shapiro Wilks, Tabla 13, refleja un comportamiento normal para los dos valores de fuerza de compactación utilizados y para todas las cantidades de oxígeno dosificada, lo que permite realizar un ANOVA confiable para todos los casos.

**Tabla 13.**

**Análisis de normalidad del poder calórico inferior relacionado con la fuerza de compactación**

OXÍGENO	COMPAC.	Variable	n	Media	D.E.	W*	P(Unilateral D)
O IGUAL	1T	PC [kj/g]	32	16,07	0,59	0,94	0,23
O IGUAL	2T	PC [kj/g]	38	14,83	0,58	0,94	0,22
O MAYOR	1T	PC [kj/g]	12	15,62	0,36	0,84	0,04
O MAYOR	2T	PC [kj/g]	6	14,85	0,63	0,9	0,45
O MENOR	1T	PC [kj/g]	12	13,99	0,27	0,87	0,1
O MENOR	2T	PC [kj/g]	6	13,71	0,13	0,79	0,06

El análisis de varianza de la Tabla 14 realizado para poblaciones no balanceadas, el p-valor obtenido expresa que la fuerza de compactación es estadísticamente significativa en la obtención del poder calórico inferior (PCI).

Por lo tanto la experimentación con 1T y 2T forman grupos diferentes estadísticamente según el análisis de Duncan de la Tabla 15.

**Tabla 14.**

**Análisis de varianza del poder calórico inferior relacionado con la fuerza de compactación**

**Para 1Tonelada  
(n=56)**

F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo.	37,92	2	19	77,47	0,0000
OXIGENO	37,92	2	19	77,47	0,0000
Error	12,97	53	0,2		
Total	50,9	55			

**Para 2Toneladas  
(n=50)**

F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo.	6,69	2	3,35	10,75	0,00014
OXIGENO	6,69	2	3,35	10,75	0,00014
Error	14,63	47	0,31		
Total	21,33	49			

**Tabla 15.**

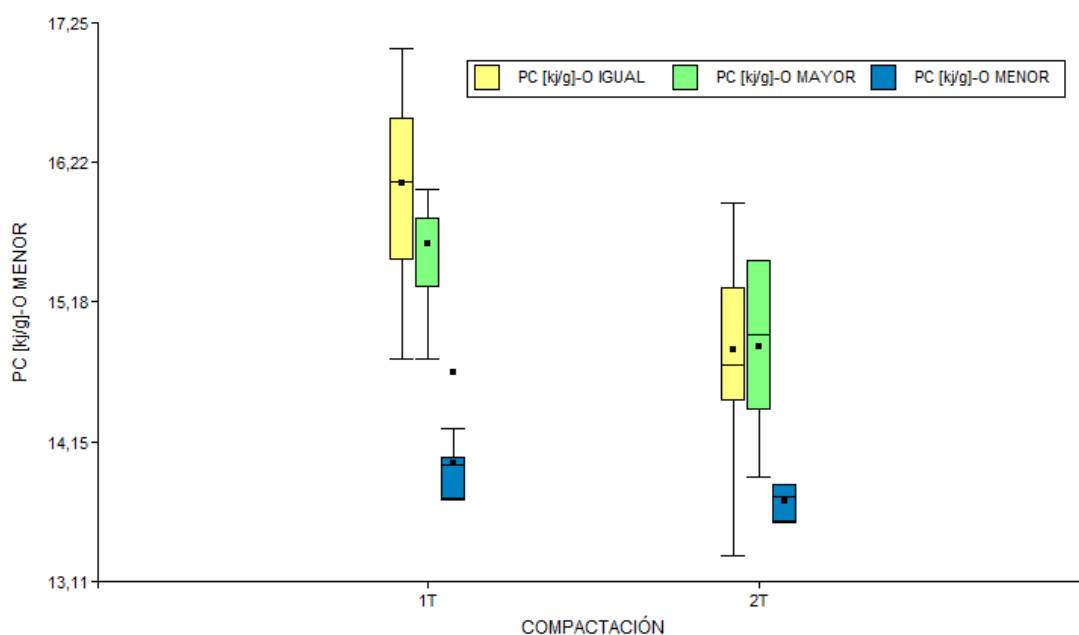
**Prueba de Duncan del PCI en relación a la Fuerza de Compactación**

Test: Duncan Alfa=0,05

Error: 0,2761 gl: 100

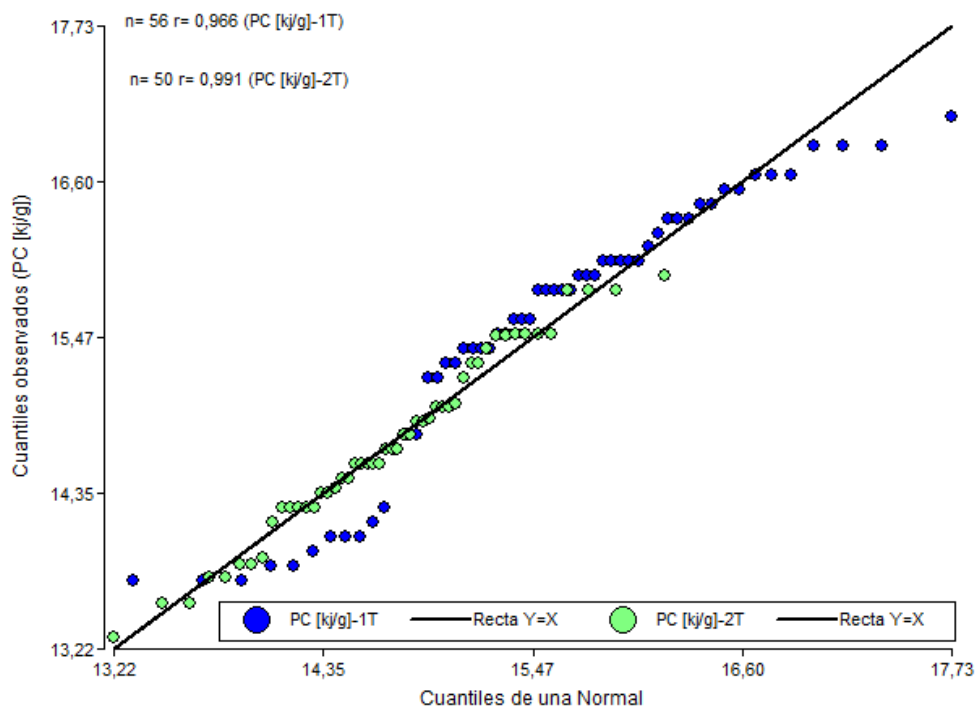
COMPACTACIÓN	Medias	n	E.E.	
2T	14,47	50	0,11	A
1T	15,23	56	0,08	B

En el gráfico de cajas de la Figura 59, se observa una media de poder calórico diferente e inversa a la fuerza de compactación, ya que el poder calórico inferior (PCI) es mayor cuando se utiliza una fuerza de compactación menor, para cualquier cantidad de oxígeno dosificada.



**Figura 59. Gráfico de Cajas: Poder calórico relacionado con la fuerza de compactación**

El gráfico de cuantiles (Q-Q plot) es una herramienta para observar cuán cerca están del comportamiento ideal una variable en función de uno o varios factores. En la Figura 60 se observa que el poder calórico inferior sigue un comportamiento normal para las dos fuerzas de compactación del pellet lo cual se ratificó con el análisis de Shapiro Wilks anteriormente discutido.



**Figura 60. Distribución quantil- quantil del poder calórico para una fuerza de compactación de 1T y 2T**

#### 4.1.4. CANTIDAD DE OXÍGENO DOSIFICADO (RELACIÓN AIRE-COMBUSTIBLE)

Se experimentaron tres dosificaciones de oxígeno, 1) menor al estequiométrico (12bar), 2) igual al estequiométrico (14.7 bares) y 3) mayor al estequiométrico (16 bares), medidos indirectamente a través de la presión regulada mediante una válvula.

Los valores medios obtenidos para el poder calórico inferior fueron 13.99, 16.07 y 15.62 [kJ/g] para dosis de oxígeno menor, igual y mayor que el estequiométrico con pellets compactados con 1T y 13.71, 14.83 y 14,85 [kJ/g] para 2T respectivamente, valores reportados en la Tabla 12 anteriormente descritos, así mismo se observa los datos de varianza con poca dispersión.



Se observa que los valores de PCI para dosificación igual y mayor al estequiométrico son similares y los valores con cantidad de oxígeno limitante son menores, esto, para las dos fuerzas de compactación utilizadas.

El p-valor del análisis de varianza de la Tabla 16 demuestra que el factor dosificación de oxígeno también tiene significación estadística sobre la variable poder calórico inferior (PCI) razón por la cual se realizó la prueba de Duncan.

Los resultados de ésta última se muestran en la Tabla 17 y se observa que la cantidad de oxígeno en defecto incide sobre el poder calórico inferior, tiene un p-valor mayor, más no la cantidad de oxígeno en exceso pues este último tiene el mismo comportamiento que la cantidad de oxígeno estequiométrico, tienen un p-valor cercano a cero.

Este es un resultado esperado pues al limitar el oxígeno se limita la reacción, por otro lado cuando el oxígeno se encuentra en exceso los valores de PCI son similares, pues la reacción solo toma la cantidad de comburente que necesita aun cuando éste estuviera en exceso.

Tabla 16.

**Análisis de varianza del poder calórico inferior relacionado con la cantidad de oxígeno dosificada**

**O IGUAL**

F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo.	26,54	1	26,54	77,63	0,0000
COMPACTACIÓN	26,54	1	26,54	77,63	0,0000
Error	23,25	68	0,34		
Total	49,78	69			

**O MAYOR**

F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo.	2,34	1	2,34	10,84	0,0046
COMPACTACIÓN	2,34	1	2,34	10,84	0,0046
Error	3,46	16	0,22		
Total	5,8	17			

**O MENOR**

F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo.	0,31	1	0,31	5,48	0,0325
COMPACTACIÓN	0,31	1	0,31	5,48	0,0325
Error	0,9	16	0,06		
Total	1,21	17			

Tabla 17.

**Prueba de Duncan de la relación entre el poder calórico y la cantidad de oxígeno dosificada**

Test: Duncan Alfa=0,05

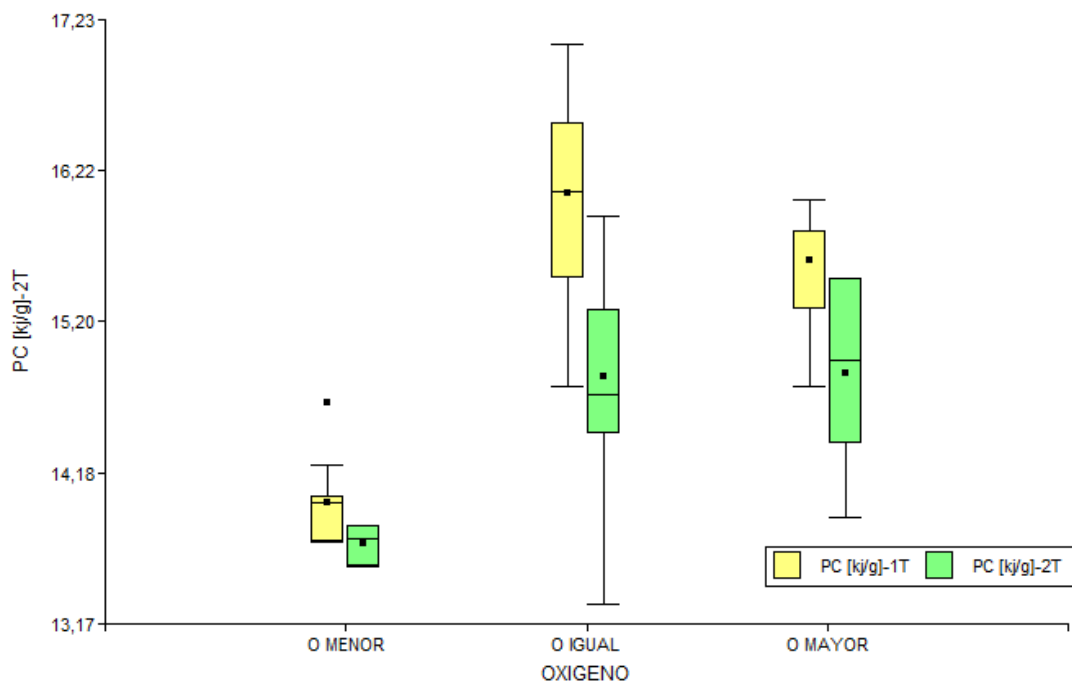
Error: 0,2761 gl: 100

OXIGENO	Medias	n	E.E.	
O MENOR	13,85	18	0,13	A
O MAYOR	15,24	18	0,13	B
O IGUAL	15,45	70	0,06	B

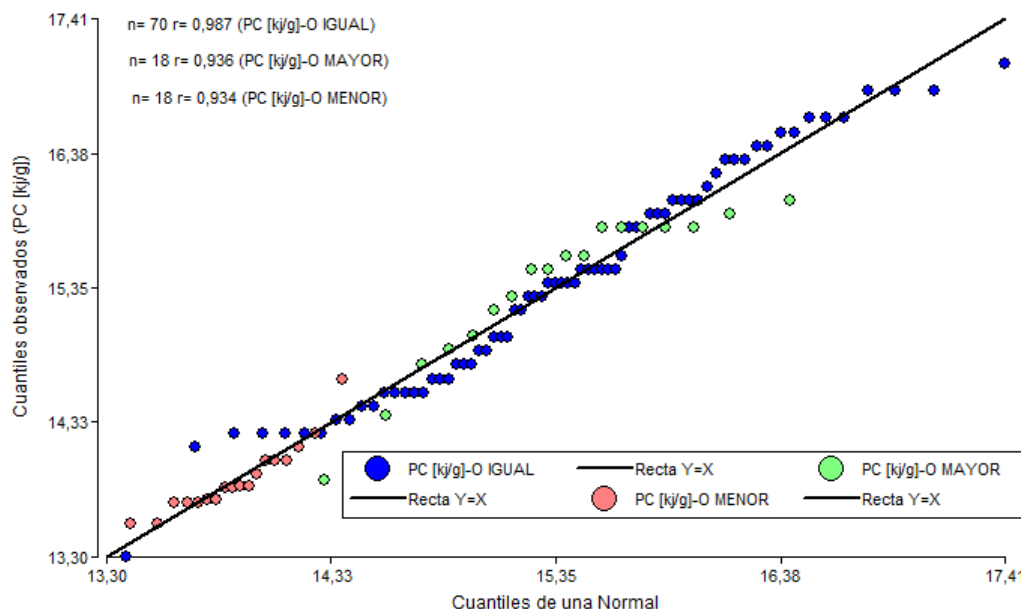
En el diagrama de cajas de la Figura 61 se observa que el PCI tiene un comportamiento similar tanto para la cantidad de oxígeno igual y la cantidad

de oxígeno en mayor cantidad que la estequiométrica y por el contrario el grupo con cantidad de oxígeno limitado presenta una media de poder calórico menor como se discutió anteriormente, este comportamiento es similar para la dos fuerzas de compactación de 1T y 2T.

La gráfica Q-Q Plot de la Figura 62 muestra la tendencia a un comportamiento normal de las tres curvas lo que ratifica el test de Shapiro realizado.



**Figura 61. Gráfico de cajas: Poder calórico relacionado con la cantidad de oxígeno dosificado**



**Figura 62. Distribución cuantil-cuantil del poder calórico inferior relacionado con la cantidad de oxígeno dosificada**

#### **4.1.5. EFECTO COMBINADO DE LOS FACTORES FUERZA DE COMPACTACIÓN Y CANTIDAD DE OXÍGENO DOSIFICADO**

Hasta aquí los efectos de los factores “Fuerza de Compactación” y “Cantidad de Oxígeno dosificada” se han realizado independientemente, sin embargo un análisis combinado se presenta a continuación para analizar la interacción de los factores mencionados.

El ANOVA realizado que se observa en la Tabla 18 para los dos factores de estudio, ratifica en primer lugar lo analizado anteriormente con los factores independientes, pues la columna p-valor tiene tendencia a cero, en el análisis combinado de los factores arroja un p-valor de 0.0037 lo cual es significativamente menor a 0.05, esto representa estadísticamente que existe una interacción entre los dos factores y que los mismos no actúan independientes en el poder calórico obtenido.

Para entender qué relación de combinación existe entre los factores, se realizó un análisis de Duncan y las interacciones binarias pertinentes se muestran en la Tabla 19.

**Tabla 18.**

**Análisis de varianza del poder calórico inferior relacionado con la fuerza de compactación, cantidad de oxígeno y efecto combinado**

Efecto Combinado						
F.V.	SC	GI	CM	F	p-valor	
Modelo.	62,63	5	13	45,00	0,0000	
COMPACTACIÓN	9,32	1	9	34,00	0,0000	
OXIGENO	33,47	2	17	61,00	0,0000	
COMBINADO						
COMPAC*OXIG.	3,27	2	2	6,00	0,0037	
Error	27,61	100	0			
Total	90,24	105				

**Tabla 19.**

**Prueba de Duncan del poder calórico inferior relacionado con la fuerza de compactación, cantidad de oxígeno y efecto combinado**

Efecto Combinado						
Test: Duncan Alfa=0,01						
Error: 0,2761 gl: 100						
OXIGENO	COMPACTACIÓN	Medias	n	E.E.		
O MENOR	2T	13,71	6	0,21	A	
O MENOR	1T	13,99	12	0,15	A	
O IGUAL	2T	14,83	38	0,09	B	
O MAYOR	2T	14,85	6	0,21	B	
O MAYOR	1T	15,62	12	0,15		C
O IGUAL	1T	16,07	32	0,09		C

Se forman tres grupos combinados. El primer grupo (A) muestra que para una cantidad de oxígeno insuficiente es indiferente trabajar con una compactación de 1T ó 2T pues, ya que el oxígeno es un reactivo limitante su poder de llenar los espacios intersticiales del pellet también se limita.

El segundo grupo (B) revela que si se trabaja con una compactación de 2T, el efecto del factor oxígeno queda anulado, lo que ya fue discutido anteriormente.

Cabe señalar que las 2 poblaciones de los dos últimos grupos analizadas son para el primer caso 32 muestras y para el segundo 12, si bien el software estadístico permite realizar análisis en poblaciones desbalanceadas es altamente recomendable balancearlas para obtener resultados más confiables.

El tercer grupo (C) está conformado por los pellets compactados con 1T y cantidad de oxígeno dosificado O MAYOR y O IGUAL. Este caso también fue discutido anteriormente, pero cabe mencionar que para este análisis se disminuyó la sensibilidad a un 99,99% de confianza, pues debido a la naturaleza desbalanceada de la información un análisis con un 95% resultó muy riguroso.

Entre estos tres grupos hay diferencias estadísticamente significativas intergrupales más no intragrupalas.

## 4.2. ANÁLISIS ECONÓMICO DEL PROYECTO

### 4.2.1. PRESUPUESTO REFERENCIAL PARA LA INVESTIGACIÓN

#### 4.2.1.1. COSTOS INDIRECTOS

Tabla 20.

#### Costos indirectos

<b>PERSONAL ASESOR</b>				
<b>NOMBRE</b>	<b>CARGO</b>	<b>TIEMPO</b>	<b>VALOR</b>	<b>TOTAL</b>
		<b>HORAS</b>	<b>(USD/HORA)</b>	<b>(USD)</b>
<b>Tutor</b>	Director	\$ 24.00	\$ 20.00	\$ 480.00
<b>Oponente</b>	Revisión	\$ 24.00	\$ 20.00	\$ 480.00
			<b>TOTAL</b>	<b>\$ 960.00</b>

#### 4.2.1.2. MISCELÁNEOS

Tabla 21.

##### Misceláneos

DESCRIPCIÓN	COSTO (USD)
ÚTILES DE OFICINA	\$ 60.00
TRANSPORTE	\$ 200.00
SERVICIOS BÁSICOS	\$ 100.00
IMPRESIONES	\$ 90.00
COPIAS DE TEXTOS	\$ 50.00
VARIOS	\$ 100.00
<b>TOTAL</b>	<b>\$ 600.00</b>

#### 4.2.1.3. COSTOS DIRECTOS

Tabla 22.

##### Costos Directos

PERSONAL EJECUTOR				
NOMBRE	CARGO	TIEMPO (HORAS)	VALOR (USD/HORA)	TOTAL (USD)
<b>Maestrante 1</b>	Ejecutor	\$ 250.00	\$ 5.00	\$ 1,250.00
<b>Maestrante 2</b>	Ejecutor	\$ 250.00	\$ 5.00	\$ 1,250.00
			<b>TOTAL</b>	<b>\$ 2,500.00</b>

#### 4.2.1.4. MATERIALES Y EQUIPOS

Tabla 23.

#### Materiales y Equipos

DESCRIPCIÓN	CANT	COSTO UNITARIO	COSTO TOTAL
		(USD)	(USD)
Ventilador	1	\$ 200.00	\$ 200.00
Soplador	1	\$ 100.00	\$ 100.00
Bomba	1	\$ 150.00	\$ 150.00
Instrumentos de medida (alquiler Horas)	10	\$ 25.00	\$ 250.00
Intercambiador de calor alterno	1	\$ 1,200.00	\$ 1,200.00
Materia prima (residuos de maíz) qq	6	\$ 15.00	\$ 90.00
		TOTAL	\$ 1,990.00



#### 4.2.1.5. OTROS COSTOS DIRECTOS

Tabla 24.

Otros costos directos

DESCRIPCIÓN	COSTO
	(USD)
BIOCALEFÓN	\$ 600.00
AYUDANTE	\$ 300.00
LOGÍSTICA	\$ 300.00
<b>TOTAL</b>	<b>\$ 1,200.00</b>

#### 4.2.1.6. RESUMEN DE COSTOS

Tabla 25.

Resumen de costos

DESCRIPCIÓN	COSTO
	(USD)
<b>COSTOS INDIRECTOS</b>	<b>\$ 1,560.00</b>
PERSONAL ASESOR	\$ 960.00
MISCELÁNEOS	\$ 600.00
<b>COSTOS DIRECTOS</b>	<b>\$ 5,640.00</b>
PERSONAL EJECUTOR	\$ 2,500.00
MATERIALES Y EQUIPOS	\$ 1,990.00
OTROS COSTOS DIRECTOS	\$ 1,200.00
IMPREVISTOS (3% CD+C)	\$ 217.00
<b>TOTAL</b>	<b>\$ 7,417.00</b>

## **CAPÍTULO 5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES**

### **5.1. CONCLUSIONES**

- En el presente trabajo se determinó un poder calórico inferior de 16.07 kJ/g para la tusa con un 13.71% de humedad medido en un pellet compactado con una fuerza de una tonelada (124 MPa), valor que es 8.36% mayor al obtenido con un pellet compactado con una fuerza de dos toneladas.
- La humedad estimada en base húmeda de la tusa secada durante un año a condiciones ambientales bajo techo, se redujo de un 38.52% a 13.71%. Con este procedimiento se demostró que este tipo de biomasa puede perder hasta un 65% de humedad sin necesidad de utilizar energía adicional de secado lo que favorece la eficiencia total del proceso.
- La densidad de los pellets es proporcional a la fuerza de compactación utilizada, se obtuvieron valores de 909.115 y 1088,439 Kg/m<sup>3</sup> para 1T y 2T respectivamente.
- El valor de poder calórico inferior obtenido al utilizar una fuerza de una tonelada para compactar el pellet fue de 16.07 kJ/g comparado con 14.83 kJ/g que se obtuvo al compactar el pellet con dos toneladas, es decir, se obtuvo un incremento del 8.36% al disminuir la fuerza de compactación. Este valor no es comparable con estudios de briquetaje pues en ellos se utiliza aglutinantes en la compactación.
- El análisis estadístico aplicado mostró que al utilizar oxígeno en cantidad inferior a la estequiométrica incide negativamente en el poder calórico obtenido, sin embargo al utilizar oxígeno en exceso arrojó resultados similares al obtenido al utilizar oxígeno en cantidad

estequiométrica, lo cual demuestra que el proceso solo emplea lo requerido para la reacción de combustión.

- El análisis estadístico combinado bifactorial mostró que existen tres grupos con diferencias estadísticamente significativas:
  - A: O MENOR y fuerza de compactación de 1T (124 MPa) y 2T (249 MPa).
  - B: Fuerza de compactación 2T Oxígeno dosificado igual o mayor (O IGUAL Y OMAYOR)
  - C: Fuerza de compactación de 1T y O MAYOR y OIGUAL

## 5.2. RECOMENDACIONES

- La biomasa representa una alternativa importante como recurso energético. El Ecuador posee abundante fuentes de residuos sólidos agrícolas tales como cáscara de cacao, cáscara de banano y cáscara de frutas que se podrían utilizar como fuentes de energía por lo cual se debería promover proyectos de investigación al respecto.
- Puesto que los resultados de la fuerza de compactación sobre el poder calórico obtenido en este proceso revelan que existe una relación inversa sería recomendable realizar un estudio más extenso para evaluar este comportamiento.
- Diseñar, construir e implementar cocinas que funcionen exclusivamente con biomasa residual sólida, para utilizarlas en las zonas rurales de nuestro país.
- Realizar un estudio energético de la tusa de maíz para diferentes variedades y buscar modificaciones genéticas para incrementar el poder energético de esta especie.

- Existe otro factor importante no considerado en este estudio que es el tamaño de partícula obtenido después de la molienda de la tusa, se recomienda investigar este factor para ver su influencia en el poder calórico.

## BIBLIOGRAFÍA

- Acciona. (2006). *Fundación para Estudios sobre la Energía*. Obtenido de <http://maikelnai.elcomercio.es/2007/02/25/el-procesamiento-con-plasma-convierte-la-basura-en-energia-limpia/>
- Acero, H., & Rodriguez, J. (2012). Reemplazo del Diesel por la Cascarilla de Arroz para Generación de Vapor. Guayaquil, Guayas, Ecuador.
- Acevedo, H., & Mantilla, J. (2008). Caracterización de los Biocombustibles en Colombia. *Boletín del Observatorio Colombiano de Energía*, 15-31. Obtenido de Ministerio de Minas y Energía.
- ActuaForest. (30 de Enero de 2013). *TodoBiomasa.com*. Obtenido de La Biomasa:  
<http://www.todosbiomasa.com/escaparate/verpagina.cgi?idpagina=20637742&refcompra=>
- AgroWaste. (Febrero de 2013). Obtenido de Gasificación:  
<http://www.agrowaste.eu/wp-content/uploads/2013/02/GASIFICACI%C3%93N.pdf>
- Aguado, J., Serrano, D., Escola, J. M., & Briones, L. (2011). El papel de la Química en la valorización de los residuos plásticos. *Química y Medio Ambiente*, 76-83.
- Arteaga, J., Arenas, E., Lopez, D., Sanchez, C., & Zapata, Z. (2012). OBTENCIÓN DE BIOCMBUSTIBLES PRODUCTO DE LA PIROLISIS RÁPIDA DE RESIDUOS DE PALMA AFRICANA (*Elaeis guineensis* Jacq.). *Bioteología en el Sector Agropecuario y Agroindustrial*, 146-147.
- Arzola Ruiz, J. (2000). *Sistemas de Ingeniería*. La Habana: Felix Varela.

- Asociación de Empresas de Energía Renovables. (2009). APPA. Obtenido de ¿Qué es la Biomasa?: [http://www.appa.es/04biomasa/04que\\_es.php](http://www.appa.es/04biomasa/04que_es.php)
- Avila, E. (aBRIL de 2009). BIOGÁS: OPCIÓN REAL DE SEGURIDAD ENERGÉTICA PARA MÉXICO. Mexico D.F.
- Barriga Rivera, A., Delgado Plaza, E., Guevara Sáenz de Viteri, J., Peralta Jaramillo, J., Naranjo Valencia, M., & Villalta Delgado, K. (2014). *Introducción al Estudio de Fuentes Renovables de Energía*. Quito: Proyecto Latin.
- Barriga, A. (22 de Nov de 2007). *Aplicaciones de Biomasa*. Quito, Pichincha, Ecuador. Obtenido de ESPOL.
- Barriga, A., & Balseca, M. (2013). *Deposito de documentos de la FAO, ECUADOR*. GUAYAQUIL.
- Basu, P. (2010). *Biomass Gasification and Pyrolysis Practical Design and Theory*. Burlington, MA: Elsevier.
- Bell, D. (28 de Noviembre de 2011). *Gasificación*. Laramie, Wyoming, Estados Unidos: Universidad de Wyoming.
- Belonio, A. T. (2005). *Rice Husk Gas Stove Handbook*. Iloilo: APPROPRIATE TECHNOLOGY CENTER.
- BERMEO JIMÉNEZ , C. F., & GUAMÁN MÉNDEZ , M. U. (Julio de 2012). Proyecto de Grado Previo a la obtención del Título de: INGENIERÍA EN CONTADURÍA PÚBLICA Y AUDITORÍA-CPA. *DIAGNOSTICO E IMPLEMENTACIÓN ESTRUCTURAL DE UNA GASIFICADORA QUE ACELERE EL PROCESO DE MADURACIÓN DE LA FRUTA*. Milagro, Ecuador: Universidad Estatal de Milagro.
- BIOENERGY INTERNATIONAL. (12 de Marzo de 2010). *Bioenergy*. Obtenido de <http://www.bioenergyinternational.es/noticias/News/show/gasificacion-updraft-energia-termica-respetuosa-con-el-medioambiente-243>

- Biomass Users Network. (2002). *Manuales sobre energía renovable: Biomasa/ Biomass*. Costa Rica: BUN-CA.
- Brandolini, A. (2005). *Recursos Fitogenéticos de America Latina*. Bergamo.
- Bridgwater, A. (1996). *Thermal Biomass conversion and utilisation Biomass Information System*. Reino Unido: European Commission.
- Burbano de Ercilla, S., & Gracia Muñoz, C. (2003). *Física General*. Tébar.
- Calle, J., & Ulloa, S. (2010). *Repositorio Universidad Politecnica Salesiana*. Recuperado el 07 de 02 de 2014, de <http://dspace.ups.edu.ec/>
- Campero Rivero, O. (2013). *Tecnologías en desarrollo*. Obtenido de Biomasa y Biocombustibles: [http://www.tecnologiasendesarrollo.org/dw/11BIOMASA\\_1ERA\\_PART E.pdf](http://www.tecnologiasendesarrollo.org/dw/11BIOMASA_1ERA_PART E.pdf)
- Carrera Carrillo, J. (2012). Los colores del maíz. *Agrodiversidad Campesina del Ecuador*.
- Castells, X. E., & Bordas Alsina, S. (2012). *Energía, Agua, Medioambiente, territorialidad y Sostenibilidad*. Diaz de Santos. Obtenido de Procesos Termoquímicos: <http://www.cps.unizar.es/~proter/Gasificaci%F3n.htm>
- Cengel, Y. (2009). *Termodinámica*. Mexico DF: Mc Graw Gill.
- cleanergysolar. (4 de Junio de 2011). *Cleanergysolar*. Obtenido de La cáscara de arroz, materia prima potencial para producir bioetanol en los países arroceros.: <http://www.cleanergysolar.com/2011/06/04/la-cascara-de-arroz-materia-prima-potencial-para-producir-bioetanol-en-los-paises-arroceros/>
- Cleary, L. (12 de Enero de 2013). *eHow en Español*. Obtenido de Cómo convertir la cascarilla de arroz en combustible alternativo: [http://www.ehowenespanol.com/convertir-cascarilla-arroz-combustible-alternativo-como\\_216275/](http://www.ehowenespanol.com/convertir-cascarilla-arroz-combustible-alternativo-como_216275/)
- Conesa Ferrer, J. (2012). Diseño de reactores heterogéneos. *Reactores de lecho fluidizado*. Alicante, España.

- Corbi, A. (30 de Octubre de 2014). *Desarrollo Argentino*. Obtenido de Contaminación ambiental: la contaminación industrial y la producción limpia: <http://www.desarrolloargentino.org/desarrollo-sostenible/contaminacion-ambiental-la-contaminacion-industrial-y-la-produccion-limpia>
- Corporación para la Investigación Energética. (2013). *Bioenergía*. QUITO: CIE.
- Corporación para la Investigación Energética. (26 de Septiembre de 2013). *CIE*. Obtenido de [http://www.energia.org.ec/cie/?page\\_id=45](http://www.energia.org.ec/cie/?page_id=45)
- De Dios, C. A. (1996). *Secado de Granos y Secadores*. Santiago de Chile.
- De Souza-Santos, M. (2004). *Solid Fuels Combustion and Gasification: Modeling, Simulation, and Equipment Operations*. Sao Paulo: CRC Press.
- DECEM. (2013). Misión DECEM. *Departamento de Ciencias de la Energía y Mecánica*, 1.
- DECEM. (2013). Visión DECEM. *Departamento de Ciencias de la Energía Mecánica*, 1.
- Dirección de Biomasa y Cogeneración. (24 de Septiembre de 2013). *Ministerio de Electricidad y Energía Renovable*. Obtenido de <http://www.energia.gob.ec/coogeneracion/>
- Dirección de Biomasa y Cogeneración. (2014). *Ministerio de Electricidad y Energía Renovable*. Obtenido de <http://www.energia.gob.ec/coogeneracion/>
- E-Center*. (2014). Obtenido de Gasificación, Historia, Reacciones Químicas, Procesos de gasificación, Materia Prima, Las aplicaciones actuales: [http://centrodeartigos.com/articulos-enciclopedicos/article\\_87179.html](http://centrodeartigos.com/articulos-enciclopedicos/article_87179.html)
- Echarri Prim, L. (1998). *Ciencias de la Tierra y Medio Ambiente*. Teide. Obtenido de



<http://www.tecnun.es/asignaturas/Ecologia/Hipertexto/07Energ/170EnBiom.htm>

Echeverría Cruz & López Mena. (2010). *Caracterización energética de la cascarrilla de arroz para su aplicación en la generación termoeléctrica*. Quito.

Echeverría Cruz, M. A., & López Mena, O. A. (Mayo de 2010). *Caracterización energética de la cascarrilla de arroz para su aplicación en la generación de energía termoeléctrica*. Quito, Pichincha, Ecuador.

ECOENG. (2014). *ECOENG Environment*. Obtenido de Gasification: <http://www.ecoeng.eu/en/technologies/gasification/>

EdRB. (2012). *SlidePlayer*. Obtenido de Soluções em energia e meio ambiente: <http://www.ews-sa.com/alternative-solutions-for-waste-management.php>

El Comercio. (22 de Noviembre de 2009). La biomasa, una fuente poco explotada. *El comercio*. Obtenido de <http://www.elcomercio.com/actualidad/biomasa-fuente-explotada.html>

El Universo. (29 de Noviembre de 2009). Un proyecto con la cascarrilla de arroz ayuda al ambiente. *El Universo*.

Elbert, J. (10 de Abril de 2011). *syngasTek*. Obtenido de Syngas: <http://syngastek.org/biocomposites/>

ERenovable. (Noviembre de 2014). *Energía Renovable*. Obtenido de Energía de Biomasa: <http://erenovable.com/energia-de-biomasa/>

ESPE. (2013). *Quiénes Somos? / Filosofía*. ESPE. Recuperado el Julio de 2013, de ESPE: <http://www.espe.edu.ec/portal/portal/main.do?sectionCode=77>

Espinoza, J. (2011). *Google Académico*. Obtenido de Google Académico: <http://core.ac.uk/download/pdf/11054742.pdf>

- Estrada, C. A., & Zapata Meneses, A. (2004). Gasificación de Biomasa para Producción de Combustibles de Bajo Poder Calorífico y su Utilización en Generación de Potencia y Calor. *Scientia et Technica Año X*, 155.
- FAO. (1993). *Depósito de Documentos de la FAO*. Recuperado el 4 de febrero de 2014, de <http://www.fao.org/docrep/x5027s/x5027S02.htm>
- Fernández, J. (23 de Enero de 2009). Obtenido de Energía de la biomasa: tipos de biomasa y su aprovechamiento energético: <http://www.monografias.com/trabajos66/biomasa-eficiencia-energetica/biomasa-eficiencia-energetica3.shtml>
- Fondeur, C. (18 de Agosto de 2009). *La tusa: usos y aplicaciones*. Recuperado el 8 de febrero de 2014, de Blog el tajo: el tajo1.blogspot.com/2009/08/latusa-uso-aplicaciones
- Food and Agriculture Organization for de United Nation. (1998). *Secado de granos y secadoras*. Obtenido de Dirección de Sistemas de Apoyo a la Agricultura: <http://www.fao.org/3/a-x5028s/X5028S04.htm>
- Forero Sandoval, J. D. (2013). Tusa del maíz: una fuente de energía renovable. *universitas Científica*, 62-65.
- Frers, C. (05 de Agosto de 2010). *Eco Portal*. Obtenido de S.O.S. contaminación ambiental: [http://www.ecoportel.net/Temas\\_Especiales/Contaminacion/s\\_o\\_s\\_contaminacion\\_ambiental](http://www.ecoportel.net/Temas_Especiales/Contaminacion/s_o_s_contaminacion_ambiental)
- Garcés, F. (29 de junio de 2012). *Poderes*. Recuperado el 8 de febrero de 2014, de Maíz: La producción se incrementa y también el descontento: <http://poderes.com.ec/2012/maiz-la-produccion-se-incrementa-y-tambien-el-descontento/>
- García Garrido, S. (2013). *Centrales Termoeléctricas de Biomasa*. Madrid.
- Gómez Barea, A. (11 de Abril de 2013). *Fundamentos del proceso de gasificación*. Ciudad Real, España.

- Gomez, J. (Julio de 2010). MODELO NO ISOTÉRMICO DE GASIFICADORES. Madrid, España.
- Gómez, J. C. (11 de Enero de 2014). Se inicia siembra de arroz con expectativa de nuevo precio. *El Universo*.
- Graham, N., Shehan, P., & Wright. (2007). Current and Potential U.S. Corn Stover Supplies. *Agronomy Journal*.
- GREENPEACE. (Agosto de 2011). Gasificación, pirólisis y plasma. *Nuevas tecnologías para el tratamiento de residuos urbanos: viejos riesgos y ninguna solución*. Buenos Aires, Argentina. Obtenido de Nuevas tecnologías para el tratamiento de residuos urbanos: viejos riesgos y ninguna solución: <http://noalaincineracion.org/wp-content/uploads/riesgos-tecnologias-residuos-urbanos.pdf>
- Guerrero Contreras, J. C., & Gamboa Niño, C. F. (2009). *Diseño Conceptual de una Planta Piloto de Combustión para el Aprovechamiento Energético de la Biomasa Residual del Maíz*. Bucaramanga, Colombia: Universidad Industrial de Santander.
- HEURA. (23 de Abril de 2012). *Expertos en Medio Ambiente Industrial*. Obtenido de ¿Que es la Biomasa?: <https://heuramedioambiente.wordpress.com/2012/04/23/que-es-la-biomasa/>
- Huaraz Choi, C. Y. (Abril de 2013). *Diseño de un gasificador de 25 kW para aplicaciones domésticas usando como combustible cascarilla de arroz*. Lima, Peru.
- IDAE. Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía. (Octubre de 2007). *Biomasa: Gasificación*. Madrid, España.
- Incropera, F., & DeWitt, D. (1999). *Fundamentos de transferencia de calor* (4a ed.). México: Prentice Hall.
- INEC, ECUADOR. (2012). *Encuesta de superficie y producción agropecuaria continua*. Recuperado el 08 de 02 de 2014, de Encuesta de superficie

y producción agropecuaria continua:  
[http://www.inec.gob.ec/ESPAC2012/InformeEjecutivo.pdf?TB\\_iframe=true&height=600&width=1000](http://www.inec.gob.ec/ESPAC2012/InformeEjecutivo.pdf?TB_iframe=true&height=600&width=1000)

Instituto Nacional de Seguridad e Higiene en el Trabajo. (2014). Obtenido de Instituto Nacional de Seguridad e Higiene en el Trabajo:  
[http://www.insht.es/InshtWeb/Contenidos/Normativa/TextosLegales/RD/2004/2267\\_04/Ficheros/tabla1\\_4.pdf](http://www.insht.es/InshtWeb/Contenidos/Normativa/TextosLegales/RD/2004/2267_04/Ficheros/tabla1_4.pdf)

Instituto Nacional de tecnología industrial. (2011). *Aspectos de la generación de calor por combustión de desechos foresto-industriales densificados*. Cordoba, Argentina.

International Energy Agency . (2008). *Energy Technology Perspectives*. Paris: OECD/IEA.

*Introducción al Análisis de Varianza*. (s.f.). Recuperado el 13 de mayo de 2015, de <http://web.udl.es/Biomath/Bioestadistica/Dossiers/Temas%20especiales/ANOVA/ANOVA%201F%20Introduccio.pdf>.

Izaguirre, C., & Erazo, D. (28 de Enero de 2011). *Resumen de la Tecnología de Gasificación*. Recuperado el 2014, de AGROENHSA:  
<http://agroensa.com/static/docs/2375RESUMEN%20DE%20LA%20TECNOLOGIA%20DE%20GASIFICADOR.pdf>

Jácome, E., & Lanás, J. (Marzo de 2015). Evaluación Termodinámica y simulación del comportamiento de un gasificador tipo downdraft al combustión de Eucalipto rechazos de café y cacao. Sangolquí, Pichincha, Ecuador: Universidad de las Fuerzas Armadas - ESPE.

Jones, C. A., Griggs, R., Williams, J., & Srinivasan, R. (1 de Feb de 2001). *Predicción de la erosión de suelos*. Obtenido de Depósito de Documentos de la FAO:  
<http://www.fao.org/docrep/t2351s/t2351s03.htm>

- Keener, H. (1981). Pyrolysis and combustion of corncobs in a fluidized bed: Measurement and analysis of behavior.
- Kunii, D., & Levenspiel, O. (1991). *Fluidization Engineering*. USA: Butterworth-Heinemann.
- Laboratorio de Energías Renovables - ESPE. (2014). Gadificador Downdraft. Ecuador.
- LIPPEL. (03 de 01 de 2013). *Sustentabilidad Briquetaje y Peletizacion*. Recuperado el 28 de 08 de 2013, de <http://www.lippel.com.br/es/sustentabilidad/briquetaje-y-peletizacion.html>
- Lopatinsky Prado, M. M. (2008). *Obtención de Bio-combustible orgánico a partir de Zea Mays con aplicación de Alfa-Amialsa*. Guayaquil: ESPOL.
- Martin, F. M. (2000). *Francisco Marcos Martin*. Recuperado el 04 de 04 de 2015, de Standardization of solid: [http://www.infomadera.net/uploads/articulos/archivo\\_2293\\_9990.pdf](http://www.infomadera.net/uploads/articulos/archivo_2293_9990.pdf)
- Martínez Ángel, J. D., Pineda Vásquez, T. G., López Zapata, J. P., & Betancur Vélez, M. (Enero de 2010). *Experimentos de combustión con cascarilla de arroz en lecho fluidizado para la producción de ceniza rica en sílice*. Medellín, Colombia.
- Martínez Capón, C. (2014). *Diseño de una planta de gasificación de lodos de EDAR para tratamientos de 28000 Mg/año de fango seco*. Barcelona, España.
- Mata, T., Martins, A., & Caetano, N. (2007). Microalgae for biodiesel production and other applications: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 217-232.
- Mckendry, P. (2002). *Energy Production for Biomass*.
- Megyesy, E. (2001). *PRESSURE VESSEL HADBOOK*. Tulsa, Oklahoma: Library of Congress Control.

- Mendoza Rivera, H. (2002). *Probabilidad e Inferencia Básica*. Obtenido de Universidad Nacional de Colombia: [http://www.virtual.unal.edu.co/cursos/ciencias/2000352/html/un3/cont\\_317-60.html](http://www.virtual.unal.edu.co/cursos/ciencias/2000352/html/un3/cont_317-60.html)
- Ministerio de Electricidad y Energía Renovable. (2014). *Ministerio de Electricidad y Energía Renovable*. Obtenido de Dirección de Biomasa y Coogeneración: <http://www.energia.gob.ec/aprovechamiento-de-residuos-agropecuarios/>
- Ministerio de Salud y Ambiente. (2001). *DOCUMENTOS PREVIOS A LA REUNIÓN DE MINISTROS DE SALUD Y DE AMBIENTE DE LAS AMÉRICAS*. Buenos Aires: Republica Argentina. Obtenido de Secretaría de agricultura, ganadería, pesca y alimentación.
- Ministerio del Ambiente. (2012). *Texto Unificado Legislación Secundaria, Medio Ambiente*. Quito.
- MITCHELL, J., PETTYGROVE, G., UPADHYAYA, S., SHRESTHA,, A., FRY, R., HOGAN, P., . . . HEMBREE, K. (2009). University of California. *Classification of Conservation Tillage Practices*. Oakland, California, Estados Unidos: UC PEER REVIEWED.
- Moreira, G. &. (Marzo de 2013). Diseño Geoespacial para gestion ambiental del valle de los Chillos. *GESTIÓN AMBIENTAL*. Sangolqui, Pichincha, Ecuador.
- Moreno, F. H. (2012). Diseño estadístico para la remocion de colorante rojo 40 sobre la tuza de maiz. *Produccion mas limpia*, 13.
- Nalladurai Kaliyan, R. V. (2010). Densification Characteristics of Corn Cobs. *SCOPUS*, 2-5.
- Novoa Casares, V. A. (2012). Elaboración de aglomerados de carbón y residuos de cosecha de maíz )tusa= como combustible sólido para uso industrial y doméstico.

- Organisation for Economic Cooperation and Development. (2000). *NationMaster*. Obtenido de Environment > Municipal waste generation: Countries Compared: <http://www.nationmaster.com/country-info/stats/Environment/Municipal-waste-generation>
- Ostargi - Energías Alternativas*. (2014). Obtenido de Gasificación de Biomasa: <http://ostargi.biz/energia-y-frio-por-biomasa/gasificacion-de-biomasa/>
- Padilla, e. (2000). Especies usadas como comburente en la comunidad de Villanueva Estado Lara - Venezuela. *Forestal*, 15.
- Palacio Betancur, L. E. (2005). *Caracterización de propiedades fluidodinámicas de lechos fluidizados en frío con mezclas de carbón - biomasa usadas en procesos de co-gasificación*. Medellín, Colombia.
- Palatnic Ampuero, M. E. (Marzo de 2011). *DISEÑO Y DESARROLLO DE PEQUEÑAS UNIDADES DE GASIFICACIÓN DE MADERA PARA APLICACIONES DE GENERACIÓN DE ENERGÍA TÉRMICA Y COGENERACIÓN A BAJA ESCALA*. Santiago de Chile, Chile.
- Pasturas de América. (2011). *Pasturas de América*. Recuperado el 12 de 02 de 2014, de Pasturas de América: [www.pasturasdeamerica.com/utilizacion-forrajes/residuos-agricolas/maiz/](http://www.pasturasdeamerica.com/utilizacion-forrajes/residuos-agricolas/maiz/)
- Peralta, E., & Tobar Vaca, M. N. (2006). *Mejora genética de la variedad de maíz chillo (Zea Mays L.) por selección masal visual estratificada moderna (Segundo Ciclo)*, IASA , ESPE. Sangolqui: tesis.
- Pérez, G., & Montenegro, L. (2015). *Reporte de Análisis LAI-15-20 OT.2667*. Quito: EPN.
- Periodico Luz Verde. (28 de Agosto de 2013). *Luz Verde*. Obtenido de La cascarilla de arroz: <http://periodicoluzverde.com/la-cascarilla-de-arroz/>

- Prada, A., & Cortés, C. (2010). La Descomposición Térmica de la Cascarrilla de Arroz: Una Alternativa de Aprovechamiento Integral. *SciElo*, Vol 14.
- Prando, R. (2014). 4ta. CHARLA: BIOMASA. *ENERGÍAS RENOVABLES EN LA INDUSTRIA DE PROCESOS.*, (págs. 2-6). Montevideo.
- Proenza, N., Cala, R., Silveira, J., & Zansi, R. (2006). Estudio termodinámico y dimensionamiento de un gasificador downdraft para um sistema de cogeneración compacto en comunidades aisladas. *Revista Ciencias Exactas Taubate*, 53-62.
- Quinceno Villada, D., & Mosquera Gutierrez, M. Y. (2010). Alternativas Tecnológicas para el uso de la Cascarrilla de Arroz como Combustible. Santiago de Cali, Cali, Colombia: Universida Autonoma de Occidente.
- Ramirez, J., Martinez, J., & Petro, S. (2007). *BASIC DESIGN OF A FLUIDIZED BED GASIFIER FOR RICE HUSK ON A PILOT SCALE.* Campinas, Sao Paulo, Brasil: Latin American Applied Research.
- Recovered Energy, Inc. (20 de Enero de 2004). *Revered Energy*. Obtenido de Frequent Questions: <http://www.recoveredenergy.com/literature/preguntas.pdf>
- Restrepo, L. F. (6 de abril de 2007). Tipos de suma de cuadrados en el análisis de varianza. Medellín, Colombia.
- Rincón, S., Gómez, A., & Klose, W. (2011). *Gasificación de biomasa residual de prcesamiento agroindustrial.* Kassel, Alemania.
- Rodriguez, A. D., Zaleta Aguilar, A., Olivares Arriaga, A., & Torres Chimal, F. (22 de Septiembre de 2010). *Análisis y Diseño de un Sistema de Gasificación de Biomasa.* Monterrey, Nuevo Leon, Mexico.
- Rueda, J. (19 de Agosto de 2013). *Universidad Nacional de Colombia.* Obtenido de Introducción al Diseño Experimental: <http://www.unalmed.edu.co/~jarueda/PDE.pdf>



- Salas, D. (03 de Abril de 2011). *El Imperdible*. Obtenido de Energías verdes, una manera de evitar el calentamiento global.: <http://elimperdible.ec/web/medioambiente/energias-verdes-una-manera-de-evitar-el-calentamiento-global.html>
- Santillán, M. (1 de Octubre de 2014). Cáscara de arroz será usada para fabricar llantas. *AutoCosmos*.
- Shafizadez, F. (1985). *Fundamentals of Thermochemical Biomass Conversion*. England: ELSEVIER APPLIED SCIENCE PUBLISHERS
- Solar Technical Information Program. (1988). *Handbook of Biomass Downdraft Gasifier Engine Systems*. Seri.
- Tamayo, M. V. (22 de 02 de 2012). *repositorio.espe.edu.ec*. Obtenido de [repositorio.espe.edu.ec](http://repositorio.espe.edu.ec): <http://repositorio.espe.edu.ec/bitstream/21000/5173/1/T-ESPE-033171.pdf>
- Tecnologías y Materiales. (17 de Abril de 2012). *ARQZINE*. Obtenido de La cascarilla de arroz: Nuevo material para elaborar hormigón: <http://arqzine.com/mag/tecnologias-y-materiales/la-cascarilla-de-arroz-nuevo-material-para-de-hormigon/>
- The American Society of Mechanical Engineers. (2010). *Tuberías de procesos, Código ASME para tuberías a presión, B31*. New York: ASME.
- The American Society of Mechanical Engineers. (2012). *Código ASME Sección VIII Div. 1 Diseño, Construcción e Inspección de Tanques y Recipientes de Presión*. New York: ASME.
- Turns, S. R. (2000). *An Introduction to combustion concepts and applications* (Second ed.). McGraw-Hill.

- U.S. Department of Energy. (2006). *Biodiesel Handling and Use Guidelines*. Springfield U.S.: Office of Scientific and Technical Information. Obtenido de U.S. Department of Energy.
- UNIDECO. (Febrero de 2009). *UNIDECO MAQUINAS PARA LA AGRO Y CONSTRUCCIÓN*. Recuperado el JULIO de 2013, de Tecnología de Gasificación: [www.undeco.com](http://www.undeco.com)
- Vighi Arroyo, F. (2012). *IngenieroAmbiental.com*. Obtenido de Salud y Seguridad Laboral en ambientes térmicos: [http://www.ingenieroambiental.com/4012/LSI\\_Cap10.pdf](http://www.ingenieroambiental.com/4012/LSI_Cap10.pdf)
- Westitan International Green Energy. (2014). *Alibaba.com*. Obtenido de <http://spanish.alibaba.com/product-gs/capacity-100m3-h-to-3000m3-h-biomass-gasifier-gasification-system-circulating-fluidized-bed-1131197847.html>
- WIKIPEDIA. (16 de 05 de 2015). *WIKIPEDIA. OORG*. Obtenido de <http://es.wikipedia.org/wiki/Arduino>
- Wilaipon, P. (2007). Physical Characteristics of Maize Cob Briquettes under Moderate Die Pressure.
- Wilhelm, W. W., Johnson, J. M., Hatfield, J. L., Voorhees, W. B., & Linden, D. (2004). Crop and Soil Productivity Response to Corn Residue Removal. *ACSESS*, 1-17.
- Yepez, D., & Chejine, F. (2012). Gasificación de biomasa residual en el sector floricultor, caso: Oriente Antioqueño. *Revista ION*.
- Yúfera, E. P. (1996). *Química Orgánica Básica y Aplicada: de la Molécula Industrial* (Vol. 1). Reverté.
- Yumrutas, R. M. (2002). *Exergy Analysis of Vapor Compression Refrigeration Systems*.
- Zapata Benabithé, Z., Rojas Rodríguez, D., Arenas Castiblanco, E., & Chejne Janna, F. (2005). *Producción de carbón activado a partir de*

*carbón subbituminoso en reactores de lecho fluidizado por proceso autotérmico. Medellín, Colombia.*

## **ANEXOS**