



**DISEÑO Y CONSTRUCCION DE UNA UNIDAD DE INVESTIGACION EN PIRÓLISIS  
CONTINUA DE BIOMASA**

**ANTONIO JOSE FAJARDO VILLAQUIRAN**

**UNIVERSIDAD DEL VALLE  
FACULTAD DE INGENIERIA  
ESCUELA DE INGENIERIA MECANICA  
SANTIAGO DE CALI FEBRERO DE 2011**

**DISEÑO Y CONSTRUCCION DE UNA UNIDAD DE INVESTIGACION EN PIRÓLISIS  
CONTINUA DE BIOMASA**

**ANTONIO JOSE FAJARDO VILLAQUIRAN**

**Proyecto: Tesis de grado para optar al título de Ingeniero Mecánico**

**Director  
Adolfo León Gómez  
Ingeniero Mecánico, M.Sc.**

**UNIVERSIDAD DEL VALLE  
FACULTAD DE INGENIERIA  
ESCUELA DE INGENIERIA MECANICA  
SANTIAGO DE CALI FEBRERO DE 2011**

Nota de Aceptación:

---

---

---

---

---

---

---

Firma del Presidente del Jurado

---

Firma del Jurado

---

Firma del Director de Trabajo de Grado

Santiago de Cali, Febrero 2011

## RESUMEN

El proyecto está enmarcado en el trabajo conjunto realizado en el Grupo de Investigación en Mejoramiento Industrial GIMI de la Escuela de Ingeniería Mecánica de la Universidad del Valle, y el Programa de Investigación en Procesos de Fábrica de Cenicaña, grupo *Valoración de Residuos del Corte de Caña de Azúcar*.

Este trabajo se realizó con el fin de diseñar y construir una “Unidad de Investigación en Pirólisis Continua de Biomasa” (UIPCB), el cual es un proceso que consiste en la descomposición térmica de la materia orgánica en ausencia de oxígeno u otros agentes gasificantes, generándose cantidades variables de gases, líquidos (alquitranes y aceites) y residuo carbonoso o char, donde el rango de temperaturas empleadas oscila entre 150 y 600 °C. En adición, se estudió la tecnología, con el fin de apropiar conocimiento para proyectos aplicados a fuentes de energía renovables en Colombia específicamente en la región azucarera del Valle del Cauca, la cual tiene alto potencial energético en la biomasa.

La biomasa a emplear son los Residuos Agrícolas Cañeros (RAC), hojas y cogollos, los cuales en la región son abundantes, además de ser un problema eventual para los cultivadores por que estos residuos son dejados en el terreno del cultivo ocasionando costos adicionales en su manejo. La opción de ser quemados en el campo (requema) ha sido eliminada por convertirse en un problema ambiental, además por reglamentaciones legales de ley.

En el proyecto se realizó una valoración energética de la biomasa, como también del proceso y selección de la tecnología de pirólisis más apropiada, y se diseñó los elementos constitutivos de la unidad.

Como la densidad de carga de los residuos del corte de caña es baja, entonces su alce, transporte, entrega y manejo son costosos, por ende en aras de encontrar alternativas tecnológicas viables, técnica, económica y ambientales, se propone que el pirolizador definitivo sea móvil, es decir que la planta sea la que se desplace al cultivo y realice el proceso, y de esta manera los productos de la pirólisis (bioproductos), serán bioaceites, biochar y biogases, para los cuales sus costos y requerimientos operativos de manejo son mucho menores, empleando el concepto de conversión de biomasa distribuida por pirólisis.

## **DEDICATORIA**

*A mis padres, Liliana y Armando, por ser mi pilar fundamental y apoyo incondicional, por siempre darme consejos y estar siempre conmigo en este camino llamado vida, acompañándome en la realización progresiva de mis sueños, por ustedes dos y para ustedes dos. Gracias Dios por mis padres.*

*A mi novia Lina, mi Namó, por estar conmigo en las buenas y malas, por ponerme los pies en la tierra y sobre todo por todo ese amor que me brindas, a tu familia por tratarme como un integrante más y enseñarme tantos valores en un hogar.*

*A mis "abue", Lilia e Irma, las mejores del mundo, y a toda mi familia, primos y primas, que siempre han sido y serán como hermanos, tíos y tías, consejeros y guías.*

*A todos mis amigos, por estar siempre conmigo incondicionalmente.*

*A todos ustedes este logro que no es mío, sino nuestro.*

## **AGRADECIMIENTOS**

*A Dios por la vida.*

*Al profesor Adolfo L. Gómez por abrirme las puertas a desarrollar este proyecto, por su tiempo y aporte invaluable en todas las etapas del mismo, y por los consejos en mi vida profesional.*

*A Cenicaña, sus empleados y personas que aportaron y colaboraron como Diego, Sara, Dr. Nicolás, Tatiana, y todo el equipo de fábrica, que de alguna manera contribuyeron al desarrollo del mismo.*

*A los profesores de Univalle, Juan M. Barraza, Guillermo Jaramillo, Fernando Casanova, Gerardo Cabrera y todos aquellos que aportaron desinteresadamente a la investigación.*

*A la escuela de ingeniería mecánica, y a Univalle por su formación académica.*

*Finalmente de nuevo a mis padres, mi novia y toda mi familia, muchas gracias.*

## TABLA DE CONTENIDO

RESUMEN .....	4
1. INTRODUCCION .....	12
1.1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA .....	12
2. MARCO TEORICO.....	13
2.1 ANTECEDENTES .....	13
2.2 JUSTIFICACION.....	17
2.3 GENERALIDADES.....	17
2.3.1 Biomasa .....	17
2.3.2 Etapas preliminares al proceso de Pirólisis .....	20
2.3.3 Proceso de Pirólisis.....	20
2.3.4 Los Productos De Pirólisis.....	22
2.3.5 Ventajas, desventajas y aplicaciones de la pirólisis y sus productos. ....	24
3. DESARROLLO DEL PROYECTO .....	26
3.1 POTENCIAL ENERGÉTICO DE LOS RESIDUOS AGRÍCOLAS CAÑEROS (RAC) Y SELECCIÓN DE LA TECNOLOGÍA DE PIRÓLISIS.....	26
3.1.1 Características de los Residuos Agrícolas Cañeros (RAC) en Colombia.....	26
3.1.2 Potencial del RAC disponible en Colombia .....	30
3.1.3 Situación actual del empleo de los RAC en Colombia (Instalaciones).....	32
3.1.4 Perspectivas del empleo de los RAC como combustible en Colombia (Pirólisis) .....	33
3.1.5 Rutas tecnológicas de Pirólisis “modelos” (actual, móvil, residuo-caña, densificación) .....	34
3.2 DISEÑO PRELIMINAR Y MONTAJE DE PRUEBAS DE LABORATORIO .....	37
3.3 DISEÑO CONCEPTUAL Y BÁSICO DE LA UNIDAD DE INVESTIGACIÓN EN PIRÓLISIS CONTINUA DE BIOMASA “UIPCB” .....	45
3.3.1 Módulo Común o Zona de Alimentación “ZA”.....	46
3.3.1.1 Capacidad teórica de la UIPCB .....	47
3.3.1.2 Análisis estático y dinámico del eje del tornillo transportador.....	49
3.3.1.3 Potencia necesaria para alimentar la biomasa RAC.....	49
3.3.2 Módulo Pirólisis o Zona de Reacción “ZR”.....	50
3.3.2.1 Modelo Transferencia de Calor.....	51
3.3.2.1.1 Propiedades de los materiales. ....	52
3.3.2.1.2 Suposiciones y Consideraciones de diseño. ....	54

3.3.2.2	Modelo Transferencia de Calor en Estado Estable .....	55
3.3.2.3	Modelo Transferencia de Calor Estado Transitorio.....	60
3.4	DISEÑO DEL SISTEMA DE CONDENSACIÓN .....	63
3.5	DISEÑO DEL SISTEMA DE CALENTAMIENTO.....	65
3.6	DISEÑO DEL SISTEMA DE SUMINISTRO DE AIRE Y DISPOSICIÓN DE LA CENIZA.....	67
3.7	DISEÑO COLECTORES DEL CHAR Y LÍQUIDOS.....	68
3.8	ENSAMBLE DE LA UIPCB.....	68
3.9	DISEÑO FINAL Y PLANOS DE CONSTRUCCIÓN.....	69
4.	PRUEBAS DE PIROLISIS EN LA UIPCB .....	70
4.1	DISEÑO EXPERIMENTAL .....	70
4.2	CARACTERIZACION DE LOS BIOPRODUCTOS.....	70
5.	RESULTADOS PIRÓLISIS. ....	71
6.	CONCLUSIONES .....	76
7.	RECOMENDACIONES .....	77
	REFERENCIAS.....	78
	ANEXOS	82



## TABLA DE CONTENIDO DE FIGURAS

Figura 1. Partes de la caña de azúcar. ....	13
Figura 2. Esquema del sistema de conversión de biomasa distribuida.....	16
Figura 3. Unidad Móvil de Pirólisis de Biomasa.....	16
Figura 4. Estructura de la Celulosa .....	18
Figura 5. Estructura Hemicelulosa.....	19
Figura 6. Estructura de lignina.....	19
Figura 7. Diagrama de bloques del proceso de obtención de Bio-Oil.....	20
Figura 8. Configuraciones del reactor para Pirólisis rápida.....	22
Figura 9. Muestra del Char obtenido en la prueba experimental de Pirólisis en el laboratorio de Cenicaña .....	22
Figura 10. Deshidratación natural de los residuos de la variedad MZC 74-275, encallados al 0x0 y 2x1, provenientes de cosechas manual y mecanizada. ....	29
Figura 11. Modelo del Potencial Energético del RAC. ....	31
Figura 12. RAC retirado por el sistema de limpieza. ....	32
Figura 13. Esquema general del pre tratamiento de la biomasa hasta la Biorefineria..	35
Figura 14. Montaje experimental prueba N° 1, para la Pirólisis del RAC.....	38
Figura 15. Toma de datos, aparición de un producto en las paredes del reactor y el condensador y obtención de bioaceite, prueba N° 1. ....	39
Figura 16. Medición de temperatura, prueba N° 1. ....	40
Figura 17. Muestra del char obtenido en la prueba experimental N° 1. ....	40
Figura 18. Muestra del material condensado, obtenido en la prueba experimental N° 1. ....	40
Figura 19. Reactor y conexión Reactor-Condensador aislado térmicamente, prueba N° 2 y N° 3. ....	42
Figura 20. Montaje experimental N°2 y N° 3, de Pirólisis de RAC.....	42
Figura 21. Gases no condensables en combustión a la salida del sistema de condensación, prueba N° 2 y N° 3.....	44
Figura 22. Material condensado, obtenido en el recolector, prueba N° 2 y N° 3. ....	44
Figura 23. Posible bioaceite, en combustión, prueba N° 3. ....	45
Figura 24. Esquema de la Unidad de Investigación en Pirólisis Continua de Biomasa. .	46
Figura 25. Módulo común y/o Zona de Alimentación de la UIPCB. ....	47
Figura 26. Hélices del tornillo de alimentación unidades en mm. ....	47
Figura 27. Módulo de Pirólisis .....	50
Figura 28. Vista en sección Módulo de Pirólisis o ZR unidades en mm. ....	51
Figura 29. Energia vs temperatura para Pirólisis.....	53
Figura 30. Modelo de la Biomasa RAC, a través del Reactor. ....	55
Figura 31. Dibujo esquemático de la zona de reacción de pirolisis, para el análisis por transferencia de calor. ....	56
Figura 32. Vista en corte de la biomasa a través del Reactor de Pirólisis. ....	58

Figura 33. Enmallado del modelo.....	58
Figura 34. Resultados del Flujo de Calor para $k_{RAC} = k_1 = 0.175 \text{ W/m}^{\circ}\text{K}$ ; $Q = 526.651 * 0.478 \text{ m}^2 = 251.7 \text{ W}$ . Flujo de Calor mostrado en Vectores. ....	60
Figura 35. Conductividad “KXX” y Entalpia “ENTH” vs Temperatura.....	61
Figura 36. Gráfica de la convergencia de la solución del modelo no lineal transitorio. ....	62
Figura 37. Trayectoria de la temperatura (°C) en función del tiempo (horas), del RAC en el centro del Reactor. ....	62
Figura 38. Distribución de Temperaturas en el Reactor para un tiempo $t = 0.414231$ , igual a 24.8 minutos, Temperatura RAC = 405.154 °C. ....	63
Figura 39. Foto en CAD del diseño del sistema de condensación y colector de bioaceite. .....	65
Figura 40. Curva de desempeño del sistema de calentamiento por combustión de cascarilla de arroz, de una plataforma de Pirólisis, Mr. Islam .....	68
Figura 41. Fotografía en programa CAD, de la UIPCB. ....	69
Figura 42. Equipo de pirólisis batch, para producción de biochar, Fabrica-Cenicaña. ..	71
Figura 43. Micro pirolizador, Fábrica-Cenicaña.....	72
Figura 44. Muestra de la biomasa RAC antes y después del proceso transformada en biochar.....	72
Figura 45. Unidad de “Micro Pirólisis” para investigación en termo conversión continua de biomasa, Fábrica-Cenicaña. ....	74
Figura 46. Equipo de pirólisis “UIPCB”, Fabrica-Cenicaña.....	75

## TABLA DE CONTENIDO DE TABLAS

Tabla 1. Tipos de Pirólisis.....	15
Tabla 2. Contenido de lignocelulosa en diferentes tipos de biomasa.....	18
Tabla 3. Reacciones químicas del proceso de Pirólisis. ....	21
Tabla 4. Rendimiento de la Pirólisis rápida reportado por Sdaka 2006.....	23
Tabla 5. Propiedades del Bio-Aceite obtenido de la Pirólisis rápida de madera Sdaka 2006.....	24
Tabla 6. Análisis elemental y poder calórico de los residuos de caña. ....	27
Tabla 7. Análisis Próximo y Último de los residuos de cosecha caña de azúcar. ....	27
Tabla 8. Valores del poder calorífico de la hoja verde, hoja seca y cogollo.....	28
Tabla 9. Variación de la humedad de los RAC en las plazoletas cubanas mediante un secado natural.....	28
Tabla 10. Sustitución potencial Diesel por Bio Oil.....	31
Tabla 11. Valores Variables Prueba N° 1, Proceso de Pirólisis .....	38
Tabla 12. Datos obtenidos del ensayo N° 1.....	39
Tabla 13. Pesos En Gramos prueba N° 3. ....	43
Tabla 14. Temperaturas Y Tiempos Del Ensayo N° 3.....	43
Tabla 15. Variación RPM del tornillo alimentador y variación del flujo másico. ....	48
Tabla 16. Relaciones de compresión en el tornillo alimentador [Diego F. Cobo, 2010].	49
Tabla 17. Dimensiones Reactor de la UIPCB. ....	51
Tabla 18. Características de la Biomasa RAC a ser pirolizada. ....	52
Tabla 19. Características de la Biomasa RAC, como combustible y fuente de calor.....	52
Tabla 20. Propiedades de los materiales del reactor y el RAC. ....	53
Tabla 21. Resultados Del Modelo Analítico Del Requerimiento de Energía por Transferencia de Calor o Energía que Absorbe El RAC. ....	57
Tabla 22. Resultados del Modelo por Elementos Finitos del Requerimiento de Energía por Transferencia de Calor o Energía que Absorbe El RAC y Comparación con el Desarrollo Analítico.....	59
Tabla 23. Requerimiento de Energía por Entalpía o Energía que Absorbe el RAC. ....	60
Tabla 24. Propiedades y Condiciones de operación del condensador.....	63
Tabla 25. Configuración condensador para opción en la variación de la producción. ..	64
Tabla 26. Composición estequiométrica de los materiales orgánicos .....	66
Tabla 23. Diseño Experimental Propuesto. ....	70
Tabla 28. Resultados corrida de 200 gramos de biomasa, en el micro pirolizador. ....	73
Tabla 29. Resultados rendimientos material recuperado en la unidad de micro pirólisis. ....	74

## 1. INTRODUCCION

### 1.1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

La caña de azúcar (ver figura N° 1) es uno de los cultivos que más biomasa produce en el mundo. En Colombia hay sembradas cerca de 200.000 hectáreas de caña de azúcar y se considera que después de la cosecha en verde de la caña, quedan en el campo entre 50 y 150 t/ha de residuos [6]. La acumulación de esta materia traería un consecuente impacto ambiental negativo.

Entre las fuentes renovables de energía, la biomasa es una alternativa atractiva ya que permite obtener un combustible a partir de recursos biológicos y su utilización podría disminuir significativamente impactos negativos en el medio ambiente. Existen métodos para conversión de la biomasa que se basan en la utilización de calor como fuente de transformación, entre ellos se encuentra la pirólisis.

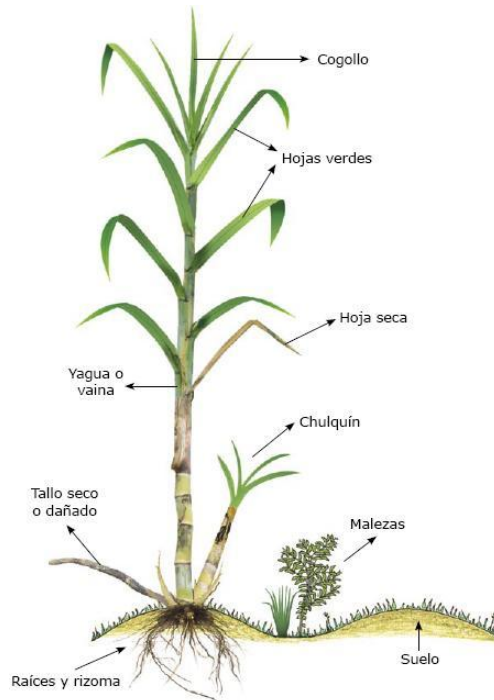
La pirólisis consiste en la descomposición físico-química de la materia orgánica bajo la acción del calor y en ausencia de un medio oxidante, es un proceso térmico de conversión en el que se utiliza un material con alto contenido de carbono para producir compuestos más densos y con mayor poder calorífico, que puedan ser empleados como combustibles directamente o luego de un posterior tratamiento. Los productos de pirólisis son gases, líquidos y residuo carbonoso cuyas cantidades relativas dependen de las propiedades de la biomasa a tratar y de los parámetros de operación del equipo. En los últimos años la pirólisis se viene utilizando para la obtención de combustibles líquidos y productos químicos a partir del carbón y residuos orgánicos.

El equipo dedicado en Cenicaña al tema de *Valoración de Residuos del Corte de la Caña de Azúcar* junto con el *Grupo de Investigación en Mejoramiento Industrial GIMI de la Escuela de Ingeniería Mecánica de la Universidad del Valle*, plantean alternativas tecnológicas, para la solución de dicho problema. Dentro de este marco se inscribe transformar energía implementado tres procesos de obtención de combustibles alternativos. Los equipos de transformación son construidos como proyectos de grado por algunos estudiantes de Ingeniería Mecánica, entre los cuales están:

- Diseño de un Gasificador
- Diseño de un Digestor
- Diseño de un Pirolizador

El desarrollo tecnológico del proceso de pirólisis ha sido desarrollado en otros países como Japón (Pirólisis de carbón), Brasil (Pirólisis de bagazo de caña), Dynamotive en

Canadá (Pirólisis de madera), entre otros, pero existe poca investigación en cuanto a pirólisis con los residuos de la caña de azúcar en Colombia y en la región.



**Figura 1. Partes de la caña de azúcar.**

El objetivo del presente trabajo es diseñar una unidad de investigación en pirólisis continua de biomasa (UIPCB), realizar un estudio del arte exhaustivo, elegir la tecnología de pirólisis mas apropiada, desarrollar modelos de requerimientos energéticos y diseñar y describir las características principales de los sistemas que conforman la UIPCB.

## **2. MARCO TEORICO**

### **2.1 ANTECEDENTES**

La pirólisis se ha utilizado durante siglos en la producción de carbón [5], y también de forma extensiva en las industrias química y petrolífera.

La pirólisis rápida de biomasa empezó a estudiarse y trabajarse a finales de 1970 y principios de la década de los 80's, en la Universidad de Western Ontario, en Canadá, donde obtuvieron etileno y polipropileno mediante pirólisis de madera utilizando un reactor de flujo ascendente; posteriormente este proyecto dio origen a la formación de la compañía *Ensyn*. En 1980 *GTRI* en USA, inició un proyecto en el que se empleó

un reactor de tubos rotatorios con partículas en movimiento, el cual obtuvo rendimientos de Bio-Aceite del 28 % p/p.

En 1984 el Laboratorio de Energía Renovable de USA "NREL", incursionó en el empleo de catalizadores durante la pirólisis, buscando mejorar la calidad de los aceites producidos; de esta forma, desarrolló un pirolizador catalítico tipo vórtex a escala piloto, empleando zeolitas como catalizador, para producir combustibles líquidos como gasolina, BTX y fracciones fenólicas.

En la década de los 80's, laboratorios y universidades de Europa y Norte América desarrollaron tecnologías para la producción de aceites pirolíticos, cuyo principal objetivo fue lograr incrementos en el rendimiento de la pirólisis en términos de la cantidad de bioaceite producido; dentro de estos centros se encontraron: *Pyrovac*, que empleó presiones reducidas del orden de los 15 kPa y temperaturas alrededor de los 450 °C para obtener rendimientos de hasta 47 % p/p; La Universidad de *Twente*, en Holanda, desarrolló un reactor cónico rotativo, en el cual las partículas de biomasa chocaban tangencialmente con las paredes del pirolizador, lográndose una "Pirólisis abrasiva" con rendimientos de 60 %p/p; *Dynamotive*, en Canadá, trabajó con reactores de lecho fluidizado para obtención de aceites aplicables para refinación y control de emisiones de SOx y NOx en plantas de combustión de carbón; de igual forma se realizaron estudios a escala piloto en Bélgica, Gran Bretaña, USA, y Suiza, principalmente, con adelantos en uso de catalizadores en reactores de lecho fluidizado, en los que se procesó biomasa con flujos desde 1 hasta 2000 kg/h, en reactores de lecho empacado, lecho fluidizado y tipo vórtex abrasivo, principalmente.

La pirólisis rápida es un proceso de descomposición térmica que se produce a temperaturas moderadas con una alta velocidad de transferencia de calor a la biomasa y un corto tiempo de residencia del vapor caliente en la zona de reacción. Varias configuraciones de reactor se ha demostrado que aseguran esta condición y logran rendimientos cercanos al 75% basado en el peso inicial de la biomasa seca. La pirólisis rápida de la biomasa produce un producto líquido, aceite de pirólisis o bioaceite que puede ser fácilmente almacenado y transportado. La pirólisis rápida ha alcanzado un éxito comercial para la producción de sustancias químicas y está siendo activamente desarrollada para la producción de combustibles líquidos.

La tecnología de pirólisis se clasifica de acuerdo al tiempo de residencia, temperatura máxima, y al producto principal, como se muestra en la Tabla 1:

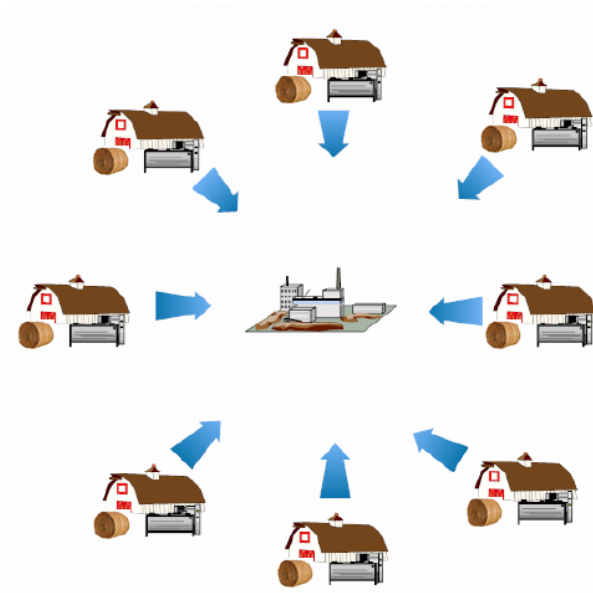
**Tabla 1. Tipos de Pirólisis. [17]**

Proceso	Temperatura °C	Velocidad de Calentamiento °C/s	Tiempo de residencia	Producto
Convencional	500°	2	gases 5 seg	Char y Bio-Oil
Rápida	400-800°	> 2	gases < 2 seg	Bio-Oil y char
Instantánea	> 600°	> 200	gases < 0,5 seg	Gases e Hidrocarburos Ligeros

La pirólisis se ha experimentado en diferentes países, utilizando diferentes tipos de materiales. Por ejemplo la pirólisis de carbón se está llevando a cabo a escala industrial en la corporación Yawata Works de Nipón Steel en Japón, donde se construyó una planta la cual procesa 1000 ton/día de carbón, para la producción de gases y aceites principalmente. Este proceso se caracteriza por el alto rendimiento térmico global logrado con un sistema de gasificación del *char*, el cual combina la pirólisis rápida del carbón y el reciclo parcial del *char* producido durante la pirólisis, para usar el calor sensible del *char* en el producto de gasificación, es como una fuente de calor para la reacción del carbón pulverizado [11].

En Canadá realizan pirólisis de madera en Dynamotive [4], una empresa que comenzó con una planta piloto que procesaba 1 tonelada por día de aserrín, produciéndose grandes avances en la segunda planta piloto de 10 toneladas por día. Se construyó posteriormente la primer planta en escala ubicada en las afueras de Toronto, Ontario – Canadá, para procesar 100 ton/día de aserrín. Actualmente los horizontes se extienden hacia la necesidad de plantas de mayor capacidad de procesamiento aspirando por el momento a plantas de 200 TPD.

En Estados Unidos en el Department of Bioproducts and Biosystems Engineering de la University of Minnesota, se llevo a cabo un sistema de conversión de biomasa distribuida (ver figura N° 2) por pirólisis asistida por microondas [13,14], con una potencia de 4.5 kW, con una computadora central que controla el proceso y 10 kg/h para varios tipos de biomasa, en el cual se pretende realizar la conversión de la energía por medio de plantas móviles que se dirijan al cultivo, para posteriormente, después de realizado el proceso las plantas móviles se dirijan a una planta central de procesamiento, lo que genera un ahorro considerable desde el punto de vista energético, ya que de esta manera los productos de la pirólisis, serán bioaceites y char, los cuales sus costos y requerimientos operativos de manejo, su densidad de carga, alce, transporte, entrega son mucho menores que los Residuos Agrícola Cañeros (RAC).



**Figura 2. Esquema del sistema de conversión de biomasa distribuida [13].**

Renewable Oil internacional y Agri-Therm en New Zealand, proponen también el sistema de plantas móviles, para la conversión de biomasa distribuida, donde la unidad de pirólisis está montada sobre un remolque como lo muestra la figura N °3.



**Figura 3. Unidad Móvil de Pirólisis de Biomasa [15].**

A nivel nacional el avance y la evolución en las investigaciones de los equipos y procesos de pirólisis de biomasa son lentos. Se tienen que llevar a cabo más estudios donde se analicen los factores que implican el mayor rendimiento a productos líquidos ya que estos pueden tener mayor valor agregado, además que Colombia especialmente la región del Valle del Cauca, el cultivo de la caña de azúcar es por sus



condiciones geográficas de excelente calidad y no habría que sustituir terrenos para cultivar caña para producir Bio-Combustibles.

## **2.2 JUSTIFICACION**

Existe una creciente demanda mundial energética, conjugada por la creciente preocupación por los gases de efecto invernadero y su efecto en el cambio climático, además del uso de recursos energéticos no renovables en su mayoría para el abastecimiento de las ciudades.

Se tiene que los RAC en la región son abundantes, el cultivo de Caña de Azúcar está sembrado en 200.000 hectáreas generando 10 millones de toneladas de residuos al año (Primera E., 2006), donde tales residuos se queman sin proporcionar utilidades y contaminan el medio ambiente por la producción de pavesa. Además no existe una valoración adecuada del RAC en la región, el cual tiene un valor energético altamente considerable (PC hoja = 16.83 MJ/kg aproximadamente).

Este escenario impulsa fuertemente el desarrollo de fuentes alternativas renovables de energía, que es lo que pretende este proyecto, por medio del diseño y construcción de una unidad de investigación en pirólisis continua de biomasa, lo cual hace indispensable el estudio de la tecnología, su viabilidad y aplicabilidad, el análisis y balance energético del proceso, acompañado del diseño del equipo para evaluar su funcionalidad y la obtención y comparación de los bioproductos de pirólisis (Char, Bioaceite y GNC) con los combustibles tradicionales.

## **2.3 GENERALIDADES**

### **2.3.1 Biomasa**

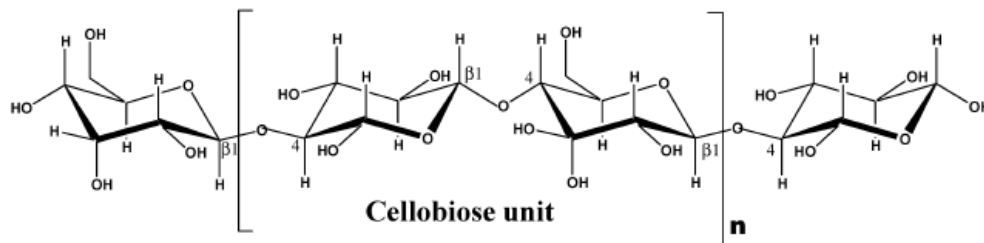
La biomasa está compuesta por más de 300 componentes, sin embargo está conformada principalmente por: lignina, celulosas y hemi-celulosas (azucares, etanol y ácido fórmico), en la tabla N° 2 se presenta los contenidos de porcentaje en peso de celulosa, hemicelulosa y lignina en varios tipos de biomasa [17].

**Tabla 2. Contenido de lignocelulosa en diferentes tipos de biomasa**

Contenido de lignocelulosa (%)			
Tipo	Celulosa	Hemicelulosa	Lignina
Madera Suave	41	24	28
Madera Dura	39	35	20
Corteza de Pino	34	16	34
Paja de Trigo	40	28	17
Cascara de Arroz	30	25	12
Turba	10	32	44

En todos los grupos funcionales están presentes: ácidos, azúcares, alcoholes, cetonas, aldehídos, fenoles y sus derivados, furano y otros compuestos oxigenados. En general, la biomasa puede liberar entre 12-19 MJ/kg en el proceso de combustión con un mínimo porcentaje de cenizas y sulfuros [9].

La celulosa es un hidrato de carbono complejo, siendo el componente principal de la pared de todas las células vegetales. En las plantas, la celulosa suele aparecer combinada con sustancias leñosas, grasas o gomosas. Comprende un 40 – 50 % de la madera seca.



**Figura 4. Estructura de la Celulosa [17].**

La hemicelulosa conocida también como poliosa, constituye entre el 25 y 35% de las plantas, forma la matriz para la superestructura de la celulosa. Este polisacárido ramificado, se encuentra formado por glucosa, manosa, galactosa, xilosa, arabinosa, 4-O ácido metilglurónico y residuos ácido galacturónicos [34].

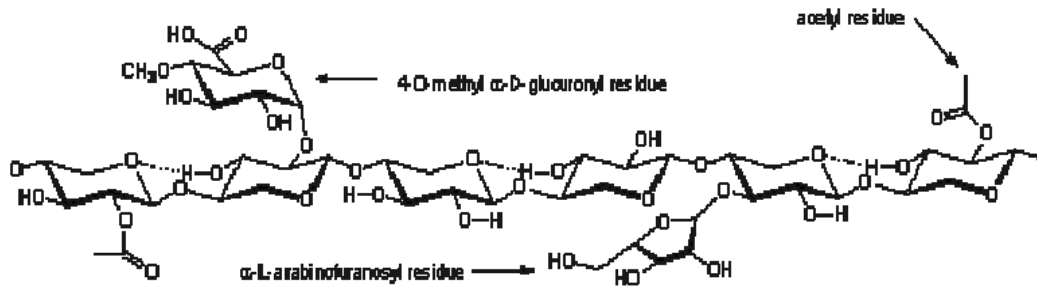


Figura 5. Estructura Hemicelulosa. [17]

La lignina es el tercer componente de la madera, la cual constituye entre el 23 y 33% de la madera suave y del 16 al 25 % de maderas duras. Es una resina amorfa, cuya estructura no es exacta, es la responsable de la aglomeración de las fibras celulósicas y a su vez es un escudo para los microorganismos que pueden destruir las fibras, su función es mantener unidas a la celulosa y la hemicelulosa [35].

La lignina presenta una amplia gama de enlaces, entre ellos hidroxilo y metoxi, que pueden darse entre ambos anillos o entre el anillo y uno de los carbonos de la cadena o entre una cadena y otra, lo que la hace un polímero muy heterogéneo y difícilmente atacable, demandando una alta energía de activación para la desarticulación de sus unidades [34].

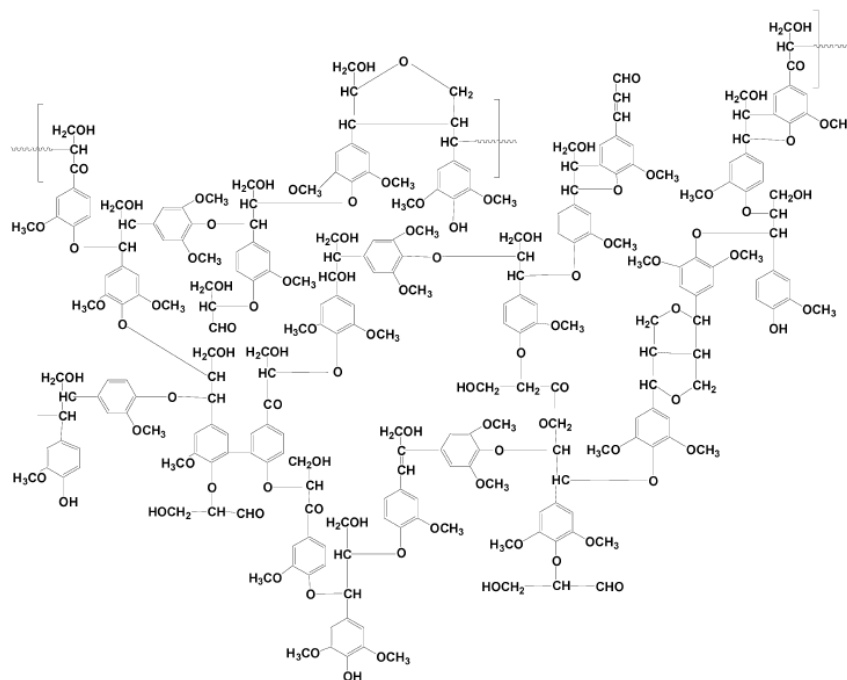


Figura 6. Estructura de lignina [17].

### 2.3.2 Etapas preliminares al proceso de Pirólisis

Las etapas preliminares antes de comenzar con el proceso de pirólisis inician con la limpieza del RAC, que se puede realizar por separación neumática en seco y continúa con el proceso de picado, de este modo el residuo reducirá la humedad por debajo del 10% del peso y disminuirá el tamaño a características adecuadas para comenzar con la pirólisis.

### 2.3.3 Proceso de Pirólisis

Una técnica para generar combustibles líquidos consiste en la pirólisis rápida de biomasa, con la cual se producen bioaceites, que luego de etapas posteriores de refinado, puede generar compuestos con propiedades similares a las de los combustibles fósiles, tales como el diesel o la gasolina.

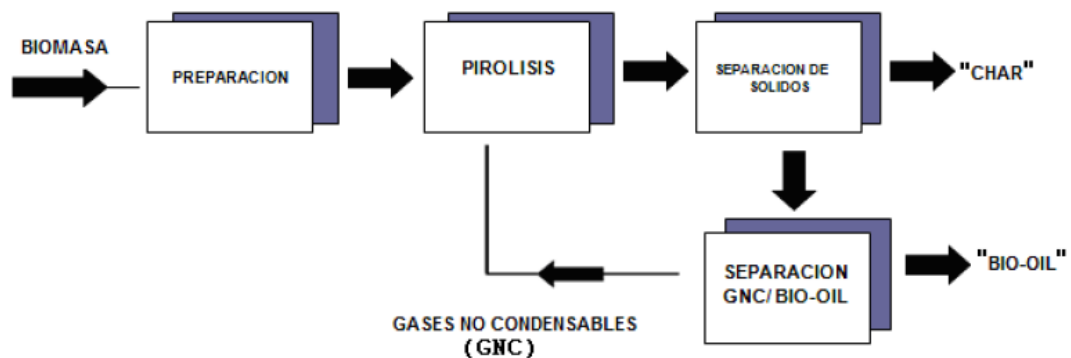


Figura 7. Diagrama de bloques del proceso de obtención de Bio-Oil. [17]

Demirbas [9-10] y colaboradores muestra la influencia de los factores que afectan el proceso de pirólisis como la temperatura y la rampa de calentamiento en la conversión de la biomasa a productos gaseosos, sólidos y líquidos. Si el propósito es maximizar la conversión de los productos líquidos resultantes, la pirólisis de la biomasa se hace a temperaturas bajas, alta rampa de calentamiento y tiempos de residencia cortos de los gases. Para una alta producción de carbón vegetal el proceso se hace a bajas temperaturas y bajas rampas de calentamiento. Si el propósito es maximizar la conversión de gases combustibles resultantes de la pirólisis este se hace a altas temperaturas, baja rampa de calentamiento y largos tiempos de residencia de los gases. Los rangos de temperatura y las reacciones químicas que ocurren en el proceso de pirólisis se listan en la tabla N° 3.

**Tabla 3. Reacciones químicas del proceso de Pirólisis.**

<b>temperatura (rango °C)</b>	<b><u>Reacción Química</u></b>
100-120	<u>deshidratación</u>
250	<u>desoxigenación y desulfurización</u> , disociación molecular de agua y dióxido de carbono. comienza la liberación de sulfuro de hidrógeno
340	<u>rotura de enlaces en compuestos alifáticos</u> . comienza la liberación de metano y otros compuestos alifáticos ligeros
380	<u>fase de carbonización</u> . Concentración de carbón en los residuos
400	<u>rotura de enlaces C-O y C-N</u>
400-600	<u>descomposición de los materiales bituminosos</u> . generación de aceites y alquitranes. Carbonización de baja temperatura
600	<u>cracking de los materiales bituminosos</u> . generación de hidrocarburos gaseosos de cadena corta e hidrocarburos aromáticos (derivados del benceno)
>600	dimerización de las olefinas (etileno) a $\alpha$ -butileno; reacción de etileno a ciclohexano; generación de compuestos aromáticos volátiles.

Existen diferentes tecnologías de pirólisis:

- Reactor de lecho fluidizado.
- Pirólisis por abrasión, reactor tipo vórtex.
- Pirólisis por flujo arrastrador, reactor de flujo concurrente.
- Pirólisis en cono rotatorio.

Las configuraciones de los reactores [6] para la pirólisis rápida son: fluidización neumática, la cual comprende reactor de lecho fijo y lecho fluidizado, fluidización mecánica, en la cual el reactor es un cono rotatorio o un tornillo sin fin y por último reactores de calentamiento por contacto directo en un disco caliente o con tanque de vacío, como lo muestra la figura N° 8. Las tecnologías mencionadas anteriormente, su funcionamiento se basa en un equipo el cual tiene cuatro componentes básicos, lo único que cambian es su forma, o disposición dentro del sistema:

1. Reactor
2. Filtro o ciclón
3. Condensador
4. Deposito de obtención de Bio-productos

La tecnología será seleccionada dentro del desarrollo del proyecto.

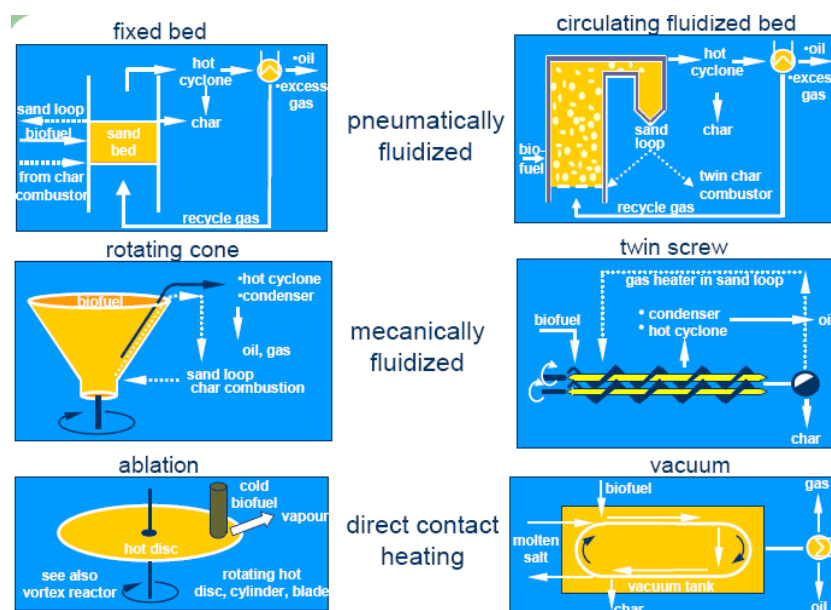


Figura 8. Configuraciones del reactor para Pirólisis rápida [16].

### 2.3.4 Los Productos De Pirólisis

#### 2.3.4.1 Char

El Char es un subproducto significativo del proceso de la pirólisis que tiene propiedades similares al coque (23-32 MJ/kg). El char de la Pirólisis tiene un valor calorífico más alto que muchas calidades de carbón. Este char al igual que el bioaceite se considera un combustible verde y neutro de CO<sub>2</sub>. [4].



Figura 9. Muestra del Char obtenido en la prueba experimental de Pirólisis en el laboratorio de Cenicaña.

### 2.3.4.2 Líquidos Orgánicos Condensables (Bioaceite).

La fracción líquida de los productos de la pirólisis consiste de dos fases, una acuosa que contiene variedad de compuestos oxigenados y una fase no acuosa que contiene compuestos orgánicos insolubles de alto peso molecular, conocida como Alquitrán. [9, 10].

### 2.3.4.3 Gases no Condensables (GNC).

Estos gases por tener la propiedad de no condensarse se pueden reciclar y así proporcionan gran parte de la energía necesaria para el proceso de pirólisis. Estos gases no son productos de valor comercial, estos gases se generan debido a la descomposición de los gases condensables en compuestos más simples como monóxido de carbono, dióxido de carbono, u otro gas inerte con el que se trabaje el proceso.

La Tabla N° 4, presenta los resultados del rendimiento obtenido para la pirólisis rápida de madera.

**Tabla 4. Rendimiento de la Pirólisis rápida reportado por Sdaka 2006.**

	rendimiento % masa	Energía/Volumen (MJ/m <sup>3</sup> )	Energía/Masa (MJ/kg)
<b>Madera</b>	100%	8000	20
<b>Bio-Aceite</b>	65%	25000	21
<b>Char</b>	12%	9000	30
<b>Gas</b>	23%	15	12

En el mismo trabajo se determinaron algunas propiedades del bioaceite, estas se presentan en la Tabla N° 5.

**Tabla 5. Propiedades del Bio-Aceite obtenido de la Pirólisis rápida de madera Sdaka 2006.**

<b>Propiedad</b>	<b>Rango</b>
Densidad (kg/lit)	1.1 - 1.3
Poder calorífico inferior (MJ/kg)	13 – 18
Viscosidad (cSt)	13 - 80 (a 50 °C)
Conductividad térmica W/m-K	0.35 - 0.43
Capacidad calórico (KJ/kg*K)	2.6 - 3.8 (a 25 - 60 °C)
Punto de ignición (°C)	110 – 120
Agua (% peso)	15 – 30
pH	2.0 - 3.7

### **2.3.5 Ventajas, desventajas y aplicaciones de la pirólisis y sus productos.**

El proceso de pirólisis y sus bioproductos tienen numerosas ventajas competitivas sobre los combustibles provenientes de la industria minera y petrolera [32]:

#### **Ventajas**

- Emisiones nulas de Oxido de Azufre (SOx)
- Bajas emisiones de Oxido de Nitrógeno (NOx). El bioaceite genera un 50% menos de emisiones de NOx que un Fuel-Oil liviano en turbinas de gas y turbinas diesel convencionales.
- Debido a que el bioaceite es un combustible proveniente de desperdicios orgánicos se considera balance nulo de CO2.
- El reemplazo de los combustibles fósiles por bioaceite genera impactos positivos para el medio ambiente, generando reconocimientos por la reducción de emisiones de gases de invernadero. Haciendo válido protocolos en beneficio del medio ambiente.
- Neutralidad del carbón o biochar.
- Para la pirólisis se puede utilizar cualquier tipo de biomasa.



- La pirólisis presenta potencial como suministro energético auto sostenible, en lugares donde no sea necesario cambiar alimentos por combustible.
- La pirólisis incrementa la densidad energética de la biomasa.

### **Desventajas**

La complicación de los procesos de pirólisis está originada por la necesidad de producir un calentamiento indirecto y por la condensación de los alquitranes.

Algunos de las desventajas o retos a afrontar son:

- El bioaceite presenta baja volatilidad.
- El poder calorífico es menor que el de otros combustibles líquidos.
- El bioaceite tiene alta viscosidad.
- Debido a su naturaleza, es corrosivo.

### **Aplicaciones**

En cuanto a las aplicaciones, el bioaceite se puede emplear como sustituto eficaz para diesel, aceite pesado, aceite liviano, gas natural en diferentes equipos y en la industria, tales como:

Calderas, re hervidores, hornos, motores estacionarios y metalurgias en donde se utilizan estos combustibles como fuentes de energía y potencia. Aunque para estas aplicaciones se deben tener en cuenta algunas modificaciones, debido a las composiciones químicas complejas presentes en estos combustibles. Por lo tanto algunas propiedades del bioaceite tienen que modificarse para su mejor aprovechamiento [33].

Otras aplicaciones:

- Fuente de químicos valiosos.
- Briquetas de charcoal.

- El biochar se utiliza como carbón activado y otras aplicaciones como material absorbente.
- El biochar tiene propiedades como mejorador de suelos, por su alto contenido de carbono y porosidad.
- Como combustible, incluyendo mezcla con Bio-Oil, para crear un biocombustible con alto contenido energético.
- Aplicaciones energéticas: procesos térmicos, para enfriamiento o calefacción de espacios, generación de energía.
- Otros mercados, usos y aplicaciones.

### **3. DESARROLLO DEL PROYECTO**

#### **3.1 POTENCIAL ENERGÉTICO DE LOS RESIDUOS AGRÍCOLAS CAÑEROS (RAC) Y SELECCIÓN DE LA TECNOLOGÍA DE PIRÓLISIS**

##### **3.1.1 Características de los Residuos Agrícolas Cañeros (RAC) en Colombia**

Desde hace algún tiempo en Colombia como en los demás países azucareros, se viene observando con mucho interés el uso del residuo agrícola cañero (RAC) como biomasa para aprovechamiento energético debido a su poder calorífico (PC hoja = 16.83 MJ/kg aproximadamente). Para tal fin y por medio del proceso termoquímico de la pirólisis se puede llegar a obtener bioaceite y biochar de alto valor energético.

Debido a las exigencias de una agricultura moderna sostenible, la agroindustria azucarera realizó un convenio de concertación con el Ministerio del Medio Ambiente de Colombia para establecer una producción limpia, en donde se pactó el desmonte gradual de las quemadas (Decreto No. 948 de 1995, Decreto No. 4296 de 2004 y Resolución No. 532 de 2005, realizadas para facilitar la labor de corte y levante. Las regulaciones vigentes establecen unas áreas vetadas para las quemadas controladas).

En los últimos años la investigación mundial de los residuos agrícolas de la caña de azúcar ha sido más profunda y valiosa debido a la necesidad de descubrir nuevas fuentes alternativas (biomasa vegetal) para la generación de energía. Entre los aportes más significativos se encuentran:

Rípoli (1991) determinó el poder calórico de los diferentes componentes del residuo de caña natural, los datos están en la Tabla N° 6.

**Tabla 6. Análisis elemental y poder calórico de los residuos de caña.**

Parámetro	Cogollo	Hojas Verdes	Hojas Secas
Carbono (%)	42.11	43.41	41.76
Hidrógeno (%)	6.25	6.38	6.26
Humedad (%)	76.79	66.21	8.81
P.C. Superior (Kcal/Kg)	4318.7	4400.6	4439.0
P.C. Inferior (Kcal/Kg)	3981.4	4095.6	4001.4

Fuente: Eiland y Clayton (1984), en el sur de Florida realizaron un análisis próximo y último de los RAC, los resultados se muestran en Tabla N° 7.

**Tabla 7. Análisis Próximo y Último de los residuos de cosecha caña de azúcar.**

Análisis Próximo				
	Residuo		Bagazo	
Parámetro	Fresco (%)	Seco (%)	Fresco (%)	Seco (%)
Humedad	65.8	0	59.2	0
Volatilidad	25.2	73.4	35.6	87.3
Ceniza	2.6	7.5	0.3	0.8
Fijación Carbono	6.4	19.1	4.9	11.9
Total	100	100	100	100
KJ/Kg	6521	19069	7925	19423
Análisis Último				
Parámetro	Residuo seco (%)		Bagazo seco (%)	
Carbono	47.60		49.90	
Hidrógeno	5.60		5.80	
Oxígeno y Nitrógeno	38.55		43.33	
Azufre	0.70		0.17	
Ceniza	7.55		0.80	
Total	100		100	

En Colombia se ha demostrado que la hoja de caña según estudios hechos por el Ingenio Incauca y la Universidad del Valle en un convenio con Cenicaña han demostrado que posee propiedades térmicas, lo que la convierte en un combustible y en una nueva alternativa para la generación de energía. La Tabla N° 8 muestra los resultados de la investigación teniendo en cuenta las cinco variedades de caña del Valle.

**Tabla 8. Valores del poder calorífico de la hoja verde, hoja seca y cogollo.**

Material	Humedad Inicial (%)	Humedad Residual	Materia Volátil	Ceniza (%)	Carbón Fijo (%)	P. Calorif. Btu/Lb	Azufre (%)
Cogollo	78.61	6.04	71.21	7.13	15.62	7704.90	0.20
Hoja Verde	65.70	6.22	66.88	9.75	17.11	7285.46	0.26
Hoja Seca	11.97	5.94	68.57	1.59	13.90	7233.50	0.22

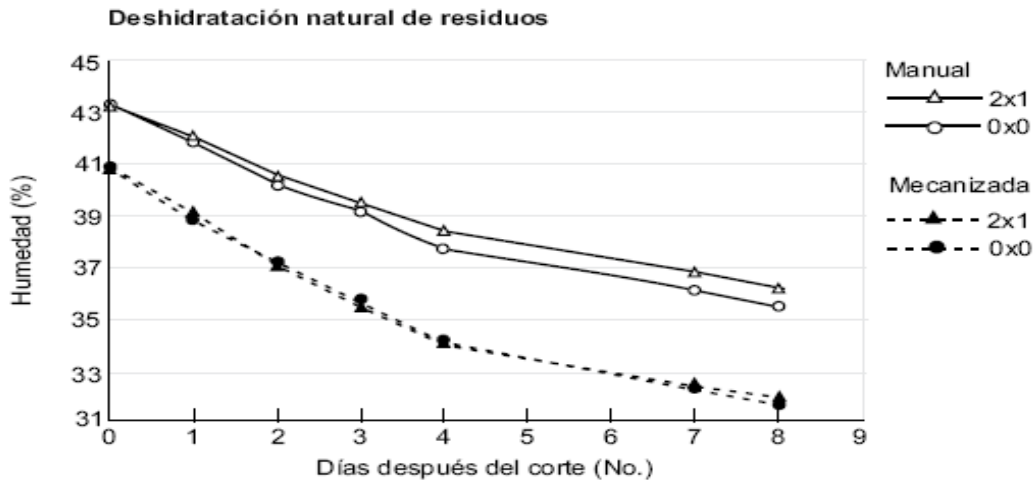
La misma investigación ha demostrado que los RAC, poseen alto poder calorífico (16.83 MJ/kg con una humedad residual del 6,22%), lo cual la convierte en un combustible y una nueva alternativa en la generación de energía. *Astaiza (1998)*.

Los análisis fraccionales muestran que los RAC, por lo general tienen un contenido de humedad del 66%, siendo superior al del bagazo (59%). En la Tabla 9, se muestra según Niebla [19], la variación de la humedad de los RAC en las plazoletas cubanas mediante un secado natural (solar), así también la Figura N° 10, muestra la deshidratación natural de los diferentes tipos de RAC, de acuerdo al tipo de caña en el Valle del Cauca.

El poder calorífico del bagazo es de 19.2 MJ/kg, y el valor calórico útil del RAC es de 16.2 MJ/kg, debido al mayor contenido de humedad. Los residuos también contienen más azufre y cenizas que el bagazo siendo su potencial energético muy alto. Se estima que con la producción de caña de 72 t/ha y 22 t/ha de RAC, se podría obtener la energía equivalente a 29 barriles de petróleo o de 10.000 Lt de alcohol, con los consecuentes beneficios ambientales [18].

**Tabla 9. Variación de la humedad de los RAC en las plazoletas cubanas mediante un secado natural [19].**

Origen de Cosecha	Tiempo en Días				
	0	1	2	3	4
Manual (% Hu)	36	30	24	20	15
Mecánica (% Hu)	68	56	46	42	38



**Figura 10. Deshidratación natural de los residuos de la variedad MZC 74-275, encallados al 0x0 y 2x1, provenientes de cosechas manual y mecanizada.**

Otra comparación entre el bagazo y el RAC que es su acompañante natural es que el bagazo tiene mayor calor de combustión (para  $W = 0\%$ ) dado sobre todo por tener los RAC mayor contenido de ceniza; sin embargo, como el bagazo se quema con aproximadamente 50% de humedad y los RAC tienen un proceso de secado natural (hasta 20%), los RAC entregan más energía por unidad de masa quemada.

Otra característica de los RAC es su densidad [20], la cual es relativamente baja sobre el costo de su transporte. Las densidades que presentan son alrededor de unos 30 – 40  $\text{kg/m}^3$ , con una humedad alrededor del 40%.

La experiencia en Florida USA [18] con la cosecha de RAC indica que la densidad de transporte depende del contenido de humedad y del sistema de recolección. El contenido de humedad inicial de los residuos fue de 70% y después de una semana sin lluvias se redujo hasta 30%. La recolección de los RAC usando una cosechadora de forrajes NEW HOLLAND 2100 resulto en una longitud de picado entre 6 y 3 cm y la densidad aparente de la carga húmeda en los vagones vario entre 110 y 170  $\text{kg/m}^3$  de residuos con una humedad del 50% y 60%. Por otra parte, la recolección de los residuos usando maquinas enfardadoras de pacas redondas permitió aumentar la densidad aparente a 190  $\text{kg/m}^3$  de residuos con 33% de humedad. La densidad aparente en base seca de las pacas fue el doble de la obtenida con la cosechadora de forrajes NEW HOLLAND 2100.

Copersucar, en Brasil [18], está estudiando la posibilidad de generar energía eléctrica a partir de los residuos de la caña. Dentro de los sistemas de recolección se han evaluado las pacas o fardos redondos y rectangulares, obteniendo densidades aparentes entre 95 y 130  $\text{kg/m}^3$ . Se considera que operativamente es más conveniente

manejar y transportar fardos rectangulares que redondos. Copersucar estima que el costo total del enfardado mas el alce y transporte es de US\$ 30/t de RAC con una humedad del 50%.

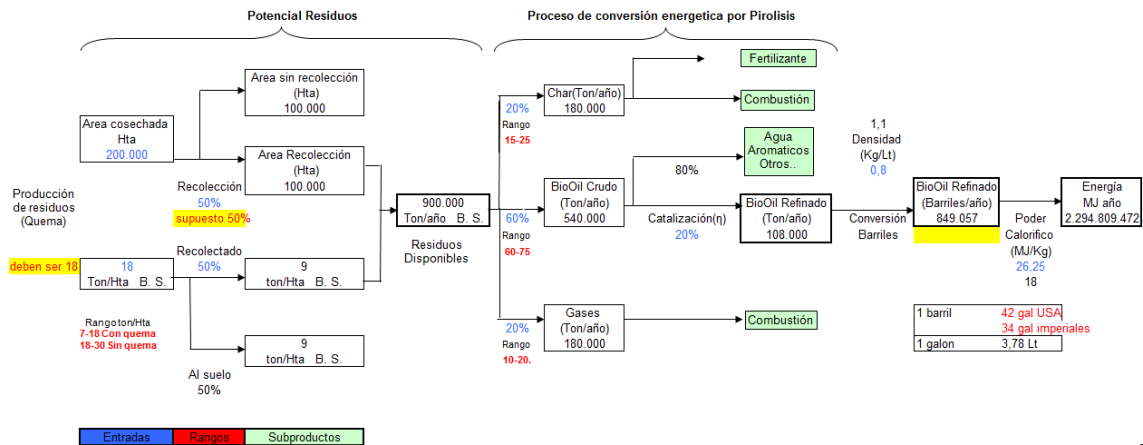
### **3.1.2 Potencial del RAC disponible en Colombia**

El sistema de cosecha de la caña de azúcar en Colombia, agrega valor a los RAC haciéndolos tener en cuenta, ya que en la actualidad, aproximadamente el 25% de la caña es cortada mecanizadamente y el Decreto No. 948 de 1995, Decreto No. 4296 de 2004 y Resolución No. 532 de 2005, realizadas para facilitar la labor de corte y levante, que establece regulaciones vigentes para áreas vetadas para las quemas controladas lo que aumentaría la producción de RAC en Colombia. Las máquinas tienen una eficiencia de más del 50%. Esto hace que en el campo quede más del 50% de los RAC y que hacia los ingenios llegue menos del 50%.

La acumulación de los RAC en los ingenios crea condiciones para su empleo ya que concentra en un lugar específico un volumen significativo de estos. En Colombia la cosecha de la caña deja en el campo más del 50% de los RAC, lo que es necesario para necesidades del suelo.

En la zona azucarera colombiana, después de la cosecha en verde de la caña quedan en el campo entre 50 y 150 t/ha de RAC. La cantidad de RAC presente en el campo después de la cosecha de la caña en verde depende de la variedad y fertilidad del suelo. La Variedad V71-51 es de maduración intermedia, de alta producción de biomasa y sobresale por presentar una relación residuos/caña de 0.8, la variedad MZC74-275, tiene una relación de residuo caña de 0.5, considerada como alta desde el punto de vista de la cosecha mecanizada. La variedad PR 61-632 es semierecta, de maduración tardía y con un contenido mediano de sacarosa, pero con una baja relación residuo/caña (0.3), lo que la hace atractiva para la cosecha mecanizada [21].

Se realizó un modelo con una hoja de cálculo (ver figura N° 11), el cual permite hallar el potencial de la pirólisis del RAC a partir de las toneladas de residuo que deseen ser transformadas por el proceso de termo-conversión (Pirólisis), obteniendo la equivalencia en energía a partir del diesel, dando como resultado lo siguiente:



**Figura 11. Modelo del Potencial Energético del RAC.**

Partiendo del hecho que el área cosechada en la región son 200.000 Hta, de las cuales el rango de cosecha de RAC sin quema es de 18 a 30 Ton /Hta, y el área de recolección junto con el RAC recolectado es el 50%, tenemos 100.000 Hta de área de recolección y 9 Ton/Hta de RAC, que equivalen a 900.000 Ton/Año de RAC disponibles. Después estableciendo como porcentaje de conversión a Char - 20%, Bio Oil - 60% y GNC - 20%, se obtendría 180.000, 540.000 y 180.000 Ton/año respectivamente. En donde el char se puede utilizar como fertilizante o en procesos de combustión, los GNC se utilizan también en combustión para el mismo proceso, y las 540.000 Ton/año de Bio Oil, el 80% serian productos como agua, aromáticos, entre otros y el 20% se llevaría a un proceso de catálisis, donde se obtendría 108.000 Ton/año de Bio Oil refinado, lo que equivale a 849.000 barriles/año de Bio Oil refinado, que a su vez energéticamente equivalen a 2.294.809 MJ/año.

Finalmente, llevando a cabo una sustitución potencial del Diesel por el Bio-Oil, una flota de camiones y tractores de un ingenio, su consumo es de 1.757.939 MJ/año, lo que equivale a 379.412 Barriles/año de Diesel, de donde el potencial equivalente en Diesel de 849.000 Barriles/año de Bio Oil refinado, es de 495.283 Barriles/año, se obtiene una sustitución del 130%.

**Tabla 10. Sustitución potencial Diesel por Bio Oil.**

Consumo Diesel	Potencial Equiv. Diesel	% Sustitución
Barriles/año	Barriles/año	
<b>379.412</b>	<b>495.283</b>	<b>130,54%</b>

### 3.1.3 Situación actual del empleo de los RAC en Colombia (Instalaciones)

El empleo de los RAC en Colombia en la actualidad como es alrededor del 25% que se recolecta por vía mecánica, el resto es quemado en el cultivo, ese 25% solo un ingenio realiza un proceso de separación del RAC y lo acumulan en grandes patios de secado natural, donde son picados para compostaje y el resto es quemado en las calderas. En los demás ingenios donde no se separa el RAC de la caña, esta es molida (RAC y caña), generando acumulación de bagazo, como combustible complementario en los centrales azucareros en los momentos de ser necesario.

En un ingenio, localizado en el Valle del Cauca, se instaló en el 2003 un sistema de limpieza en seco de la caña de azúcar de la cual se obtiene como desecho los residuos sólidos, ver figura N° 12, este sistema consta de una mesa alimentadora (Mesa # 4), dos gallegos, cinco bandas conductoras y seis ventiladores. Producto de investigaciones del sistema se obtuvo que el consumo energético calculado en el 2003 en este sistema, es 214 Kilowattios equivalente a 100 millones anuales y trabaja con el 59% de la capacidad instalada, en cuanto al material retirado (residuos), se concluyó que en promedio se retiraron por el sistema proporcionalmente 43% de hojas, 16% de Yaguas y 18% de tierra. Por último se determinó la eficiencia vegetal del sistema ( $E_{fi.veg} = \frac{Kg. \text{ materia.veg.Extraña}}{Kg. \text{ materia.veg.Inicial}} * 100$ ), tomando como referencia la caña cosechada manual y mecánicamente, entonces la eficiencia vegetal fue de 28% (caña cortada mecánicamente) y 56% (caña cortada manualmente). *Bedolla y Portilla (2004)*



**Figura 12. RAC retirado por el sistema de limpieza.**

Con este panorama se permite concluir que ya se está empezando a mirar el uso de los RAC como materia prima para cualquier proceso de conversión energética. Y en



términos generales el empleo de los RAC es como combustible en la mezcla bagazo-residuo para ser utilizada en las calderas. Además por ley las quemas actualmente están reguladas, tendiendo más adelante a ser gradualmente eliminadas lo que generara un aumento en la producción de RAC lo que conlleva a mirar tecnologías apropiadas para el aprovechamiento de la misma y ese es el objetivo de este proyecto, utilizar la tecnología de pirólisis, para la obtención de bioenergía, como ruta al desarrollo sostenible del país.

#### **3.1.4 Perspectivas del empleo de los RAC como combustible en Colombia (Pirólisis)**

Lo que se plantea en este proyecto como objetivo, es el Diseño de Una Unidad de Investigación en Pirólisis Continua de Biomasa, entonces ese será el enfoque, el empleo de los RAC como Bio-combustible en Colombia vía pirólisis. Procesos de termo-conversión, como lo son gasificación, combustión e hidrólisis son objeto de estudio en otros trabajos de grado del grupo VARCCA (*Valoración de Residuos del Corte de Caña de Azúcar*) de la sección de Fábrica en Cenicafé.

La perspectiva para el empleo de los RAC como combustible vía pirólisis en Colombia es amplia, y se basan en factores como:

- Actualmente el manejo de estos residuos son las quemas controladas permitidas y reguladas por la legislación vigente: Decreto No. 948 de 1995, Decreto No. 4296 de 2004 y Resolución No. 532 de 2005, realizadas para facilitar la labor de corte y levante. Dichas regulaciones establecen unas áreas vetadas para las quemas controladas, dando lugar a la cosecha en verde, con el consecuente aumento del residuo agrícola, lo cual permite materia prima disponible para desarrollo de nuevas tecnologías entre ellas la Pirólisis.
- La actual acumulación de RAC en los ingenios crea problemas de manejo de los mismos y conlleva a buscar soluciones de tipo tecnológico, ambiental y económicamente viable para el manejo de los mismos.
- La necesidad de reducir los consumos de Fuel Oil en los ingenios que procesan azúcar y alcohol, usando los RAC como combustible complementario vía pirólisis, así también como diferentes variantes técnicas a emplear.

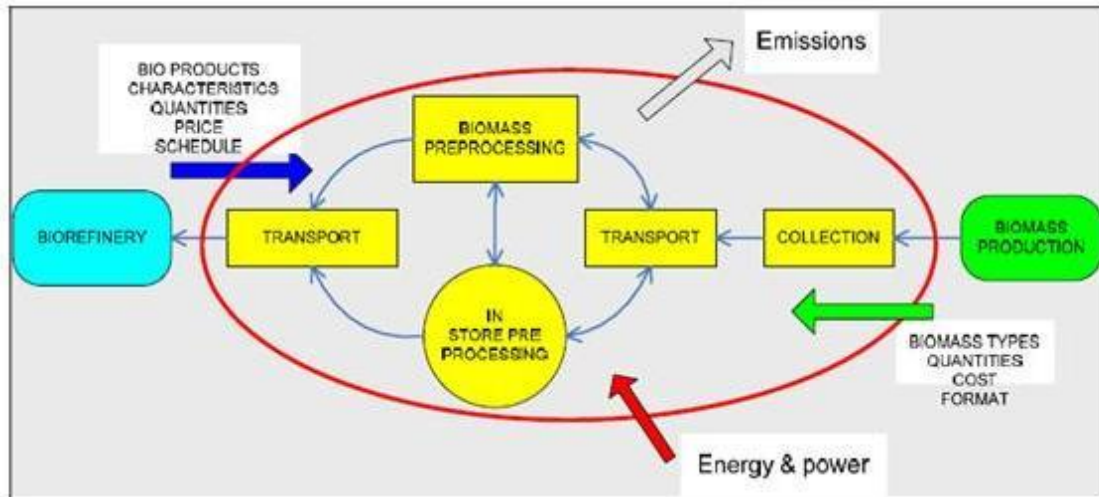
- El empleo de los RAC como combustible vía pirólisis, dada su condición de biomasa renovable anual no hace incrementar el efecto invernadero y de hecho contribuye a la preservación del medio ambiente, generando reconocimientos por la reducción de emisiones de gases de invernadero, haciendo valido protocolos en beneficio del medio ambiente.
- La implementación de una cultura de Bio-Ingenios y concebir la industria azucarera como una industria sucro-energética es una alternativa muy atractiva [22].

### **3.1.5 Rutas tecnológicas de Pirólisis “modelos” (actual, móvil, residuo-caña, densificación)**

La figura N° 13, muestra un esquema general de la ruta del manejo de la biomasa RAC, hasta la Biorefinería [23], que para este proyecto, la Biorefinería es la UIPCB. La biomasa se recoge en los cultivos o en el ámbito forestal. La biomasa recogida es transportada una distancia media de unos 25 km para el almacenamiento y / o pre procesamiento. El pre procesamiento puede incluir una o una combinación de varios procesos como son reducción de tamaño, fraccionamiento, clasificación, densificación y secado.

El almacenamiento de la biomasa húmeda también puede impartir modificaciones bioquímicas y físicas para los RAC.

Las actividades dentro del óvalo rojo, identifican los actuales y posibles futuras empresas de suministro de biomasa. Las flechas en el diagrama muestran el flujo de material y la información. El flujo de información (línea azul) de la Biorefinería a la empresa de suministro de biomasa, incluye las especificaciones de calidad y características para la biomasa, es decir, el contenido de humedad, granulometría, contenido de celulosa y lignina, además Información importante para la logística, que incluye las cantidades, los plazos de entrega y precio. En respuesta a las demandas, el lado de la producción de biomasa proporciona al sistema de abastecimiento (flecha verde), el tipo de biomasa, cantidades y costo.



**Figura 13. Esquema general del pre tratamiento de la biomasa hasta la Biorefinería. [23]**

El ovalo rojo enmarca el sistema de abastecimiento de la biomasa, utiliza energía (Flecha roja) y potencia, para recolectar, transportar y pre-procesar la biomasa. El sistema como es de esperarse genera emisiones al ambiente (flecha gris), las cuales deben ser minimizadas. Y finalmente después de llegar a la Biorefinería, o sea a la UIPCB, se obtendrán los productos de pirólisis, los cuales son CHAR, BIOACEITE y GNC.

Ya mostrado el esquema de la ruta de la biomasa hasta la Biorefinería de forma general, a continuación se muestran las posibles rutas tecnológicas de Pirólisis (modelos), las cuales se denominaron así:

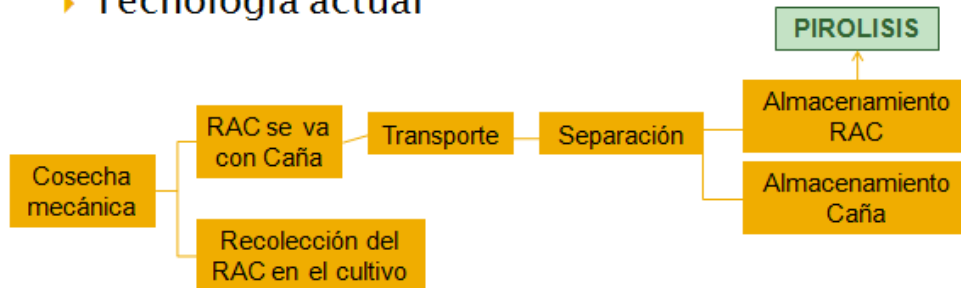
- Tecnología Actual
- Tecnología RAC y Caña
- Densificación
- Tecnología Móvil

En todas las tecnologías, menos en la móvil, en el almacenamiento del RAC ocurre el secado de la misma, posteriormente se da el proceso de pirólisis en la UIPCB y la obtención de los Bio-productos.

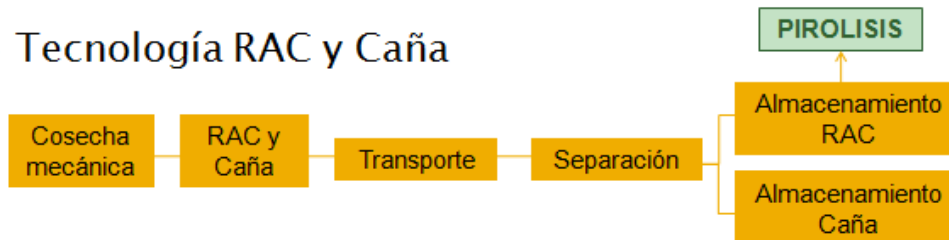
En la **Tecnología Actual**, los ventiladores de las cosechadoras mecánicas están encendidos, lo que hace que aproximadamente quede en el cultivo el 90% de los RAC, y el 10% restante sea transportado junto con la caña al ingenio. Posteriormente en algunos ingenios colombianos los RAC y la caña pasa por un sistema de limpieza en seco de la caña de azúcar, lo que da como desecho los residuos sólidos RAC y minerales entre otros. Una importante característica de esta tecnología es que los RAC

y la caña quedan cortados de igual tamaño alrededor de 20 a 30 cm, y posteriormente son secados de forma natural (solar), lo que sigue contando por decirlo de cierta manera con RAC, es decir materia prima gratis para disponerlo a la UICPB.

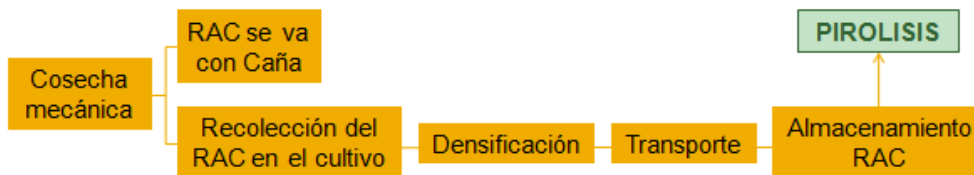
### ► Tecnología actual



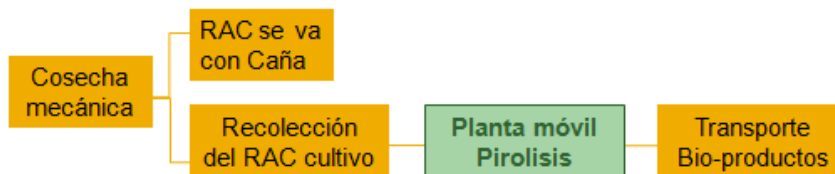
### ► Tecnología RAC y Caña



### ► Densificación



### ► Tecnología móvil



Fuente el Autor.

La **Tecnología RAC y Caña**, sugiere apagar los ventiladores de las cosechadoras, de manera que sea transportado Caña y RAC al sistema de limpieza y separación, lo que conlleva a que la eficiencia de transporte sea afectada y disminuya, por ejemplo ya no se transportarían 30 Ton de caña en los trenes cañeros, sino, podrían ser 20 Ton de Caña y 10 Ton de RAC, lo que aumentaría la disposición de RAC en el ingenio. Pero se debe tener en cuenta el ahorro en el apagado de los ventiladores. Después la caña y el

RAC pasan por el sistema de limpieza, y la caña va a los molinos y el RAC al proceso de secado y posteriormente a la UIPCB.

La **Densificación**, trata de cosechar mecánicamente la caña con los ventiladores encendidos, lo que genera acumulación del RAC en el cultivo. Posteriormente una unidad de densificación, podría ser una máquina peletizadora móvil, va al cultivo y forma los pellets, lo que aumentaría la eficiencia de transporte, para el posterior secado y procesamiento en la UIPCB, en el ingenio.

Finalmente la **Tecnología móvil**, se basa en un concepto llamado Proceso de Conversión de Biomasa Distribuida [13], que trata de hacer llegar a los cultivos, varias unidades móviles de Pirólisis (satélites), que realicen el proceso en el cultivo y después transportar los Bio productos, ganando en eficiencia de transporte, reduciendo el número de pasos del proceso y no concentrando la producción lo que conlleva un mejoramiento en la parte ambiental. La unidad de pirólisis móvil llega al cultivo, después de realizada la cosecha mecánica, y de hacerse el secado necesario en el cultivo.

Como el objetivo del presente trabajo es el Diseño y Construcción de la UIPCB, para apropiación del conocimiento, investigación y experimentación en Pirolisis Continua de Biomasa y desarrollo de tecnología local en energías renovables, después de validarse, se procederá a aplicar en conjunto algunos de los modelos o rutas tecnológicas propuestas anteriormente.

### **3.2 DISEÑO PRELIMINAR Y MONTAJE DE PRUEBAS DE LABORATORIO**

El diseño preliminar se realizó con 3 pruebas de laboratorio con el fin de llevar a cabo la pirólisis del RAC en un montaje experimental y observar el proceso, comportamiento y resultados, en forma práctica, para después aplicar dicha práctica al Diseño de la UIPCB.

Se realizaron tres ensayos experimentales, lo cuales dieron como resultado, lo siguiente:

#### **RESUMEN INFORME PRUEBA EXPERIMENTAL N°1 DE PIRÓLISIS DE RAC (Residuo Agrícola Cañero) PARA EL DESARROLLO DE LA TESIS, DISEÑO Y CONSTRUCCION DE UNA UNIDAD DE INVESTIGACION EN PIRÓLISIS CONTINUA DE BIOMASA**

En la prueba experimental N° 1, se realizó el primer ensayo de pirólisis de carácter práctico para observar el proceso, su comportamiento y resultados en el laboratorio, para aterrizar y validar los conceptos básicos teóricos del mismo.

El montaje se realizó con el equipo disponible en el laboratorio de Cenicaña, el cual se muestra en la figura N° 14.



**Figura 14. Montaje experimental prueba N° 1, para la Pirólisis del RAC.**

El montaje experimental lo componen, un quemador de gas como fuente calor, el reactor es un flask de tres bocas, un condensador de doble tubo enfriado por agua, soporte, RAC y una termocupla para registro de temperaturas.

Para el correcto desarrollo experimental de la prueba se requiere de unas condiciones o parámetros preestablecidos, los cuales son las variables de mayor incidencia en el proceso de pirólisis. Estas son la temperatura, el tiempo de residencia de los gases en el reactor, el tamaño de la partícula, el porcentaje de humedad y el tipo de biomasa. En la siguiente tabla se muestran algunos rangos de valores para cada una de las variables anteriormente mencionadas, para el correcto procedimiento experimental.

**Tabla 11. Valores Variables Prueba N° 1, Proceso de Pirólisis**

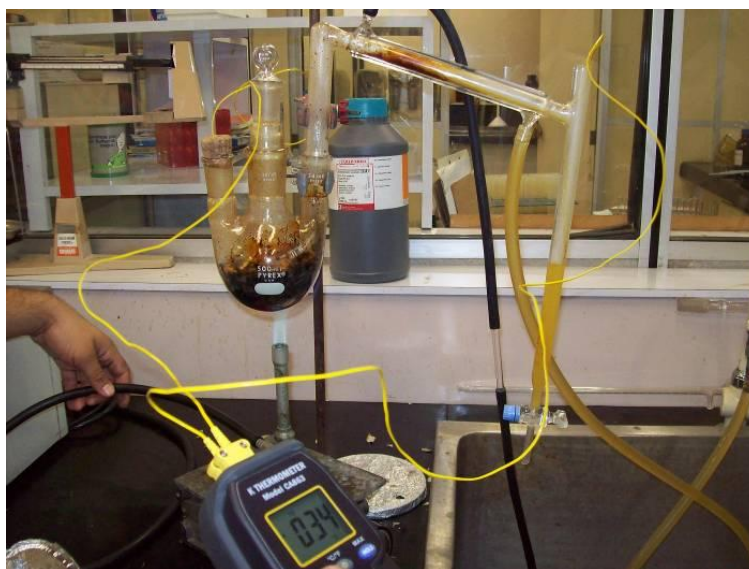
<b>Variables De Mayor Incidencia En El Proceso De Pirólisis</b>				
Temperatura °C	Tiempo de la Prueba	Tamaño de Partícula	% de Humedad Muestra	Tipo de Biomasa
400-600°	0 a 60 min	1-5 mm	< al 10	RAC

Las condiciones de % de humedad, tamaño de partícula, gas inerte, no se cumplieron en este ensayo, pero como el objetivo fue de carácter práctico se procedió a hacer la prueba, sin los valores preestablecidos para el ensayo, solo con el fin de ganar experiencia acerca del proceso, observar comportamiento, obtener y evaluar resultados, para posteriormente comparar con la teoría y sacar conclusiones para pruebas posteriores, ya que este es el primer ensayo realizado.

Se inició la corrida y se observó la aparición de gases en el reactor y condensador. Posteriormente en las paredes del condensador y del reactor aparece un producto muy denso de color café oscuro. Se toman datos de temperatura (ver figura N° 15 y 16) y densidad de la muestra del bioaceite cada 15 minutos, los cuales se consignan en la siguiente tabla.

**Tabla 12. Datos obtenidos del ensayo N° 1.**

Tiempo [minutos]	Temperatura en la Base del Reactor [°C]	Temperatura Dentro del Reactor [°C]	Temperatura del Bio-Oil [°C]	$\rho$ Muestra Obtenida de Bio-Oil [g/cm <sup>3</sup> ]
15	400	125	34	---
30	450	225	34	1.0016
45	475	250	35	0.9990
60	---	---	---	---



**Figura 15. Toma de datos, aparición de un producto en las paredes del reactor y el condensador y obtención de bioaceite, prueba N° 1.**



**Figura 16. Medición de temperatura, prueba N° 1.**

Finalmente terminado el proceso, al ser Batch se desmontó el reactor y se sacó la muestra de char (ver figura N° 17 y 18), y también se obtuvo la muestra del material condensado.



**Figura 17. Muestra del char obtenido en la prueba experimental N° 1.**



**Figura 18. Muestra del material condensado, obtenido en la prueba experimental N° 1.**



El ensayo arrojó resultados para implementación en los ensayos posteriores, entre los cuales están:

Las variables mencionadas como de mayor incidencia, en el proceso de pirólisis, no estaban en su rango de aceptabilidad para la misma. Además no se tuvo un control de % en pesos para determinar rendimientos de productos sólidos, líquidos y gases, por lo que se recomienda de carácter obligatorio tener en cuenta para ensayos posteriores.

Durante la prueba se observó una sustancia que se quedaba pegada en las paredes del reactor y el condensador. Parece ser el bioaceite, ya que presenta las características de color y viscosidad, además su textura resultó muy grasosa, lo que indica que se encuentra material condensado, en esos lugares y las muestras obtenidas del bioaceite (ver figura N° 18), sean posiblemente en su totalidad agua obtenida del RAC.

Lo que salta a la vista entonces es un problema de transferencia de calor por lo que se debe garantizar que la condensación ocurra en el condensador, para evitar craqueo de la muestra, además la conexión Reactor-Condensador debe estar aislada térmicamente, al igual que el reactor, para evitar este tipo de problema.

### **RESUMEN INFORME PRUEBA EXPERIMENTAL N° 2 y N° 3 DE PIRÓLISIS DE RAC (Residuo Agrícola Cañero) PARA EL DESARROLLO DE LA TESIS, DISEÑO DE UNA UNIDAD DE INVESTIGACION EN PIRÓLISIS CONTINUA DE BIOMASA**

Partiendo como base de la prueba experimental N° 1, se procedió a mejorar el ensayo de pirólisis para esta nueva prueba, las variables de mayor incidencia para este tipo de ensayos se encuentran en el rango de aceptabilidad, así también como la adaptación del reactor, la conexión reactor-condensador y el condensador.

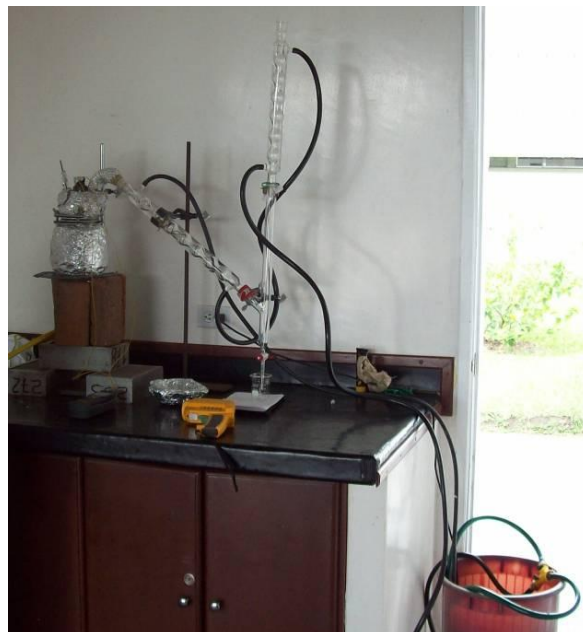
En la figura N° 19, se observa la adaptación de un reactor más grande y del sistema de aislamiento térmico, el cual permitió un aumento en eficiencia térmica del proceso y de una correcta condensación de los gases de pirólisis.



**Figura 19. Reactor y conexión Reactor-Condensador aislado térmicamente, prueba N° 2 y N° 3.**

En adición, se realizó un montaje con recirculación de agua, utilizando una bomba y un recipiente con agua que hace las veces de torre de enfriamiento, lo que permite menor gasto de agua.

Ya realizados estos ajustes al montaje experimental, quedó como lo muestra la figura N° 20, para posteriormente realizar el ensayo.



**Figura 20. Montaje experimental N°2 y N° 3, de Pirólisis de RAC.**

Realizado el ensayo los datos obtenidos se consignaron en las siguientes tablas. Cabe mencionar que el ensayo N° 2 (40 gramos de muestra), no se tomaron datos, ya que

era para verificar y realizar las recomendaciones de la primera prueba y comprobar el funcionamiento el sistema cualitativamente. El ensayo N° 3 (100 gramos de muestra), si se tomaron datos los cuales se muestran a continuación:

### DATOS EXPERIMENTALES ENSAYO N° 3 PIRÓLISIS DE RAC

A continuación se muestran los datos obtenidos en el ensayo N° 3 de Pirólisis de RAC:

**Tabla 13. Pesos En Gramos prueba N° 3.**

PESOS INICIALES	
Peso Del Balón Vacio (g)	522
Peso Tapa Del Balón (g)	300
Peso Balón + Peso Muestra Seca (g)	620.8
Peso de la Muestra RAC (g)	98.8

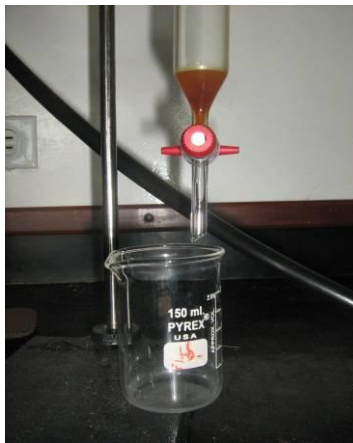
**Tabla 14. Temperaturas Y Tiempos Del Ensayo N° 3.**

ZONAS DEL PROCESO	TEMPERATURA (°C)	TIEMPO
Reactor (No confiable)	182 ; 190 ; 180	Cada 15 minutos
A la Salida del Reactor	75.9 ; 87 ; 85	Cada 15 minutos
A la Salida del 1 <sup>er</sup> Condensador	29.3 ; 30 ; 29.5	Cada 15 minutos
A la Salida del 2 <sup>do</sup> Condensador	28 ; 28 ; 27	Cada 15 minutos
Aparición 1 <sup>er</sup> Gas en el Recolector	-----	A los 3 minutos
Aparición 1 <sup>er</sup> Condensado	-----	A los 9 minutos
1 <sup>er</sup> Encendido del Gas	-----	A los 5 minutos
Duración de la Llama del Gas	-----	40 minutos
Duración Total del Proceso	-----	45 minutos

A continuación se muestran algunas fotografías de los dos ensayos, las del lado izquierdo son los del ensayo N° 2 y las del lado derecho las del N° 3:



**Figura 21. Gases no condensables en combustión a la salida del sistema de condensación, prueba N° 2 y N° 3.**



**Figura 22. Material condensado, obtenido en el recolector, prueba N° 2 y N° 3.**

Uno de los resultados más relevantes del ensayo N° 3, fue que el material que se obtiene en las paredes del condensador, se extrajo y se observó que su textura era bastante grasosa, lo que nos indica posiblemente que también puede ser bioaceite, por ende se raspó un poco de esa posible sustancia se encendió y lo que ocurrió fue lo que muestra la siguiente figura:



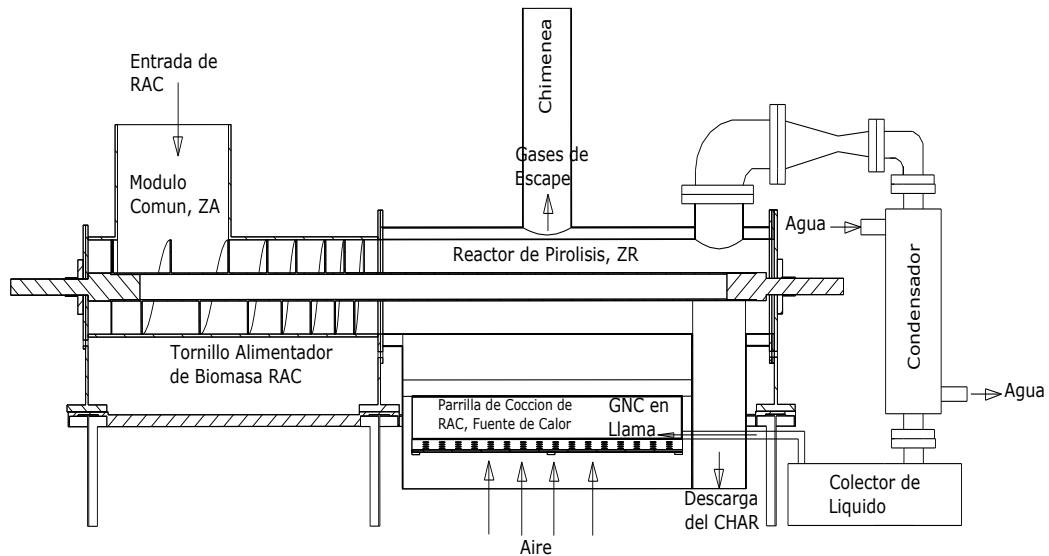
**Figura 23. Posible bioaceite, en combustión, prueba N° 3.**

Finalmente los parámetros que se variaron respecto a la primera prueba dieron como resultado una mejora en cada uno de los componentes del montaje experimental que se modificaron, lo que arroja en el proceso un avance significativo y un avance en los resultados del mismo, para aplicación en la unidad continua.

Cenicaña, realizara a cada uno de los productos obtenidos de la pirólisis experimental, Bio-Char, Bio-Oil, y GNC, caracterización, para comparar los valores obtenidos, con los de la literatura al respecto, para poder determinar aciertos o desaciertos de los ensayos. Además el biochar, se está probando en plántulas, para ver el comportamiento del mismo, en cuanto a mejoramiento de suelo, y como afecta a la planta en general.

### **3.3 DISEÑO CONCEPTUAL Y BÁSICO DE LA UNIDAD DE INVESTIGACIÓN EN PIRÓLISIS CONTINUA DE BIOMASA “UIPCB”.**

Partiendo del estudio del arte sobre pirolisis, de las pruebas experimentales anteriores y de los parámetros de diseño a implementar, el diseño de la UIPCB propuesto, lo componen dos zonas o módulos, como se observa en la figura 24, su configuración es por fluidización mecánica y su calentamiento es indirecto.



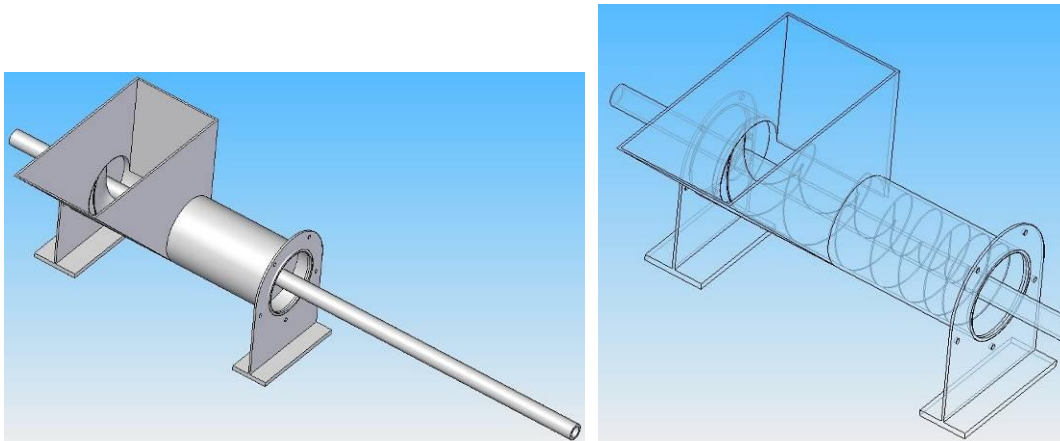
**Figura 24. Esquema de la Unidad de Investigación en Pirólisis Continua de Biomasa.**

La primera sección llamada ZONA DE ALIMENTACIÓN (ZA), es una sección o módulo común, ya que sirve también para el desarrollo de un Gasificador como otro proyecto de grado de Univalle, cumple la labor de alimentar el RAC de forma continua por medio de un tornillo sin fin con reducción de paso, que hace se genera un sello sacando gran parte del oxígeno para el proceso de pirólisis. La segunda sección llamada ZONA DE REACCION (ZR) o módulo pirólisis, es donde ocurre el proceso de pirólisis.

Debido a la naturaleza corrosiva de los líquidos de pirólisis [24], especialmente derivados de la biomasa y al alto rango de temperatura de operación del sistema (400 °C a 600°C) se selecciono como material acero inoxidable de grado ASTM A 240 y AISI 304 para la mayoría de los componentes del equipo. A continuación se describe a detalle cada componente de la UIPCB para una clara comprensión del diseño del equipo.

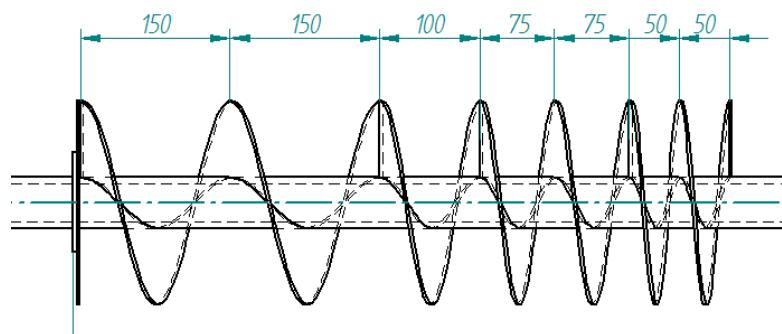
### 3.3.1 Módulo Común o Zona de Alimentación "ZA":

El módulo común o Zona de Alimentación (ZA) Figura 25, se diseñó en acero, a partir de un tubo de 1/8" de espesor y Diámetro exterior de 8" 9/16.



**Figura 25. Módulo común y/o Zona de Alimentación de la UIPCB.**

La biomasa se introduce en la tolva y es transportada por un tornillo sin fin, fabricado a partir de un tubo central (eje) de 2" 3/8 de Diámetro exterior, al cual se le adicionan las hélices con un espesor de 3mm y con reducción de paso, como lo muestra la vista en sección en la figura 26. El tornillo va apoyado en las dos bridas externas, realiza la labor de alimentar en continuo y es accionado por un motor que al variar su frecuencia, se controla el tiempo de residencia de la biomasa en la zona de reacción.



**Figura 26. Hélices del tornillo de alimentación unidades en mm.**

### 3.3.1.1 Capacidad teórica de la UIPCB

Cada revolución del tornillo alimentador se supone desplaza hacia el reactor el volumen de biomasa contenido en uno de sus bolsillos, siendo este volumen calculado mediante la siguiente expresión:

$$V_b = \pi/4 * (D_e^2 - D_i^2) * p * \eta$$

; donde

	De: Diámetro Reactor
	Di: Diámetro Eje Tornillo
	p: Paso Tornillo
	η: Eficiencia Volumétrica de llenado

Suponiendo una eficiencia volumétrica del 75% se estima el volumen introducido por revolución:

$$V_b = \pi/4 * (0,21115^2 - 0,0603^2) * .150 * .75 = 0.0036$$

Con una densidad en base seca de 25 a 40 kg/m<sup>3</sup> según la literatura [29], y la densidad teórica del modelo de alrededor 50 kg/m<sup>3</sup>, se realizó un promedio y se tomó 40 kg/m<sup>3</sup> y un flujo másico requerido de 0.00277kg/s, 0.00416kg/s, 0.00555kg/s (10kg/h--15kg/h--20kg/h respectivamente como opción de variación en la producción) se calculan las revoluciones por minuto necesarias para satisfacerlo:

$$m = V * \rho * rps \quad ; \text{ donde} \quad \begin{array}{l} m: \text{Flujo Másico} \\ V_b: \text{Volumen de bolsillo} \\ \rho: \text{Densidad} \\ rps: \text{Revoluciones por Segundo.} \end{array}$$

$$rps = m / (V * \rho) = 0.0027 / (0.0036 * 40) = 0.019 \text{ rps} = 1.154 \text{ rpm}$$

Entonces para cada flujo másico se tiene que:

**Tabla 15. Variación RPM del tornillo alimentador y variación del flujo másico.**

Flujo Másico RAC (Kg/h)	Flujo Másico RAC (Kg/s)	Rps	Rpm
10	0.00277	0.0192	1.154
15	0.00416	0.0288	1.733
20	0.00555	0.0385	2.313

El motor del sistema de alimentación a utilizar es un Siemens 3~Mol. 1LA3 133-4 YB70 de 12 HP y 1750 RPM, el acople es por medio de una corona en el eje del tornillo de alimentación y un piñón en el eje del motor, y el ajuste de las rpm, se realizará por medio de un variador.

A continuación se muestra cada una de las zonas del tornillo alimentador y la relación de compresión en cada una de ellas, partiendo de una densidad de 40 kg/m<sup>3</sup>:



**Tabla 16. Relaciones de compresión en el tornillo alimentador [Diego F. Cobo, 2010].**

	ZONA 1 (Recepción)		ZONA 2 (Compresión)		ZONA 3 (Compresión)		ZONA 4 (Compresión)	
DIÁMETRO DEL EJE	2,375	In	2,375	in	2,375	In	2,375	In
ESPELOR DEL EJE	0,125	In	0,125	in	0,125	In	0,125	In
DIÁMETRO EXTERIOR	8,375	In	8,375	in	8,375	In	8,375	In
ESPELOR FILETE	0,125	In	0,125	in	0,125	In	0,125	In
PASO	150	Mm	100	mm	75	Mm	50	Mm
# DE PASOS	2	und.	1	und.	2	und.	2	und.
LONGITUD:	0,3	Mts	0,1	mts	0,15	Mts	0,1	Mts
DENSIDAD:	40	Kg/m3	60	Kg/m3	80	Kg/m3	120	Kg/m3

### 3.3.1.2 Análisis estático y dinámico del eje del tornillo transportador.

El eje que se utiliza para el sistema de transporte, como se mencionó anteriormente está apoyado en sus bridas externas por un par de rodamientos en cada una, y en la tabla N° 15 se observa sus RPM de operación, las cuales son menores a 3 RPM, aunque en la práctica serían menores a 10 RPM, lo que no genera velocidades críticas, evitando deflexiones por fuerza centrífuga, además la función del tornillo es solo alimentar y transportar la biomasa, hasta la zona de reacción, por lo cual no está sometido a grandes esfuerzos de torsión, flexión, o cargas dinámicas o de fatiga altas [38].

Debido a esto no es un criterio de diseño el análisis estático o dinámico del eje central del tornillo.

### 3.3.1.3 Potencia necesaria para alimentar la biomasa RAC.

Por medio de un analizador de redes en el motor del sistema de alimentación de RAC se puede obtener el consumo de energía eléctrica necesario, para calcular el valor de la potencia consumida durante las pruebas se utiliza la siguiente ecuación [28].

$$P_m = \sqrt{3} * V_1 * I_1 * \cos\phi$$

En donde

$P_m$  = Potencia Consumida.

$V_1$  = Voltaje de la línea.

$I_1$  = Corriente Consumida.

$\cos\phi$  = Factor de Potencia.

### 3.3.2 Módulo Pirólisis o Zona de Reacción “ZR”:

A través de la variación de los parámetros más importantes en el proceso de pirólisis, como son el tipo de biomasa, las condiciones de la atmosfera de reacción, la temperatura máxima, la tasa de calentamiento y el tiempo de permanencia de los productos en el reactor, es posible influir en la característica y distribución de sus principales productos [17].

Partiendo del diseño preliminar y montaje de pruebas de laboratorio visto en la sección 3.2, el módulo de pirólisis, o Zona de Reacción, para simplificar su fabricación el reactor es un cilindro horizontal de 1/8" de espesor y Diámetro exterior de 8" 9/16, el cual su calentamiento es indirecto, y lo genera una parrilla de cocción de biomasa (RAC) en la parte inferior. Al final de la ZR esta la descarga de char en la parte inferior del reactor, y el ducto de salida de los gases pirolíticos está en la parte superior, el cual es un tubo de 5" de Diámetro que se conecta al condensador (ver figura N° 27 y 28).

Para determinar su temperatura se instalarán dos sondas o tubos del mismo material del reactor en la mitad de la zona de la longitud efectiva de reacción, para saber la temperatura máxima de pirólisis, y la segunda, en el ducto de conexión entre el reactor y el condensador, para conocer la temperatura de salida, o temperatura a la que se encuentran los gases pirolíticos y controlar su correcta temperatura para una adecuada condensación y máximos rendimientos. En dichas sondas se posicionara un medidor de temperatura “K Thermometer modelo CA 863”, el cual dispone de dos termocuplas para observar allí dichas temperaturas, disponible en Cenicaña.

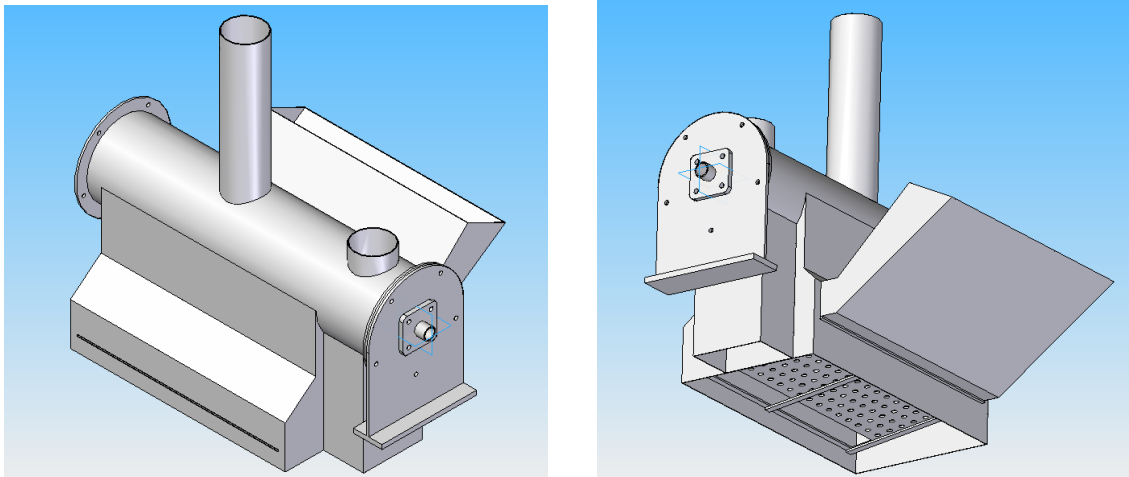


Figura 27. Módulo de Pirólisis

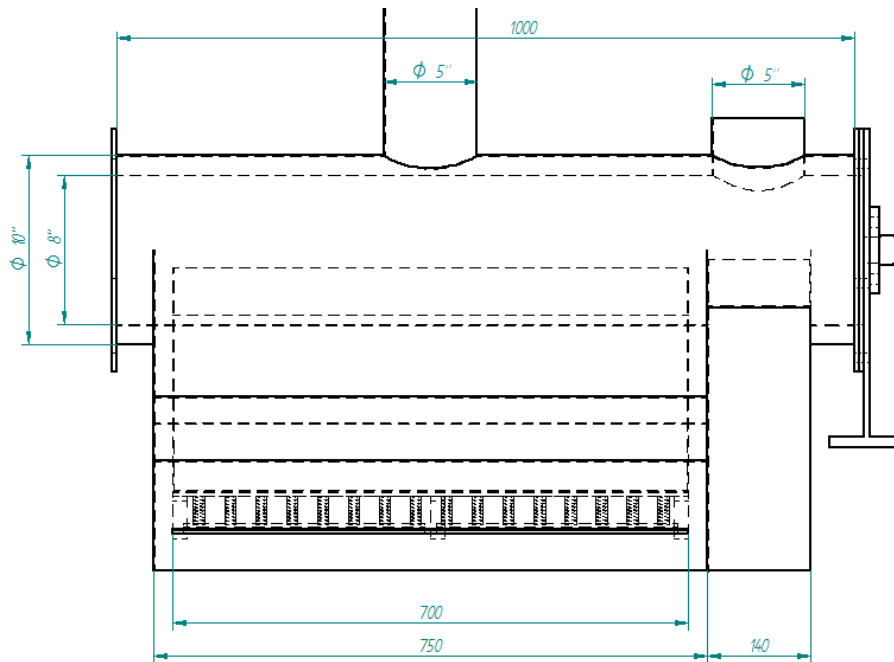


Figura 28. Vista en sección Módulo de Pirólisis o ZR unidades en mm.

### 3.3.2.1 Modelo Transferencia de Calor

Se realizó un modelo, de forma analítica y de forma numérica con la herramienta computacional Ansys®, para determinar el calor requerido para pirolizar la biomasa y el comportamiento de la temperatura de la biomasa dentro del reactor en el tiempo ya que el proceso de pirólisis es de tipo no lineal transitorio, además ocurre convección, conducción, radiación, reacciones químicas y cambios de fase. De esta manera, y de acuerdo a las características de diseño y parámetros de operación propuestos para el reactor, se modeló para observar la trayectoria y el proceso de transferencia de calor de la pirólisis, como sigue:

En la Tabla 17 están las dimensiones del reactor de pirólisis, y en las Tablas 18 y 19, están las características de la materia prima a ser transformada y del combustible que genera el calor necesario al proceso el cual también es RAC.

Tabla 17. Dimensiones Reactor de la UIPCB.

REACTOR CILINDRICO		
Radio Exterior	0,1087	M
Espesor	0,0032	M
Altura (Long. Efec. Reacción)	0,7000	M
Coefficiente de conductividad (K)	60,0000	W/m <sup>2</sup> K
Radio Interior	0,1055	M

**Tabla 18. Características de la Biomasa RAC a ser pirolizada.**

<b>BIOMASA PARA PIROLIZAR "RAC"</b>		
Temperatura para pirolizar	450,0000	°C
Peso	1,0000	Kg
Volumen (Volumen Reactor)	0,0184	m <sup>3</sup>
Densidad	54,3962	Kg/m <sup>3</sup>
Humedad	30,0000	%
Coeficiente de conductividad del RAC. (300, 573 y 673 K)	0,1750 – 1,035 y 1,465	W/m°K
Flujo másico de RAC	10	Kg/h
Coeficiente (k) madera	1,211	W/m°K

**Tabla 19. Características de la Biomasa RAC, como combustible y fuente de calor.**

<b>BIOMASA COMBUSTIBLE RAC "COMB"</b>		
Temperatura de flama	1200,0000	°C
Peso	0,5000	Kg
Volumen (Área parri x Altura cama)	0,0107	m <sup>3</sup>
Densidad	46,9468	Kg/m <sup>3</sup>
Humedad	30,0000	%
PCI	15120,0000	Kj/Kg
Flujo másico comb	5	Kg/h
Temperatura del Hogar	900	°C
Coeficiente de convección de los humos del Hogar	15	W/m <sup>2</sup> °k

El objetivo es conocer la distribución de temperaturas de la biomasa y el reactor, además de saber el calor o energía necesaria durante la pirólisis, dentro de un tiempo propuesto de dos horas. La biomasa atraviesa el reactor cilíndrico (ver dimensiones Tabla N° 17) alimentado por el tornillo, ambos fabricados en acero. Ocurre convección entre el reactor de acero y el ambiente de la parrilla de cocción de biomasa, o sea en el hogar, debido a la fuente calor por combustión del RAC, el cual suministra el calor al reactor.

### 3.3.2.1.1 Propiedades de los materiales.

Las propiedades de los materiales, RAC y reactor de acero, se listan en la tabla N° 20.

Tabla 20. Propiedades de los materiales del reactor y el RAC.

<b>Conductivity (KXX) for Steel</b>			<b>Conductivity (KXX) for Wood</b> <i>Jalan, V.K. Srivastava</i>	<b>Conductivity (KXX) for RAC</b> <i>A.J Fajardo V.</i>
at 20 °C	54	W/m K	1,211	0,175
at 100 °C	57	W/m K	1,43	0,605
at 300 °C	48	W/m K	2,03	1,035
at 400 °C	45	W/m K	2,33	1,465
at 600 °C	36	W/m K	2,93	1,895
at 800 °C	33	W/m K	3,53	2,325
<b>Enthalpy (ENTH) for Steel</b>			<b>Enthalpy (ENTH) for RAC</b> <i>Gráfica 29.</i>	
at 20 °C		KJ/Kg	80	
at 100 °C		KJ/Kg	250	
at 300 °C		KJ/Kg	1100	
at 400 °C		KJ/Kg	1500	
at 600 °C		KJ/Kg	2750	
<b>Initial Conditions</b>				
Temperature of Steel	890 °C			
Temperature of RAC	25 °C			
<b>Convection Properties</b>				
Gases Film coefficient	15	W/m <sup>2</sup> K		
Home temperatura	900 °C			
Process Time	2 Hour			

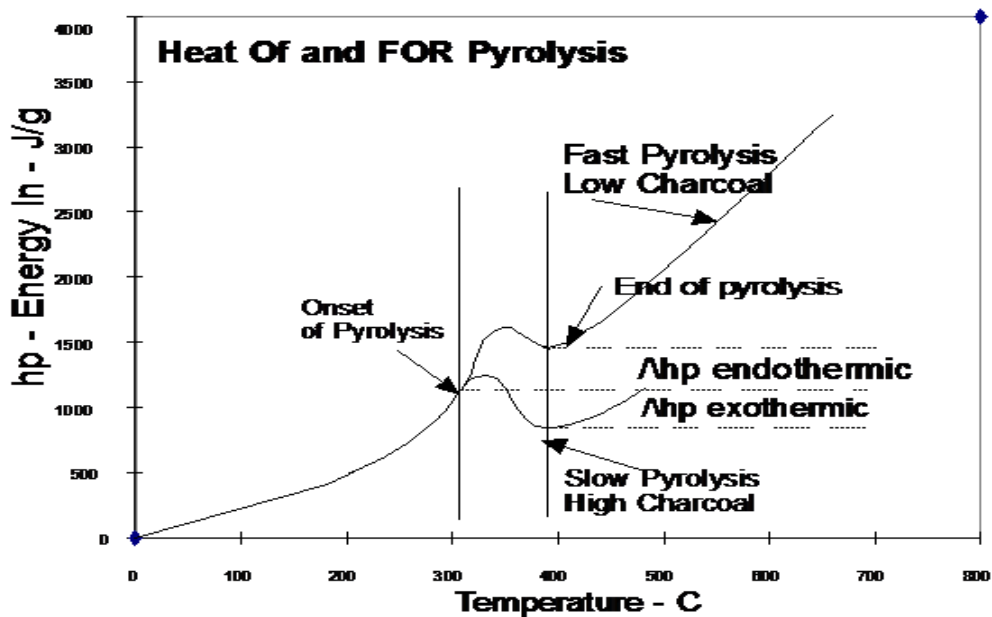


Figura 29. Energia vs temperatura para Pirólisis.[30]

### 3.3.2.1.2 Suposiciones y Consideraciones de diseño.

Jalan, V.K. Srivastava [31], sugiere que la conductividad para la madera es  $k = 1.13 + 0.003(T - 273)$  W/m.K, dando como resultado los valores, mostrados en la Tabla N° 20, entonces se presenta un incremento promedio para las temperaturas tabuladas del “k” en 2.243 veces. Debido a que no se conoce la variación de la conductividad “k” para el RAC, se tabuló, partiendo del k sugerido en la literatura para 20 °C de 0,175 W/m K, incrementándolo en las veces que se aumenta la conductividad para la madera, dando unos valores de diseño supuestos para el desarrollo del modelo de pirólisis de RAC ver tabla 20. Los efectos de la radiación fueron ignorados.

Durante la pirólisis según Curtis and Miller [25], los poros en la biomasa se agrandan, llevando a que las partículas lleguen a ser mas porosas a medida que la biomasa se convierte en gas, volátiles y char. Consecuentemente el tamaño de los poros resulta en muchos sitios adicionales de reacciones para los volátiles y los gases producidos, y permiten la interacción entre la partícula caliente, estos temas son discutidos por Ekstrom and Rensfelt [26] y Anthony and Howard [27]. Para este caso, dentro del reactor durante la pirólisis de la biomasa, el calor es transmitido por los siguientes métodos:

1. Conducción dentro las partículas solidas de biomasa.
2. Convección dentro los poros de las partículas.
3. Convección y radiación entre la superficie del reactor y el hogar.
4. Temperatura constante en la superficie del reactor.

Para simplificar la solución, se asumió que el calor transferido dentro de las partículas sólidas de biomasa es solo por conducción, suponiéndose el RAC como un cilindro tubular solido de biomasa y los efectos de la porosidad en la biomasa solida no se consideraron, lo cual puede ser válido para partículas muy densas de algunos tipos de biomasa, o para biomasa compactada. Su temperatura radial, aumenta a medida que aumenta el tiempo, haciendo que se formen cantidades de volátiles y GNC. Cambios en las condiciones de calentamiento, podrían alterar la tasa de reacción y afectar la distribución de los productos.

Hay que tener en cuenta que en la práctica, la transferencia de calor por convección en el reactor, afectara favorablemente el desempeño del sistema, ya que los gases piroliticos producidos dentro del reactor, están en contacto con las partículas de biomasa, reduciendo tiempos de residencia de la biomasa y aumentando la eficiencia energética del sistema.

### 3.3.2.2 Modelo Transferencia de Calor en Estado Estable

Primero se obtuvo la energía disponible de la fuente de calor, la cual proviene de la combustión del RAC, con un 30% de humedad y sus características ya se listaron anteriormente en la Tabla 19. Entonces para conocer la energía disponible o el calor desde el combustible tenemos que:

$$Q = \text{masa} * \text{PCI} * \% \text{ libre de Hu}$$

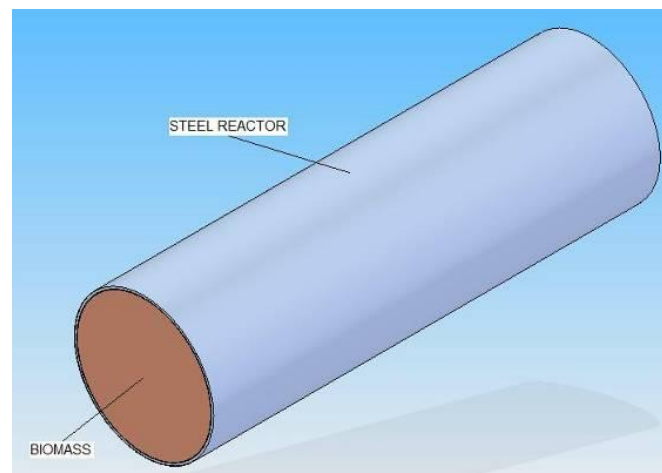
$$Q = 0.5 * 15120 * 70\%$$

$$Q = 5292 \text{ kJ} \text{ ---- Energía Disponible o calor desde combustible: } Q_{\text{disponible}} = 5292,0000 \text{ kJ}$$

A continuación se realiza el modelo analítico y numérico para conocer el requerimiento energético por transferencia de calor en estado estable y por entalpia, además como ya se tiene la energía disponible, se obtiene también la eficiencia ( $\eta$ ) teórica, la cual es:

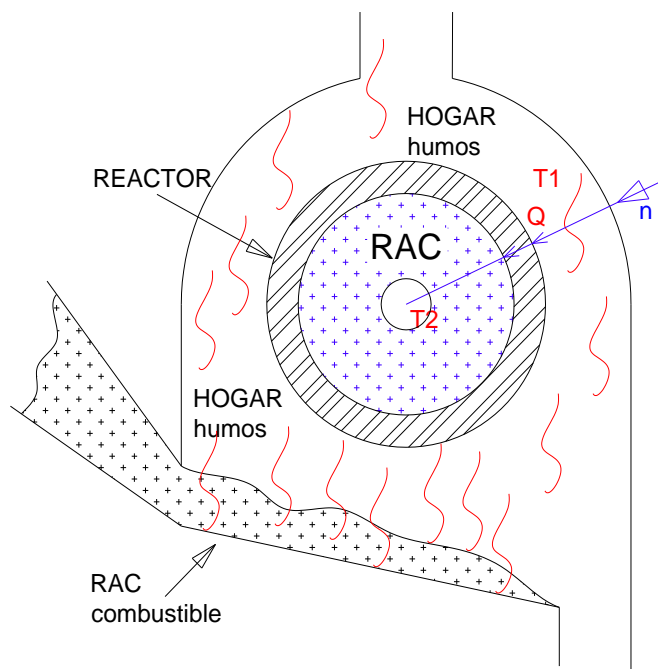
$$\eta = Q_{\text{requerido}} / Q_{\text{disponible}}$$

Los resultados del modelo para saber el flujo de calor en estado estable desde la temperatura del hogar 900 °C hasta la temperatura el centro de la biomasa, o sea la temperatura de pirólisis de RAC a 450°C, basado en la transferencia de calor en un cilindro compuesto por dos elementos Reactor de Acero y RAC se muestran a continuación (ver figura N° 30).



**Figura 30. Modelo de la Biomasa RAC, a través del Reactor.**

La figura 31, muestra un dibujo de una vista esquemática en corte transversal de la zona de reacción, el calor va desde los humos en el hogar producidos por la combustión de la biomasa, hasta el centro del RAC.



**Figura 31. Dibujo esquemático de la zona de reacción de pirólisis, para el análisis por transferencia de calor.**

Entonces se tiene por transferencia de calor que:

$$Q = [T1 - T2] / [(1/h \cdot A)_{\text{humos}} + (1/2\pi kL \cdot \ln(D2/D1))_{\text{reactor}} + (1/2\pi kL \cdot \ln(D2/D1))_{\text{RAC}}]$$

- Donde,
- A: Área superficial del reactor
  - h: Coeficiente de convección de los humos
  - k: Coeficiente de conductividad k para el reactor y para el RAC
  - T1: Temperatura de los humos
  - T2: Temperatura en el centro del RAC, o temperatura de pirólisis
  - D1: Diámetros interiores para el reactor y para el RAC
  - D2: Diámetros exteriores para el reactor y para el RAC

Entonces reemplazando los valores que se tiene para cada uno de los k del RAC en la Tabla N° 18 de acuerdo a su temperatura se tiene que el flujo de calor Q es igual a:

Q = 254.6 W , para  $k_{\text{RAC}} = 0.175 = k1$   
 Q = 1084.8 W , para  $k_{\text{RAC}} = 1.035 = k2$   
 Q = 1343.7 W , para  $k_{\text{RAC}} = 1.465 = k3$

Además el tiempo de la corrida es de 360 segundos, o sea 6 minutos, con lo cual al multiplicarlo por el flujo de calor Q, se obtiene la energía requerida para la pirólisis del RAC, por transferencia de calor.



$$E \text{ [kJ]} = Q \cdot \text{tiempo} / 1000$$

Energía requerida para el RAC con "k1" =  $(254.6 \cdot 360) / 1000 = 91.64 \text{ kJ}$

Energía requerida para el RAC con "k2" =  $390.54 \text{ kJ}$

Energía requerida para el RAC con "k3" =  $485.03 \text{ kJ}$

Ahora el RAC contiene humedad y partimos del hecho que contiene una humedad del 30%, que es la humedad con la cual el RAC se encuentra al secarse de forma natural por el sol, entonces el calor latente de evaporación es de  $2270 \text{ kJ/kg}$ , lo que da como resultado que la energía requerida por el agua para evaporarse es:

$$E = \text{Calor} \cdot \text{masa} \cdot \text{humedad} / 100$$

$$E = 2270 \cdot 1 \cdot 30 / 100$$

Energía requerida para el agua =  $681 \text{ kJ}$

Finalmente se obtuvo la energía total requerida para el RAC, la cual es la suma de la energía requerida para el agua y la energía para el RAC, entonces los resultados son:

Energía total con "k1":  $Q_{\text{requerido}} = 772.64 \text{ kJ}$

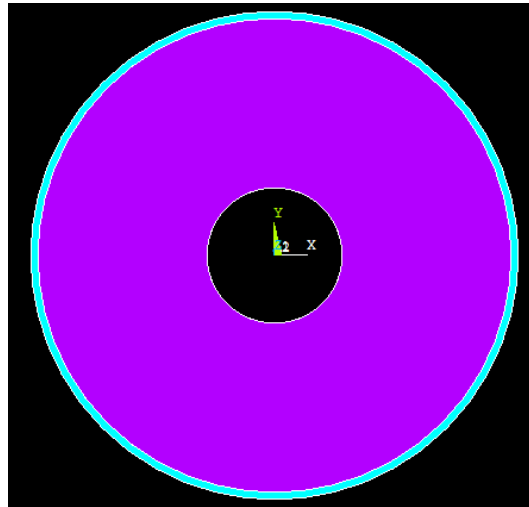
Energía total con "k2":  $Q_{\text{requerido}} = 1071.54 \text{ kJ}$

Energía total con "k3":  $Q_{\text{requerido}} = 1166.03 \text{ kJ}$

**Tabla 21. Resultados Del Modelo Analítico Del Requerimiento de Energía por Transferencia de Calor o Energía que Absorbe El RAC.**

Flujo de calor con "k1"	254,6	W
Flujo de calor con "k2"	1084,8	W
Flujo de calor con "k3"	1347,3	W
Tiempo de la prueba	360	Seg
Área de transferencia	0,478	m <sup>2</sup>
Energía requerida para el RAC con "k1"	91,64	kJ
Energía requerida para el RAC con "k2"	390,54	kJ
Energía requerida para el RAC con "k3"	485,03	kJ
Calor latente de evaporación	2270	Kj/kg
Energía requerida para el agua	681	kJ
Energía total con "k1":	772,64	kJ
Energía total con "k2":	1071,54	kJ
Energía total con "k3":	1166,03	Kj
Eficiencia $\eta$ :	15%	
Eficiencia $\eta$ :	20%	
Eficiencia $\eta$ :	22%	

Los resultados para el modelo térmico por elementos finitos, en Ansys, para el flujo de calor en estado estable, se muestran a continuación:

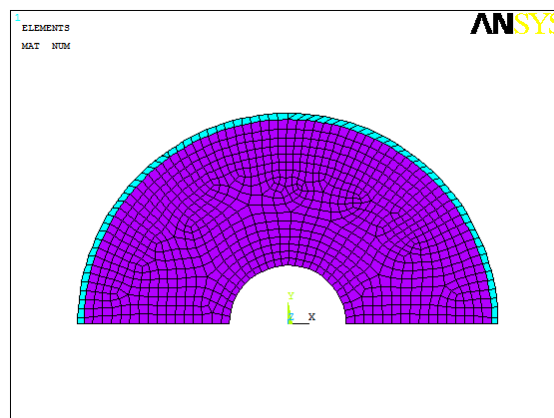


**Figura 32. Vista en corte de la biomasa a través del Reactor de Pirólisis.**

En la Figura N° 32, el área exterior verde es el Reactor y el área interior morada es la biomasa RAC, con el tubo del tornillo en el centro. Para el análisis se utilizó por simetría, la mitad del anillo, para consumir menos recurso computacional.

El tipo de elemento utilizado fué PLANE 55 - thermal solid, el tipo de análisis es en estado estable, las condiciones de frontera son 900 °C temperatura del hogar, convección entre el hogar y la pared exterior del reactor, 450 °C temperatura en el centro del RAC y las propiedades del reactor de acero y del RAC se consideran constantes.

El enmallado se realizó por áreas en forma libre (ver figura N° 33) y referido a cada tipo de material y se obtuvo la convergencia de la malla, como sigue:



**Figura 33. Enmallado del modelo.**

*SOLUTION OPTIONS*

*PROBLEM DIMENSIONALITY..... 2-D*  
*DEGREES OF FREEDOM..... TEMP*  
*ANALYSIS TYPE.....STATIC (STEADY-STATE)*  
*GLOBALLY ASSEMBLED MATRIX.....SYMMETRIC*

*LOAD STEP OPTIONS*

*LOAD STEP NUMBER..... 1*  
*TIME AT END OF THE LOAD STEP..... 1.0000*  
*NUMBER OF SUBSTEPS..... 1*  
*STEP CHANGE BOUNDARY CONDITIONS.....NO*  
*PRINT OUTPUT CONTROLS.....NO PRINTOUT*  
*DATABASE OUTPUT CONTROLS.....ALL DATA WRITTEN FOR THE LAST SUBSTEP.*

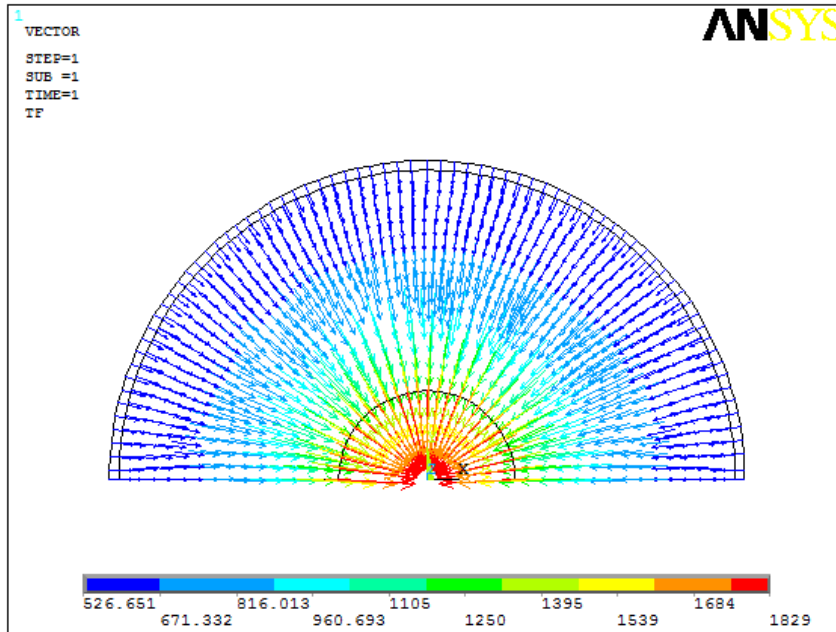
El programa Ansys arroja los resultados en función del área de transferencia de calor, entonces para obtener el flujo de calor se multiplica por el área de transferencia y se obtuvo un valor muy aproximado, a los valores hallados de forma analítica.

En la Tabla 22 se muestran los resultados del modelo, de acuerdo a cada uno de los “k” de conducción para el RAC.

**Tabla 22. Resultados del Modelo por Elementos Finitos del Requerimiento de Energía por Transferencia de Calor o Energía que Absorbe El RAC y Comparación con el Desarrollo Analítico.**

Conductividad "k" del RAC	Flujo de Calor en Ansys por unidad de Área	Área media de TDC (m <sup>2</sup> )	Flujo de calor ANSYS (W)	Flujo de Calor Analítico (W)
k1 = 0,175	526,651	0,478	251,739178	254,6
k2 = 1,035	2244	0,478	1072,632	1084,8
k3 = 1,465	2786	0,478	1331,708	1347,3

A continuación se muestra la figura obtenida en Ansys por elementos finitos, para el “k1”, en ella se ve la dirección de la transferencia de calor por medio de vectores, también se obtiene el máximo (1829) y mínimo (526.651) flujo de calor por unidad de área, del cual se escoge el menor valor del flujo térmico.



**Figura 34. Resultados del Flujo de Calor para  $k_{RAC} = k1 = 0.175 \text{ W/m}^2\text{K}$ ;  $Q = 526.651 * 0.478 \text{ m}^2 = 251.7 \text{ W}$ . Flujo de Calor mostrado en Vectores.**

También se determinó el requerimiento de energía por entalpía para la pirólisis, basado en la figura N° 29 y la masa del RAC a pirolizar. Entonces teniéndose la entalpía requerida para la pirólisis y para el agua en kJ/kg, así como su porcentaje en peso del 70% y 30% respectivamente, al multiplicarlos obtenemos el requerimiento energético por entalpía para la pirolisis del RAC.

Los resultados se listan a continuación en la Tabla N° 23.

**Tabla 23. Requerimiento de Energía por Entalpía o Energía que Absorbe el RAC.**

Entalpía para Pirólisis del RAC	2.000,00	Kj/Kg
Energía requerida para el RAC	1.400,00	Kj
Entalpía del agua	3.488,00	Kj/Kg
Energía requerida por el agua	1.046,40	Kj
Energía total	2.446,40	Kj
Eficiencia $\eta$ :	46%	

### 3.3.2.3 Modelo Transferencia de Calor Estado Transitorio

Los resultados para el modelo térmico, no lineal transitorio, se realizaron utilizando también la herramienta computacional Ansys por Elementos Finitos, el modelo

utilizado es el mismo que para el estado estable, así como el tipo de elemento y el enmallado.

Las propiedades del reactor de acero, se consideran constantes. La conductividad y la entalpía de la biomasa RAC, dependen térmicamente de la temperatura. Ambas son valores de entrada en la tabla N° 20 y se graficaron contra la temperatura, como lo muestra la figura N° 35. Los efectos de la radiación son ignorados.

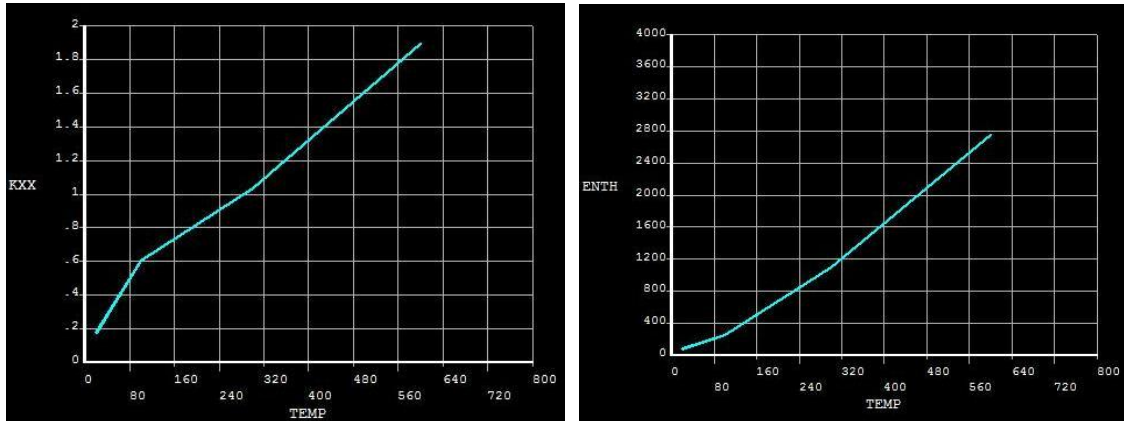


Figura 35. Conductividad “KXX” y Entalpía “ENTH” vs Temperatura.

El tipo de análisis es transitorio, las condiciones de frontera son las mismas que las del estado estable y las condiciones iniciales son que la biomasa esta inicialmente a 20 °C y la temperatura del exterior del reactor a 900 °C.

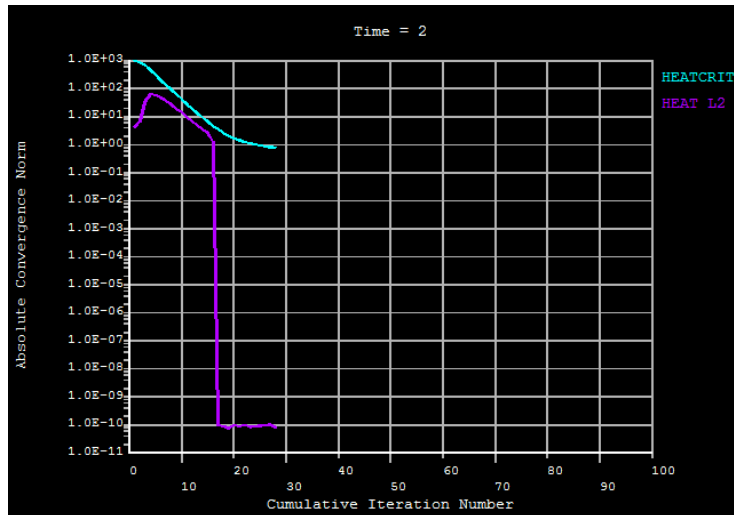
El tiempo, tamaño del paso temporal y los parámetros relacionados, se agregaron como sigue:

1. **Main Menu> Solution> Load Step Opts> Time/Frequec> Time-Time Step**
2. “Time at end of load step” = 2

**Note:** This represents 2 hour.

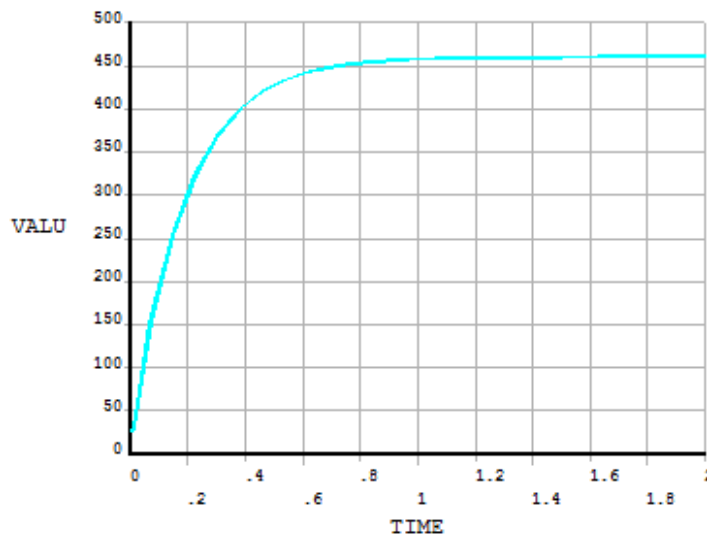
3. “Time step size” = 0.005
4. (check) “Stepped or ramped b. c.” = Stepped
5. “Minimum time step size” = 0.0005
6. “Maximum time step size” = 0.125
7. [OK]

Mientras ANSYS soluciona el análisis, el monitor de la Graphical Solution Tracking (GST), gráfica la "Absolute Convergence Norm" como una función del número de iteraciones acumulativas, note que la solución asume que converge para valores menores o iguales que el criterio de convergencia ver figura N° 36.



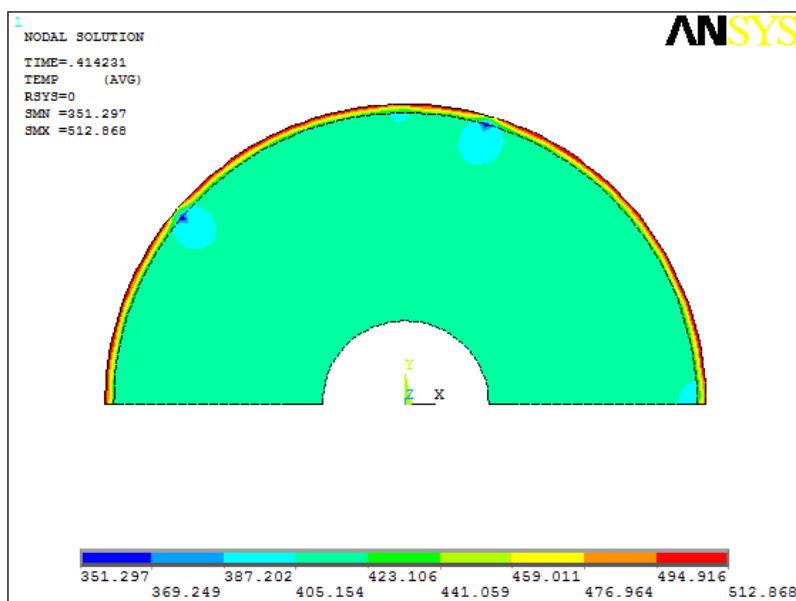
**Figura 36. Gráfica de la convergencia de la solución del modelo no lineal transitorio.**

Finalmente se obtienen y muestran los resultados del modelo térmico no lineal transitorio, la figura N° 37, muestra el comportamiento de la temperatura en grados centígrados, contra el tiempo en horas, del RAC en el Reactor.



**Figura 37. Trayectoria de la temperatura (°C) en función del tiempo (horas), del RAC en el centro del Reactor.**

Seguidamente se muestra uno de los resultados animados de la distribución de temperatura en el tiempo  $t = 0.414231$  (ver figura N° 38), lo que quiere decir que para las condiciones y supuestos mencionados anteriormente para el diseño del pirólizador, en menos de 25 minutos de acuerdo a la Figura N° 37, se obtiene la temperatura de Pirólisis 400 °C, en toda la Biomasa.



**Figura 38. Distribución de Temperaturas en el Reactor para un tiempo  $t = 0.414231$ , igual a 24.8 minutos, Temperatura RAC = 405.154 °C.**

En los anexos está un documento guía en inglés donde explica cómo se llevó a cabo el proceso del modelo no lineal transitorio detallado de transferencia de calor, con comandos y gráficas en ANSYS, en forma de tutorial.

### 3.4 DISEÑO DEL SISTEMA DE CONDENSACIÓN

Una rápida condensación de los gases de pirólisis, provoca un alto rendimiento de los productos líquidos condensables, bioaceites. Debido a los alquitranes que se encuentran en el condensado de pirólisis, se forman depósitos con facilidad en el condensador y en las líneas de conexión [24]. Entonces se diseñó un condensador de doble tubo con flujos paralelos con agua de enfriamiento, para facilitar su limpieza. Debido a la naturaleza corrosiva del condensado, el condensador se diseñó de dos tubos concéntricos de acero inoxidable, de diámetro 2 pulgadas y 4 pulgadas. Los cálculos para determinar las dimensiones del condensador se muestran a continuación.

**Tabla 24. Propiedades y Condiciones de operación del condensador.**

Cp aire	1,0057	J/kg K
Cp agua	4,18	J/g K
Cp Gases Piroliticos (Mr Islam)	2	J/g K
Temperatura Caliente1 TC1 (gases Pirólisis)	450	°C
TEMPERATURA CALIENTE2 TC2 (salida GNC)	60	°C

Temperatura Frio 1 TF1 (agua entra cond)	20	°C
Llave agua abierta totalmente	1000	kg/h
Flujo másico de los Gases de Pirólisis	10	Kg/h
Flujo másico agua de enfriamiento	100	Kg/h

Con los datos de la tabla N° 24, se determino la temperatura TF2, o sea la temperatura del agua de enfriamiento a la salida del condensador.  $Q=m \cdot Cp \cdot (Tc-Tf)=U \cdot A \cdot \Delta T$ , entonces:

$$10 \cdot 2 \cdot (450 - 60) = 100 \cdot 4.18 \cdot (TF2 - 20), \text{ resolviendo para TF2, se tiene:}$$

$$TF2 = 38.66 \text{ °C}; \quad Q = 2166.6 \text{ W}$$

Ahora la transferencia de calor entre los gases y el agua es,

$$Q = U \cdot A \cdot \Delta T, \text{ donde}$$

$U =$  Coeficiente Global de Transferencia de Calor aprox. 350 W/m<sup>2</sup>K (Mr Islam)

$A =$  Área mínima del tubo del condensador

$\Delta T =$  diferencia de temperatura media logarítmica

$$\Delta T = [(TC2-TF2)-(TC1-TF1)]/[Ln((TC2-TF2)/(TC1-TF1))] = 136.1 \text{ °C}$$

De las ecuaciones anteriores se tiene que:

$$2166.6 = 350 \cdot 136.1 \cdot A \text{ y resolviendo para } A = 0.0454 = 2 \cdot \pi \cdot R \cdot L,$$

Si el Radio del condensador es 1" = 25.4 mm

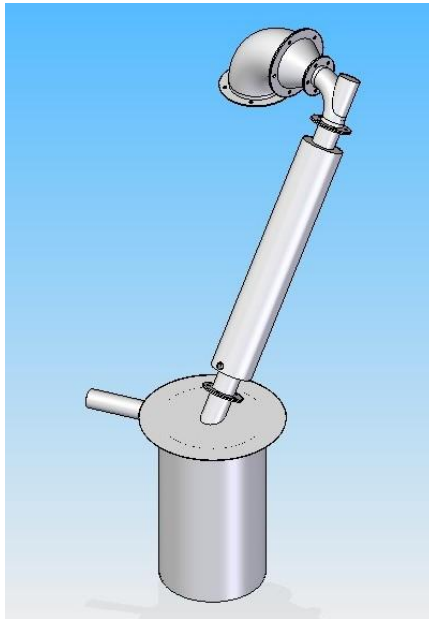
Entonces el largo del tubo para el condensador es  $L = 285$  mm (mínimo).

Se propone el largo del condensador definitivo sea  $L = 600$  mm (mínimo), para dejar la opción de variar la producción para tres flujos másicos, teniendo en cuenta variar también el flujo del agua de enfriamiento. Entonces los flujos másicos de los gases pirolíticos (suponiendo 100% gases) y agua de enfriamiento (llave agua abierta 100% = 1000 kg/h) para validar esa longitud efectiva, se muestra en la siguiente tabla:

**Tabla 25. Configuración condensador para opción en la variación de la producción.**

N° Prueba	Flujo Másico Gases de Pirólisis (kg/h)	Flujo Másico Agua (kg/h) llave agua abierta 100%=1000	Largo Mínimo Condensador (mm)
1	10	100	285
2	15	100	498
3	20	500	503





**Figura 39. Foto en CAD del diseño del sistema de condensación y colector de bioaceite.**

### **3.5 DISEÑO DEL SISTEMA DE CALENTAMIENTO.**

Una parrilla de combustión de biomasa, se diseñó para suministrar el calor necesario al reactor. La parrilla se fabricará con una placa de acero de 1/8" de espesor, se posicionó inclinada teniendo en cuenta el ángulo al cual desliza de forma natural el RAC (ángulo menor a 20°), para evitar deslizamientos espontáneos del combustible, además es agujerada para que pase el aire a través de ella y se queme el combustible, el cual es también RAC. La longitud efectiva de reacción es de 70 cm de largo, que es la largo de la parrilla. El sistema de alimentación del combustible, es por medio de una compuerta ubicada al lado del reactor y se llena manualmente con RAC, el cual después a medida que se consume el RAC se va empujando y llenando de nuevo.

Debido a que la quema del RAC es un proceso de combustión, los enlaces de las moléculas de los reactivos se rompen, y los átomos y electrones se reagrupan para formar los productos. En las reacciones de combustión, la oxidación rápida de los elementos reactivos del combustible trae como consecuencia la liberación de energía al formarse los productos de la combustión [37].

**Tabla 26. Composición estequiométrica de los materiales orgánicos [36].**

Material	Carbon	Hydrogen	Oxygen
Newspapers	20.00	29.79	13.13
Magazines	20.00	32.69	15.07
Mixed paper	20.00	32.18	15.31
Liquid cartons	20.00	37.51	7.64
Corrugated card packaging	20.00	31.28	15.41
Other card	20.00	31.28	15.41
Upholstery	20.00	31.08	13.89
Leather shoes	20.00	30.39	8.15
Vacuum cleaner dirt	20.00	31.81	8.44
Vegetable food waste	20.00	32.38	11.48
Cooked meat scraps	20.00	38.14	6.20
Fried fats	20.00	37.87	3.04
Lawn grass	20.00	30.97	11.83
Leaves	20.00	28.12	8.73
Green logs	20.00	30.65	12.65
Evergreen shrubs	20.00	32.36	12.50
Flowering plants	20.00	34.01	12.92
Wood	20.00	28.39	12.60
Refuse-derived fuel	20.00	31.85	9.79

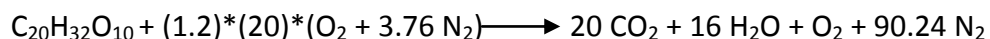
De la tabla N° 26, se puede ver que la composición  $C_{20}H_{32}O_{10}$ , es una selección adecuada para modelar la biomasa.

Entonces el modelo para el aire de combustión, partiendo del hecho que cada mol de aire de combustión va acompañado de 3.76 moles de nitrógeno, el nitrógeno es inerte y la combustión es completa, se tiene que la relación aire-combustible en base molar y másica es:

$$AC = \underline{AC} * (M_{aire}/M_{comb})$$

Donde  $\underline{AC}$  es el cociente aire-combustible en base molar y AC en base másica. Para los cálculos de combustión de este modelo la masa molecular del aire se tomó igual a 28.97 kg/kmol, para el carbono 12.01 kg/kmol, para el  $H_2$  2.016 kg/kmol y el  $O_2$  32 kg/kmol.

Entonces la cantidad de aire real suministrado no coincide con la teórica, debido a esto realmente la cantidad de aire suministrado se expresa en términos del porcentaje del aire teórico o estequiométrico, para este efectos de este cálculo se supone un 20% de exceso de aire. La ecuación química ajustada es:



Así pues, la cantidad total de aire de combustión es 114.24 moles de aire por mol de combustible.

Ahora la relación aire-combustible en base másica es:

$$AC = \frac{AC}{M_{aire}} * (M_{aire}/M_{comb}) = 114.24 * (28.97/432.5) = 7.65 \text{ kg}_{aire} / \text{kg}_{combustible}$$

El calor o energía disponible desde el combustible RAC, a partir de los datos de la tabla N° 19, la masa es de 1/2 kg de RAC, por cada kg de muestra de biomasa, es decir una relación de combustible/biomasa = 0.5 y el PCI igual a 15120 kJ/kg, se determinó así:

$$Q_{calor} = m_{masa} \times PCI_{poder-calorifico}$$

$$Q_{calor} = 0.5 * 15120 = 7560$$

Debido a que el RAC tiene una humedad del 30% se tiene que la energía disponible desde el combustible es de 5292 kJ (ver capítulo 3.3.2.2).

También se considera la opción de utilizar quemadores de gas como fuente calor, y para obtener su consumo energético, medir el flujo utilizando un rotámetro, y con el respectivo poder calorífico, sea gas propano, natural, etc., medir su aporte energético al sistema ( $Q_{calor} = m_{flujo-masico} \times PCI_{poder-calorifico}$ ), además también se puede obtener su curva de desempeño, al variar la entrada de aire en el quemador, que a su vez varía el flujo másico del gas, permitiendo controlar la temperatura en el reactor, dando como resultado las variables para calcular dicha curva.

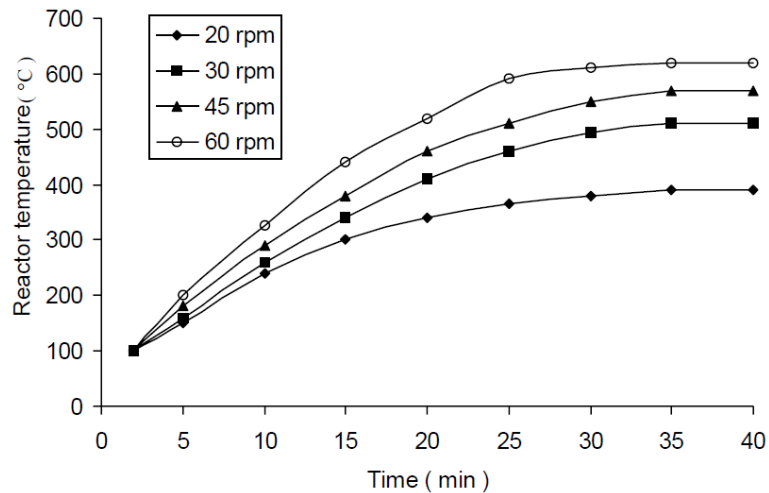
### **3.6 DISEÑO DEL SISTEMA DE SUMINISTRO DE AIRE Y DISPOSICIÓN DE LA CENIZA.**

El sistema de suministro de aire y la disposición de las cenizas, se ubicaron debajo de la parrilla de cocción de RAC. El sistema de disposición de las cenizas se diseñó en acero y es un tanque al final de la parrilla de combustión. Al quemarse el RAC en la parrilla, se van generando las cenizas, que por el empuje del nuevo combustible impulsado manualmente, a través de la parrilla, caen por gravedad en el compartimento al final de la misma.

El sistema de suministro de aire, consiste en que la parrilla de cocción tiene agujeros, por los cuales pasa el aire por debajo y llega al combustible RAC, impulsado por la chimenea en la parte superior del reactor. La variación del diámetro de la chimenea o por medio de una compuerta agujerada debajo de la parrilla de cocción se regula la temperatura en el hogar, controlando la cantidad de suministro de aire.

En adición se puede agregar un ventilador al sistema, para generar un tiro forzado, lo que permite controlar la temperatura en el reactor, al variar su frecuencia o rpm, y

obtener una medida del desempeño del sistema de calentamiento, como se muestra en la figura N° 40, para un sistema de calentamiento por combustión de cascarilla de arroz, en un equipo de pirólisis propuesto por Mr. Islam [24].



**Figura 40. Curva de desempeño del sistema de calentamiento por combustión de cascarilla de arroz, de una plataforma de Pirólisis, Mr. Islam [24].**

### 3.7 DISEÑO COLECTORES DEL CHAR Y LÍQUIDOS.

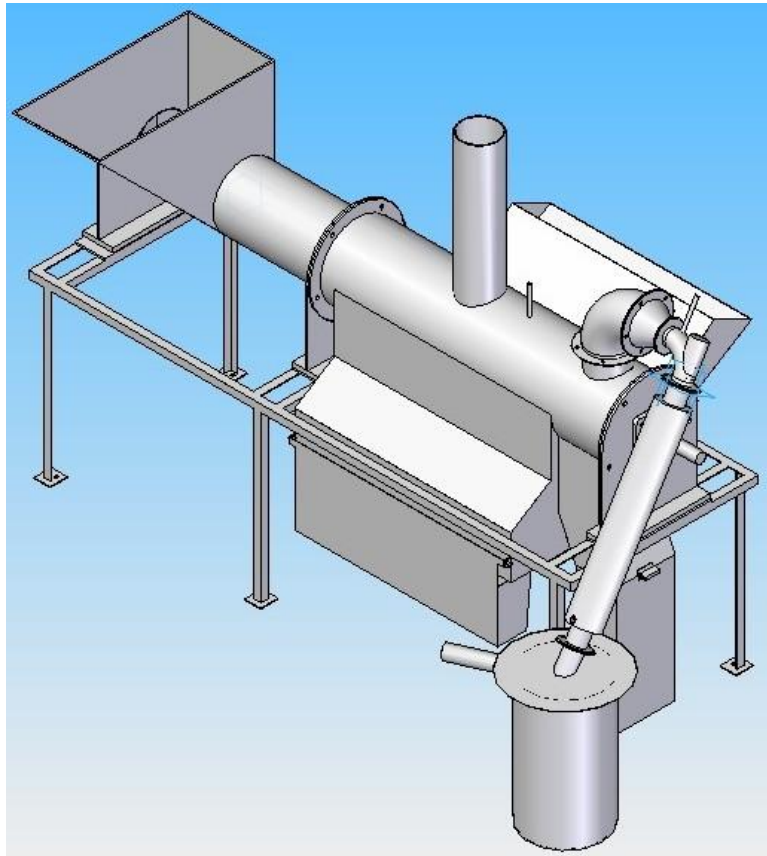
El colector del char, es un recipiente agujereado dentro de un tanque con agua, el cual enfría el residuo carbonoso, evitando que haga combustión. Se diseñó en acero, y para vaciar el contenido se saca el recolector del tanque de agua y se recolecta el char enfriado, seguidamente se vuelve a conectar al ducto de descarga de char, y se sigue el proceso en continuo.

Un colector de líquidos se conecta a la salida del condensador, en acero inoxidable debido a la naturaleza corrosiva de los líquidos de pirólisis derivados de la biomasa.

### 3.8 ENSAMBLE DE LA UIPCB.

La unidad de pirólisis se ensamblará en una mesa construida con perfiles en L de acero, 1" X 1" y espesor 1/8". Los dos módulos, el común y el módulo de pirólisis, se unen por medio de bridas unidos por tuercas y pernos, de igual manera se sujeta a la mesa la UIPCB. Los componentes sometidos a altas temperaturas, como el reactor, los soportes del tornillo de alimentación, las juntas por tuberías y bridas, serán sellados con placas y arandelas de asbestos y sellantes líquidos para altas temperaturas. Los

otros componentes se sellarán utilizando sellantes de baja temperatura y arandelas blandas de caucho para aislar el sistema y evitar la entrada de oxígeno. La conexión entre el reactor y el condensador es lo más corta posible, y se aísla térmicamente para focalizar la condensación donde debe ocurrir. También se aisló con fibra de vidrio toda la Zona de Reacción, para minimizar las pérdidas y hacer la UIPCB más eficiente. La figura N° 41, muestra la Unidad de Investigación en Pirólisis Continua de Biomasa UIPCB.



**Figura 41. Fotografía en programa CAD, de la UIPCB.**

### **3.9 DISEÑO FINAL Y PLANOS DE CONSTRUCCIÓN.**

En los Anexos se encuentra el diseño final de la unidad, el cual se realizó para que opere de forma continua, todos los planos de construcción se realizaron con herramientas CAD ilustrando de manera corta, sencilla y organizada, los pasos para la construcción del mismo.

## 4. PRUEBAS DE PIROLISIS EN LA UIPCB

### 4.1 DISEÑO EXPERIMENTAL

Se dejan planteadas las pruebas que realizará el Equipo de trabajo de Cenicaña en la UIPCB, variando parámetros como velocidad en el sistema de alimentación de RAC, el cual va ligado al tiempo de permanencia de la biomasa en el reactor y su producción, temperatura máxima de pirólisis, y características de la biomasa RAC como humedad y tamaño de partícula.

A los productos obtenidos por la Pirólisis de RAC, se les realizará pruebas de poder calorífico y viscosidad, en el laboratorio de Cenicaña.

**Tabla 23. Diseño Experimental Propuesto.**

#Prueba y Producción	Vel. Transporte (RPM)	Temp. Máxima en el Reactor (°C)	% Hu de la Biomasa	Tamaño de Partícula (cm)
1A (10 kg/h)	1.2	450	30	10 a 15
1B (10 kg/h)	1.2	550	30	10 a 15
2A (20 kg/h)	2.3	450	30	10 a 15
2B (20 kg/h)	2.3	550	30	10 a 15
3A (10 kg/h)	1.2	450	< 10	< 5
3B (10 kg/h)	1.2	550	< 10	< 5
4A (20 kg/h)	2.3	450	< 10	< 5
4B (20 kg/h)	2.3	550	< 10	< 5

En la tabla N° 23, se muestran las variables a medir en las pruebas, están son 8 en total a realizar. Después de corridas c/u de las 8 pruebas, se determinará por medio de las cantidades en masa del char y el bioaceite obtenido, en base a la biomasa inicial, cual fue de acuerdo a las condiciones de operación, los rendimientos respectivos de sus productos y observar de acuerdo a las características de diseño del equipo cual es su curva de desempeño.

### 4.2 CARACTERIZACION DE LOS BIOPRODUCTOS

Los productos obtenidos de las pruebas de pirólisis en la UIPCB, en el laboratorio de Cenicaña se les realizarán la medida del Poder calorífico al char y la biomasa y viscosidad al bioaceite, en equipos disponibles en el mismo, para comparación con los valores que aparecen en la literatura.

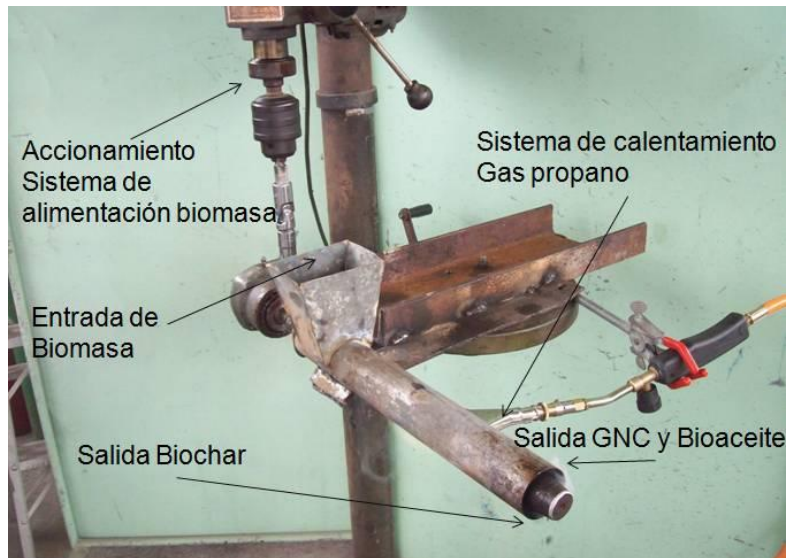
## 5. RESULTADOS PIRÓLISIS.

Con los recursos disponibles por parte de Cenicaña, se construyeron dos equipos más, aparte de los ya mencionados anteriormente a escala laboratorio. El primero para determinar comportamiento del RAC (también se utilizó madera) como combustible y fuente de calor y validar pirólisis Batch (“Small-Batch Method to Making Biochar By Peter Hirst, New England”), para producir biochar (ver figura N° 42), y el segundo denominado “micro pirolizador” o micro UIPCB, un equipo que opera en forma continua, con configuración por fluidización mecánica (ver figuras N° 43 y 45), y calentamiento indirecto, para investigación en pirólisis continua de biomasa. El tercer equipo es la UIPCB (ver figura N° 46), diseñada en este proyecto, la cual Cenicaña como cliente, da por concluida la labor de investigación, además por disponibilidad de recursos de tiempo y dinero, posteriormente construirá dicho equipo.



**Figura 42. Equipo de pirólisis batch, para producción de biochar, Fabrica-Cenicaña.**

En la unidad de micro pirólisis se realizó una corrida para procesar 200 g de biomasa. Se consumieron 103.1 g de gas propano con el montaje mostrado en la figura N° 43, y el rendimiento en char alcanzado para una temperatura entre 350 y 450 °C y un tiempo de residencia de 42s fue del 15%.



**Figura 43. Micro pirolizador, Fábrica-Cenicaña.**

Finalmente, la muestra del producto biochar presentó reducción del tamaño de partícula por trituración, ver figura N° 44.



**Figura 44. Muestra de la biomasa RAC antes y después del proceso transformada en biochar.**

A continuación se muestran en la siguiente tabla los resultados de la corrida en el micro pirolizador.



**Tabla 28. Resultados corrida de 200 gramos de biomasa, en el micro pirolizador.**

<b>Tiempo Total Proceso</b>	40 min			
<b>Corriente</b>	<b>Masa procesada (Gramos)</b>	<b>Flujo másico (g/s)</b>	<b>Poder calorífico inferior (KJ/Kg)</b>	<b>Flujo de Energía (Kj/s)</b>
<b>Biomasa</b>	200	0,0813	16845	1,370
<b>Propano</b>	103,1	0,0419	46350	1,943
<b>Biochar</b>	36,7	0,0149	8600	0,128
<b>Mezcla Bio-oil y Biogas</b>	163,3	0,0664	15000	0,996
<b>Eficiencia Energética</b>	34%			
<b>Potencia Accionamiento</b>	1.8 HP			
<b>Velocidad Tornillo Alimentación</b>	2 RPM			

Se realizó otra corrida con adecuaciones técnicas en la unidad de micro pirólisis, entre ellas, adaptación del sistema de condensación para obtención de bioaceite, se aisló térmicamente para reducir pérdidas por calor, boquilla para combustión de los GNC. El montaje final se observa en la figura N° 45, dando como resultado, bioproductos, con los siguientes parámetros para el ensayo:

Parámetros fijos:

- Tamaño de partícula: 53 $\mu$ m
- Humedad de la biomasa: 7%

Parámetros variables:

- Velocidad de alimentación de la biomasa: 12, 20, 26, 29, 55 rpm.
- Temperatura externa del reactor: 450 °C, 500 °C
- Posición del sistema de calentamiento (boquilla quema de gas): 3 posiciones
- Configuración del sistema de condensación: 4 configuraciones
- Temperatura agua para condensadores: ambiente, 20 °C, 15 °C, 11 °C.

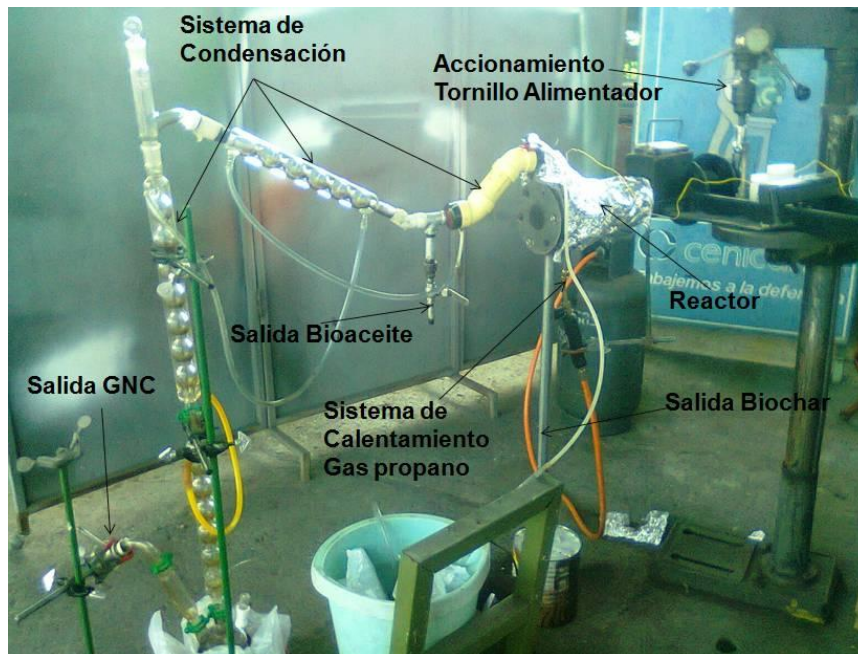
La experimentación realizada hasta el momento ha permitido establecer diferentes parámetros de operación del equipo de micro pirólisis continua, como son:

- Velocidad de alimentación: 12 rpm
- Temperatura externa del reactor: 500 °C
- Temperatura agua de enfriamiento: 11 °C

En la siguiente tabla se muestran los valores del porcentaje de material recuperado de cada uno de los productos obtenidos en el ensayo:

**Tabla 29. Resultados rendimientos material recuperado en la unidad de micro pirólisis.**

Material Recuperado	Porcentaje de Recuperación (%)
Biochar	34
Bioaceite	25
GNC y Gases Condensables	41



**Figura 45. Unidad de “Micro Pirólisis” para investigación en termo conversión continua de biomasa, Fábrica-Cenicaña.**

Finalmente la UIPCB, mostrada en la figura N° 46, es la unidad proyección a escala piloto para investigación en pirólisis continua de biomasa.



**Figura 46. Equipo de pirólisis “UIPCB”, Fabrica-Cenicaña.**

## 6. CONCLUSIONES

- Se diseñó una unidad de investigación en pirólisis continua de biomasa, con principios y conceptos termoquímicos, configuración por fluidización mecánica y calentamiento indirecto, para la obtención de char, bioaceite, y gases no condensables.
- Se realizó un modelo de requerimiento energético por transferencia de calor, en estado estable, y transitorio, bajo condiciones y supuestos del diseño propuesto, obteniendo eficiencia energética promedio del 36%, con biomasa RAC como combustible y fuente de calor con relación combustible/biomasa del 0.5, 30% de humedad promedio de la materia prima RAC, y temperatura máxima de pirólisis alrededor de 500 °C.
- Se diseñaron e implementaron en trabajo conjunto con el equipo de fábrica de Cenicaña, equipos a escala de laboratorio batch y unidades denominadas “micro” en continuo para la investigación en pirólisis de biomasa. (Ver figuras N° 20, 42, 45 y 46).
- Se validó en la unidad de micro pirólisis, el funcionamiento del equipo con pruebas o corridas realizadas, dando como resultado eficiencia energética del 34%, bajo las mismas condiciones de operación del modelo. Además los rendimientos de los bioproductos, dieron resultados dentro del rango de producción (biochar 34%, bioaceite 25%, GNC y gases condensables 41% de material recuperado), de acuerdo al tipo de pirólisis, lo que significa que el equipo funciona adecuadamente.

## 7. RECOMENDACIONES

- Estudiar y realizar para trabajos futuros, un modelo de requerimiento energético por transferencia de calor, teniendo en cuenta al análisis por convección, reacciones químicas y radiación, para la pirólisis de biomasa.
- Para el correcto desarrollo experimental de las pruebas y validación futura de la UIPCB, por parte de Cenicaña, se requerirá de unas condiciones o parámetros preestablecidos, los cuales son las variables de mayor incidencia en el proceso de pirólisis. Estas son la temperatura máxima de pirólisis, el tiempo de residencia de los gases en el reactor, el tamaño de la partícula, el porcentaje de humedad y el tipo de biomasa, los cuales deben estar dentro de los rangos de aceptabilidad mencionados en este documento. Partiendo de allí como base, posteriormente se podrán variar dichas condiciones, y observar el comportamiento de la unidad y sus bioproductos, en un rango más amplio de operación, como tamaños de partícula mayores como el material salido del corte por cosecha mecánica, y humedades de la biomasa alrededor del 30%.
- Es indispensable las sondas de medición de temperaturas en la zona de reacción efectiva, a la entrada del condensador, y además se recomienda un tercer punto de medición a la salida del condensador, para garantizar la temperatura de pirólisis (450 °C a 500 °C), temperatura salida de gases del reactor (400 °C, temperatura inicio condensación alquitranes) y temperatura que permita condensar hasta el agua (menor a 70 °C.) sucesivamente, para tener control sobre todo el proceso de termo conversión por pirólisis y poder realizar ajustes al equipo en cada uno de sus sistemas.
- Se debe tener un correcto aislamiento térmico y la menor distancia entre la salida del reactor y la entrada al condensador debido a que largas longitudes ocasionan condensación sobre las paredes antes de llegar al condensador, además se generan tacos de obstrucciones o concentraciones de alquitranes y disminuiría el rendimiento ya que se tendrá una menor cantidad de bioaceite saliendo del condensador.
- En el sistema de calentamiento, el RAC como fuente de calor necesita de un mayor tiro que la madera para darse condiciones adecuadas de combustión, ya que al aire se le dificulta mas atravesar un lecho compuesto por RAC que uno compuesto por trozos de madera, tener en cuenta para el sistema un tiro forzado utilizando un ventilador y relacionar su frecuencia con la variación de temperatura en el reactor, para control del mismo.

## REFERENCIAS

1. Patricia Gilligan, Juan Manuel Eberlé. "Pirólisis rápida de biomasa para la generación de energía limpia" Encarnación Ezcurra 365 (C1107CLA) - Buenos Aires – Argentina.
2. "Biotherm A System for Continuous Quality, Fast Pyrolysis Bio Oil." Dynamotive Energy Systems Corporation.
3. "A Guide to Physical Property Characterization of Biomass-Derived Fast Pyrolysis Liquids", VTT Publications 450, Anja Oasmaa – VTT Energy Cordner Peacocke – Conversion and Resource Evaluation Ltd.
4. K.W. Morris. "Fast pyrolysis of bagasse to produce BioOil for power generation". DynaMotive Technologies Corporation.
5. FAO, 1994. Integrated energy systems in China – The cold Northeastern region experience. Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación, Roma, 1994.
6. Prías O.; "Escenarios energéticos del país", Programa Nacional Energía y Minería Conciencias.
7. Dimelsy Salas & Javier Ortega. " Pirólisis y Co-Pirólisis de carbón con residuos del corte de caña de azúcar". Universidad del Valle.
8. Mohr, K.; Nonn, Ch.; y Jager, J., 1997. Behaviour of PCDD/F under pyrolysis conditions. Chemosphere 34: 1053-1064
9. Demirbas A. "Analysis of Liquid Products from Biomass via Flash Pyrolysis", Energy Sources, Vol. 24, pp 337–345, Turkey 2002.
10. Demirbas A. "Hydrocarbon from pyrolysis and hydrolysis processes of biomass". Energy Sources, Vol. 25, pp 67-75, Turkey 2003.
11. Kawasaki S. "Multi-Purpose Coal Utilization Technologies (Pyrolysis Technologies)". Center for Coal Utilization, Japan; Nippon Steel Corporation; NKK Corporation; Kawasaki Steel Corporation; Sumitomo Metal Industries, Ltd.; Kobe Steel Ltd.; Ube Industries, Ltd.; Idemitsu Kosan Co., Ltd.; Nippon Steel Chemical Co., Ltd. Japan 2004.

12. Millán F. "El conglomerado del azúcar del Valle del Cauca, Colombia". Centro Nacional de Productividad (CNP), CEPAL serie Desarrollo productivo No. 134, Santiago de Chile 2002.
13. Petter Heyerdahl and Geoffrey Gilpin. "Distributed Biomass Conversion". Norwegian University of Life Sciences - Institute for Mathematics & Technology.
14. Roger Ruan, Paul Chen, Fei Yu, Kevin Hennessy, Yuanhua Wang, Jianping Wu, Alf Tunheim. "Distributed Biomass Conversion". Center for Biorefining -Department of Bioproducts and Biosystems Engineering - University of Minnesota.
15. John Edwards. "Pyrolysis of Biomass to Produce Bio-Oil, BioChar and Combustible Gas". School of Engineering and Advanced Technology, Massey University.
16. Dietrich Meier. "Fast Pyrolysis - a Route for Energy and Chemicals from Recovered Wood". BFH, Institute for Wood Chemistry and Chemical Technology of Wood, Hamburg.
17. Clara García Y Fredy Canchala. "Obtención De Bio-Oil A Partir De Residuos De Corte De Caña De Azúcar En Un Reactor Tubular De Lecho Fijo." Universidad del Valle, Escuela de ingeniería Química, Cali Colombia.
18. J.S. Torres, C.O. Briseño, D. Astaiza, y M. Rosillo. "Manejo y valor energético de los residuos de la cosecha en verde." Cenicaña.
19. Niebla y Rubio: "Características de la paja de caña como combustible". *Rev. Centro Azúcar*, 1990, No. 3, Cuba.
20. Ing. Ángel M. Rubio González e Ing. Félix Pérez Egusquiza: "Actualidad del empleo como combustible de los residuos agrícolas cañeros en cuba" *INT. SUGAR JNL.*, 2000, VOL. 102, NO. 1219
21. J.S. Torres y F. Villegas: "Sistema de manejo de residuos y efectos en la producción". Cenicaña.
22. Pérez: "Realidad del uso de la paja de caña como combustible en Cuba". Documento Interno Delegación MINAZ-VC, Cuba, 1998.

23. Shahab Sokhansanj, P.Eng., University of British Columbia Jim Fenton, President, Jim Fenton and Associates, Edmonton: "Cost benefit of biomass supply and pre-processing, Synthesis Paper". BIOCAP, Canada.
24. M. R. Islam, M. N. Islam and M. N. Nabi: "Design, Fabrication and Performance Study of a Biomass Solid Waste Pyrolysis System for Alternative Liquid Fuel Production". Department of Mechanical Engineering, Rajshahi University of Engineering & Technology (RUET), Rajshahi-6204, Bangladesh, revised on 17 Apr 2004.
25. Curtis LJ, Miller DJ. Ind. Eng. Chem. Res. 1988;27:1775-83.
26. Ekstrom C, Rensfelt E. Flash pyrolysis of biomass in Sweden. In: Proc. Specialists' Workshop on Fast Pyrolysis of Biomass. Copper Mountain Co., 1980;SERI/CP-622-1096.
27. Anthony DB, Howard JB. AIChE Journal 1976;22:625±56.
28. De la Vega, C. Pérez. Diseño de un picador de residuos de cosecha de la caña de azúcar. Proyecto de grado. Escuela de ingeniería Mecánica, Universidad del Valle, 1998.
29. Rajeev Jorapur and Anil K. Rajvanshi. Sugarcane Leaf-Bagasse Gasifiers for Industrial Heating Applications. Nimbkar Agricultural Research Institute (NARI).P.O. Box 44, PHALTAN-415523, Maharashtra, INDIA.
30. Tomas B. Reed & Siddhartha Gaur, The high heat of fast pyrolysis for large particles. The Colorado School of mines, Golden, CO 80401.
31. Jalan R.K. Jalan, V.K. Srivastava. Studies on pyrolysis of a single biomass cylindrical pellet kinetic and heat transfer effects. Department of Chemical Engineering, Indian Institute of Technology, Hauz Khas, New Delhi 110 016, India Received 2 May 1998.
32. Brown R. C. And Holmgren J. Fast Pyrolysis and Bio-Oil Upgrading. Iowa
33. Garcia Perez M., Chala A., Pakdel H., Kretschmer D., Roy C. Characterization of bio-oils in chemical families. Biomass and Bioenergy, pp 1-20, Canada 2006.



34. Primera E., Co-Licuefacción de carbón mineral con residuos del corte de la cosecha de caña de azúcar; Tesis de Maestría, Universidad del valle, Cali, 2005.
35. Mohan D., Pittman Ch., and Steele P.; Pyrolysis of wood/biomass for bio oil: A critical review. Energy & Fuels, Vol. 20, pp 848-880, United States 2006.
36. Williams, P. T. and Williams, E. A., The Pyrolysis of Municipal Solid Waste in a Fluidised Bed Reactor, Biomass for Energy and the Environment, Pergamon Press, Biffaward, C-Tech Innovation Ltda, 2003.
37. Moran J. y Shapiro M., Fundamentos de Termodinámica Técnica. 2° edición, Cap 13, Fundamentos de la Combustión.
38. Shigley E. y Mischke R., Diseño en Ingeniería Mecánica. Sexta Edición, Mc graw Hill, 2002.

## **ANEXOS**

- Documento del desarrollo en forma de tutorial en inglés del modelo de transferencia de calor en Ansys.
- Planos de la UIPCB.