

**EVALUACIÓN DEL PROCESO DE PIRÓLISIS COMO ALTERNATIVA DE  
VALORIZACIÓN PARA LA REBABA DE CAUCHO EN CROYDON COLOMBIA  
S.A.**

**GIOZUL TATIANA BOLIVAR ROJAS  
MARIA PAULA CUENCA MAYORGA**

**FUNDACIÓN UNIVERSIDAD DE AMÉRICA  
FACULTAD DE INGENIERÍAS  
PROGRAMA DE INGENIERÍA QUÍMICA  
BOGOTÁ D.C,  
2019**

**EVALUACIÓN DEL PROCESO DE PIRÓLISIS COMO ALTERNATIVA DE  
VALORIZACIÓN PARA LA REBABA DE CAUCHO EN CROYDON COLOMBIA  
S.A.**

**GIOZUL TATIANA BOLIVAR ROJAS  
MARIA PAULA CUENCA MAYORGA**

**Proyecto integral de grado para obtener el título de  
INGENIERO QUÍMICO**

**Asesor  
OSCAR LIBARDO LOMBANA CHARFUELAN  
Ingeniero Químico**

**Director  
HEVER ANDRES CHAVES ROMERO  
Ingeniero químico**

**LIBARDO MENDOZA GENEY  
Dr-Ingeniero mecánico**

**FUNDACIÓN UNIVERSIDAD DE AMÉRICA  
FACULTAD DE INGENIERÍAS  
PROGRAMA DE INGENIERÍA QUÍMICA  
BOGOTÁ D.C,  
2019**

**Nota de aceptación**

---

---

---

---

---

---

---

---

---

**Ing. Claudio Alberto Moreno Arias**

---

**Ing. Duvian Alberto Vera Romero**

**Bogotá D.C, agosto del 2019**

## DIRECTIVAS DE LA UNIVERSIDAD

Presidente institucional y Rector Institucional

**Dr. MARIO POSADA GARCÍA – PEÑA**

Vicerrector de Desarrollo y Recursos Humanos

**Dr LUIS JAIME POSADA GARCÍA - PEÑA**

Vicerrectora Académica y de Posgrados

**Dra ANA JOSEFA HERRERA VARGAS**

Decano de Facultad de Ingenierías

**Ing JULIO CESAR FUENTES ARISMENDI**

Director programa de Ingeniería Química

**Ing. LEONARDO DE JESÚS HERRERA GUTIERREZ**

Las directivas de la Universidad de América, los jurados calificadores y el cuerpo docente no son responsables por los criterios e ideas expuestos en el presente documento. Estos corresponden únicamente a los autores.

## **DEDICATORIA**

Dedicamos este Proyecto de Grado a Dios por permitirnos alcanzar nuestros logros, a nuestros padres y hermanos por acompañarnos en este proceso y brindarnos su apoyo incondicional, su amor y palabras de aliento. A nuestras familias en general por ser el centro de nuestras vidas y no dejarnos desfallecer en los momentos de angustia.

A cada uno de nuestros compañeros y amigos que hicieron parte de esta gran aventura, quienes siempre estarán presentes en las anécdotas vividas y a lo largo de nuestros avances en el camino a ser excelentes profesionales.

## **AGRADECIMIENTOS**

Agradecemos a Dios por permitirnos culminar esta etapa, pues gracias a su guía constante y fortaleza, nos dio la sabiduría y la dirección necesaria para cumplir con nuestros objetivos. A nuestras familias y amigos por su constante colaboración, apoyo y motivación.

A Laboratorios Calderón y a la Pontificia Universidad Javeriana en donde se llevaron a cabo las prácticas experimentales del presente proyecto. A Croydon Colombia S.A por impulsar la propuesta y permitir el desarrollo de la misma en sus instalaciones, en cabeza del Ing. Hever Andrés Chaves Romero como director del proyecto. De igual manera queremos agradecer al Dr.-Ing. Libardo Mendoza Geney, codirector del proyecto quien nos brindó su colaboración, disposición y acompañamiento para el desarrollo las actividades teóricas de este trabajo y a los docentes y orientadores de la Fundación Universidad América; especialmente a Oscar Libardo Lombana Charfuelan, quienes nos guiaron y brindaron sus conocimientos a lo largo de la carrera permitiéndonos realizar el Trabajo de Grado.

A todos, gracias.

## CONTENIDO

	pág.
INTRODUCCIÓN	24
OBJETIVOS	29
1. GENERALIDADES DEL CAUCHO Y PROCESO DE DEGRADACIÓN TÉRMICA	30
1.1 EL CAUCHO	30
1.1.1 Tipos de caucho	30
1.1.1.2 Caucho Sintético	31
1.1.2 Aditivos de procesamiento	32
1.1.3 Producción manufacturada de caucho	35
1.2 PROCESOS DE TRANSFORMACIÓN TÉRMICOS	36
1.2.1 Procesos termoquímicos	36
1.2.1.1 Combustión	36
1.2.1.2 Pirólisis	36
1.2.1.3 Gasificación	37
1.2.1.4 Licuefacción	37
1.3 PIRÓLISIS	38
1.3.1 Fundamentos	38
1.3.2 Tipos de pirólisis	39
1.3.3 Tipos de reactores de pirólisis	41
1.3.4 Caracterización de los productos del proceso de pirólisis	47
1.4 PIRÓLISIS DE CAUCHO	48
1.4.1 Variables de importancia en el proceso de pirólisis del caucho	48
1.4.2 Caracterización de los productos de pirólisis de caucho	50
2. DIAGNOSTICO DE LA GENERACIÓN DE REBABA DE CAUCHO	55
2.1 PROCESO DE PRODUCCIÓN	56
2.2 REBABA DE CAUCHO	57
2.2.1 Composición de la rebaba de caucho	57
2.2.2 Tipos de rebaba de caucho	58
2.3 CARACTERÍSTICAS DEL CAUCHO DE INTERÉS PARA FINES TÉRMICOS	61
2.3.2 Cantidad de muestra y tamaño de partícula	61
2.3.3 Densidad	62
2.3.4 Contenido de humedad	62
2.3.5 Contenido de cenizas	62
2.3.6 Poder calorífico	62
2.4 CARACTERIZACIÓN DE LA REBABA DE CAUCHO	63
2.4.1 Análisis elemental	63
2.4.2 Análisis próximo	64
2.4.2.1 Material Volátil	65

2.4.2.2	Humedad	65
2.4.2.3	Cenizas	66
2.4.2.4	Poder calorífico	66
2.4.3	Propiedades físicas	66
2.4.3.1	Densidad a granel	67
2.4.3.2	Tamaño de partícula	67
2.4.4	Análisis de resultados	69
3.	PROCESO DE PIRÓLISIS DE LA REBABA DE CAUCHO	73
3.1	PRE TRATAMIENTO DE LA MATERIA PRIMA	73
3.1.1	Reducción del tamaño de partícula	74
3.1.2	Operación de secado	75
3.2	DESARROLLO EXPERIMENTAL DEL PROCESO DE PIRÓLISIS	75
3.2.1	Identificación y selección de los factores del proceso	75
3.2.1.1	Factores controlables	76
3.2.1.2	Factores no controlables	76
3.2.1.3	Factores estudiados	76
3.2.2	Hipotesis	80
3.2.3	Diseño de experimentos	80
3.3	MONTAJE EXPERIMENTAL	82
3.3.1	Metodología experimental	82
3.3.2	Caracterización del equipo de pirólisis	83
3.4	RESULTADOS DEL PROCESO DE PIROLISIS DE LA REBABA DE CAUCHO	87
3.4.1	Análisis estadístico de los datos	87
3.4.2	Distribución de los productos de pirólisis	88
3.4.3	Caracterización de los productos de pirólisis	93
3.4.3.1	Carbonizado (Sólido)	93
3.4.3.2	Aceite (Líquido)	97
3.5	RENDIMIENTO PROCESO DE PIRÓLISIS	102
4.	ESPECIFICACIONES TÉCNICAS DEL PROCESO DE PIRÓLISIS DE LA REBABA DE CAUCHO	105
4.1	CRITERIOS DE DISEÑO	105
4.1.1	Cantidad de materia prima requerida	105
4.1.2	Cantidad de energía a producir	105
4.1.3	Tamaño de partícula	107
4.1.4	Tipo de pirólisis	107
4.1.5	Tipo de reactor	107
4.1.5.1	Caracterización del reactor de pirólisis	107
4.2	PROPUESTA DE DISEÑO	110
4.2.1	Pre tratamiento de la rebaba de caucho	110
4.2.2	Etapas de pirólisis	111
4.2.2.1	Uso de los productos de la etapa de reacción de pirólisis	111
4.2.3	Proceso de gasificación	112

4.2.4	Selección del reactor para el proceso de valorización de rebaba de caucho	112
4.2.5	Diagrama PFD	112
4.3	BALANCE DE MASA Y ENERGÍA	114
5.	ANÁLISIS FINANCIERO	125
5.1	DISCRIMINACIÓN DE COSTOS	125
5.1.1	Costos actuales	126
5.1.1.1	Disposición de materia prima	126
5.1.1.2	Costo de energía	126
5.1.1.3	Mantenimiento	126
5.1.2	Costos propuestos	127
5.1.2.1	Costos operacionales	127
5.1.2.1.1	Presupuesto de inversión	127
5.1.2.1.3	Mantenimiento	128
5.1.2.1.4	Mano de obra (Sueldo operario)	128
5.2	ANÁLISIS DE INDICADORES FINANCIEROS	130
5.2.1	TIO.	130
5.2.2	VP	130
5.2.3	CAUE	130
6.	CONCLUSIONES	132
7.	RECOMENDACIONES	134
	BIBLIOGRAFÍA	135
	ANEXOS	144

## LISTA FIGURAS

	pág.
Figura 1. Tendencia de la demanda mundial de caucho para la fabricación de llantas y de generación de desperdicios de caucho proveniente de LLFU en la UE	25
Figura 2. Distribución del aprovechamiento de las llantas usadas en la cadena de gestión (% en Ton)	27
Figura 3. Esquema de una planta de pirólisis de materia orgánica.	39
Figura 4. Esquema de un proceso de pirólisis con reactor de lecho fluidizado con calentamiento indirecto, tolva de alimentación, ciclón y condensador de líquidos.	42
Figura 5. Esquema de un proceso de pirólisis con reactor de cono rotatorio con calentamiento indirecto, tolva de alimentación, ciclón y condensador de líquidos	43
Figura 6. Esquema de un proceso de pirólisis con reactor de tornillo sin fin con calentamiento indirecto, tolva de alimentación, colector de sólidos, ciclón y condensador de líquidos.	44
Figura 7. Esquema del reactor de caída libre	45
Figura 8. Esquema de un reactor de Lecho Fijo con separador de gases	46
Figura 9. Proceso de pirólisis con reactor de horno rotatorio inclinado de operación continua.	47
Figura 10. Proceso de producción del caucho para el prensado de suelas	56
Figura 11 . Factores de un proceso a estudiar	76
Figura 12. Comparación del panorama actual y el panorama propuesto	125
Figura 13. Costos actuales de la empresa Croydon Colombia S.A	127
Figura 14. Costos propuestos para la empresa Croydon Colombia S.A	129

## LISTA TABLAS

	pág.
Tabla 1.Descripción de los tipos de pirólisis según las condiciones de operación manejadas.	40
Tabla 2. Análisis próximo y elemental para carbón pirolítico	52
Tabla 3. Datos de análisis elemental de caucho	64
Tabla 4. Revisión bibliográfica de las características correspondientes al análisis próximo del caucho	70
Tabla 5. Resultados del análisis de la rebaba de caucho	70
Tabla 6. Resultados de densidad de la rebaba de caucho	71
Tabla 7. Representación del diseño factorial	81
Tabla 8. Condiciones de operación a la entrada del proceso	82
Tabla 9. Dimensiones del reactor de pirólisis	84
Tabla 10.Dimensiones del conector de gases.	84
Tabla 11.Dimensiones del condensador en húmedo.	85
Tabla 12.Dimensiones del quemador	85
Tabla 13. Análisis de varianza para el diseño factorial para dos factores para el rendimiento del gas del proceso	88
Tabla 14. Balance de masa rebaba negra a 700°C	90
Tabla 15. Normalización de datos	91
Tabla 16. Datos de revisión bibliográficamente del análisis elemental para el producto carbonizado en base a caucho de neumáticos	95
Tabla 17.Comparación de las propiedades concernientes al análisis próximo del carbonizado de caucho.	96
Tabla 18. Resultados de la cromatografía de gases, de la muestra de la réplica de rebaba negra a 700°C	100
Tabla 19. Compuestos químicos en (%mol) y poder calorífico (MJ/Nm <sup>3</sup> ) del gas de síntesis del proceso de pirólisis de caucho de neumáticos a diferentes temperaturas	101
Tabla 20.Revisión bibliográfica de rendimientos de procesos de pirolisis para caucho de neumáticos y sus respectivos sistemas experimentales	108
Tabla 21. Descripción y función de equipos y corrientes en el diagrama PFD del proceso	113
Tabla 22. Costo por disposición de materia prima	126
Tabla 23. Costo de energía térmica	126
Tabla 24. Costo de mantenimiento	126
Tabla 25. Costos actuales de la empresa Croydon Colombia S.A	127
Tabla 26. Presupuesto de inversión	127
Tabla 27. Costo de servicio industrial (energía por equipos)	128
Tabla 28.Costo de mantenimiento	128
Tabla 29.Costo asociado a mano de obra	129
Tabla 30.Costos propuestos para la empresa Croydon Colombia S.A.	129

## LISTA GRÁFICOS

	pág.
Grafica 1. Frecuencia anual de órdenes por tipo de rebaba de prensado de suelas (2018)	59
Grafica 2. Porcentaje anual de generación de rebaba (2018)	59
Grafica 3. Porcentaje anual de generación de rebaba por colores (2018)	60
Grafica 4. Distribución de productos de los procesos llevados a cabo con tipo de rebaba negra	93
Grafica 5. Perfil térmico del reactor en el proceso de pirólisis de la rebaba de caucho R. mezcla a 550°C	97
Grafica 6. Efecto de la temperatura en el rendimiento del producto carbonizado	103
Grafica 7. Efecto de la temperatura en el rendimiento de aceite del proceso de pirolisis	104
Grafica 8. Efecto de la temperatura en el rendimiento de gas de síntesis del proceso de pirolisis	104

## LISTA ECUACIONES

	pág.
Ecuación 1. Reacción genérica de pirólisis	38
Ecuación 2. Calculo de la cantidad de material volátil	65
Ecuación 3. Calculo del contenido de humedad	65
Ecuación 4. Calculo del contenido de cenizas	66
Ecuación 5. Cálculo del diámetro medio de partícula (Dm)	69
Ecuación 6. Diseño factorial aplicado al rendimiento de gas del proceso de pirólisis de rebaba de caucho	88
Ecuación 7. Cálculo del poder calorífico de gas	102
Ecuación 8. Cálculos de la energía a producir por mes, asumiendo como poder calorífico total el reportado para el proceso de pirólisis en su caracterización	106
Ecuación 9. Cálculos de la energía a producir mensual, con estimación del poder calorífico del gas del proceso de gasificación	106
Ecuación 10. Balance de masa pre tratamiento	114
Ecuación 11. Balance de masa etapa de reacción de pirólisis	115
Ecuación 12. Balance de masa etapa de gasificación	116
Ecuación 13. Balance de energía para un sistema cerrado	116
Ecuación 14. Primera ley de la termodinámica para sistemas cerrados	117
Ecuación 15. Balance de energía para la etapa de pirólisis	118
Ecuación 16. Balance de energía para la etapa de gasificación	120
Ecuación 17. Balance de energía del proceso de valorización de rebaba de caucho	121
Ecuación 18. Cálculo de energía neta producida por el proceso	121
Ecuación 19. Cálculo de energía neta producida por el proceso con un solo reactor	124
Ecuación 20. Valor presente del proyecto	130
Ecuación 21. Costo anual uniforme del proyecto	130

## LISTA CUADROS

	pág.
Cuadro 1. Composición en porcentaje de cucho vulcanizado, con clasificación de confidencialidad	58
Cuadro 2. Datos y equivalencias de las mallas utilizadas en el tamizado de las muestras pulverizadas y molidas respectivamente	68
Cuadro 3. Variables involucradas en el proceso de pirólisis de rebaba de caucho	77

## LISTA IMÁGENES

	pág.
Imagen 1. Zapatos de línea de calzado convencional, modelo Discovery bajo	55
Imagen 2. Suelas moldeadas y vulcanizadas, de los zapatos de la línea convencional	55
Imagen 3. Condiciones de operación del proceso de prensado de suelas	57
Imagen 4. Rebaba de caucho negra (Z31, suela de calzado convencional y z8, suela de bota)	68
Imagen 5. Instalación del equipo de pirólisis	83
Imagen 6. Controladores de temperatura	86
Imagen 7. Medidor de presión	86
Imagen 8. Contador de gas	87
Imagen 9. Carbonizado producto de la pirólisis de rebaba negra	94
Imagen 10. Carbonizado con degradación incompleta del proceso de pirólisis a 550°C	97
Imagen 11. Fracción líquida del proceso de pirólisis (Derecha aceite inicial, izquierda aceite acumulado)	98
Imagen 12. Recolección gas del proceso	99
Imagen 13. Jeringa de 100 $\mu$ "siringe PTEE tupper leuerlock	100

## LISTA DIAGRAMAS

	pág.
Diagrama 1. Proceso de valorización de residuos de caucho	26
Diagrama 2. Esquema del proceso de pirólisis de la rebaba de caucho	73
Diagrama 3. Proceso de pirólisis experimental de la rebaba de caucho	89
Diagrama 4. Esquema general del proceso de pirólisis de rebaba de caucho	110
Diagrama 5. Diagrama PFD del proceso de valorización de pirólisis rebaba de caucho	113
Diagrama 6. Etapa de pre tratamiento (Reducción de tamaño de partícula) del proceso de pirólisis de rebaba de caucho	114
Diagrama 7. Etapa de reacción de pirólisis del proceso de pirólisis de rebaba de caucho	115
Diagrama 8. Etapa de gasificación del proceso de pirólisis de rebaba de caucho	116
Diagrama 10. Balance de masa y energía de las especificaciones técnicas del proceso de pirólisis de la rebaba de caucho	122
Diagrama 11. Diagrama de Sankey del balance de energía	123

## LISTA ANEXOS

	pág.
Anexo A. muestreo y caracterización de la rebaba de caucho	145
Anexo B. pretratamiento de la materia prima	153
Anexo C. proceso de pirolisis de rebaba de caucho	156
Anexo D. caracterización de los productos	186
Anexo E. especificaciones técnicas del proceso	195
Anexo F. costos y especificaciones técnicas de los equipos de la propuesta de valorización de la rebaba de caucho	196

## ABREVIATURAS Y UNIDADES

**°C:** grados Celsius  
 **$\rho$ :** densidad  
**CH<sub>4</sub>:** metano  
**CO:** monóxido de carbono  
**CO<sub>2</sub>:** dióxido de carbono  
**H<sub>2</sub>:** hidrogeno  
**H<sub>2</sub>S:** ácido Sulhídrico  
**g:** gramos  
**kg:** kilogramos  
**kJ:** kilo julios  
**MJ:** mega julios  
 **$m$ :** flujo másico  
**%H, M<sub>ar</sub>:** porcentaje de humedad  
**V<sub>d</sub>:** porcentaje de material volátil  
**A<sub>d</sub>:** contenido de cenizas  
 **$x_i$ :** fracción  
**D<sub>m</sub>:** diámetro medio de partícula (mm)  
**D<sub>pi</sub>:** diámetro de partícula retenido en cada tamiz (mm)  
**% p.p:** composición en porcentaje en peso  
**°C/min:** velocidad de calentamiento  
**Q:** energía  
**C<sub>p</sub>:** capacidad calorífica a presión constante  
**T:** temperatura  
**NFU:** neumáticos fuera de uso  
**GCR:** gránulo de caucho reciclado obtenido de neumáticos en desuso  
**GCV:** poder calorífico neto, por sus siglas en inglés “gross calorific value” (kJ/kg)  
**PC:** poder calorífico (kJ/kg, MJ/kg)  
**TIO:** tasa interna de oportunidad (%)  
**Ton:** tonelada Métrica de 1000 kilogramos  
**VP:** valor Presente (\$ COP, USD)  
**PM:** peso molecular  
**Q<sub>producida</sub>:** energía producida por el sistema  
**Q<sub>producida pirólisis</sub>:** energía producida por la etapa de pirólisis  
**Q<sub>producida gasificación</sub>:** energía producida por la etapa de gasificación  
**Q<sub>Rcaucho</sub>:** energía interna de la rebaba de caucho  
**Q<sub>molino</sub>:** energía suministrada al equipo de molino  
**Q<sub>Rcaucho molida</sub>:** energía interna de la rebaba de caucho molida  
**Q<sub>Reactor Pirólisis</sub>:** energía suministrada al reactor de pirólisis  
**Q<sub>Reactor Gasificación</sub>:** energía suministrada al reactor de gasificación  
**Q<sub>Carbonizado</sub>:** energía interna contenida en el carbonizado  
**Q<sub>Aceite</sub>:** energía interna contenida en el aceite  
**Q<sub>Gas</sub>:** energía interna contenida en el gas

- Q** entrada a equipos: energía suministrada a los equipos del proceso
- Q** Producida total: energía producida por el proceso
- Q** Producida neta: energía neta producida
- FNCE:** fuentes no convencionales de energía
- GEE:** gestión eficiente de la energía

## GLOSARIO

**ALQUITRAN:** sustancia bituminosa, grasa, oscura, viscosa, semisólida y de olor fuerte, que se obtiene de la destilación -en ausencia de aire- de ciertas sustancias que posean materias volátiles; fundamentalmente de la hulla, el petróleo, la turba, los huesos y de algunas maderas resinosas.

**CARBONIZADO:** material obtenido a partir de una alimentación con alto contenido de carbono, que se ha pirolizado en un entorno de oxígeno nulo o muy bajo y mediante procesos sostenibles.

**COMBUSTIBLES:** un combustible es un material que al ser quemado puede producir calor, energía o luz. Generalmente el combustible libera energía de su estado potencial a un estado utilizable, sin importar si se hace de manera directa o mecánicamente, originando como residuo el calor.

**CONTENIDO DE HUMEDAD:** el contenido de humedad de un material es la relación de la masa de agua contenida por kilogramo de materia seca.

**MATERIAL VOLÁTIL:** fase obtenida como producto en la pirólisis, referente a los compuestos condensables y no condensables de la materia prima en proceso. En la fase no condensable (gases) se caracteriza la presencia de hidrógeno, metano y dióxido de carbono; mientras que la fase condensable (líquidos) se caracteriza por estar compuesta por alquitranes y aceites de bajo peso molecular.

**PIRÓLISIS:** es un proceso termoquímico mediante el cual el material orgánico de los subproductos sólidos se descompone por la acción del calor, en una atmósfera deficiente de oxígeno y se transforma en una mezcla líquida de hidrocarburos, gases combustibles, residuos secos de carbón y agua; los productos obtenidos en este proceso pueden ser utilizados.

**PODER CALORÍFICO:** representa la energía en forma de calor entregada por un combustible o material cuando es sometido a un proceso de combustión completa, su valor se expresa en MJ/kg o MJ/m<sup>3</sup> dependiendo la naturaleza del combustible.

**PORCENTAJE O CONTENIDO DE CENIZAS:** el porcentaje de cenizas indica la cantidad de materia sólida no combustible por kilogramo de material.

**REBABA:** sección sobrante de la suela de calzado, luego del proceso de prensado

**TEA:** tubo que permite liberar de forma controlada y segura los gases residuales de procesos de gas, evitando explosiones y disminuyendo el daño ambiental causado por los hidrocarburos no quemados.

**VULCANIZACIÓN:** es un proceso químico mediante el cual se calienta el caucho crudo en presencia de azufre, permitiendo obtener un caucho más estable, duro y resistente mecánicamente.

## RESUMEN

El presente trabajo, busca evaluar el proceso de pirólisis de rebaba de caucho, con el fin de establecer de manera propositiva especificaciones técnicas de diseño para la valorización del material para producción de energía; partiendo de la rebaba de caucho, para posterior aplicación y beneficio en la empresa CROYDON COLOMBIA S.A en la ciudad de Bogotá.

Es por ello que a través de una revisión bibliográfica previa, se determina el potencial energético, la importancia de la reutilización de los desperdicios de caucho vulcanizado y sus diferentes formas de valorización. De igual manera se definen los procesos de degradación térmica con fin energético, a la par de la pirolisis, para determinar la idoneidad de la propuesta. Todo ajustado a las necesidades de la empresa, en la cual se realizó un diagnóstico de la generación de rebaba y con base en ello posteriormente se realizó una caracterización de la rebaba como materia prima en un proceso de pirolisis.

En la caracterización, se tomaron en cuenta los parámetros fisicoquímicos de importancia para fines térmicos y su influencia en los rendimientos del proceso de pirolisis. Paso seguido se realizó el proceso experimental, a nivel de laboratorio, del proceso con rebaba de caucho; para el cual se desarrolló un diseño experimental en donde se evaluaron los factores de temperatura y tipo de rebaba. También se realizó el respectivo pretratamiento de la materia prima para dar inicio a la metodología experimental.

Como resultados del proceso experimental se establecieron los rendimientos del proceso de pirólisis para los 3 productos principales (sólido, líquido y gas) y la caracterización de los mismos, la cual permitió estimar el poder calorífico del gas de salida a través de una cromatografía de gases.

Finalmente, se realizó la parte propositiva del proyecto, con base en los resultados obtenidos durante la experimentación, se definen especificaciones técnicas de un proceso termoquímico con el objetivo de generar una alternativa real que pueda ser incorporada al sistema productivo de CROYDON COLOMBIA S.A. A esta propuesta se le realizó el análisis financiero correspondiente para determinar la viabilidad de su posible implementación final en la empresa.

**Palabras claves:** pirólisis, rebaba de caucho, proceso de valorización.

## INTRODUCCIÓN

La disposición final de los residuos de caucho, ha generado a lo largo de los últimos años, gran preocupación global; pues este material genera un impacto ambiental importante debido, a que su proceso de descomposición es muy lento; a la intemperie se estima entre 500 y 3000 años y su elevada elasticidad impide su compactación cuando se lleva a un relleno sanitario; incluyendo riesgos por su inadecuado almacenamiento tales como: incendio, pues es un material inflamable, proliferación de plagas y enfermedades, liberación gases perjudiciales para la salud generando mercurio, hidrocarburos poliaromáticos y metales pesados por quema no controlada, entre otros<sup>1</sup>.

Es por estas razones que se han desarrollado esfuerzos a nivel mundial para controlar este residuo, a través de normativas que buscan una mayor responsabilidad por parte de las empresas productoras, con el fin de generar programas pos consumo e incluso el reintegro de los residuos de caucho al ciclo productivo, siendo Taiwán uno de los países pioneros en este tipo de regulación, seguido por Estados Unidos, Japón y la Unión Europea<sup>2</sup>. A su vez esta reglamentación ha llevado a un auge en la industria del reciclaje del caucho, en un esfuerzo de la comunidad industrial y ambiental por cumplirla; este tipo de industria emergente tiene como objetivo reincorporar caucho de desecho al ciclo económico privilegiando los procedimientos que permiten un reciclaje directo y un uso moderado de los recursos naturales.

Así mismo se ha demostrado que el grado de desarrollo de los procesos de reciclaje del caucho está directamente relacionado a la severidad de las normas y legislación vigente de cada país. Según el Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial, en Colombia se generan más de 5 millones de llantas usadas<sup>1</sup>, a pesar de existir un marco normativo que a través de la resolución 1457 de 2010 establece la implementación de procesos para la gestión de los residuos sólidos. Considerando que entre el 65 y el 70 % del caucho producido en el mundo es utilizado para la fabricación de llantas y su demanda en el mercado ha crecido al paso de los años, tal como se observa en la Figura 1; debe tenerse en cuenta que cada año se generan aproximadamente 17 millones de toneladas de llantas fuera de uso (NFU) y dado que el total de caucho en una llanta corresponde más o menos el 41 y el 55 % de su peso, se tiene que entre 7 y 9 millones de toneladas de caucho provenientes de NFU se disponen cada año a nivel mundial. En Colombia, es pertinente indicar que en 2010 se dispusieron 42 mil toneladas de caucho

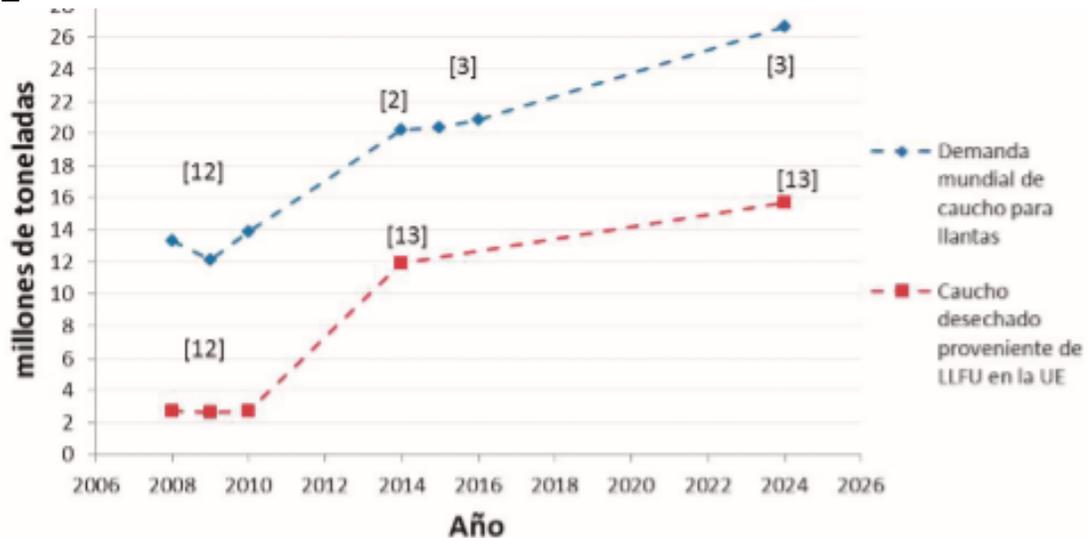
---

<sup>1</sup> SIMANCAS, Marilyn, CASTILLO, Shirley. Estudio de prefactibilidad para la recolección y aprovechamiento de llantas en desuso en la ciudad de Bogotá. Universidad Católica de Colombia, 2017.p. 15-19.

<sup>2</sup> PELAEZ ARROYAVE, G.J, VELAZQUEZ RESTREPO, S.M, GIRALDO VASQUEZ, D.H. Aplicaciones de caucho reciclado: una revisión de la literatura. Ciencia e Ingeniería Neogranadina, vol 27, no.2 pp. 27-50. DOI: <http://dx.doi.org/10.18359/rcin.2143>.

proveniente de NFU, mientras que en 2015 se generaron alrededor de 100 mil toneladas<sup>3</sup>.

**Figura 1. Tendencia de la demanda mundial de caucho para la fabricación de llantas y de generación de desperdicios de caucho proveniente de LLFU en la UE**



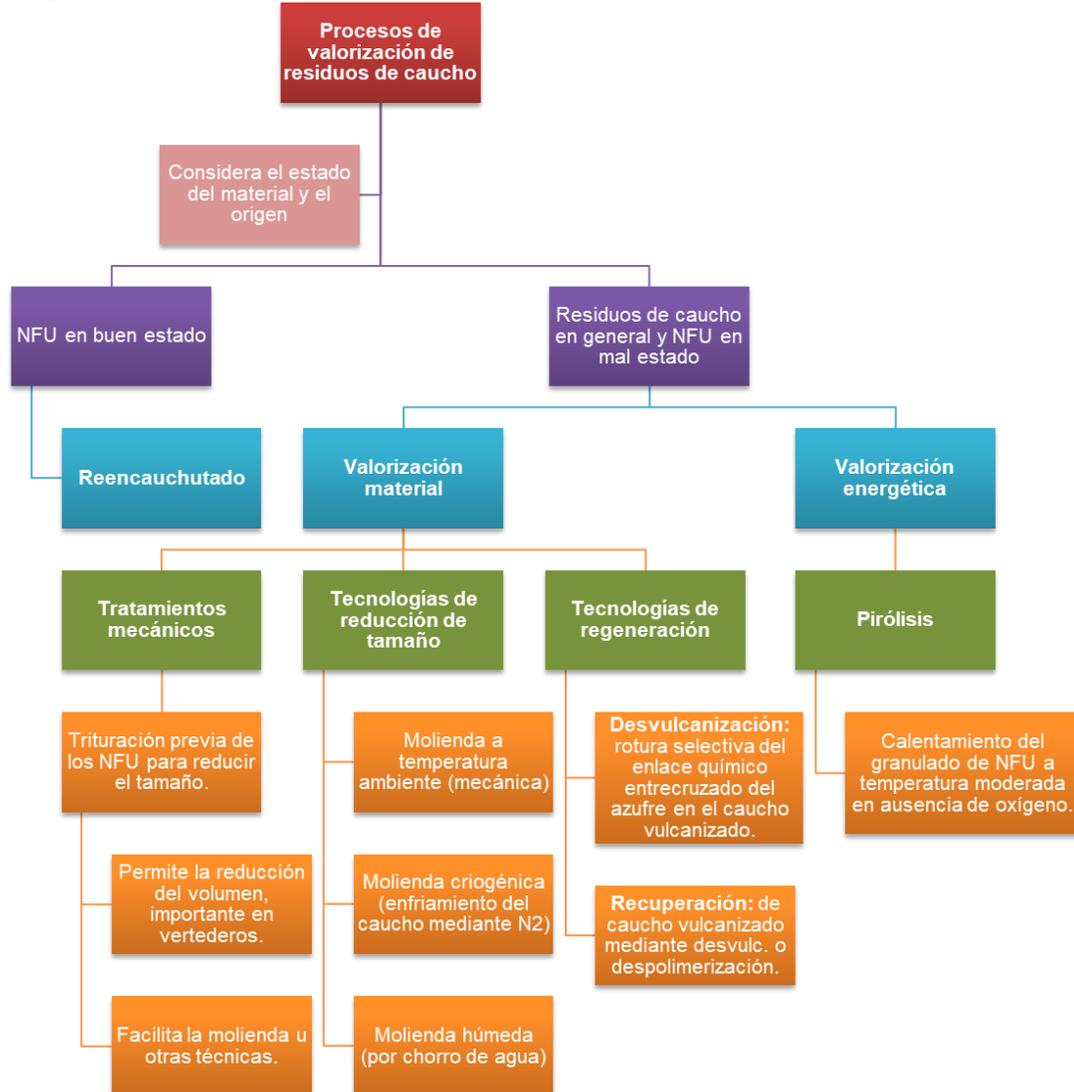
Fuente: PELÁEZ ARROYAVE, G. J., VELÁSQUEZ RESTREPO, S. M., GIRALDO VÁSQUEZ, D. H. Aplicaciones de caucho reciclado: una revisión de la literatura. Ciencia e ingeniería Neogranadina, vol. 27, no. 2, pp. 27-50. DOI: [http:// dx.doi.org/10.18359/rcin.2143](http://dx.doi.org/10.18359/rcin.2143).

El caucho es un material de gran resistencia para diversas condiciones de uso, generalmente sus campos de actuación podrían definirse como sellar, amortiguar, transportar, entre otros. De modo que su uso constante y cotidiano en la sociedad, implica la búsqueda de alternativas de valorización del material cuando su vida útil termine. En efecto, se conocen actualmente técnicas de valorización material, tal como el recauchutado, tratamientos mecánicos, tecnologías de reducción de tamaño y tecnologías de regeneración o desvulcanización; cuya aplicación más importante es en la mezcla de asfaltos y técnicas de valorización energética que contemplan procesos de pirolisis y termólisis, cuya finalidad es su utilización como combustible de sustitución, siempre que se respeten las disposiciones ambientales<sup>4</sup>. Tal como se explica a profundidad en el Diagrama 1.

<sup>3</sup>UNIÓN TEMPORAL OCADE LTDA. (COLOMBIA) SANIPLAN (R.J.-BRASIL) AMBIENTAL S.A. (ARGENTINA).Diagnóstico ambiental sobre el manejo actual de llantas y neumáticos usados generados por el parque automotor de Santa Fe de Bogotá.

<sup>4</sup> CANO, Encarnación, et al. Valorización material y energética de neumáticos fuera de uso actualización. Circulo de innovación en materiales tecnología aeroespacial y nanotecnología Universidad Carlos III de Madrid, Parque Científico de Leganés. 2008

**Diagrama 1. Proceso de valorización de residuos de caucho.**



Fuente: Elaboración propia con base en CANO, Encarnación, et al. Valorización material y energética de neumáticos fuera de uso actualización. Circulo de innovación en materiales tecnología aeroespacial y nanotecnología Universidad Carlos III de Madrid, Parque Científico de Leganés.2008

En Colombia, la producción de caucho tiene una gran oferta y demanda en el mercado, pues existen más de 300 fábricas que consumen caucho natural importado de Malasia principalmente. El consumo anual en Colombia es de 28.000 toneladas y en el país sólo se producen 1.000 toneladas en las 483 hectáreas que tiene en producción.<sup>5</sup> Sin embargo el desarrollo de su reciclaje a lo largo del país no ha alcanzado un punto álgido y por el momento se ha concentrado en la valorización material; dejando de lado la producción de energía por este medio, aunque se han

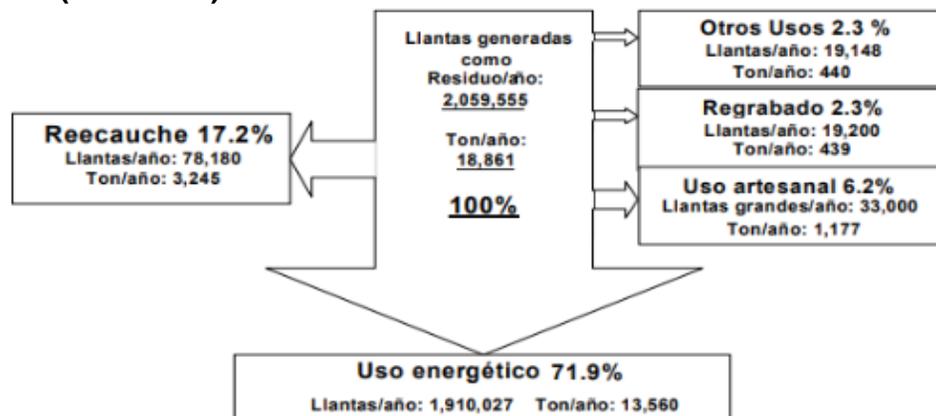
<sup>5</sup> O. B. B and C. R. S, "Situación y Perspectivas de la Industria del Caucho en el Mundo y en Colombia," Revista Facultad Nacional De Agronomía, vol. 46, (1 y 2), pp. 71-106, 1993.

encontrado usos incontrolados, tal como se evidencia en la Figura 2. En hornos artesanales de combustión alimentados con llantas, para la producción de panela en zonas apartadas del país que no cuentan con facilidades de acceso a combustibles o redes de gas natural, tal como lo reporta Mejía<sup>6</sup> en su análisis; que generan impactos ambientales y de salud pública relacionados con las emisiones de COV's<sup>3</sup> y HAP's<sup>4</sup>, contaminantes carcinogénicos y mutagénicos, y otros que causan afecciones al sistema respiratorio y circulatorio<sup>7</sup>.

La valorización energética abre la puerta a la implementación de industrias mixtas y la posibilidad de eliminar y reducir por completo la cantidad de residuos de caucho, pues paralelamente permite vez limitar el consumo de combustibles fósiles, en condiciones adecuadas. Especialmente el proceso de pirólisis del cual se obtienen tres productos de interés energético, que son una carbonilla sólida, un aceite o combustible líquido y un gas combustible. Sin embargo, su implementación cuenta con reticencias por parte de la industria debido a su costo de instalación.

Dadas las características de caucho se busca plantear una alternativa para mitigar el impacto ambiental que genera el desperdicio de la rebaba de caucho de la empresa CROYDON COLOMBIA S.A. planteando un proceso de pirólisis en el cual se reducirá el volumen de residuos y se generarán productos combustibles que podrían utilizarse a futuro, para suplir las necesidades energéticas de la compañía.

**Figura 2. Distribución del aprovechamiento de las llantas usadas en la cadena de gestión (% en Ton)**



Fuente: UNIÓN TEMPORAL OCADE LTDA. (COLOMBIA) SANIPLAN (R.J.-BRASIL) AMBIENTAL S.A. (ARGENTINA). Diagnóstico ambiental sobre el manejo actual de llantas y neumáticos usados generados por el parque automotor de Santa Fe de Bogotá.

<sup>6</sup> MEJÍA, Juan. Análisis de sensibilidad de un proyecto de reciclaje de llantas. Universidad Militar. Disponible en: <https://repository.unimilitar.edu.co/handle/10654/11952>.

<sup>7</sup> UNIÓN TEMPORAL OCADE LTDA. (COLOMBIA) SANIPLAN (R.J.-BRASIL) AMBIENTAL S.A. (ARGENTINA). Diagnóstico ambiental sobre el manejo actual de llantas y neumáticos usados generados por el parque automotor, Bogotá.

Considerando que los residuos de caucho vulcanizado que se producen al no ser reutilizables, representan un gasto importante para su disposición final. La valorización energética de estos residuos puede ser una vía factible para generar productos de mayor valor agregado. Dentro de los procesos de producción de la empresa CROYDON COLOMBIA S.A se requiere de suministros constantes de gas natural y electricidad que actualmente son provistos por la red de suministro lo que involucra gastos económicos, equivalentes a \$COP 223'811.806/mes. Con base en estas circunstancias, el propósito de este proyecto es evaluar el proceso de pirólisis de los residuos de rebaba de caucho para la producción de gas combustible y viabilizar su utilización en los sistemas de consumo de gas dentro del proceso productivo de la empresa CROYDON COLOMBIA S.A.

## **OBJETIVOS**

### **OBJETIVO GENERAL**

Evaluar el proceso de pirólisis como alternativa de valorización para la rebaba de caucho de Croydon Colombia S.A.

### **OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

- Determinar las características concernientes al análisis próximo y las propiedades físicas de la materia prima.
- Desarrollar experimentalmente el proceso de pirólisis de rebaba de caucho en un reactor de lecho fijo a nivel laboratorio.
- Definir las especificaciones técnicas del proceso de pirólisis de rebaba de caucho.
- Realizar un análisis financiero del uso del gas generado en el proceso de pirólisis para la industria Croydon Colombia S.A.

## 1. GENERALIDADES DEL CAUCHO Y PROCESO DE DEGRADACIÓN TÉRMICA

El caucho es uno de los materiales que cada vez tienen mayor impacto a nivel mundial, pues su gran versatilidad ha permitido que sea un recurso económico y fácil de usar industrialmente para diferentes aplicaciones. En este capítulo se explican las generalidades del caucho y los procesos de degradación térmica y su valorización a través del proceso de pirólisis de residuos para la obtención de combustibles.

### 1.1 EL CAUCHO

El caucho es un material con grandes propiedades de resistencia para diversas condiciones de uso, generalmente sus campos de actuación podrían definirse como sellar, amortiguar, transportar<sup>8</sup>. Esto se puede ver reflejado en su aplicación en la industria automotriz, en la construcción y en productos más cercanos a las personas en su calzado.

**1.1.1 Tipos de caucho.** Existen diferentes tipos de cauchos, y estos se pueden clasificar en dos grandes grupos: el caucho natural y el caucho sintético. La principal diferencia entre ambos radica en el origen de las materias primas. A continuación se explica cada uno de ellos:

- **Caucho Natural:** este se obtiene a partir de un fluido lácteo llamado látex hallado en muchas especies vegetales típicas de regiones tropicales<sup>9</sup>.
- **Caucho sintético:** este se obtiene a partir del procesamiento de hidrocarburos.

**1.1.1.1 Caucho natural.** El caucho natural es un producto obtenido por medio de la coagulación del látex emanado de algunas plantas, aunque, un gran número de plantas segregan látex cuando su corteza es cortada, sólo unas pocas especies producen la cantidad suficiente y de calidad adecuada para que su explotación sea sostenible desde el punto de vista económico. A nivel mundial se explota comercialmente la especie *Hevea Brasiliensis*, árbol originario de la cuenca del río Amazonas, en los territorios de Brasil, Bolivia, Perú y Colombia.

En la década de 1870 los ingleses enviaron varias expediciones al Amazonas a recoger semillas del árbol de caucho, estas semillas fueron llevadas a sus colonias en Asia donde después de algunos años de experimentación el árbol fue adaptado y se desarrollaron métodos adecuados de cultivo, extracción y coagulación del

---

<sup>8</sup> O. B. B and C. R. S, "Situación y Perspectivas de la Industria del Caucho en el Mundo y en Colombia," Revista Facultad Nacional De Agronomía, vol. 46, (1 y 2), pp. 71-106, 1993.

<sup>9</sup> MARTÍNEZ COVALEDA, Héctor J., SALAZAR SOLER, Marcela., BARRIOS URRUTIA, Camilo A. Cadena del caucho en Colombia, Bogotá, Colombia, Marzo 2005.

caucho. Durante las primeras décadas del siglo XIX algunos países de la región, como Tailandia, Malasia e Indonesia, se consolidaron como los principales proveedores de caucho en el mercado internacional, desplazando a Brasil y otros países Suramericanos<sup>10</sup>.

**1.1.1.2 Caucho Sintético.** Es un copolímero, elaborado artificialmente mediante reacciones químicas, conocidas como condensación o polimerización, a partir de determinados hidrocarburos insaturados. Los compuestos básicos del caucho sintético llamados monómeros, tienen una masa molecular relativamente baja y forman moléculas gigantes denominadas polímeros. Mediante la copolimerización es posible variar las propiedades, ensanchando así el campo de aplicación.

### Tipos de caucho sintético

Existen numerosos tipos de caucho sintético, y sus aplicaciones están en función de sus propiedades ya que a medida del tiempo se han desarrollado numerosos tipos de caucho con propiedades específicas las cuales sirven para aplicaciones especiales en la industria. A continuación se mencionan y describen algunos tipos de caucho sintético utilizados en la industria de calzado:

- **SBR.** El SBR es un copolímero de butadieno y estireno en el cual un 25% de las unidades de estireno están distribuidas al azar entre el 75% de las unidades de butadieno en las cadenas moleculares. Este tipo de caucho fue preparado por primera vez en Alemania en 1929. El SBR sin vulcanizar es soluble en la mayoría de los solventes hidrocarbonados. La vulcanización es más lenta en el SBR que en el caucho natural y se requiere por lo tanto de aceleradores más poderosos. Alrededor del 70% del SBR es utilizado por la industria llantera, este tipo de caucho es el que más se emplea, suponiendo algo así como el 60% de la producción de caucho consumido ya sea natural o sintético<sup>11</sup>.
- **BR.** El BR o polibutadieno, tiene una flexibilidad muy alta, es el único caucho sintético con una flexibilidad mayor incluso que al del hule natural, al mismo tiempo, la resistencia a la abrasión es sobresaliente y la flexibilidad a baja temperatura es excelente<sup>12</sup>. Por otro lado sus principales limitaciones son: baja adhesividad para consigo mismo y la baja tensión y resistencia al desgarre. El uso de este caucho es limitado por sí mismo, este material es frecuentemente usado en mezclas con otros cauchos, como por ejemplo en la industria llantera

---

<sup>10</sup> REYES, Eugenio, "Biodegradación del caucho por *Alternaria alternata*", Universidad Nacional Andrés Bello, Facultad de medicina, escuela de tecnología médica, Septiembre, 2015.

<sup>11</sup> BELICZKY, Louis S, FAJEN, John. Enciclopedia de Salud y Seguridad en el trabajo. Sección 8. Industrias del Caucho, Industrias Químicas.

<sup>12</sup> BOSQUES, Gabriela, Síntesis de polibutadieno cis-1,4 en solución con estireno y su uso como hule precursor en poliestireno de alto impacto obtenido mediante el proceso in Situ. Centro de investigación en Química aplicada. Octubre del 2014.

en la cual se tomó por sus cualidades de resistencia a la abrasión y baja generación de calor.

- **Caucho isopreno.** La producción de una 2 réplica del caucho natural ofrecía una meta interesante a vencer, la dificultad consistía no en polimerizar al isopreno eso ya se había realizado anteriormente. Lo que se requería era encontrar la manera de enlazar las unidades de isopreno en forma regular: todos en la misma dirección para producir un cis 1,4 isopreno. Los catalizadores especiales con los cuales podría obtenerse dicho orden fueron descubiertos a mediados de este siglo. En teoría se esperaría que el caucho isopreno al tener este la misma composición química del caucho natural, tuviera las mismas propiedades químicas, pero en la práctica hay diferencias, los tipos varían algo en la longitud y estructura de las moléculas.
- **Butadieno.** Las principales aplicaciones del butadieno son el caucho sintético (SBR, SBS, caucho termoplástico, etc.); muy empleado en producir suelas para calzado, neumáticos y otras piezas para la industria de automoción, adhesivos y sellantes, modificación de asfaltos, modificación de polímeros y compuestos para una infinidad de aplicaciones.

**1.1.2 Aditivos de procesamiento.** Los aditivos de procesamiento son cualquier material usado en dosis relativamente bajas, que mejora las características de procesamiento sin afectar significativamente las propiedades físicas.

- **Agentes vulcanizantes.** Son productos químicos que se requieren para reticular las cadenas de goma en la red que da las propiedades físicas deseadas en el producto final. El tipo de agente vulcanizante requerido variará con el tipo de caucho utilizado.

El agente más común utilizado es el azufre, que reacciona con la mayoría de los cauchos insaturados para producir vulcanizados. Sin embargo, los peróxidos tienen varias ventajas; tales como: mayor estabilidad al calor., mejor resistencia a la reversión, baja deformación por compresión a alta temperatura, la ausencia de azufre evita la corrosión de metales. En cambio sí se escoge el tipo de vulcanización con azufre es necesario adicionar materiales para la activación del azufre, tales como acelerantes, activadores y frecuentemente inhibidores<sup>13</sup>.

- **Activadores del acelerante.** El azufre es un agente de vulcanización lento, se necesitan grandes cantidades de azufre, altas temperaturas y periodos de calentamiento largos y aun así se obtienen bajas eficiencias de reticulación y propiedades de resistencia y envejecimiento igualmente bajas. Solo con los

---

<sup>13</sup> JIMÉNEZ, Johanna, TORRES, Johanna. Evaluación del proceso de desvulcanización química a nivel laboratorio para los residuos de caucho procedentes de la suela en Croydon Colombia S.A. Fundación Universidad de América. Bogotá, Colombia. 2014. P.35

acelerantes de vulcanización se pueden alcanzar las cualidades correspondientes a los niveles tecnológicos requeridos. Estos compuestos se utilizan para aumentar la velocidad de vulcanización mediante la activación del acelerador de manera más eficaz. Se cree que reaccionan para formar complejos intermedios con los aceleradores. El complejo formado de este modo es más eficaz en la activación del azufre presente en la mezcla, aumentando así la tasa de curación.

El óxido de zinc es el aditivo más importante, pero en casos especiales se utilizan óxido de magnesio e hidróxido de calcio. El sistema caucho-azufre-acelerantes óxido de zinc es además activado por la adición de ácidos grasos como ácido esteárico, estearato de zinc o laurato de zinc. En general, se puede afirmar que el aumento del pH conduce a la activación de la vulcanización; los activadores básicos mencionados conllevan al mejoramiento de las propiedades de resistencia y acorta el tiempo de vulcanización. Los ácidos grasos y las sales de ácidos grasos dan un mejor procesamiento del caucho y aumentan la dispersión de los rellenos<sup>14</sup>.

- **Plastificante.** Los plastificantes no sólo modifican las propiedades físicas del compuesto y del vulcanizado, sino que también pueden mejorar el procesamiento, actuando como dispersante durante la incorporación de la carga y al mismo tiempo se reduce la viscosidad del compuesto y, consecuentemente, la temperatura de procesamiento. Como modificador de propiedades en compuestos de caucho, los plastificantes pueden reducir el punto de transición de segundo orden (punto de transición vítrea) y el módulo de elasticidad. Como resultado, se mejora la flexibilidad en frío. El módulo estático y la resistencia a la tracción son disminuidos en la mayoría de los casos, resulta una elongación a la rotura más alta<sup>15</sup>.
- **Antioxidante.** Todos los cauchos están suficientemente afectados por procesos naturales o envejecimiento acelerado de modo que es necesario añadir materiales que son capaces de retrasar este tipo de deterioro. Los cambios en las propiedades de los materiales que ocurren por largo periodos de almacenamiento sin la acción de químicos que produzcan una degradación parcial o completa. Los grupos insaturados de los cauchos de dieno hacen posibles la vulcanización con azufre pero también presentan una sensibilidad hacia el oxígeno, ozono y otras sustancias reactivas<sup>16</sup>.
- **Inhibidor.** A menudo las especificaciones de vulcanización requieren de acelerantes los cuales tienen un sistema de seguridad a la quemadura deficiente. En estos casos o cuando se utiliza el tiempo de vulcanización corto o

---

<sup>14</sup> *Ibíd.*, p.36

<sup>15</sup> *Ibíd.*, p.36

<sup>16</sup> *Ibíd.*, p.37

elevadas temperaturas de proceso, se tiene que retrasar el inicio de la vulcanización para asegurar el procesamiento.

Estos ingredientes deben reducir la actividad del acelerador durante el procesamiento y almacenamiento. Su propósito es evitar la vulcanización prematura durante el almacenamiento y la elaboración del producto final, Pero no deben descomponer o interferir con el acelerador durante el curado normal a temperaturas elevadas<sup>17</sup>.

- **Relleno.** Los rellenos se han utilizado desde el descubrimiento de la vulcanización del caucho, para reforzar, extender y reducir costos. La selección de un material de carga particular para un compuesto depende de la característica de procesamiento y las propiedades físicas deseadas, el costo, y, sobre todo, el rendimiento final del producto.

Los rellenos o material de carga se clasifican principalmente como negros de carbón y rellenos de color claro para los cuales la principal clasificación es su composición química. Por ejemplo, la sílice coloidal, los silicatos de aluminio y calcio, la alúmina gel, el caolín, la sílice, el talco, la tiza (carbonato de calcio), los óxidos metálicos como el óxido de zinc y los carbonatos metálicos. Con estas clase de rellenos se presentan diferentes grados de actividad, básicamente la mayoría de negros de carbón, la sílice coloidal y la mayoría de los silicatos con tamaño de partícula pequeño pertenecen a los rellenos de alta y media actividad, mientras que la tiza pertenece a los rellenos inactivos<sup>18</sup>.

- **Ingredientes misceláneos.** Los materiales de este tipo se utilizan siempre que se desee algún efecto o propiedad particular en un vulcanizado.
- **Abrasivos.** Ingredientes minerales tales como sílice y piedra pómez son adecuados para este propósito.
- **Agentes de soplado.** Los agentes adecuados deben ser capaces de liberar gas durante el período de la vulcanización. Los compuestos azo y los carbonatos son productos químicos adecuados que liberan gas.
- **Colorantes.** Los materiales utilizados para la coloración de productos que no sean negros, son pigmentos orgánicos o inorgánicos estables.
- **Retardante de llama.** Hidrocarburos clorados o fosfato de antimonio, se pueden añadir para reducir inflamabilidad.

---

<sup>17</sup> Ibíd., p.39.

<sup>18</sup> Ibíd., p.39.

- **Agentes de homogeneización.** Mezclas de resinas utilizadas para ayudar en la mezcla de dos o más elastómeros. Reducen el tiempo de procesamiento y ofrecen mezclas más uniformes.
- **Lubricantes internos.** Ciertas aminas, amidas, fluoro- carbonos y materiales de cera a base de alto polietileno de bajo peso molecular como lubricantes internos que proporcionan una buena liberación de molde.
- **Odorantes.** Compuestos aromáticos capaces de filtrar hacia fuera o enmascarar los olores de los compuestos de caucho<sup>19</sup>.

**1.1.3 Producción manufacturada de caucho.** El caucho natural, al igual que el caucho sintético, es empleado por la industria como materia prima para la elaboración de semiproductos o formas básicas (caucho sin vulcanizar, hilos y cuerdas de caucho vulcanizado, placas, hojas, tiras, varillas y perfiles de caucho sin endurecer y tubos de caucho vulcanizado sin endurecer) y otros artículos de diverso uso, los cuales a su vez, se utilizan en la producción de numerosos productos (llantas neumáticas para camiones, vehículos de pasajeros y de producción agrícola, llantas sólidas, guantes, impermeables, autopartes, artículos deportivos, mangueras, borradores, tapetes, bandas transportadoras, banditas, suelas, pegantes y cauchos especiales para las diferentes industrias.

La producción manufacturera de caucho comprende cinco grandes procesos<sup>20</sup>:

- **Mezcla.** Consiste en producir un compuesto con todos los ingredientes (caucho natural, caucho sintético y otros aditivos) para permitir un procesamiento fácil en las etapas subsiguientes.
- **Extrusión.** Su finalidad es darle un perfil o forma determinada al caucho, a través de una tobera o dado; una vez obtenida la forma, el caucho es enfriado con agua o aire para darle estabilidad dimensional.
- **Calandrado o laminación.** Permite obtener perfiles específicos o láminas para recubrir otros materiales como textiles o hilos.
- **Moldeo.** Da forma al caucho por medio de un molde.
- **Vulcanización.** Es el cambio de estado plástico a elástico de un compuesto elastomérico; este proceso le confiere las características finales a un producto.

---

<sup>19</sup> *Ibíd.*, p.40.

<sup>20</sup> Análisis de cadenas productivas, generalidades de la Cadena petroquímica-Caucho. Departamento Nacional de planeación. [http://www.dnp.gov.co/01\\_CONT/POLITICA/Cadenas\\_Productiva.htm](http://www.dnp.gov.co/01_CONT/POLITICA/Cadenas_Productiva.htm)

## 1.2 PROCESOS DE TRANSFORMACIÓN TÉRMICOS

**1.2.1 Procesos termoquímicos.** Los procesos termoquímicos son principalmente tres: Combustión, pirólisis y gasificación, el proceso de licuefacción es rara vez usado en el aprovechamiento energético de la biomasa<sup>21</sup>.

**1.2.1.1 Combustión.** La combustión de un combustible se puede definir como la oxidación total del mismo para producir energía principalmente y algunos subproductos como dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) y agua (H<sub>2</sub>O). En el caso de la biomasa el proceso consta de varios pasos fundamentales: En primer lugar la biomasa debe ser secada, gran parte de los recursos biomásicos tienen un alto contenido de agua, entre mayor sea el contenido de agua más difícil resulta su aprovechamiento para la producción de energía. A continuación sigue el proceso de pirólisis en el cual, la materia orgánica es descompuesta por calentamiento en ausencia de oxígeno (O<sub>2</sub>). En este proceso se forma carbón y alquitrán, así como algunos gases combustibles<sup>22</sup>.

El siguiente paso en la combustión de la biomasa es la gasificación. Aquí se forman gases combustibles, principalmente metano (CH<sub>4</sub>). Finalmente el último paso de la cadena es la combustión final en la que los gases se combinan con oxígeno para formar dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) y agua (H<sub>2</sub>O) y otros subproductos que dependen de los componentes del combustible biomásico, adicionalmente se generan cenizas<sup>23</sup>.

La combustión de la biomasa es usada en un amplio margen de equipos para transformar la energía química almacenada en la biomasa en calor, energía mecánica o electricidad, tal como estufas, turbinas de vapor, turbogeneradores, etc. La combustión de biomasa es la técnica más utilizada para obtener energía del recurso, sea en forma de calor o para la generación de electricidad<sup>24</sup>.

**1.2.1.2 Pirólisis.** La pirólisis es la transformación de la biomasa en fracciones líquidas, sólidas y gaseosas a partir del calentamiento de la biomasa en ausencia de aire a temperaturas cercanas a los 500 °C. La pirólisis puede ser usada para producir “biocombustibles” principalmente usando la técnica de “bioflash” posibilitando de esa forma la producción de biocrudo a partir de biomasa con una eficiencia superior al 80%. El biocrudo puede ser usado en motores e igualmente

---

<sup>21</sup> ARENAS CASTELLANOS, Daniel. Propuesta De Diseño De Un Proceso Para La Generación De Energía Eléctrica a Partir De Los Residuos De La Producción De Café. Pontificia Universidad Javeriana, Bogotá, Octubre 2009.

<sup>22</sup> PINEDO, Andrea Urien. Obtención de biocarbones y biocombustibles mediante pirólisis de biomasa residual”, Universidad Nacional de Educación a Distancia Septiembre 2013.

<sup>23</sup> SÁNCHEZ MALDONADO, Cristóbal. La pirólisis como método para la generación de electricidad en Magallanes, Diciembre 2013.

<sup>24</sup> BASU, Prabir. Biomass Gasification and Pyrolysis. Practical Design and Theory. Burlington, USA 2010.

como materia prima para refinerías. Sin embargo estos crudos presentan problemas en su producción tales como la poca estabilidad térmica y su poder corrosivo. Existen algunos procesos tales como reducción de la cantidad de oxígeno en la mezcla y la remoción de todos los compuestos alquénicos por medio de hidrogenación y rompimiento catalítico de las moléculas<sup>25</sup>.

Desde un punto de vista químico, la pirólisis es un proceso complejo, generalmente se lleva a cabo a través de una serie de reacciones en las que influyen muchos factores como lo son: la estructura y composición de la materia prima, la tecnología utilizada, la velocidad de calentamiento, el tiempo de residencia, la velocidad de enfriamiento y la temperatura del proceso<sup>26</sup>.

Los distintos tipos de procesos de pirólisis se clasifican atendiendo a la velocidad de calentamiento, el tiempo de residencia y la temperatura final alguno de estos son: carbonización, pirólisis convencional, pirólisis rápida, pirólisis flash de gases y líquidos, pirólisis ultra rápida, pirólisis a vacío, hidropirólisis y metano pirólisis.

**1.2.1.3 Gasificación.** La gasificación es la degradación total del sustrato de carbono (en este caso particular, la biomasa) hasta llevarlo a forma gaseosa. Cuando se usa el oxígeno (O<sub>2</sub>) como agente oxidante los productos de la gasificación son principalmente metano (CH<sub>4</sub>), monóxido y dióxido de carbono (CO y CO<sub>2</sub> respectivamente).

Adicionalmente durante el proceso se producen otros gases como hidrógeno (H<sub>2</sub>) y nitrógeno (N<sub>2</sub>), y queda un residuo de materia inerte. La gasificación ocurre de acuerdo a la siguiente secuencia de procesos en la gran mayoría de gasificadores, con pequeñas variaciones los unos de los otros. En primer lugar la biomasa debe ser secada, luego calentada, a continuación ocurre la descomposición térmica y finalmente ocurre la gasificación. El gasificador se calienta para favorecer las reacciones endotérmicas que ocurren en el proceso<sup>27</sup>. La gasificación de la biomasa recoge productos sólidos, líquidos y gaseosos para transformarlos en gases útiles en la generación de energía.

**1.2.1.4 Licuefacción.** La licuefacción (o licuación) se conoce a uno de los cambios de estado que puede tener la materia, en particular el que de un estado gaseoso pasa a un estado líquido. El proceso ocurre por efecto de la presión y de la temperatura, en la medida que para todos los gases existe un nivel de temperatura debajo del cual, aplicando una presión suficientemente grande, pueden

---

<sup>25</sup> BERRUECO, C, et al. Pyrolysis of waste tyres in an atmospheric static-bed batch reactor: Analysis of the gases obtained. En: Journal of Analytical and Applied Pyrolysis. Agosto, 2005. Vol. 74, p. 245–253.

<sup>26</sup> GONZÁLEZ, J.F, et al. Pyrolysis of automobile tyre waste. Influence of operating variables and kinetics study. En: Journal of Analytical and Applied Pyrolysis. Octubre, 2001. Vol. 58-59, p. 667-683.

<sup>27</sup> BASU, Prabir. Biomass Gasification and Pyrolysis. Practical Design and Theory. Burlington, USA. 2010

transformarse en líquidos. En el mismo sentido, por grande que fuera la presión el gas no podrá ser licuado en cuanto su temperatura supere determinado nivel.

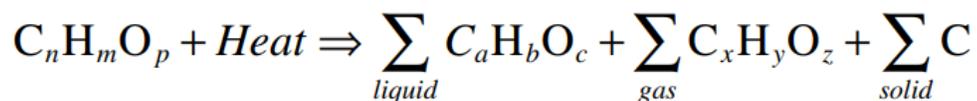
El proceso del cambio de estado de gas a líquido por medio de las altas presiones y bajas temperaturas fue descubierto por Michael Faraday en 1823, y el estudio posterior más importantes fueron los de Thomas Andrews, que en 1869 descubrió que cada gas tiene una temperatura crítica sobre la que es imposible la licuación, y por el contrario cuando se procede a la compresión sucede que la velocidad de las moléculas y las distancias entre ellas disminuyen hasta experimentar el cambio de estado<sup>28</sup>.

### 1.3 PIRÓLISIS

**1.3.1 Fundamentos.** La pirólisis consiste en calentar materia orgánica en ausencia de aire u oxígeno a una velocidad especificada o tasa de calentamiento, hasta una temperatura máxima conocida como temperatura de pirólisis, y mantenerla allí durante un tiempo especificado. Los productos de la pirólisis corresponden a: líquido, gases condensables y carbón sólido o ceniza; por su parte, el gas condensable puede descomponerse aún más en gases no condensables (CO, CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub> y CH<sub>4</sub>), líquido y carbón<sup>29</sup>.

Teóricamente, el proceso de pirólisis puede estar representado en la siguiente reacción genérica<sup>30</sup>, en donde los subíndices representan el número de átomos de cada elemento que constituye tanto la materia prima empleada como los productos obtenidos:

#### Ecuación 1. Reacción genérica de pirólisis



Fuente: BASU, Prabair. Biomass Gasification and Pyrolysis. Practical Design and Theory. Burlington, USA. 2010.

Un esquema de una planta de pirólisis, se muestra en la Figura 3, el cual es aplicable para cualquier tipo de materia orgánica en forma sólida; su funcionamiento se describe a continuación<sup>31</sup>:

---

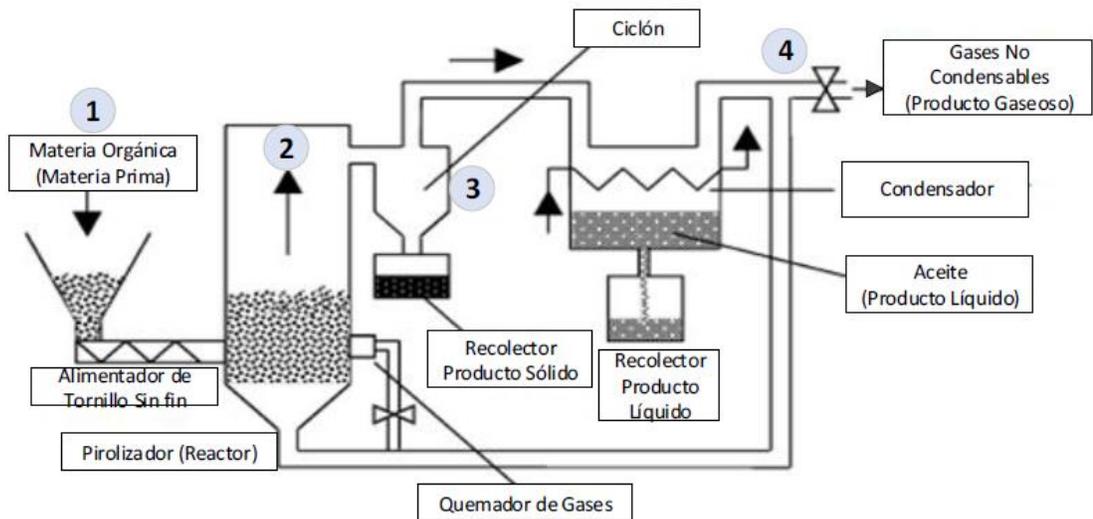
<sup>28</sup> BURTO, Andrea, La licuefacción de los gases o hacia las bajas temperaturas, Universidad Nacional Autónoma de México, Junio, 2006

<sup>29</sup> BASU. Op Cit., p.68.

<sup>30</sup> BASU, Op. Cit., p.69

<sup>31</sup> CHIVATÁ, Daniel, DUARTE, Cristian, Diseño conceptual de una planta para el aprovechamiento de caucho molido de neumáticos usados a partir de pirólisis. Fundación Universidad de América. Bogotá, Colombia. 2018. P.38

**Figura 3. Esquema de una planta de pirólisis de materia orgánica.**



Fuente: CHIVATÁ, Daniel, DUARTE, Cristian, Diseño conceptual de una planta para el aprovechamiento de caucho molido de neumáticos usados a partir de pirólisis. Fundación Universidad de América. Bogotá, Colombia.

- La materia orgánica se alimenta a una cámara de pirólisis que contiene sólidos calientes que permiten alcanzar la temperatura de pirólisis, a la cual comienza la descomposición.
- Los vapores condensables y no condensables liberados salen de la cámara, mientras que el carbón sólido producido permanece parcialmente en la cámara y parcialmente en el gas.
- El gas se separa del carbón y se enfría después del reactor. El vapor condensable se condensa como aceite de pirólisis; los gases no condensables salen de la cámara como gas producto.
- La fracción no condensable de gases, puede inyectarse en un quemador para calentar la cámara de pirólisis. De forma similar, el carbón sólido puede recogerse como un producto comercial o quemarse en una cámara separada para producir energía en forma calor, la cual es necesaria para la pirólisis.

**1.3.2 Tipos de pirólisis.** El proceso de pirólisis se puede llevar a cabo de diferentes maneras dependiendo la combinación de las condiciones de operación, como lo son: velocidad de calentamiento, ambiente de reacción, tiempo de residencia, temperatura máxima alcanzada, uso o no de un catalizador y forma de calentamiento. Lo anterior sumado a la naturaleza del reactor empleado, confiere diferentes tipos de pirólisis posibles a implementar, los cuales se presentan en la Tabla 1<sup>32</sup>.

<sup>32</sup> BASU. Op., Cit., p.72

Tabla 1.Descripción de los tipos de pirólisis según las condiciones de operación manejadas.

**CARACTERÍSTICAS DE ALGUNOS TIPOS DE PIROLISIS**

Proceso de Pirólisis	Tiempo de Residencia	Tasa de Calentamiento	Temperatura Final (°C)	Productos
<b>Carbonización Convencional</b>	Días	Muy Baja	400	Carbón
	5 – 30 Minutos	Baja	700	Ceniza, Aceite Pirolítco, Gas
<b>Rápida</b>	< 2 Segundos	Muy Alta	500	Aceite Pirolítco
<b>Flash</b>	< 1 Segundos	Alta	<650	Aceite Pirolítco, Químicos, Gas
<b>Ultra-Rápida</b>	< 0,5 Segundos	Muy Alta	1000	Químicos, Gas
<b>Al Vacío</b>	2- 30 Segundos	Media	400	Aceite Pirolítco
<b>Hidropirólisis</b>	< 10 Segundos	Alta	<500	Aceite Pirolítco
<b>Metano - Pirólisis</b>	< 10 Segundos	Alta	>700	Químicos

Fuente: BASU, Prabair. Biomass Gasification and Pyrolysis. Practical Design and Theory. Burlington, USA 2010.

Independientemente de las condiciones seleccionadas para el proceso (Ver Tabla 1) y junto a la naturaleza del reactor, la pirólisis es un proceso de degradación térmica en ausencia de oxígeno que demanda energía en forma de calor para llevar a cabo las reacciones de craqueo térmico; por lo cual, la forma en cómo se aporta el calor al proceso la divide en dos grandes tipos<sup>33</sup>:

- **Calentamiento directo.** La transferencia de calor se da por convección y conducción, en donde la energía es proporcionada directamente por gases de combustión o sólidos inertes precalentados que entran en contacto directo con la materia prima a procesar<sup>34</sup>.
- **Calentamiento indirecto.** También conocido como calentamiento alotérmico, en donde la transferencia de calor se da por conducción y radiación de las paredes del reactor, la fuente de calentamiento más usada son gases de combustión provenientes de un quemador o empleando sólidos inertes precalentados en cámaras de combustión<sup>35</sup>.

<sup>33</sup> ELÍAS, Xavier. La Pirólisis. En: Tratamiento y valorización energética de residuos. 1 ed. Ediciones Díaz de Santos. Madrid, España. 2012. p. 478-481.

<sup>34</sup> Ibíd., p. 480.

<sup>35</sup> Ibíd., p. 480 -481.

**1.3.3 Tipos de reactores de pirólisis.** La etapa de reacción donde se lleva a cabo el proceso de pirólisis puede llevarse a cabo usando diferentes tecnologías que dependen de la naturaleza del reactor y aspectos prácticos de su operación<sup>36</sup>, a continuación se presentan los principales tipos de reactores según la literatura y por su aplicabilidad industrial:

- **Reactor de lecho fluidizado.** Es el reactor más estudiado y desarrollado debido a su amplia aplicabilidad en la industria petrolera para reacciones de cracking catalítico, tiene una configuración vertical y en procesos de pirólisis la materia prima es alimentada por la parte superior del reactor para que al llegar al fondo entre en contacto con el medio fluidizado de transferencia de calor, el cual es por lo general es arena u otro sólido inerte<sup>37</sup>.

El medio fluidizado cumple la función de mejorar la transferencia de calor o actuar como catalizador del proceso, además su calentamiento puede ser directo o de forma indirecto por medio del gas de fluidización que es de carácter inerte con respecto a la materia prima o sustrato a descomponer térmicamente.

En la Figura 4 se presenta un esquema para un proceso de pirólisis que emplea un reactor de lecho fluidizado<sup>38</sup>, en donde se observan las operaciones de separación características de este reactor como lo es el ciclón, que separa la corriente volátil y el material sólido en suspensión que contenga para después continuar con la etapa de condensación que separa el producto líquido y gaseoso.

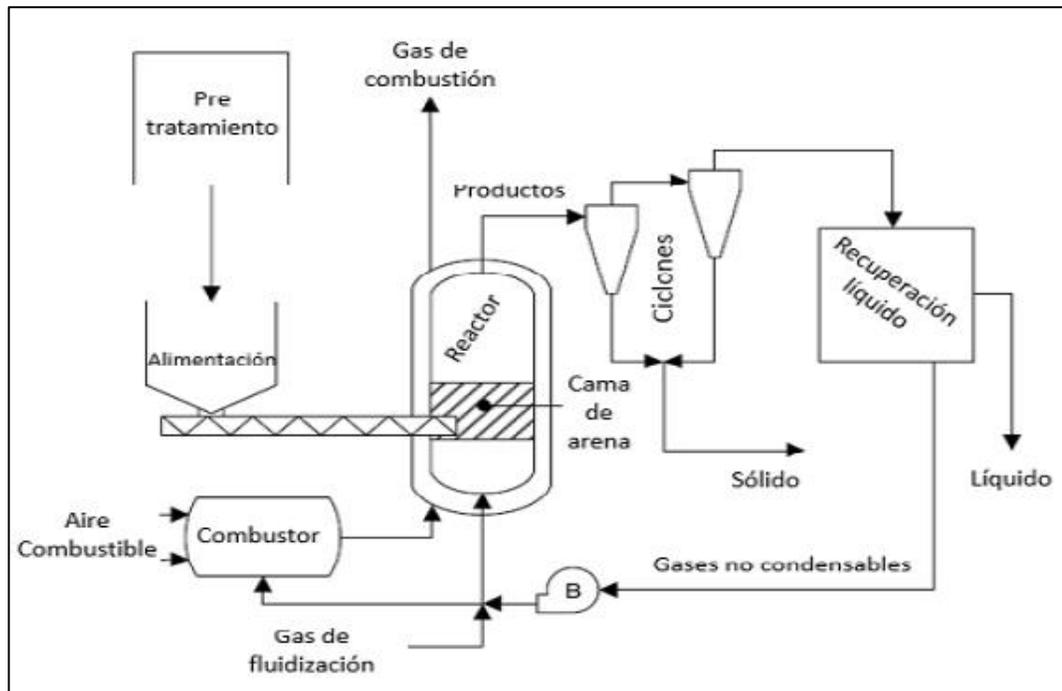
---

<sup>36</sup> CALDERÓN, Felipe S. La producción de combustibles vehiculares a partir de plástico de desecho. 1ed. Dr. Calderón Laboratorios. Bogotá D.C., Colombia, 2016. p. 163-165

<sup>37</sup> FONSECA, William. Evaluación de reactor de lecho fluidizado en el proceso de pirólisis catalítica usando desecho de caucho de llanta. Universidad de los Andes. Bogotá D.C. 2016.

<sup>38</sup> *Ibíd.*, p. 24.

**Figura 4. Esquema de un proceso de pirólisis con reactor de lecho fluidizado con calentamiento indirecto, tolva de alimentación, ciclón y condensador de líquidos.**



Fuente: FONSECA, William. Evaluación de un reactor de Lecho Fluidizado en el proceso de pirólisis catalítica usando desecho de caucho de llanta. Universidad de los Andes. Departamento de Ingeniería Química. Bogotá D. C., Colombia. 2016.

- **Reactor de cono rotatorio.** Consta de un recipiente de reacción vertical donde la materia prima está en contacto directo con un lecho de calentamiento de arena u otro sólido inerte, donde se mezcla mecánicamente aprovechando el momento angular del cono<sup>39</sup>. Esto reduce el consumo de gas de fluidización y mejora la transferencia de calor, su calentamiento también puede ser directo o indirecto; sin embargo, no ha sido escalado a escala industrial y su uso se ha restringido a plantas piloto<sup>40</sup>.

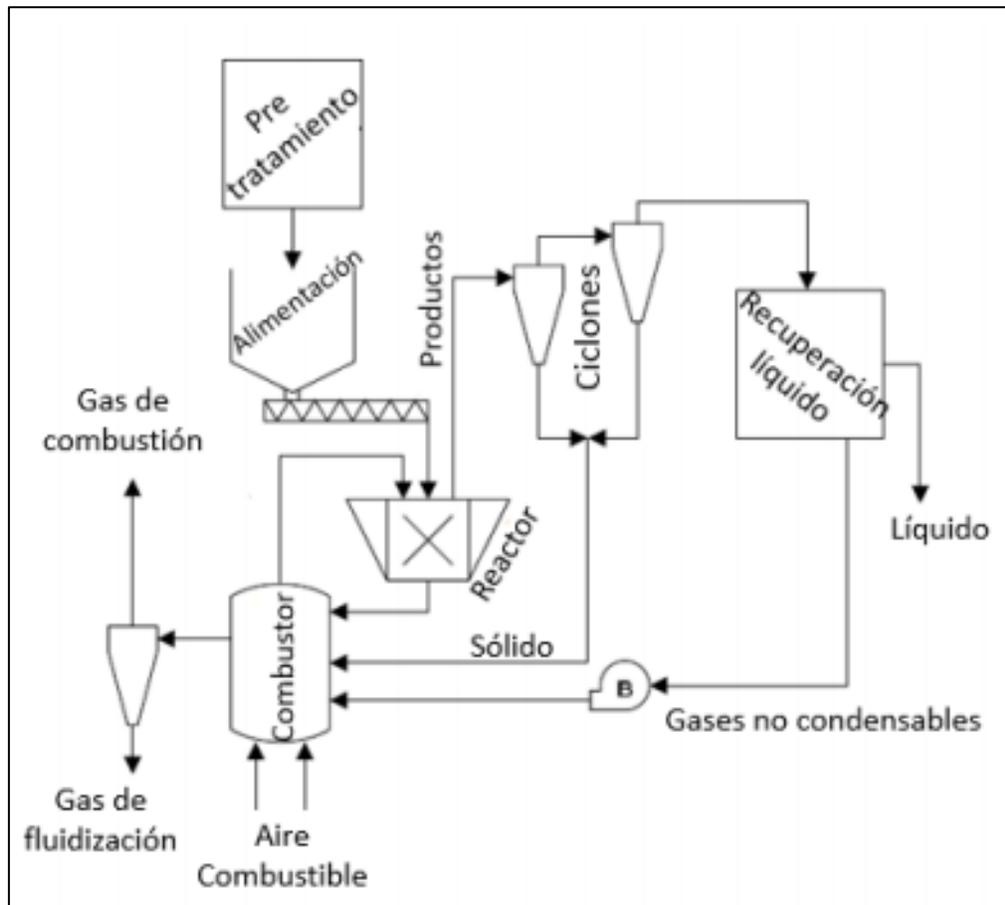
En la Figura 5 se presenta un esquema para un proceso de pirólisis que emplea un reactor de cono rotatorio<sup>41</sup>, en donde sumado al ciclón se observa una cámara de combustión que permite aprovechar tanto los gases del proceso de pirólisis o gases no condensable como el producto sólido en el calentamiento del proceso.

<sup>39</sup> SÁNCHEZ, Daniel Jose. Synthetic diésel production through catalytic pyrolysis of biomass-waste tyre mixtures. Trabajo de grado Maestría en ciencias en ingeniería Química. Universidad de los Andes. Bogotá, 2015. P.9-10.

<sup>40</sup> FONSECA. Op. Cit., p. 24.

<sup>41</sup> Ibíd. p. 24.

**Figura 5. Esquema de un proceso de pirólisis con reactor de cono rotatorio con calentamiento indirecto, tolva de alimentación, ciclón y condensador de líquidos.**



Fuente: FONSECA, William. Evaluación de un reactor de Lecho Fluidizado en el proceso de pirólisis catalítica usando desecho de caucho de llanta. Universidad de los Andes. Departamento de Ingeniería Química. Bogotá D. C., Colombia. 2016.

- **Reactor de tornillo sin fin.** Su funcionamiento es análogo al esquema de funcionamiento para un reactor de cono rotatorio (Ver Figura 6), en donde la materia prima entra en contacto directo con el lecho de calentamiento y se mezcla el conjunto en un recipiente horizontal por medio de un tornillo sin fin<sup>42</sup>.

Este no usa gas de fluidización y su calentamiento es de tipo indirecto por medio de una chaqueta de calentamiento con gases de combustión.

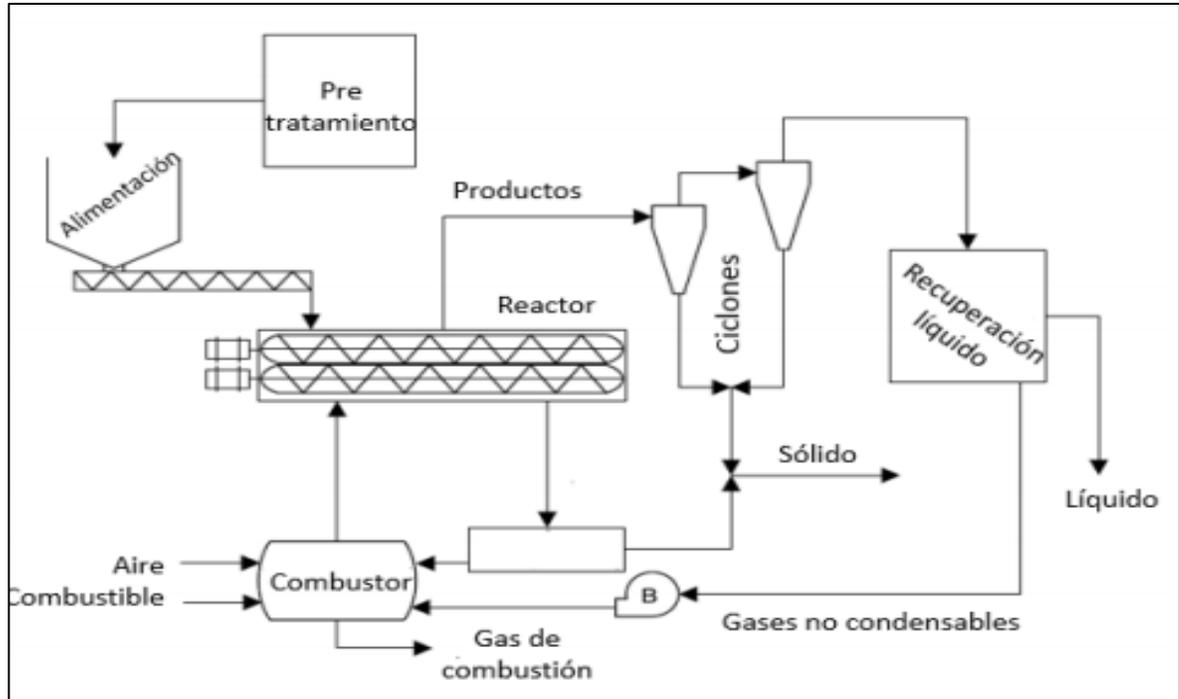
En la Figura 6 se presenta un esquema para un proceso de pirólisis que emplea un reactor de tornillo sin fin<sup>43</sup>, en donde aún se requiere el ciclón para separar

<sup>42</sup> Ibíd. p. 25.

<sup>43</sup> Ibíd. p.26.

material sólido suspendido de la corriente efluente del reactor para posteriormente recuperar el producto en fase líquida por medio de un proceso de condensación que permite separar el gas del proceso para su posterior quema en el combustor que provee la energía necesaria para el reactor de tornillo sin fin por medio de la chaqueta de calentamiento.

**Figura 6. Esquema de un proceso de pirólisis con reactor de tornillo sin fin con calentamiento indirecto, tolva de alimentación, colector de sólidos, ciclón y condensador de líquidos.**

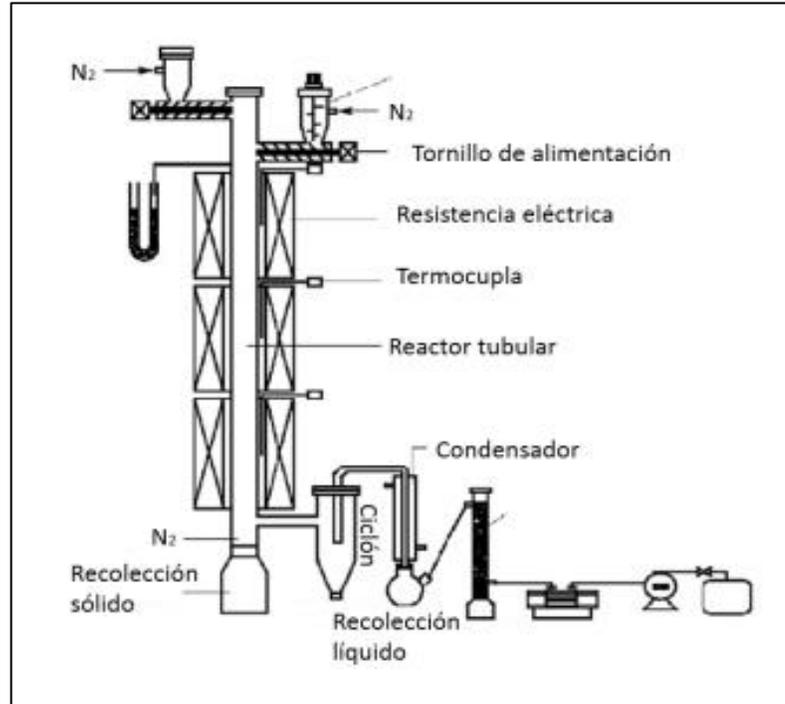


Fuente: FONSECA, William. Evaluación de un reactor de Lecho Fluidizado en el proceso de pirólisis catalítica usando desecho de caucho de llanta. Universidad de los Andes. Departamento de Ingeniería Química. Bogotá D. C., Colombia. 2016.

- **Reactores de caída libre.** Los reactores de caída libre son aquellos compuestos por un tubo en una posición vertical, donde la materia prima pasa y por transferencia de calor ésta es degradada. Las aplicaciones de este tipo de reactores son limitadas a procesos termoquímicos como la gasificación y pirólisis, sin embargo, también es aplicado para estudios de cinéticas<sup>44</sup>. Al igual que para el sistema de cono rotatorio la necesidad de un flujo de fluidización es minimizada debido a que la alimentación de la materia prima es en la cima del reactor. Un esquema del reactor de caída libre es ilustrado en la Figura 7.

<sup>44</sup> Ibid. p. 26.

**Figura 7. Esquema del reactor de caída libre**



Fuente: FONSECA, William. Evaluación de un reactor de Lecho Fluidizado en el proceso de pirólisis catalítica usando desecho de caucho de llanta. Universidad de los Andes. Departamento de Ingeniería Química. Bogotá D. C., Colombia. 2016.

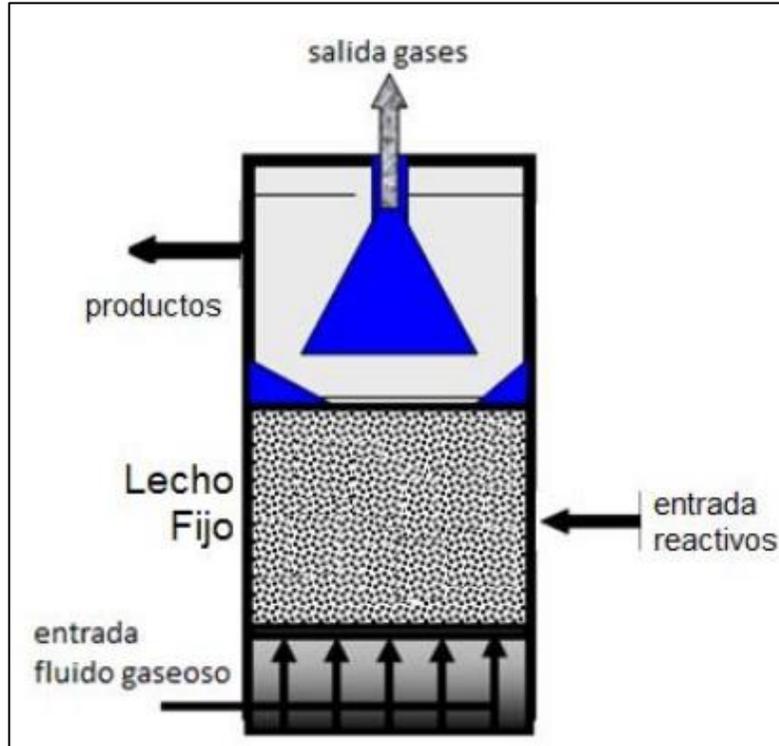
- **Reactor de lecho fijo.** Estos son recipientes verticales en donde se calienta únicamente el fondo del reactor lo que genera un perfil térmico a lo largo de las paredes del reactor<sup>45</sup>, su calentamiento es en la mayoría de los casos indirecto para evitar fluidización en el lecho fijo, aunque en algunos casos emplea una corriente de gas inerte de arrastre que extraiga la fracción volátil generada para evitar fenómenos de reflujo de condensados y reacciones de craqueo secundarias indeseadas<sup>46</sup>. Desde el punto de vista mecánico son de gran versatilidad y simplicidad de construcción; no obstante, tiene grandes desventajas operacionales, tales como: limitada transferencia de calor y masa, adhesión de material sólido o coque en las paredes del reactor, deformación del material de construcción del cuerpo del reactor y la limpieza y remoción del producto en fase sólida. En la Figura 8 se presenta el esquema de un reactor de lecho fijo<sup>47</sup>:

<sup>45</sup> CALDERÓN. Op. Cit., p. 38.

<sup>46</sup> Lbíd., p. 44-45

<sup>47</sup> OBANDO, Gabriel. Condiciones de Diseño de un Reactor de Pirólisis a escala de laboratorio para la obtención de Biocarbón a partir de Residuos Orgánicos Sólidos. Trabajo de Grado Magister en Desarrollo Sostenible y Medio Ambiente. Manizales, Colombia. Universidad de Manizales, 2015. p. 14-23.

Figura 8. Esquema de un reactor de Lecho Fijo con separador de gases



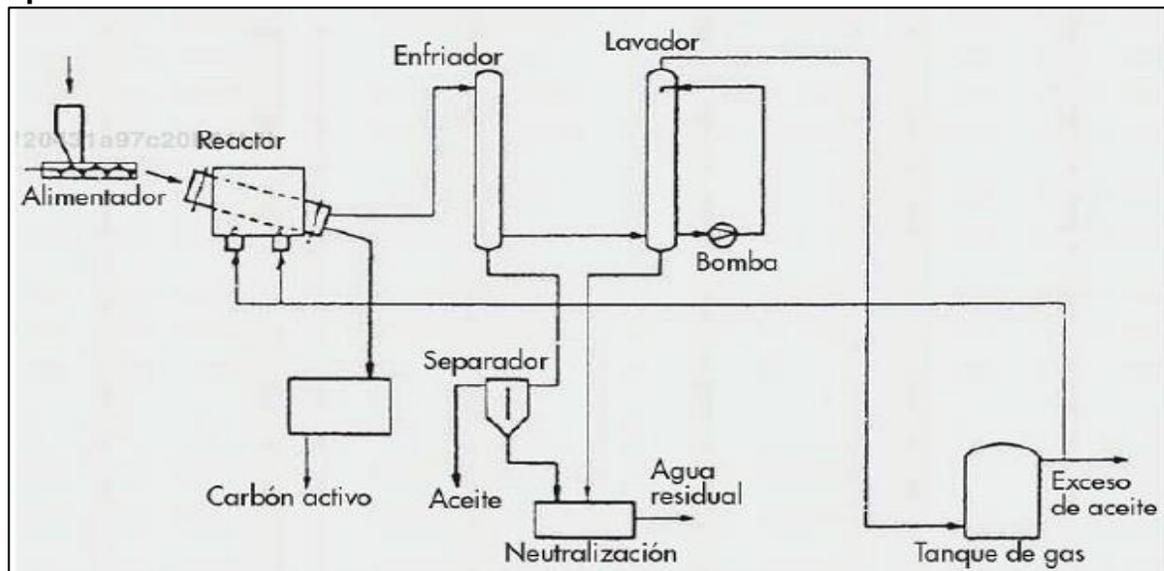
Fuente: OBANDO, Gabriel. Condiciones de Diseño de un Reactor de Pirólisis a escala de laboratorio para la obtención de Biocarbón a partir de Residuos Orgánicos Sólidos. Universidad de Manizales. Manizales, Colombia. 2015.

- **Reactores de horno rotatorio.** Es el tipo de reactor más usado industrialmente debido a su gran similitud con los hornos rotatorios de la industria cementera<sup>48</sup>, aunque en procesos de pirólisis su calentamiento se da de manera indirecta con gases de combustión para prevenir fluidización de la materia prima y operaciones de separación de material sólido suspendido en la fracción volátil. La configuración del reactor es totalmente horizontal o horizontal con una leve inclinación, lo cual permite operar el proceso de manera discontinua o continua respectivamente. Dada la rotación radial que tienen sobre su propio eje, se garantiza una mayor área de transferencia de calor y mayores coeficientes de transferencia de masa y calor dentro de la masa de reacción debido a la remoción continua del material en las paredes internas del reactor. Además, este tipo de reactores permite separar el producto sólido de la fracción volátil en el mismo reactor, lo cual evita operaciones de separación como ciclones. En la Figura 9 se presenta un esquema para un proceso de pirólisis que emplea un reactor de horno rotatorio, que opera de forma continua<sup>49</sup>.

<sup>48</sup> SÁNCHEZ. Op. Cit., p. 14.

<sup>49</sup> ELÍAS. Op. Cit., p. 483.

**Figura 9. Proceso de pirólisis con reactor de horno rotatorio inclinado de operación continuúa.**



Fuente: ELÍAS, Xavier. La Pirólisis. En: Tratamiento y valorización energética de residuos. 1 ed. Ediciones Díaz de Santos. Madrid, España. 2012.

**1.3.4 Caracterización de los productos del proceso de pirólisis.** Los productos que se obtienen de un proceso de pirólisis a nivel general<sup>50</sup> se clasifican en tres tipos principalmente los cuales son aprovechados energéticamente: Producto sólido (ceniza o carbonilla), producto líquido (Aceite) y el producto gaseoso (gases condensables y no condensables).

- **Carbonilla (producto sólido).** El producto sólido de la pirólisis conocido como carbonilla hace referencia según Castells y Velo<sup>51</sup>, a la fracción de hidrocarburos más pesada de la biomasa la cual no se logra convertir en vapor durante el proceso, por lo que no sale ni como aceite ni como gas.
- **Aceite (producto líquido).** El producto líquido de la pirólisis según Castells y Velo<sup>52</sup>, contiene moléculas de hasta treinta y cinco carbonos, correspondientes a una amplia gama de hidrocarburos como: parafinas, olefinas, ceras, aromáticos y naftenos; estos compuestos pasan a la fase de vapor como consecuencia de las altas temperaturas de operación del reactor y quedan en fase líquida al condensarse.

<sup>50</sup> BASU. Op. Cit., p. 70.

<sup>51</sup> CASTELLS, Xavier Elías y VELO GARCÍA, Enric. La pirólisis. Tratamiento y valorización energética de residuos. Ediciones Díaz de Santos. España. 2013. p. 88.

<sup>52</sup> Ibíd., p 88.

- **Gases incondensables (producto gaseoso).** Este producto pirolítico, está conformado principalmente según Castells y Velo<sup>53</sup>, por las moléculas más pequeñas que se separan de las cadenas carbonadas de la biomasa; es decir de compuestos de uno a cuatro carbonos como el metano (CH<sub>4</sub>), el propano (C<sub>3</sub>H<sub>8</sub>) y el butano (C<sub>4</sub>H<sub>10</sub>); además de gases no pirolíticos como el hidrógeno (H<sub>2</sub>), el dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) y el monóxido de carbono (CO).

## 1.4 PIRÓLISIS DE CAUCHO

“La fabricación de neumáticos es una de las principales aplicaciones del caucho”<sup>54</sup>. Así Hervás<sup>55</sup>, expone que el neumático se compone principalmente de caucho y aditivos en cantidades diferentes como óxido de zinc, antioxidantes, negro de humo, azufre, entre otros. Miranda, Segovia y Sosa<sup>56</sup>, expresan que en los últimos tiempos la industria del caucho ha experimentado un proceso de mundialización, debido al incremento en el uso vehicular. Castro<sup>57</sup>, plantea que el problema radica en la disposición final de las llantas ya que su confinamiento es en los rellenos sanitarios o la quema de los mismos generando emisiones de gases que contienen partículas nocivas para el entorno, causando grandes problemas ambientales. El aprovechamiento de esos residuos sólidos está en la mira debido a que son una buena alternativa para la obtención de energía.

La pirólisis de caucho es un proceso que en la actualidad en diferentes países es una ruta prometedora para convertir los residuos de NFUs en combustible en ausencia de oxígeno a una temperatura entre 300 y 800 °C<sup>58</sup>, por medio de este proceso se genera la formación de los productos líquidos, gaseosos y sólidos.

**1.4.1 Variables de importancia en el proceso de pirólisis del caucho.** Las variables o parámetros más influyentes en los procesos de pirólisis de residuos de neumáticos para la obtención de los productos deseados son: temperatura y presión de operación, velocidad de calentamiento, tamaño de partícula, tiempo de residencia. Estas variables antes mencionadas son variables de diseño, debido a que son fijadas por los investigadores y según ellas se obtienen rendimientos y resultados diferentes.

---

<sup>53</sup> *Ibíd.*, p. 88.

<sup>54</sup> FULLANA, Andres. Pirólisis y combustión de neumáticos usados y lodos de depuradora. Trabajo de grado. Universidad de Alicante. 2001.

<sup>55</sup> HERVAS RAMIREZ, Lorenzo. Los residuos urbanos y asimilables. Andalucía.: Consejería de medio ambiente, 2003., p. 281.

<sup>56</sup> MIRANDA, Rosa del Carmen; SEGOVIA MARTÍNEZ, Ciro César y SOSA BLANCO, Cesar Alberto. Pirólisis de llantas usadas: Estudio cinético. En: Información tecnológica. 2006. Vol. 17, no. 2, p 8.

<sup>57</sup> CASTRO, Guillermo. Reutilización, reciclado y disposición final de neumáticos. Universidad de Buenos aires. 2007. 2 p

<sup>58</sup> ACOSTA Rolando Andrés, MONCADA Silvia Juliana, GAUTHIER-MARADEI Paola, NABARLAT Debora Alcida Estudio preliminar de la producción de aceite y carbón mediante pirólisis intermedia de caucho de llantas usadas. Universidad Industrial de Santander, Grupo de Investigación INTERFASE, Escuela de Ingeniería Química. Bucaramanga, Santander, Colombia

A continuación se describen las variables antes mencionadas en función de la influencia para un proceso de pirólisis térmica tipo batch llevado a cabo en un horno rotatorio<sup>59</sup>:

- **Temperatura.** Es la variable de mayor importancia en el proceso, debido a que permite la degradación térmica del material a pirolizar y garantiza la estabilidad y rendimiento esperado de los productos de interés<sup>60</sup>. Esta degradación térmica ha sido estudiada por análisis termogravimétrico, en donde se identifica los valores o rangos de temperaturas logran pérdidas de peso apreciables en el material a pirolizar.<sup>61</sup>

Para el caso de los residuos de neumáticos, varios autores <sup>62 63 64</sup> reportan pérdidas de aproximadamente entre 470°C y 500°C, a temperaturas superiores como 800°C reportaron pérdidas de peso despreciables; a su vez, identificaron tres zonas de pérdida de peso apreciables que se dan en los siguientes rangos de temperatura: 100°C y 250 °C en donde se da el secado y descomposición de aditivos y plastificantes, 250°C y 350°C en donde se descompone el caucho natural (NR), y entre 350°C y 470°C en donde se descomponen el caucho estireno y caucho estireno- butadieno (BR y SBR).

Con respecto a su influencia sobre los productos, se da el siguiente comportamiento<sup>65</sup>: el rendimiento de producción de la fase gaseosa y líquida se incrementa con la temperatura dadas las reacciones más fuertes de craqueo térmico, pero a temperaturas superiores de 500°C los rendimientos de productos líquido disminuyen, la fase sólida presenta un incremento en el rendimiento hasta los 600°C y disminuye conforme disminuye la temperatura.

- **Presión:** La presión dentro del sistema de reacción afecta la naturaleza de los productos de la siguiente manera <sup>66</sup>: altas presiones promueven la formación de un producto líquido más viscoso, así como la tendencia a reacciones

---

<sup>59</sup> FONSECA, Op. Cit, p. 15-17.

<sup>60</sup>MESA, María Paula; ORTÍZ, Carol Ivonne. Evaluación del proceso de pirólisis para la producción de diésel a nivel de laboratorio a partir de residuos plásticos de industrias de alimentos. Trabajo de grado para optar al título de Ingeniero Químico. Bogotá D. C.: Fundación Universidad de América, 2016. p. 33.

<sup>61</sup> ACOSTA, R., *et al.* Estudio preliminar de la producción de aceite y carbón mediante pirólisis intermedia de caucho de llantas usadas. En: Revista de Investigación Universidad del Quindío. agosto, 2013. vol. 24, p. 139-141.

<sup>62</sup> *Ibíd.*, p. 141.

<sup>63</sup> BETANCUR, M., *et al.* Production of activated carbon by waste tyre thermochemical degradation with CO<sub>2</sub>. En: Journal of Hazardous Materials. septiembre, 2009. vol. 168, p. 882-887.

<sup>64</sup> EDUARD, L., *et al.* Tyre char preparation from waste tyre rubber for dye removal from effluents. En: Journal of Hazardous Materials. marzo, 2010. vol. 175, p. 151-158.

<sup>65</sup> SUHANYA, M. *et al.* Recovery of Oil from Waste Tyres using Pyrolysis Method: A Review. En: International Journal of Research in Engineering & Technology. Julio, 2013. vol. 1, no. 2, p. 81-85.

<sup>66</sup> MARTÍNEZ. Op. Cit., p. 198.

secundarias indeseadas debido al mayor tiempo de residencia de la fracción volátil formada, contrario a trabajar a bajas presiones o al vacío en donde el tiempo de residencia de la fracción volátil es muy corto y se garantiza mayores rendimientos de la fase líquida y gaseosa. No obstante ambos extremos de operaciones implican mayores costos en la construcción y operación del proceso de pirólisis, lo cual induce a la pirólisis a presiones moderadas o atmosféricas como la mejor alternativa en este tipo de procesos.

- **Velocidad de calentamiento.** También conocida como tasa o rampa de calentamiento expresada en °C/min, su influencia sobre el rendimiento de los productos es mínima cuando se tiene establecida la temperatura de operación, es decir cuando la operación es de carácter isotérmica, de manera que entre más rápido se caliente la materia prima a una temperatura dada, se produce menor fracción sólida y mayor fracción líquida y gaseosa<sup>67</sup>.
- **Tamaño de partícula.** Hace referencia al diámetro de partícula o tamaño promedio de la materia prima, en procesos termoquímicos se asumen por lo general que a menor tamaño de partícula se presentan comportamientos isotérmicos y no se dan limitaciones de transferencia de masa, es decir que no existen gradientes de temperatura o masa dentro del material<sup>68</sup>.
- **Tiempo de residencia.** Corresponde al tiempo de retención o al tiempo de reacción de la materia prima dentro del reactor, es la segunda variable de mayor relevancia en el proceso debido a que su magnitud determina el tamaño de los equipos y los servicios asociados a los mismos<sup>69</sup>. Además, su influencia sobre el rendimiento de los productos está ligada al tipo de reactor seleccionado para la pirólisis, que para el caso de reactores del tipo horno rotatorio de tipo industrial con capacidades de procesamiento de 5 y 10 ton/batch pueden llegar a ser de 24 hasta 30 horas<sup>70</sup>, los cuales dependen a su vez de la naturaleza de la materia prima.
- **Rendimiento de reacción.** Es un índice de producción para cada producto de interés del proceso de pirólisis, el cual se expresa en términos de la masa producida de cada producto con respecto a la masa alimentada inicialmente de materia prima<sup>71</sup>. Es considerada la variable de respuesta del proceso y es netamente dependiente de las variables de operación antes descritas.

**1.4.2 Caracterización de los productos de pirólisis de caucho.** La viabilidad de aplicar la pirólisis como método para reutilizar los neumáticos de desecho, depende

---

<sup>67</sup> SUHANYA. Op. Cit., p. 84.

<sup>68</sup> MARTÍNEZ, J., *et al.* Waste tyre pyrolysis- A review. En: Renewable and Sustainable Energy Reviews. 2013. Vol.23, p. 198-199

<sup>69</sup> MARTÍNEZ. Op. Cit., p. 201.

<sup>70</sup> CALDERÓN,. Op. Cit, p. 163-165

<sup>71</sup> FONSECA. Op. Cit., p. 15-18

del mercado existente para los productos obtenidos. Por esta razón, la caracterización de los productos de pirólisis y las posibilidades de su aplicación en otros procesos de la industria es muy importante. Los productos que se obtienen de un proceso de pirólisis a nivel general<sup>7273</sup>, se clasifica en tres tipos principales, según su estado físico: Fase sólida- (ceniza o carbonilla), fase líquida- (alquitranes, hidrocarburos y agua) y fase gaseosa- gas (gases condensables y no condensables).

- **Residuo sólido (negro de humo).** Constituye el producto en fase sólida del proceso, que contiene Negro de Humo y otros minerales o componentes inorgánicos presentes en el NFUs<sup>74</sup>. A su vez, varios estudios han informado de la producción de carbonos y carbón activo de los neumáticos de desecho<sup>75</sup>, estos carbonos activos se han utilizado para adsorber fenoles, tintes y metales básicos, fenoles, butano y gas natural. Las características del carbono (especialmente el área específica) están fuertemente influenciadas por la naturaleza del agente activador (vapor o CO<sub>2</sub>) y la temperatura del proceso. Basado en la tecnología actual y en los resultados de la literatura, la activación de los residuos sólidos de neumáticos por debajo de 700 °C parece poco práctica<sup>76</sup>. Además, el tamaño de partícula del caucho del neumático tiene influencia sobre la porosidad del carbono resultante, generado por la activación de vapor.

A continuación, se presenta el análisis próximo y elemental realizado por varios autores para carbón pirolítico junto al valor promedio estimado.

---

<sup>72</sup> JUMA, M, *et al.* Pyrolysis and Combustion of scrap Tyre. En: Petroleum & Coal. febrero, 2006. vol. 48, no. 1, p. 15-16.

<sup>73</sup> BASU. Op. Cit., p. 70.

<sup>74</sup> JUMA. Op. Cit., p 15-26.

<sup>75</sup> TAVERA, C., *et al.* Production of Oil and Char by Intermediate Pyrolysis of Scrap Tyres: Influence on Yield and Product Characteristics. En: Chemical Engineering Journal. 2015. vol. 13, p. 189-200

<sup>76</sup> JUMA. Op. Cit., p. 21.

**Tabla 2. Análisis próximo y elemental para carbón pirolítico**

REFERENCIA	Travera <sup>77</sup>	Li <sup>78</sup>	Casu <sub>79</sub>	Martínez <sup>80</sup>	Roy <sub>81</sub>	Ponderado
<b>Análisis próximo (Base Seca)</b>						
Material	6,94	7	11,08	7,01	7,7	7,95
Volátil (%p)						
Cenizas (%p)	13,78	14,77	13,6	14,77	13,1	14
Carbón Fijo (%p)	79,87	78,22	78,42	78,22	79,2	78,79
<b>Análisis Elemental (Sin ceniza)</b>						
C (%p)	92,41	94,83	95,61	94,84	94,20	94,38
N (%p)	0,42	0,62	0,31	0,73	0,30	0,48
H (%p)	0,82	1,71	1,49	1,71	1,20	1,39
S (%p)	2,57	2,83	2,59	2,83	4,20	3,0
O (%p)	3,78	-	-	-	-	0,76

Fuente: Elaboración propia basada en CHIVATÁ, Daniel, DUARTE, Cristian, Diseño conceptual de una planta para el aprovechamiento de caucho molido de neumáticos usados a partir de pirólisis. Fundación Universidad de América. Bogotá, Colombia.

- **Líquidos pirolíticos (fuel Oil).** La fase líquida es el producto más importante del proceso de pirólisis de neumáticos. Laresgoiti<sup>82</sup>, presenta una caracterización detallada de todos los líquidos de pirólisis obtenidos a 300, 400, 500, 600 y 700 °C, a su vez, informa que los líquidos derivados de neumáticos son una mezcla compleja de compuestos orgánicos C<sub>6</sub>-C<sub>24</sub>, que contienen una gran cantidad de compuestos aromáticos (53,4-74,8%), algunos compuestos nitrogenados (2,47-3,5%) y algunos compuestos oxigenados (2,29-4,85%). Cualitativamente, el aceite posee una fracción alifática de alcanos y alquenos junto a una fracción aromática.

Por su parte, el poder calorífico de los líquidos pirolíticos o GCV “*Gross Calorific Value*” de 42 MJ/kg, es incluso superior al especificado para los aceites de calefacción comerciales, pero el contenido de azufre en porcentaje en masa (1-1,4%) es cercano o ligeramente superior al valor límite permitido ambientalmente en muchos países. El aceite pirolítico al ser sometido a procesos de destilación, puede producir productos químicos útiles, tales como: benceno, tolueno, xileno

<sup>77</sup> LI, S.Q. *et al.* Pilot-Scale pyrolysis of scrap tyres in a continuous rotatory kiln reactor. En: Industrial & Engineering Chemistry Research. Junio, 2004. vol 43, p. 5141-5143

<sup>78</sup> LI, S.Q. *et al.* Pyrolysis process for the treatment of scrap tries: preliminary experimental results. En: Waste Management. Junio, 2002. vol 22, p. 917-923.

<sup>79</sup> LI, . Op. Cit, p. 920.

<sup>80</sup> MARTÍNEZ. Op. Cit., p. 206-207.

<sup>81</sup> ROY, C. *et al.* Conversion of used tyres to Carbon Black an Oil by pyrolysis. En: Rubber Recycling. Taylor & Francis Group, 2005. p. 437-460.

<sup>82</sup> LARESGOITI, M.F, *et al.* Characterization of the liquid products obtained in tyre pyrolysis. En: Journal of Analytical and Applied Pyrolysis. Junio, 2004. vol. 71, p. 917-934.

y limoneno, dependiendo del tipo de neumáticos de desecho pirolizados y de las condiciones de operación del proceso de pirólisis<sup>83</sup> esta es una de las aplicaciones más comprometedoras; sin embargo, el aceite de pirólisis se usa principalmente en procesos de combustión para calentamiento<sup>84</sup> que se lleva a cabo en hornos, calderas, secadores, quemadores, lo cual lo cataloga como un crudo o aceite combustible de uso industrial.

- **Gases pirolíticos.** Hace referencia a la fracción volátil generada del proceso de degradación térmica, que contiene dos componentes o fracciones: gases condensables (vapor) y gases no condensables (gas primario), los vapores, que están hechos de moléculas más pesadas, se condensan al enfriar con agua de enfriamiento, incrementando el rendimiento de producción de líquido.

La mezcla de gas no condensable contiene gases de menor peso molecular como dióxido de carbono, monóxido de carbono, metano, etano y etileno. Éstos no condensan con el enfriamiento convencional usando agua como refrigerante. Otros gases no condensables producidos por el agrietamiento secundario del vapor se denominan gases secundarios. El producto final de gas no condensable es por lo tanto una mezcla de gases primarios y secundarios, y su rendimiento de producción está ligado a las múltiples configuraciones de operación, que puede tener el proceso.

A modo de ejemplo, Berrueco<sup>85</sup> obtuvo un rendimiento porcentual de gas del 2,4 - 4,4% en masa, comparado con Chang<sup>86</sup> del 30-53% en masa; por otra parte, Laresgoiti<sup>87</sup>, utilizando una autoclave en una atmósfera de nitrógeno a temperaturas entre 400 y 700 ° C, encontró que los gases pirolizados consistieron en CO, CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>S e hidrocarburos como CH<sub>4</sub>, C<sub>2</sub>H<sub>4</sub>, C<sub>3</sub>H<sub>6</sub> y C<sub>4</sub>H<sub>8</sub> y sus derivados insaturados. Berrueco, analizando los gases de pirólisis por cromatografía de gases, encontró que los principales gases producidos por el proceso de pirólisis son H<sub>2</sub>, CO, CO<sub>2</sub> e hidrocarburos CH<sub>4</sub>, C<sub>2</sub>H<sub>4</sub>, C<sub>3</sub>H<sub>6</sub> y C<sub>4</sub>H<sub>8</sub>. Roy<sup>88</sup> obtuvo gases por pirólisis al vacío, compuestos principalmente de H<sub>2</sub>, CO, CO<sub>2</sub> y unos pocos hidrocarburos gases.

---

<sup>83</sup>QUEK, Augustine, *et al.* Liquefaction of waste tyres by pyrolysis for Oil and chemicals- A review. En: Journal of Analytical and Applied Pyrolysis. mayo, 2013. vol. 101, p. 1-16.

<sup>84</sup> ECOPELROL, Colombia. Catálogo de productos. [En Línea]. [Citado 8 abril, 2019] disponible en: ([http://www.ecopetrol.com.co/especiales/Catalogo\\_de\\_Productos/pdf/Ecopetrol%20Combustoleo%20VSM-01.pdf](http://www.ecopetrol.com.co/especiales/Catalogo_de_Productos/pdf/Ecopetrol%20Combustoleo%20VSM-01.pdf).)

<sup>85</sup> BERRUECO, . Op. Cit., p 253.

<sup>86</sup> CHANG, YU-MIN. On pyrolysis of waste tyre: Degradation rate and product yields. En: Resources, Conservation and Recycling. Agosto, 1996. vol. 17, p. 125-139

<sup>87</sup> LARESGOITI, M.F, *et al.* Chromatographic analysis of the gases obtained in tyre pyrolysis. En: Journal of Analytical and Applied Pyrolysis. Mayo, 2000. vol. 55, p. 43-54.

<sup>88</sup> ROY, C *et al.* Recycling of scrap tyres to Oil and carbon black by vacuum pyrolysis. En: Resources, Conservation and Recycling. Septiembre, 1990. vol. 4, p. 203-213.

En general, los autores describieron los principales componentes de los gases de pirólisis como:  $H_2$ ,  $H_2S$ ,  $CO$ ,  $CO_2$ ,  $CH_4$ ,  $C_2H_4$ ,  $C_3H_6$ , junto con hidrocarburos ligeros. Los gases pirolíticos pueden ser aprovechados o realimentados al proceso para aprovechar su poder energético en procesos de calentamiento, como el reactor y a su vez ser empleados en proceso de gasificación.

## 2. DIAGNOSTICO DE LA GENERACIÓN DE REBABA DE CAUCHO

En el proceso productivo de calzado de la empresa Croydon Colombia S.A, se hace uso de caucho en varias secciones del zapato, tales como cintas, punteras, refuerzos, apliques y suela. Todos estos componentes posteriormente se vulcanizan obteniendo la estética y consistencia final del zapato, de acuerdo al modelo.

**Imagen 1. Zapatos de línea de calzado convencional, modelo Discovery bajo**



Fuente: Croydon Colombia S.A.

Una de las secciones más importantes del zapato es la suela, ya que es la que va a soportar el peso y uso del consumidor final. Por ende, cuenta con una resistencia y flexibilidad adecuada que permite comodidad a la hora de caminar, pero no se desgasta rápidamente por abrasión debida al suelo. (Ver imagen 1 y 2).

**Imagen 2. Suelas moldeadas y vulcanizadas, de los zapatos de la línea convencional**

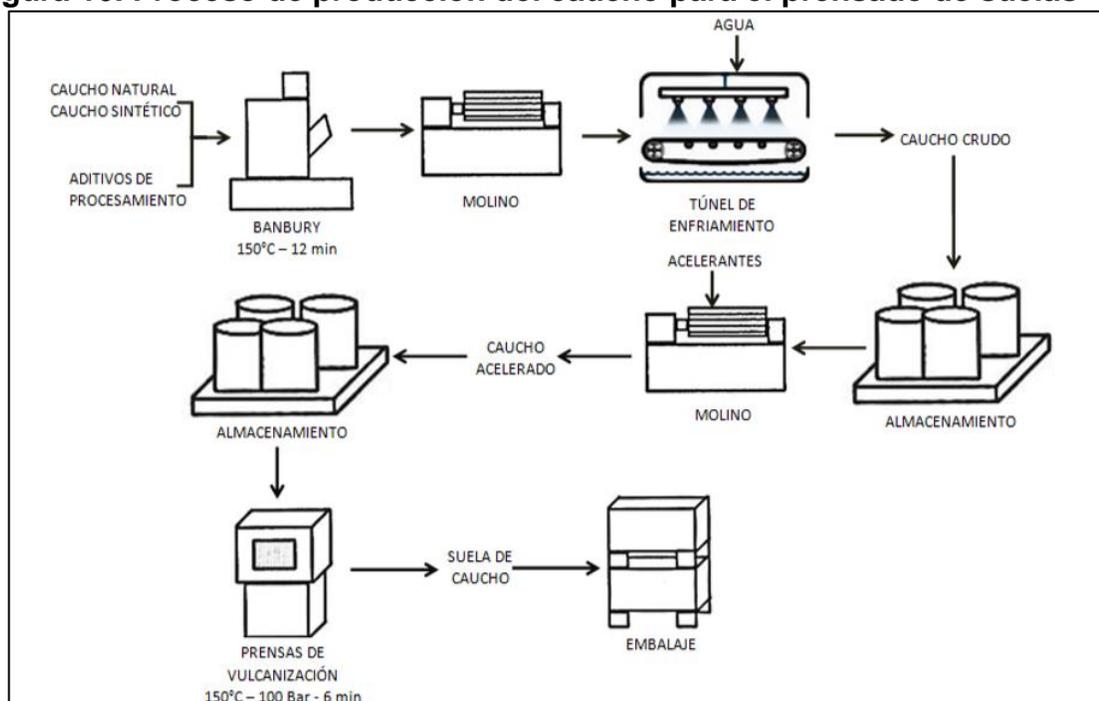


Fuente: elaboración propia, Croydon Colombia S.A.

## 2.1 PROCESO DE PRODUCCIÓN

Para el año 2018, Croydon Colombia S.A. generó un promedio mensual de 1217kg de residuos de caucho, correspondiente a un rango de 10-15% de la materia prima total empleada en el proceso, clasificados como rebaba o sobrantes del proceso de producción de calzado convencional, específicamente en la sección de prensado de suelas. El proceso comienza en el Banbury, en donde se realiza la mezcla de cauchos naturales y sintéticos con aditivos de procesamiento a una temperatura entre 150°C a 170°C por un tiempo máximo de 12 minutos; una vez mezclado se lleva al molino para homogenizar la mezcla y producir laminas, las cuales pasarán a través del túnel de enfriamiento en donde el caucho vuelve a la temperatura ambiente y está listo para ser almacenado hasta el momento de la producción de la suelas; en esta etapa del proceso se le denomina caucho crudo. Ver Figura 10.

**Figura 10. Proceso de producción del caucho para el prensado de suelas**



Fuente: JIMÉNEZ, Johanna, TORRES, Johanna. Evaluación del proceso de desvulcanización química a nivel laboratorio para los residuos de caucho procedentes de la suela en Croydon Colombia S.A. Fundación Universidad de América. Bogotá, Colombia. 2014. Basado en: Croydon Colombia S.A

Posteriormente el caucho crudo pasa nuevamente a través de varios molinos y se le adiciona el agente vulcanizante (principalmente azufre), para así producir caucho acelerado, manteniendo un sistema de refrigeración durante el proceso para evitar una vulcanización no deseada en el molino. A continuación el caucho acelerado es transportado al área de moldeado y prensado de suelas, en donde finalmente es

vulcanizado a una temperatura de 150°C y una presión de 100 Bar por un tiempo de 6 minutos<sup>89</sup>, ver Imagen 3.

Es un proceso simple con una alta cuota de manufactura, puesto que el operario encargado, es quién de acuerdo a la orden de producción selecciona el color y referencia de caucho a utilizar, la cantidad y el molde por par de suelas de acuerdo a la talla descrita en la orden de producción. Es por ello que luego de que el molde se cierra, se prensa; para vulcanizar el caucho y finalmente obtener la forma deseada para cada suela. A continuación, el operario recorta los bordes sobresalientes de caucho, este excedente de caucho vulcanizado se le conoce como rebaba de caucho.

**Imagen 3. Condiciones de operación del proceso de prensado de suelas**



Fuente: Elaboración propia, Croydon Colombia S.A.

La rebaba de caucho, es un desperdicio variable de un compuesto semielaborado de caucho; pues este proceso manual hace que la pericia del trabajador, sea la responsable de cuánta rebaba por suela puede salir, así mismo el tamaño de la misma pues, son ellos mismos quienes la recortan.

## **2.2 REBABA DE CAUCHO**

**2.2.1 Composición de la rebaba de caucho.** La composición aproximada de la mezcla se establece a continuación, considerando que pueden existir variaciones significativas en cuanto a la naturaleza de los aditivos y los colorantes dependiendo de la referencia y las características previas del residuo como caucho crudo y acelerado, ver Cuadro 1; antes del proceso de vulcanización en las prensas. En general se puede clasificar a la rebaba como una mezcla específica de caucho

---

<sup>89</sup> JIMÉNEZ, Johanna. Op. Cit., p 43-44

natural y sintético junto con aditivos especiales, para que el producto final adquiera características de resistencia y dureza<sup>90</sup>.

**Cuadro 1. Composición en porcentaje de caucho vulcanizado, con clasificación de confidencialidad**

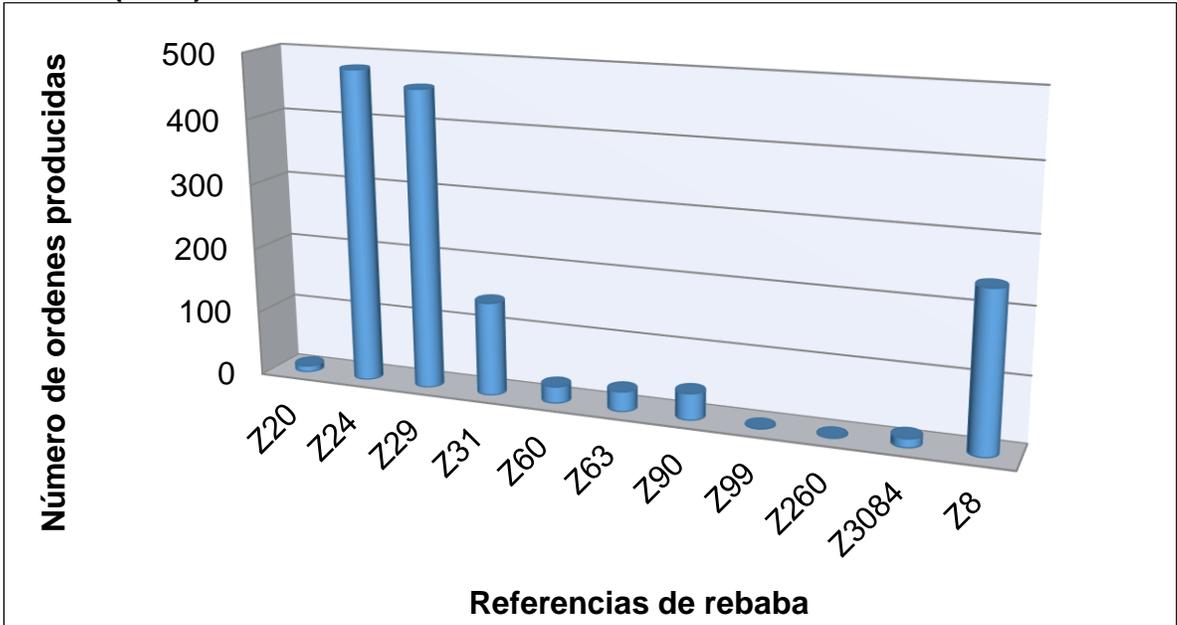
<b>Caucho crudo</b>		
<b>Componente</b>	<b>Composición %</b>	<b>Característica</b>
<b>Caucho Natural</b>	13	Elastómero
<b>Cis 1,4 – Poli Butadieno</b>	38	
<b>SBR (Styrene Butadiene Rubber)</b>	12	
<b>Aceite mineral Blanco</b>	3,2	Plastificante
<b>Bi- Fenilicos</b>	1,2	Antioxidante
<b>Cera incolora</b>	0,62	Antiozonante
<b>Ácido Esteárico</b>	1,3	Activador
<b>Poli etilenglicol</b>	1,1	
<b>Óxido de Zinc</b>	1,5	
<b>N-Ciclo Hexil Tioftalamida</b>	0,06	Inhibidor
<b>Oxido de Silicio</b>	17	Ayuda de Proceso
<b>Oxido de Silicio de alta dispersión</b>	8,2	
<b>Chem</b>	1,5	Tactificante
<b>Kluz</b>	1,3	
<b>Colorante</b>	0,02	Colorante
<b>Caucho acelerado</b>		
<b>Componente</b>	<b>Composición %</b>	<b>Característica</b>
<b>Caucho crudo</b>	98	Elastómero
<b>Azufre</b>	1,3	Agente Vulcanizante
<b>Tetrametil Tiuram Disulfuro</b>	0,4	Acelerante
<b>Z-Di Benzotinzol</b>	0,3	

Fuente: Elaboración propia. Basado en: JIMENEZ, Johanna, TORRES, Johanna. Evaluación del proceso de desvulcanización química a nivel laboratorio para los residuos de caucho procedentes de la suela en Croydon Colombia S.A. Fundación Universidad de América. Bogotá, Colombia. 2014. Basado en: Croydon Colombia S.A.

**2.2.2 Tipos de rebaba de caucho.** Al igual que los diseños de los zapatos cambian de acuerdo a criterios de moda y estilo del consumidor, lo hacen las referencias y colores del caucho utilizado para producir las suelas. Es por ello que la rebaba vulcanizada se presenta en varios tonos. Teniendo en común una composición base de caucho natural, SBR, butadieno y polibutadieno, más los aditivos o ayudas de proceso; entre ellas el colorante. Se ha establecido la siguiente frecuencia de uso para el año 2018. Ver las gráficas 1 y 2 correspondientes a los datos de este año para frecuencia y porcentaje de rebaba generado.

<sup>90</sup> Ibíd.,p. 45-46

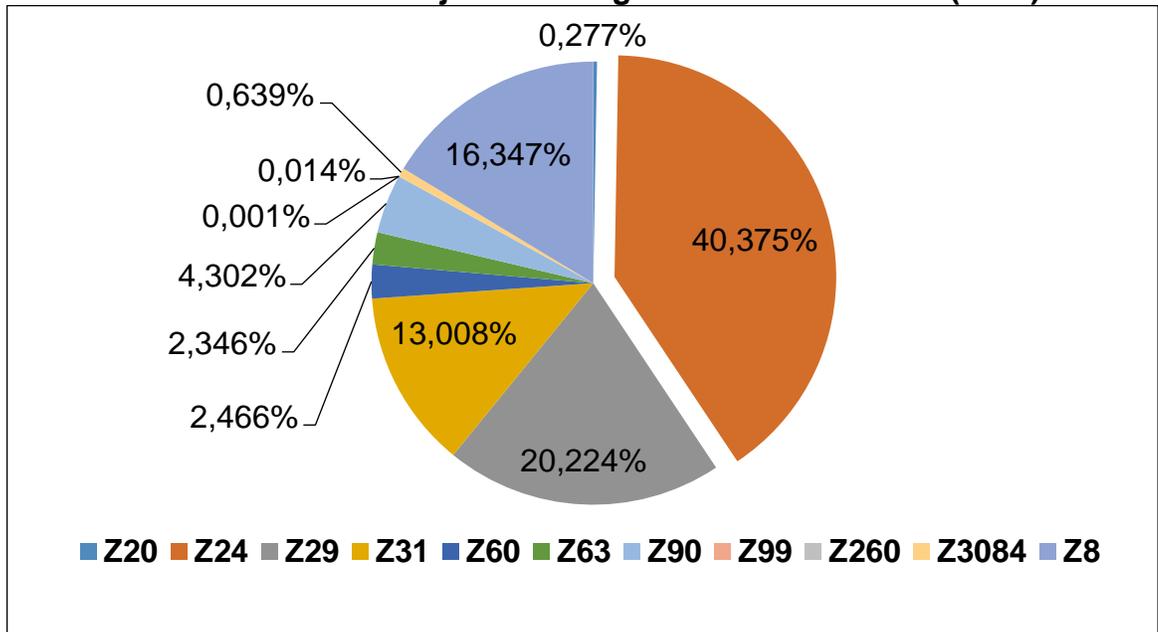
**Gráfica 1. Frecuencia anual de órdenes por tipo de rebaba de prensado de suelas (2018)**



Fuente: elaboración propia, con base en datos proporcionados por Croydon Colombia S.A.

De acuerdo al desarrollo de la producción de suelas del año 2018, se logra establecer que las referencias de mayor demanda son Z24, Z29, Z31 y Z8. Las cuales se encuentran en las líneas Discovery CB, Royal deportivos, Discovery alto-bajo negro-negro y en la bota Argyll respectivamente.

**Gráfica 2. Porcentaje anual de generación de rebaba (2018)**

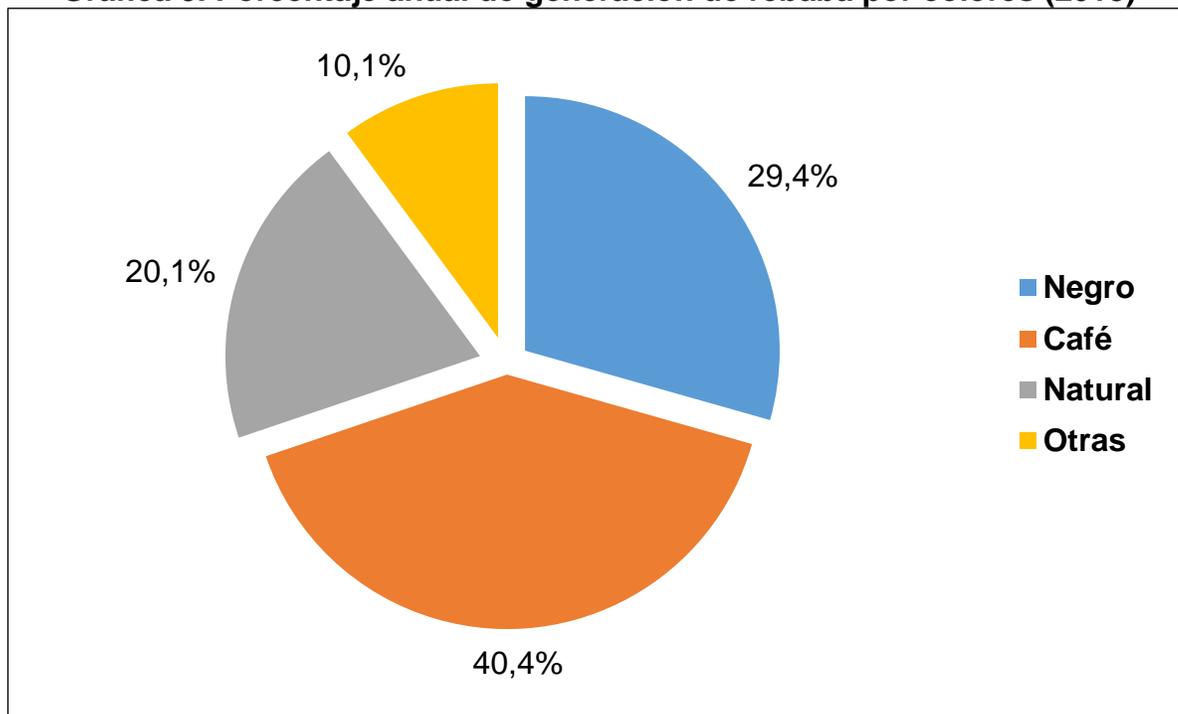


Fuente: elaboración propia, con base en datos proporcionados por Croydon Colombia S.A.

Al analizar en el mismo periodo de tiempo (año 2018) la cantidad de rebaba que se produce por referencia, considerando que la cantidad de materia prima empleada en el proceso de prensado de suelas varía de acuerdo a la cantidad de pares y a la talla de los mismos; se encontró que de las rebabas de interés previamente descritas ocupan los mayores porcentajes, el cual corresponde al 90% en comparación a las demás (10% Z20, Z60, Z63, Z90, Z99, Z260, Z3084). Tal como se observa en el Gráfico 2.

Estableciendo este grupo de estudio conformado por el 90% de la rebaba producida anualmente, la característica diferenciadora entre ellas se encuentra en su composición, en cuanto al colorante que utilizado en la mezcla. Respecto a esta se ordena el grupo de rebaba de interés, fraccionándolo según este factor en tres categorías: Rebaba negra, café y natural. Tal como se muestra en la Gráfica 4.

**Gráfica 3. Porcentaje anual de generación de rebaba por colores (2018)**



Fuente: elaboración propia, con base en datos proporcionados por Croydon Colombia S.A.

Para obtener el color negro se utiliza como colorante el negro de humo y para el color café una mezcla de óxido de hierro rojo y amarillo. En el caso del color natural este no trae colorante pero expresa el color amarillo claro propio de las balas de caucho.

## 2.3 CARACTERÍSTICAS DEL CAUCHO DE INTERÉS PARA FINES TÉRMICOS

Tal como se mencionó previamente, el proceso de pirolisis y sus rendimientos se ven influenciados considerablemente por la materia prima y las condiciones iniciales de la misma. Es por ello que conocer el estado previo de la alimentación al proceso, en este caso el caucho, resulta imprescindible puesto que pequeñas modificaciones en estos factores pueden conducir a alteraciones en los resultados e incluso a una interpretación errónea de los mismos; tal como afirma Hernández en su tesis<sup>91</sup>.

A continuación se mencionará solo aquellas características de importancia en los procesos termoquímicos, especialmente aquellos que son de interés a la hora de caracterizar un combustible sólido y que atañen al caucho como materia prima; tales como: la composición, el contenido de cenizas, la densidad, el contenido de humedad, la cantidad de muestra y el tamaño de partícula<sup>92</sup>.

**2.3.1 Composición.** El espectro de los productos pirolíticos depende de este factor, es por ello que un análisis elemental (CHONS), del caucho permitiría explicar diferencias cuantitativas en los rendimientos de los productos combustibles; es decir, sólido, líquido y gas producidos durante la pirolisis, de acuerdo a lo reportado por García<sup>93</sup>. De igual manera indicará el potencial térmico al establecerse especialmente el contenido de carbono, lo cual es un acercamiento al poder calorífico de la materia prima.

**2.3.2 Cantidad de muestra y tamaño de partícula.** Estos factores afectan fundamentalmente la transferencia de materia y de calor en el reactor<sup>94</sup>. Ya que las partículas más grandes tardan más tiempo en calentarse. Es decir que el diámetro de partícula o tamaño promedio de la materia prima, en los procesos termoquímicos se asume por lo general que a menor tamaño de partícula se presentan comportamientos isotérmicos y no se dan limitaciones de transferencia de masa<sup>95</sup>, es decir que no existen gradientes de temperatura o masa dentro del material. Por otro lado Fonseca<sup>96</sup> menciona el efecto que tiene esta variable sobre la velocidad de calentamiento; dado que en los diferentes experimentos realizados se notó que a medida que el tamaño de partícula aumentaba la tasa de calentamiento de la partícula disminuía.

---

<sup>91</sup> HERNANDEZ FÉREZ. Maria de Remedio. Evaluación de la pirolisis térmica y catalítica de polietileno en lecho fluidizado como técnica de reciclado. Influencia de las variables sobre los productos generados. Tesis doctoral en ciencias químicas. Alicante, España: Universidad de Alicante. Facultad de Ciencias. Departamento de Ingeniería química. 2007

<sup>92</sup> *Ibíd.*, p. 77

<sup>93</sup> GARCIA CORTEZ, Ángela Nubia. Estudio termoquímico y cinético de la pirólisis de residuos sólidos urbanos. Trabajo de grado Doctor en ciencias químicas. Alicante, España: Universidad de Alicante. Facultad de ingeniería. Departamento de química, 1993

<sup>94</sup> HERNÁNDEZ FÉREZ. *Op. Cit.*, p. 79

<sup>95</sup> CHIVATA, . *Op. Cit.*, p 44.

<sup>96</sup> FONSECA, . *Op. Cit.*, p 24.

En el caso del caucho en especial del obtenido de los NFUs, para tamaños de partícula inferiores a 5mm, el proceso de pirólisis está gobernado por la reacción química de degradación térmica; de manera que las limitaciones adscritas a fenómenos de transferencia de calor y masa pueden obviarse o despreciarse<sup>97</sup>.

**2.3.3 Densidad.** Una elevada densidad de la muestra a pirolizar puede evitar la salida de los productos de la materia prima; capturándolos como alquitranes y degradándolos en mayor proporción<sup>98</sup>, lo cual indica una disminución en la fracción sólida e hidrocarburos pesados.

También se considera como la causa de que algunos materiales produzcan más gas que otros, debido a que al quedar retenidas las partículas de alquitrán durante más tiempo<sup>99</sup> este tiende a craquearse por reacciones secundarias y por consecuencia de ello aumentar la fracción gaseosa del proceso.

**2.3.4 Contenido de humedad.** La materia prima con un alto contenido de agua, representa para el proceso de pirolisis un consumo de calor extra para secar la muestra<sup>100</sup> y la descomposición como tal iniciará a una temperatura inferior a la nominal, favoreciéndose la formación de la fracción sólida y líquida.

**2.3.5 Contenido de cenizas.** En cuanto a las cenizas presentes, se reporta que un aumento en este factor implica para el proceso de pirolisis un menor rendimiento en alquitrán y fracción líquida<sup>101</sup>; aumentando en ese orden la producción de gas y agua (de acuerdo a la presente en la materia prima).

**2.3.6 Poder calorífico.** Esta es la principal característica para considerar el uso final de la rebaba de caucho como combustible alternativo, al alimentarse a un proceso de pirolisis y que el control de la calidad de un combustible es de vital importancia para su incorporación o no en un proceso productivo.<sup>102</sup>

Es por ello que se debe tomar en cuenta la cantidad de energía interna contenida en el combustible, siendo que entre más alta sea la energía contenida, mayor será el poder calorífico. Se define el “poder calorífico de una sustancia o combustible

---

<sup>97</sup> MARTÍNEZ, J., *et al.* Waste tyre pyrolysis- A review. En: Renewable and Sustainable Energy Reviews. 2013. Vol.23, p. 198-199

<sup>98</sup> HERNÁNDEZ FÉREZ. Op. Cit.,p 79.

<sup>99</sup> GARCIA CORTEZ. Op.Cit.,p.14.

<sup>100</sup> *Ibíd.*,p. 15.

<sup>101</sup> *Ibíd.*,p. 13.

<sup>102</sup>ALS. ANÁLISIS CALIDAD DE COMBUSTIBLES ALTERNATIVOS Disponible: [https://www.alsglobal.es/noticias/ANALISIS-CALIDAD-DE-COMBUSTIBLES-ALTERNATIVOS\\_436.201](https://www.alsglobal.es/noticias/ANALISIS-CALIDAD-DE-COMBUSTIBLES-ALTERNATIVOS_436.201)

como la cantidad de calor que se genera, por kilogramo o metro cúbico de esa sustancia, al oxidarse de forma completa”<sup>103</sup>.

Existen dos tipos de poder calorífico, el poder calorífico superior y el poder calorífico inferior, el primero hace referencia a “la cantidad total de calor desprendido en la combustión completa de 1 kg de combustible cuando el vapor de agua originado en la combustión está condensado y se contabiliza, por consiguiente, el calor desprendido en este cambio de fase”; por otra parte el poder calorífico inferior hace referencia a “la cantidad total de calor desprendido en la combustión completa de 1 kg de combustible sin contar la parte correspondiente al calor latente del vapor de agua de la combustión, ya que no se produce cambio de fase, y se expulsa como vapor”<sup>104</sup>.

## 2.4 CARACTERIZACIÓN DE LA REBABA DE CAUCHO

**2.4.1 Análisis elemental.** Teniendo en cuenta la importancia de la composición de la materia prima en el proceso de pirolisis, se realiza una revisión bibliográfica que busca determinar la composición de la materia prima a través de este análisis, de forma teórica. La finalidad de este análisis es determinar los porcentajes en peso de carbono, hidrógeno, nitrógeno y azufre; de la rebaba de caucho. Sin embargo al no realizar el proceso experimental se tendrán en cuenta datos determinados para caucho en general y neumáticos fuera de uso.

De este análisis de acuerdo a las referencias citadas en la Tabla 3, que son ensayos realizados en caucho de llantas, se evidencia un alto porcentaje en el contenido de carbono; debido a que como se menciona en el capítulo anterior, el caucho es un polímero compuesto por diversas cadenas carbonadas, independientemente de su origen natural o sintético. Por otro lado considerando los aditivos de proceso que se añaden a la mezcla dependiendo del propósito, como en el caso del negro de humo en las mezclas para llantas, este se suma a la matriz carbonada. Adicionalmente el alto contenido de azufre se debe a su uso como agente vulcanizante.

A su vez este porcentaje tan alto en carbono indica que el caucho cumple con algunas de las propiedades que deben poseer los precursores de carbón activado, como son: que sean materiales ricos en carbono, con bajo contenido en componentes inorgánicos y que no sufra degradación durante su

---

<sup>103</sup> RODRIGUEZ GALBARRO, Hermenegildo. Tablas con los valores del poder calorífico de materiales y combustibles. [En línea]. [Consultado el 04 de mayo del 2019]. Disponible en: [https://ingemecanica.com/tutoriales/poder\\_calorifico.html](https://ingemecanica.com/tutoriales/poder_calorifico.html)

<sup>104</sup> BOTTA Néstor Adolfo. En: Red Proteger. [Sitio web]. Poder Calorífico. [Consultado el 04 de mayo del 2019]. Disponible en: [http://www.redproteger.com.ar/poder\\_calorifico.htm](http://www.redproteger.com.ar/poder_calorifico.htm).

almacenamiento<sup>105</sup>. Lo cual lo hace una materia prima con potencial como combustible sólido y de gran poder calorífico.

**Tabla 3. Datos de análisis elemental de caucho**

Elemento	Cardona <sup>106</sup>	Acosta et al. <sup>107</sup>	Fernández et al. <sup>108</sup>
<b>Carbono (%p)</b>	84	86	87,6
<b>Hidrógeno (%p)</b>	7,19	7,55	7,6
<b>Nitrógeno (%p)</b>	0,49	1,68	0,3
<b>Azufre (%p)</b>	1,42	1,6	2,01
<b>Oxígeno (%p)</b>	3,27	3,15	3,1

Fuente: Elaboración propia. Basado en: CARDONA, Luisa. Transformación termoquímica de neumáticos usados en una sola etapa en atmósfera de co2, para la obtención de carbón activado .Universidad pontificia bolivariana. Escuela de ingenierías. Facultad de ingeniería química. Medellín. 2014. ACOSTA Rolando Andrés, MONCADA Silvia Juliana, GAUTHIER-MARADEI Paola, NABARLAT Debora Alcida Estudio preliminar de la producción de aceite y carbón mediante pirolisis intermedia de caucho de llantas usadas. Universidad Industrial de Santander, Grupo de Investigación INTERFASE, Escuela de Ingeniería Química. Bucaramanga, Santander, Colombia y FERNÁNDEZ.A. M., BARRIOCANAL. C. and ALVAREZ. R. Pyrolysis of a waste from the grinding of scrap tyres. Journal of Hazardous Materials, vol. 203–204, pp. 236–43, Feb. 2012.

**2.4.2 Análisis próximo.** Para realizar la determinación de las características correspondientes al análisis próximo de la rebaba de caucho, se utilizan el paquete de normas establecidas por la AENOR (Agencia Española de Normalización) para fuentes biológicas y otras fuentes alternativas de energía, en sus equivalencias ISO. Este análisis se realiza para determinar los porcentajes de humedad, ceniza y materia volátil de las muestras; que tal como se mencionó anteriormente son características de importancia en los procesos termoquímicos. Para realizar las pruebas se redujo el tamaño de partícula de la rebaba de caucho inicialmente con el fin de facilitar su manipulación y cumplir las normas que sugieren un tamaño menor a 1mm. Para conocer en detalle sobre la caracterización realizada, (ver el anexo A).

<sup>105</sup> CARDONA, Luisa. Transformación termoquímica de neumáticos usados en una sola etapa en atmósfera de CO<sub>2</sub>, para la obtención de carbón activado .Universidad pontificia bolivariana. Escuela de ingenierías. Facultad de ingeniería química. Medellín. 2014.

<sup>106</sup> *Ibíd.*, p. 47.

<sup>107</sup> ACOSTA Rolando Andrés , MONCADA Silvia Juliana, GAUTHIER-MARADEI Paola, NABARLAT Debora Alcida. *Op.Cit.*, p. 141.

<sup>108</sup> FERNÁNDEZ.A. M., BARRIOCANAL. C. and ALVAREZ. R. Pyrolysis of a waste from the grinding of scrap tyres. Journal of Hazardous Materials, vol. 203–204, pp. 236–43, Feb. 2012

**2.4.2.1 Material Volátil.** Para la determinación del porcentaje de material volátil se empleó la norma ISO 18123:2015<sup>109</sup>. Un gramo de caucho y humedad promedio de 0,49 % se calentó a temperatura constante de 900°C±10°C durante 7 minutos en una mufla Thermolyne 1500. El porcentaje es calculado de la pérdida en masa de la muestra deduciendo la pérdida de masa por humedad, tal como se ve en la ecuación 2.

### Ecuación 2. Calculo de la cantidad de material volátil

$$V_d = \left[ \frac{100 (m_2 - m_3)}{m_2 - m_1} - M_{ad} \right] * \left[ \frac{100}{100 - M_{ad}} \right]$$

Fuente: INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARIZATION. Solid biofuels -Determination of the content of volatile matter. ISO18123.First edition.2015

#### Donde:

- $V_d$ : Material volátil en la muestra expresado como porcentaje en masa.
- $m_1$ : es la masa del crisol vacío.
- $m_2$ : es la masa del crisol y 1g de muestra antes de calentar.
- $m_3$ : es la masa del crisol y la muestra, luego de calentar.
- $M_{ad}$ : Humedad, como porcentaje en masa de la muestra determinada de acuerdo a la norma ISO18134.

**2.4.2.2 Humedad.** Para la determinación del contenido de humedad se usa la norma ISO18134:2015<sup>110</sup>. El procedimiento consiste en someter muestras de 1 g de materia prima, a una temperatura de 105 ± 2 °C hasta obtener un valor estable de la masa de materia prima. El calentamiento se realiza en un horno Thermolyne 1500 por una hora en la cual se tomó medición y se mantuvo por otra hora más en la cual la masa no presento mayor variación. La medición de la masa se debe realizar con una balanza con precisión de 0,1 mg y se debe presentar una desviación no mayor de 0,2%. El contenido de humedad obtenido es el valor de referencia para las demás pruebas de caracterización. A continuación la ecuación 3 describe la determinación de humedad ( $M_{ar}$ ) en porcentaje de masa.

### Ecuación 3. Calculo del contenido de humedad

$$M_{ar} = \frac{(m_2 - m_3) - (m_4 - m_5)}{(m_2 - m_1)} * 100$$

Fuente: INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARIZATION. Solid biofuels -Determination of moisture content-Oven dry method. ISO18134. First edition.2015

<sup>109</sup> INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARIZATION. Solid biofuels-Determination of the content of volatile matter. ISO18123.First edition.2015

<sup>110</sup> INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARIZATION. Solid biofuels-Determination of moisture content-Oven dry method. ISO18134.First edition.2015

**Donde:**

- $M_{ar}$ : Contenido de humedad de la muestra, expresado como porcentaje de masa.
- $m_1$ : es la masa del crisol vacío
- $m_2$ : es la masa del crisol y 1g de muestra.
- $m_3$ : es la masa del crisol y la muestra, luego del secado.
- $m_4$  y  $m_5$ : son la masa de referencia del crisol, el cual para esta caracterización no presentó variación y por ende se asume como constante.

**2.4.2.3 Cenizas.** Se determina el contenido de cenizas de la rebaba de caucho considerando la norma ISO 18122:2015<sup>111</sup>, se realiza con 1 g de caucho de 0,49% de humedad promedio. Inicialmente se calienta hasta 250 °C en 50 minutos y se mantiene a esta temperatura durante una hora y posteriormente se lleva hasta 550 °C y se mantiene esta temperatura por 2 horas.

**Ecuación 4. Calculo del contenido de cenizas**

$$A_d = \frac{(m_3 - m_1)}{(m_2 - m_1)} * 100 * \frac{100}{100 - M_{ad}}$$

Fuente: INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARIZATION. Solid biofuels-Determination Determination of ash content. ISO18122. First edition.2015

**Donde:**

- $A_d$ : contenido de cenizas en la muestra expresado como porcentaje en masa
- $m_1$ : es la masa del crisol vacío
- $m_2$ : es la masa del crisol y 1g de muestra antes de calentar.
- $m_3$ : es la masa del crisol y la muestra, luego de calentar.

**2.4.2.4 Poder calorífico.** Al igual que en el análisis elemental el poder calorífico de la rebaba de caucho se determina de forma teórica a través de una revisión bibliográfica, a partir de la cual se establece según Botta<sup>112</sup> el valor de esta propiedad varía de acuerdo al tipo de caucho; ya que para el natural se reporta un valor de 42 MJ/kg, mientras que para el caucho de neumáticos reporta un valor de 32,6 MJ/kg , sin embargo considerando que la rebaba es una mezcla de cauchos sintéticos y natural se espera un comportamiento similar a lo anteriormente descrito con un valor de poder calorífico en el rango de 32,6-45,8 MJ/kg.

**2.4.3 Propiedades físicas.** La determinación de las propiedades físicas de la materia prima y los productos sólidos son importantes para el estudio de los

---

<sup>111</sup> INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARIZATION. Solid biofuels-Determination of ash content. ISO18122. First edition.2015.

<sup>112</sup> BOTTA. Op.,. Cit.

mecanismos de transporte que se puedan presentar. Tal como se mencionó anteriormente, especialmente en la transferencia de calor.

**2.4.3.1 Densidad a granel.** La densidad a granel es la relación entre la masa y el volumen total. Esta densidad puede variar, dependiendo del grado de empaquetamiento de los granos y es mínima cuando la masa está suelta y alcanza un máximo cuando la masa se somete a vibración o apisonamiento. De acuerdo con los resultados se observó que el volumen de la masa cambia en diferentes mediciones, esto se debe a la acomodación inicial y el ángulo de reposo del sólido<sup>113</sup>. Para la prueba se utilizaron dos volúmenes, una probeta de 250 ml y un beaker de 800ml; y para la determinación se sigue el procedimiento de la norma UNE-EN 15103<sup>114</sup>, cuya directriz establece el llenado del recipiente, dejando caer la muestra desde una altura entre 20 y 30 cm. Posteriormente se somete a sacudidas leves para asentar la muestra y se rellena hasta cumplir con el volumen del recipiente; finalmente se pesa el recipiente lleno y vacío con el fin de establecer la masa que ocupa el recipiente con muestra. Se realizaron dos réplicas de cada ensayo.

**2.4.3.2 Tamaño de partícula.** Tal como se hizo referencia en el análisis próximo se realizó una disminución al tamaño de partícula de la rebaba, ya que esta originalmente sale del proceso como tiras irregulares de caucho. Para ello se probaron dos procesos; una pulverización con el fin de obtener material adecuado que cumpliera las normas seleccionadas para caracterización y paralelamente una molienda. De estos procesos se realizó un análisis granulométrico, que busca determinar la distribución por tamaños de las partículas de un material sólido; esto con el fin de conocer la distribución de tamaños de las partículas que componen una muestra separada mediante cedazos o tamices<sup>115</sup>. El análisis se realizó siguiendo la norma ISO 17827:2016<sup>116</sup>, la cual pide una condición de humedad menor al 20% y teniendo en cuenta la baja humedad teórica (tabla 4.) encontrada para el caucho no se realizó un secado previo de la rebaba.

La operación de tamizado se realizó para las muestras de rebabas Z24, Z29, Z31 y Z8; de las cuales solo la rebaba Z8 difiere un poco de las demás al provenir del prensado de tacones para bota de caucho, puesto que la rebaba corresponde al borde que sobresale de la suela luego del proceso de prensado en el calzado

---

<sup>113</sup> PRUCOMMERCIALRE. ¿Qué es la densidad a granel? [Sitio WEB]. Octubre 2010. [06, mayo. 2019]. Disponible en: <https://www.prucommercialre.com/que-es-la-densidad-a-granel/>

<sup>114</sup> ASOCIACIÓN ESPAÑOLA DE NORMALIZACIÓN. Biocombustibles sólidos. Determinación de la densidad a granel. UNE-EN15103.2010

<sup>115</sup> GARCÍA, Andreu César, et al. Prácticas de materiales de construcción – I.T. Obras Públicas. [En línea], 2009. p. 2. [Consultado en 06 de mayo del 2019]. Disponible en: <https://rua.ua.es/dspace/>

<sup>116</sup> **INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. Solid biofuels - Determination of particle size distribution for uncompressed fuels. ISO17827. First edition.2016**

convencional, pero en el caso de las suelas de las botas de caucho este borde tiende a ser más grueso (Imagen 4).

La operación de tamizado se realizó para cada una de las 4 muestras, cada una de 200 g en las dos condiciones (rebaba pulverizada y molida) durante 15 minutos utilizando una tamizadora marca Pinzuar LTRA (Ver anexo A y B), con 6 y 5 tamices de mallas diferentes, respectivamente (ASTM E-11:8). En el cuadro 2, se pueden observar los datos del tamizado y las especificaciones de las mallas utilizadas.

**Cuadro 2. Datos y equivalencias de las mallas utilizadas en el tamizado de las muestras pulverizadas y molidas respectivamente**

N° Tamiz	R. Pulverizada			R. Molida		
	Malla ASTM E11-87	TYLER Standard screen 1910	Abertura (mm)	Malla ASTM E11-87	TYLER Standard screen 1910	Abertura (mm)
0	8	8	2,357	4	4	4,715
1	10	9	1,982	5	5	3,965
2	12	10	1,667	6	6	3,334
3	14	12	1,402	8	8	2,357
4	16	14	1,179	10	9	1,982
5	18	16	0,991	-	-	-

Fuente: Elaboración propia, basado en la equivalencia internacional de tamices: WORDPRESS. Operaciones unitarias en ingeniería. Equivalencia internacional de tamices. Ivan Ramírez. [En línea]. [Consultado en 06 de mayo del 2019]. Disponible en: <https://ucatedraivan.files.wordpress.com/2014/08/equivalencia-internacional-de-tamices.pdf>.

**Imagen 4. Rebaba de caucho negra (Z31, suela de calzado convencional y z8, suela de bota)**



Fuente: elaboración propia

Adicionalmente se calculó el diámetro medio de partícula, siguiendo la ecuación 5.

**Ecuación 5. Cálculo del diámetro medio de partícula (Dm)**

$$Dm = \sum xi * Dpi$$

Donde:

- **Dm**= Diámetro medio de partícula (mm).
- **Xi**= Fracción másica.
- **Dpi**= Diámetro de partícula retenido en cada tamiz (mm).

**2.4.4 Análisis de resultados.** De acuerdo a lo planteado, para el desarrollo del análisis próximo se encuentran para la rebaba de caucho los datos descritos en la tabla 5, los cuales fueron similares a los reportados en la tabla 4. En cuanto a la humedad la rebaba de caucho se reporta incluso una humedad menor a la establecida bibliográficamente para llantas, lo cual confirma que no es necesario realizar un proceso de secado previo al proceso de pirolisis y que el poder calorífico de la rebaba como materia prima no se verá afectado durante el proceso de pirolisis, ya que un porcentaje significativo de humedad lo disminuye<sup>117</sup>. Sin embargo se evidencian diferencias en cuanto al contenido de cenizas y material volátil. Esto se puede relacionar a la calidad, cantidad y tipo de aditivos utilizados como rellenos reforzantes o diluyentes del caucho, dado que el contenido de cenizas se obtiene al eliminar los componentes orgánicos de la muestra es posible que un bajo contenido de estos aditivos haya alterado la prueba en comparación a lo reportado para caucho de neumáticos.

---

<sup>117</sup> M.J. KABIR, M.G. RASUL, N. ASHWATH and A.A. CHOWDHURY .A Review on Green Wastes Pyrolysis for Energy Recovery Central Queensland University Centre for Plant and Water science, Faculty of Sciences, Engineering and Health Rockhampton, Queensland , Australia. 2012

**Tabla 4. Revisión bibliográfica de las características correspondientes al análisis próximo del caucho**

<b>Análisis próximo (% en base húmeda)</b>			
<b>Referencia bibliográfica</b>	<b>Humedad</b>	<b>Contenido de cenizas</b>	<b>Material Volátil</b>
<b>Cardona<sup>118</sup></b>	0,8	3,6	65,6
<b>Acosta et al.<sup>119</sup></b>	-	6,15	66,2
<b>Fernández et al.<sup>120</sup></b>	-	9,3	63

Fuente: Elaboración propia. Basado en: CARDONA, Luisa. Transformación termoquímica de neumáticos usados en unsoa la etapa en atmósfera de co2, para la obtención de carbón activado .Universidad pontificia bolivariana. Escuela de ingenierías. Facultad de ingeniería química. Medellín. 2014.; ACOSTA Rolando Andrés, MONCADA Silvia Juliana, GAUTHIER-MARADEI Paola, NABARLAT Debora Alcida. Estudio preliminar de la producción de aceite y carbón mediante pirólisis intermedia de caucho de llantas usadas. Universidad Industrial de Santander, Grupo de Investigación INTERFASE, Escuela de Ingeniería Química. Bucaramanga, Santander, Colombia y FERNÁNDEZ.A. M., BARRIOCANAL. C. and ALVAREZ. R. Pyrolysis of a waste from the grinding of scrap tyres. Journal of Hazardous Materials, vol. 203–204, pp. 236–43, Feb. 2012.

Esta diferencia en contenido de material orgánico, tiene una relación directa con el alto contenido de negro de humo o negro de carbón, cuyo presencia en el caucho de neumáticos de acuerdo a la literatura, oscila entre el 22-28%<sup>121</sup> de su composición. Comparando este con la rebaba analizada los aditivos presentes en ella provienen de origen inorgánico tales como; silicatos, carbonatos y un menor porcentaje en negro de humo lo que genera un aumento en el contenido de cenizas del material, tal como se evidencia en la tabla 5.

**Tabla 5. Resultados del análisis de la rebaba de caucho**

<b>Análisis próximo (% en base húmeda)</b>			
<b>Referencia</b>	<b>Humedad</b>	<b>Contenido de cenizas</b>	<b>Material Volátil</b>
<b>Z24</b>	0,39	33,00	73,01
<b>Z31</b>	0,28	30,50	73,01
<b>Z8</b>	0,70	25,00	71,01
<b>Z29</b>	0,59	27,00	74,51

Fuente: elaboración propia.

<sup>118</sup> CARDONA. Op.Cit., p-47

<sup>119</sup> ACOSTA et al. Op. Cit.,p.141

<sup>120</sup> FERNANDEZ et al. Op. Cit.,p.5

<sup>121</sup>CASTRO, Guillermo .Materiales y compuestos para la industria del neumático. Departamento de Ingeniería mecánica. F.I.U.B.A. Diciembre.2008

Sin embargo de acuerdo a lo expresado por Garcia<sup>122</sup> es una ventaja para la fracción gaseosa, al igual que un alto contenido en volátiles, pues tal como manifiesta Betancur<sup>123</sup> el contenido de volátiles hace que los neumáticos usados sean una materia prima interesante, no sólo para su uso como combustible sino también en procesos para obtener diferentes fracciones de productos sólido, líquido, y gaseoso como la pirolisis. De igual forma, el contenido del material volátil, se asocia principalmente con los contenidos de hidrógeno y carbono orgánico presentes fundamentalmente en el material polimérico.

En cuanto a las propiedades físicas, el parámetro de la densidad de la rebaba de caucho se encuentra disponible en la tabla 6, en base a estos resultados; el que una materia prima tenga una alta densidad y gran presencia de material volátil, indica que el carbonizado resultante de la pirolisis, puede tener las características necesarias en su estructura del carbonizado para llegar a utilizarse como carbón activado; permitiendo la formación de poros, respectivamente.

**Tabla 6. Resultados de densidad de la rebaba de caucho**

Referencia	Densidad (g/ml)
Z24	0,321
Z31	0,349
Z8	0,291
Z29	0,301

Fuente: elaboración propia.

De las distribuciones de tamaño de partícula para la rebaba pulverizada se encuentra que el tamaño del diámetro medio de partícula varía de una referencia a la otra (ver anexo A). Sin embargo el promedio para el material por este método de reducción es de 1,045 mm, el cual es cercano a lo exigido por las normas de caracterización.

En cuanto a la rebaba molida se obtiene que el tamaño de partícula de la alimentación en su mayoría tiene un tamaño mayor a 4,75 mm, resultado de un proceso de molienda en un molino de cuchillas y se encontró de este análisis granulométrico que el diámetro medio de partícula promedio, que es el valor medio del tamaño de distribución, corresponde a 4,69 mm para las cuatro referencias.

En vista de estos resultados, al llevar a cabo la pulverización, bajo las mismas condiciones del equipo, la rebaba sale con alto contenido de finos e impurezas, debido a la falta de uso y mantenimiento del equipo; es por ello que se decide

<sup>122</sup> GARCIA CORTEZ, Op. Cit.,p. 15

<sup>123</sup> BETANCUR, M. Obtención de carbón activado a partir de neumáticos usados mediante la incorporación de calcio y su aplicación en procesos de adsorción. Tesis Doctoral. (Doctor en Ingeniería). Universidad Pontificia Bolivariana. Área Energía y Termodinámica, Medellín.2010

trabajar con el tamaño de partícula más grande entre los dos procesos. Además tal como reporta Hoyos y Figueroa<sup>124</sup>, las partículas de mayor tamaño tienen una menor velocidad de transferencia de calor y por lo tanto calientan más lentamente pero a pesar de ser una desventaja en cuanto al tiempo permite que la partícula se descomponga no solo en los productos gaseosos y líquidos primarios, sino que por acción del tiempo el combustible líquido tiende a descomponerse de igual manera, lo que implica un aumento el rendimiento de gas y alquitrán.

Considerando la poca variación de resultados entre las referencias se seleccionan solo la rebaba de color negro (Z31-Z8) y Café (Z24), para llevar a cabo el diseño experimental del proceso de pirólisis.

---

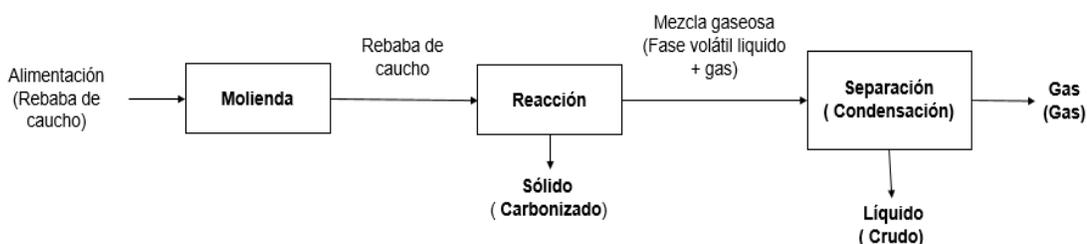
<sup>124</sup> MEMORIAS DEL IV SIMPOSIO DE QUÍMICA APLICADA-SIQUIA 2009. HOYOS L.J., FIGUEROA D.R. Efecto del tamaño de partícula y de la temperatura de secado en la pirólisis a la velocidad media de aserrín. Universidad del Quindío. 9,10 y 11 de septiembre. Armenia, Colombia.

### 3. PROCESO DE PIRÓLISIS DE LA REBABA DE CAUCHO

Una vez caracterizada la rebaba de caucho a utilizar dentro del proceso de pirólisis, en el presente capítulo, se describirán los procedimientos para el desarrollo del proceso de pirólisis de rebaba de caucho, junto con su diseño experimental de tipo factorial, donde se determinan las variables controlables y no controlables, con el fin de conocer los factores de influencia en la variable respuesta. Para ello se determinaron inicialmente las condiciones de operación tanto de la etapa de pre tratamiento (disminución del tamaño de partícula) y la etapa de reacción de pirólisis de rebaba de caucho, además, se realiza la descripción de la metodología experimental, caracterización del equipo de pirólisis, análisis de la distribución de productos y rendimiento del proceso.

A continuación se muestra el esquema del proceso de pirólisis de rebaba de caucho a nivel experimental:

**Diagrama 2. Esquema del proceso de pirólisis de la rebaba de caucho**



Fuente: elaboración propia.

#### 3.1 PRE TRATAMIENTO DE LA MATERIA PRIMA.

Tal como se explica en el capítulo anterior, la rebaba de caucho que se genera del proceso de prensado de suelas tiene un tamaño irregular, dado que el corte se realiza de forma manual. La utilización energética del caucho reciclado tiene en este caso esta limitación debido a su heterogeneidad.

El pretratamiento del caucho reciclado es entonces una fase clave del proceso de aprovechamiento energético de este tipo de fuentes combustibles ya que según Nogues, García y Rezeau<sup>125</sup>, estos procesos de adecuación de la materia prima pueden ser clave para la factibilidad y rentabilidad del aprovechamiento energético. Dentro de los pre-tratamientos físicos que usualmente se emplean para adecuar las materias primas previamente al proceso de pirólisis y a los procesos termoquímicos en general están: la reducción del tamaño de las partículas, secado,

<sup>125</sup> NOGUES, Fernando Sebastián, GARCÍA GALINDO, Daniel y REZEAU, Adeline. Energía de la Biomasa. Zaragoza, España: Prensas Universitarias de Zaragoza, 2010. p. 47. ISBN 978-84-92774-91-3.

la densificación, peletización y la torrefacción.<sup>126</sup> La realización de todos los pretratamientos anteriormente mencionados no es de obligatoria realización ya que dependerá del tipo de materia prima empleada y del proceso de conversión al cual esta vaya a ser sometida para su aprovechamiento energético.

**3.1.1 Reducción del tamaño de partícula.** El objetivo de este pretratamiento es el de reducir la muestra en piezas más pequeñas como: astillas, aserrín, polvo, etc., por dos razones principalmente: la primera con el fin de mejorar el proceso de transferencia de calor que se da durante el proceso de conversión termoquímica, en este caso de pirólisis y además facilitar el transporte y manejo de la muestra y en segundo lugar pensando en el reactor que se utilizara en la experimentación, el cual no permite tamaños de partícula de gran tamaño. Dependiendo del tipo de materia prima, posterior a este pretratamiento se pueden retirar algunos contaminantes, dado que la presencia de impurezas no permite que los productos del proceso sean fracciones de hidrocarburos aceptables para plantas de refinería<sup>127</sup>.

En cuanto a la valorización material del caucho, especialmente de los neumáticos fuera de uso, se puede triturar o moler un NFU en distintos tamaños, según la aplicación final. No obstante, a menor tamaño, mayor costo del proceso de reducción. Además, la reducción a menor tamaño consume una gran cantidad de energía, causa desgaste mecánico en el equipo y genera material particulado en la operación<sup>128</sup>. Ya que la potencia requerida para un molino o triturador de cuchillas para procesar 50-100 kg/h es de 1,5kW en comparación a una pulverizadora con una capacidad similar (75-250 kg/h) que ocupa una potencia de 7-11kW<sup>129</sup>, es decir, que esta última consume más energía para proveer un menor tamaño de partícula.

**Molienda.** Según Uba<sup>130</sup>, la molienda es una operación de reducción de tamaño de material similar a la trituración. Los productos obtenidos por molienda son pequeños y de forma regular. Para el proceso de molienda se hace uso de “los molinos que son aparatos que reducen el tamaño de la materia por fricción e impacto con elementos móviles del interior del molino. Consiguen tamaños de partícula del orden de 1 mm<sup>131</sup>. El proceso de molienda se realizó en las instalaciones de CROYDON COLOMBIA S.A en un molino de cuchillas (Ver anexo B), durante un periodo de 15 minutos. Este tipo de molinos “Tiene una configuración de cuchillas en forma inclinada que produce una acción de corte suave y limpio tipo tijera, garantizando

---

<sup>126</sup> *Ibíd.*,p. 47

<sup>127</sup> BORSODI, Nikollett., et al. Hydrocarbons obtained of contaminated waste plastics. University of Pannonia, Department of MOL Hydrocarbon and Coal Processing. Veszprém, Hungary. 2011

<sup>128</sup> CHIVATA, Daniel., DUARTE, Cristian. *Op Cit.*,p 33

<sup>129</sup> MOLINOS Y MEZCLADORES. Molino pulverizador y Molino de cuchillas. Disponible en: <http://molinosymezcladoras.com/molinos-pulverizadores.html> [en línea]

<sup>130</sup> UBA, Industrias I: Molienda. Universidad de Buenos Aires. Facultad de ingeniería. 2015.

<sup>131</sup> LOPEZ COSTA, J; CERVERA, S. Curso de ingeniería química: Introducción a los procesos, las operaciones unitarias y los fenómenos de transporte. Barcelona.: Reverté, S.A, 1991. 84 P

alta resistencia al impacto y máxima durabilidad de los filos de corte; además proporciona un mayor rendimiento con menor potencia de motor, menos ruido y menos polvo. Son considerados ideales para la recuperación y reproceso (reciclaje), también ampliamente usado en la industria de caucho, cuero, papel, cartón, telas, plásticos, madera, residuos no metálicos, etc. Así mismo, puede ser utilizado en la industria farmacéutica o la industria alimentaria.

El proceso de molienda se realiza en un molino de cuchillas y no de otro tipo de dado que bajo el principio de impacto no sería eficaz para el material; dado que este absorbería la fuerza ejercida y es de baja comprensibilidad.

**3.1.2 Operación de secado.** El secado es una operación que busca “la eliminación de la humedad presente en una sustancia o material, aprovechando la vaporización del agua por efecto de la temperatura o la acción de un agente de secado”<sup>132</sup>. Si la materia prima es una fuente, que será utilizada como combustible para la producción de energía, es de suma importancia la operación de secado ya que de esta manera aumentara el potencial energético de la materia prima.

Según Cardona<sup>133</sup> el caucho tiene una humedad no mayor al 0,8 %; de acuerdo a los resultados obtenidos en la caracterización de la rebaba de caucho (ver tabla 4), mencionados en el capítulo anterior se obtienen datos de humedad menores a los reportados en la literatura para los diferentes tipos de rebaba analizados; esta es una de las razones por la cuales no es indispensable realizar esta operación y por ende no habrían costos asociados a esta, por concepto de energía extra para alcanzar la temperatura nominal.

## **3.2 DESARROLLO EXPERIMENTAL DEL PROCESO DE PIRÓLISIS**

Para comenzar a realizar el proceso de pirólisis de la rebaba de caucho es necesario definir las variables y condiciones de operación a las cuales se llevará a cabo, pues de esta manera se empiezan a plantear los diferentes parámetros que permiten desarrollar el diseño de experimentos.

**3.2.1 Identificación y selección de los factores del proceso.** Para determinar el rendimiento del producto de interés (gas), se establecen los factores que tienen influencia directa e indirecta en el resultado final, de esta manera se seleccionan los niveles a estudiar para los factores del experimento y se mencionan las demás variables que se encuentran presentes en el proceso.

---

<sup>132</sup> SILVA LORA, Electo Eduardo y RINCÓN MARTÍNEZ, José María. Bioenergía Fuentes, Conversión y Sustentabilidad. Bogotá, Colombia: Red Iberoamericana de Aprovechamiento de Residuos Orgánicos en Producción de Energía, 2014. p. 100. ISBN 978-958-58880-0-5

<sup>133</sup> CARDONA, Luisa,. P.46

**3.2.1.1 Factores controlables.** Son variables de proceso o características de los materiales experimentales que se pueden fijar en un nivel dado<sup>134</sup>. Algunos de éstos son los que usualmente se controlan durante la operación normal del proceso (véase figura 11), y se distinguen porque, para cada uno de ellos, existe la manera o el mecanismo para cambiar o manipular su nivel de operación. Por ende esto último es lo que hace posible que se pueda experimentar con ellos.

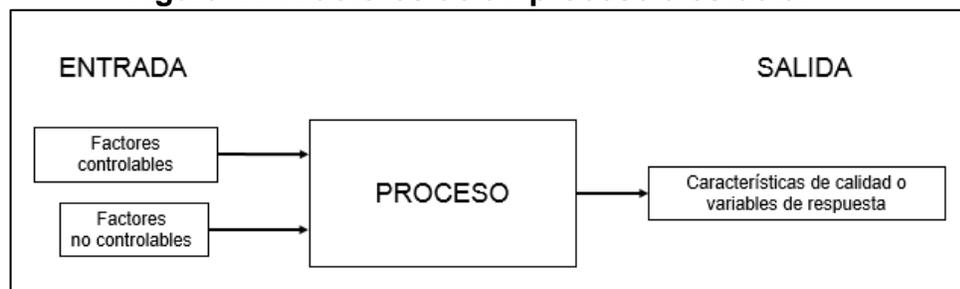
- **Factores del diseño de experimentos.** Los factores del diseño de experimentos hacen parte de los factores controlables, éstos no tienen un único valor debido a que son los parámetros que se van a variar con el objetivo de conocer su efecto en la variable respuesta.
- **Niveles y tratamientos.** Los diferentes valores que se asignan a cada factor estudiado en un diseño de experimentos se llaman niveles. Una combinación de niveles de todos los factores estudiados se llama tratamiento o punto de diseño.

**3.2.1.2 Factores no controlables.** Son variables o características de materiales y métodos que no se pueden controlar durante el experimento o la operación normal del proceso<sup>135</sup>. (Véase figura 11).

**3.2.1.3 Factores estudiados.** Son las variables que se investigan en el experimento para observar cómo afectan o influyen en la variable de respuesta<sup>136</sup>.

- **Variable respuesta.** A través de esta(s) variable(s) se conoce el efecto o los resultados de cada prueba experimental, por lo que pueden ser características de la calidad de un producto y/o factores que miden el desempeño de un proceso<sup>137</sup>. El objetivo de muchos estudios experimentales es encontrar la forma de mejorar la(s) variable(s) de respuesta.

**Figura 11 . Factores de un proceso a estudiar**



Fuente: elaboración propia.

<sup>134</sup> GUTIÉRREZ PULIDO, Humberto; VARA SALAZAR, Román. Análisis y diseño de experimentos. Segunda Edición, México.

<sup>135</sup> *Ibíd.*, p.

<sup>136</sup> *Ibíd.*, p.

<sup>137</sup> MONTGOMERY, Douglas C; Diseño y análisis de experimentos, Universidad estatal de Arizona, Segunda edición, Limusa Wiley, Grupo Noriega Editores, 2004 Mexico

En el cuadro 3 se muestran las variables que pueden *intervenir o involucradas* en el proceso de pirólisis de rebaba de caucho, describiéndolas como variables controlables o no controlables del ensayo.

**Cuadro 3. Variables involucradas en el proceso de pirólisis de rebaba de caucho**

	<b>Variable</b>	<b>Unidad</b>	<b>Factores controlables</b>	<b>Factores no controlables</b>
1	Temperatura de operación	°C	X	
2	Carga de alimentación al reactor (cantidad de materia prima)	g	X	
3	Tamaño de partícula	mm	X	
4	Tiempo de residencia	min	X	
5	Composición de la rebaba de caucho	% p.p	X	
6	Temperatura Ambiente	°C		X
7	Contenido de Humedad	%		X
8	Presión de operación	atm		X
9	Velocidad de calentamiento	°C/min		X

Fuente: elaboración propia

A continuación se describen y se seleccionan las variables controlables que van ser parte de los factores de diseño de experimento a trabajar.

- **Temperatura de operación.** Es una variable a controlar ya que permite la degradación térmica del material a pirolizar y garantiza la estabilidad y rendimiento esperado de los productos de interés<sup>138</sup>. Esta variable será seleccionada como uno de los factores del diseño de experimentos a plantear, considerando que es la variable de mayor importancia en el proceso de acuerdo a la literatura genera variaciones en el rendimiento y es un costo variable a nivel energético del proceso.
- **Tipo de rebaba de alimentación al reactor.** Al indagar en varios antecedentes se observa que la pirólisis se desarrolla con cualquier cantidad de material<sup>139</sup>, también esta variable depende de las características del reactor a utilizar. Esta variable será seleccionada como uno de los factores del diseño de experimentos a plantear; en vista de que permite establecer diferencias en cuanto al desempeño del material en proceso, según la referencia y diferencia entre ellas.

<sup>138</sup> FONSECA, Op, cit. p 15.

<sup>139</sup> *Ibíd.*, p. 17

- **Tiempo de residencia.** Es una variable a controlar, ya que corresponde al tiempo de retención o al tiempo de reacción de la materia prima dentro del reactor, es la una variable de relevancia en el proceso debido a que su magnitud determina el tamaño de los equipos y los servicios asociados a los mismos<sup>140</sup>, pero no es un factor de diseño, ya que al realizar una pre-experimentación del proceso de pirólisis de rebaba caucho se identificó que pasado cierto tiempo ( 5 horas aprox) el volumen de gas producido llega a un valor casi constante por intervalo, se mantiene constante por aproximadamente 1 hora; en evidencia de esto se detiene le proceso y se establece a 5 horas la experimentación.
- **Tamaño de partícula.** Es un variable a controlar, considerando que hace referencia al diámetro de partícula o tamaño promedio de la materia prima a emplear, en procesos termoquímicos se asumen por lo general que a menor tamaño de partícula se presentan comportamientos isotérmicos y no se dan limitaciones de transferencia de masa es decir que no existen gradientes de temperatura o masa dentro del material <sup>12</sup>, tal como se expresó en el capítulo 2; pero no es un factor de diseño por que previamente se realizó un pretratamiento con el fin de reducir el tamaño de partícula de la materia prima.
- **Composición de la rebaba de caucho.** Es una variable a controlar, tal como se expresó en el capítulo 2, dado que establece el punto de partida de los resultados en rendimiento del proceso de pirólisis. Es controlable pues se conoce de antemano la composición de cada tipo de rebaba de caucho, pero no es un factor de diseño, debido que la empresa tiene una composición determinada para el material.

De las variables antes mencionadas cabe mencionar que: las variables tiempo de residencia, tamaño de partícula, composición de la rebaba de caucho son parámetros que dejen fijos en el diseño de experimentos.

De acuerdo con lo mencionado anteriormente se seleccionan las 2 variables que van hacer parte de los factores y la variable respuesta del diseño de experimentos:

**Factores del diseño de experimentos.** Para el diseño de experimentos que se determinan los niveles de temperatura de operación y tipo de rebaba de alimentación al reactor como los factores del diseño de experimentos, por lo que a continuación se definen sus respectivos niveles.

---

<sup>140</sup> SUHANYA,. Op. Cit, p. 82. .

## **Temperatura de operación.**

Bajo los siguientes criterios de selección:

- La influencia en el rendimiento de producción de la fase gaseosa y líquida se incrementa con las temperaturas dadas por las reacciones más fuertes de craqueo térmico, pero a temperaturas superiores de 500°C los rendimientos de productos líquido disminuyen, la fase sólida presenta un incremento en el rendimiento hasta los 600°C y disminuye conforme disminuye la temperatura.
- A una temperatura menor a 500°C no se lograría la descomposición de la materia orgánica presente en la rebaba de caucho.
- 600 °C es la temperatura establecida para la descomposición térmica de las cadenas carbonadas de los diferentes compuestos del caucho (SBR, BR, NR) en estudios realizados previamente.
- Temperaturas superiores a 650 °C generan una mayor distribución de productos gaseosos que es la finalidad a la cual se desea obtener.

De esta manera se escogen los tres niveles que harán parte del diseño de experimentos para el factor temperatura de operación teniendo en cuenta lo antes mencionado, los niveles seleccionados son los siguientes: nivel (550°C), nivel (650°C) y nivel 3 (700°C).

## **Tipo de rebaba alimentada al reactor.**

Bajo las siguientes condiciones.

- De acuerdo al desarrollo de la producción de suelas del año 2018, se logra establecer que las referencias de mayor demanda son Z24, Z29, Z31 y Z8.
- Representando el porcentaje anual de generación de rebaba por colores se evidencia porcentualmente: el tipo de rebaba la rebaba negra (29,4%), rebaba café (40,4 %) y la mezcla de rebaba (10,1%).
- De acuerdo a lo expuesto en el capítulo 2 relacionado con los tipos de rebaba y considerando la poca variación de resultados entre las referencias se seleccionan solo la rebaba de color negro (Z31-Z8) y Café (Z24), de acuerdo a esto para la alimentación de los 400 gr que se alimentan: rebaba negra (44% Z31- y 56%- Z8), rebaba café (100% - Z24) y rebaba de mezcla ( 20% Z31, 25% - Z8, 55% - Z24).

De esta manera se escogen los tres niveles que harán parte del diseño de experimentos para el factor tipo de rebaba al reactor teniendo en cuenta lo antes mencionado, los niveles son los siguientes: nivel 1 (rebaba negra), nivel 2 (rebaba café) y el nivel 3 (mezcla de rebaba).

**Factores estudiados.** La variable seleccionada es el *rendimiento* del proceso de pirólisis.

- **Variable respuesta.** Para este caso la variable seleccionada es el *rendimiento del gas del proceso de pirólisis* como la variable respuesta para analizar el efecto de la temperatura y la carga de alimentación al reactor en el proceso de pirólisis.

**3.2.2 HIPOTESIS.** Antes de desarrollar el diseño de experimentos, se deben plantear hipótesis referentes a lo que se desea comprobar, de tal manera que posteriormente puedan analizarse los resultados obtenidos mediante un análisis estadístico de los datos. Para este caso las hipótesis se establecen para la temperatura, la carga de alimentación al reactor y la interacción entre estos dos factores.

Inicialmente se debe plantear una hipótesis nula ( $H_0$ ), la cual afirma que los resultados entre los niveles del factor son iguales, por lo que no habría efecto en la variable respuesta. Posteriormente, la hipótesis alterna ( $H_i$ ) se plantea para describir lo contrario, pues esta señala que los resultados entre niveles son diferentes lo cual indicaría que el factor sí tiene efecto y por último la interacción.

□

#### **Factor Temperatura**

- **$H_0: \alpha = 0$**  → No hay efecto del factor temperatura en el rendimiento del gas del proceso de pirólisis.
- **$H_i: \alpha \neq 0$**  → Hay efecto del factor temperatura en el rendimiento del gas del proceso de pirólisis.

#### **Factor Tipo de rebaba alimentada al reactor**

- **$H_0: \beta = 0$**  → No hay efecto del factor tipo de rebaba alimentada al reactor en el rendimiento del gas del proceso de pirólisis.
- **$H_i: \beta \neq 0$**  → Hay efecto del factor tipo de rebaba alimentada al reactor en el rendimiento del gas del proceso de pirólisis.

#### **Interacción entre factores**

- **$H_0: \alpha\beta = 0$**  → No hay efecto de la interacción de factores en el rendimiento del gas del proceso de pirólisis.
- **$H_i: \alpha\beta \neq 0$**  → Hay efecto de la interacción de factores en el rendimiento del gas del proceso de pirólisis.

**3.2.3 Diseño de experimentos.** El diseño de experimentos a desarrollar será de tipo factorial  $3^2$ , denominado así porque tiene 2 factores (temperatura de operación

y tipo de rebaba alimentada al reactor) de esta manera tanto cuentan con tres niveles respectivamente.

Para obtener la matriz de resultados se realizó 9 corridas con un total de 3 réplicas, es decir que se realizaron tres duplicados por cada condición a evaluar; con el fin de analizar el efecto que tiene cada factor por separado y la interacción que hay entre ellos para esto se combinan los niveles de temperatura con cada nivel del factor tipo de rebaba alimentada al reactor.

Una vez se ha realizado la respectiva experimentación, se calcula el rendimiento de gas obtenido en cada proceso de pirólisis; dado que para este diseño experimental, se tiene en cuenta la fracción gaseosa obtenida en el proceso de pirolisis de rebaba de caucho; es decir el gas del proceso de pirolisis, ya que es el producto de interés analizar.

De este modo se genera la tabla 7 que corresponde a la matriz del diseño factorial.

**Tabla 7. Representación del diseño factorial**

<b>TEMPERATURA</b>	<b>REBABA NEGRA</b>	<b>REBABA CAFÉ</b>	<b>REBABA MEZCLA</b>
<b>550 °C</b>	R11	R21	R31
	R12	R22	R32
	R13	R23	R33
	R14	R24	R34
<b>650 °C</b>	R15	R25	R35
	R16	R26	R36
	R17	R27	R37
<b>700 °C</b>	R18	R28	R38
	R19	R29	R39

Fuente: elaboración propia

### **Desarrollo diseño factorial**

A continuación se lleva a cabo el desarrollo del diseño factorial, para el rendimiento del gas de pirólisis de rebaba de caucho teniendo en cuenta:

- Se inicia con la selección del factor A y B (Temperatura y Tipo de rebaba), ordenando los datos obtenidos del proceso.
- Se realiza la suma de cada una de las réplicas.
- Se realiza el cálculo de ( $Y_{i\cdot\cdot}$ ,  $Y_{\cdot j\cdot}$  y  $Y_{\cdot\cdot\cdot}$ ).
- Posteriormente se calcula la suma de cuadrados.
- Se estiman los grados de libertad para el factor A, el B junto con su interacción, adicionalmente el error.

- Posteriormente, se procede a estimar el valor correspondiente cuadrados medios
- Para finalizar se identifican los valores de la variable  $F_{Máx c}$  y  $F_{Tablas}$ .

El desarrollo de lo propuesto anteriormente se evidencia en el (Anexo C)

### 3.3 MONTAJE EXPERIMENTAL

El montaje experimental para el proceso de pirólisis de la rebaba de caucho se realizó en la empresa Dr. Calderón Laboratorios Asistencia Técnica Agrícola ubicados en la AK 20 N 87-81 de la ciudad de Bogotá. Todas las pruebas fueron realizadas a nivel laboratorio.

**3.3.1 Metodología experimental.** La metodología inicio con el ensamblaje de los equipos del montaje mostrado en la imagen 5 y la verificación de las conexiones y funcionamiento de cada uno de los equipos que hacen parte de la instalación. Posteriormente se realizó la preparación de la materia prima que va a ser sometida al proceso de pirólisis cantidad que se usó por muestra fue de un total de 400g, antes de iniciar el proceso se cargó el condensador de gases 2500 mL.

El reactor se cargó con la cantidad de materia prima antes mencionada a condiciones ambiente para la ciudad de Bogotá, luego se cerró herméticamente la unidad de reacción empleando un empaque y se dio inicio al proceso de calentamiento indirecto por medio de una resistencia eléctrica hasta llegar a la temperatura tope establecida para cada corrida. El tiempo total transcurrido por ensayo fue de cinco horas.

Se destinó a la puesta en marcha y estabilización del proceso, 5 horas de tiempo de residencia de la rebaba de caucho dentro del reactor y finalmente ocho horas en el enfriamiento del montaje experimental y en la determinada extracción y pesaje de los productos; en el (Ver anexo B) se presenta el protocolo seguido para llevar a cabo las corridas experimentales.

En la tabla 8 se evidencian las condiciones de operación de entrada del proceso.

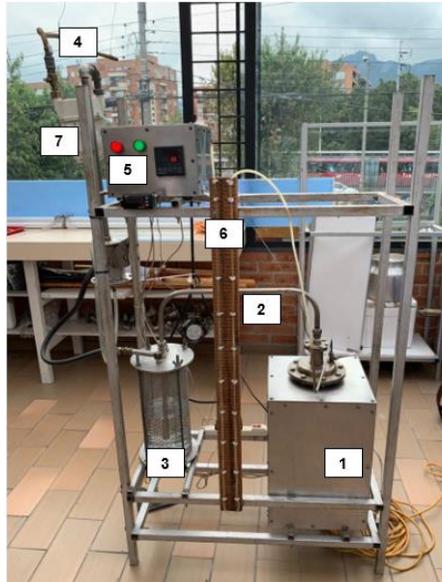
**Tabla 8. Condiciones de operación a la entrada del proceso**

Variable	Unidades	Valor
Tiempo	Horas (h)	5
Caucho ( Tipo de Rebaba)	Gramos (g)	400
Agua	Mililitros (mL)	2500
Agua	Mililitros (mL)	2500

Fuente: elaboración propia

**3.3.2 Caracterización del equipo de pirólisis.** Los equipos utilizados en el proceso de pirólisis de la rebaba de caucho son suministrados por la empresa Dr. Calderón Laboratorios Asistencia Técnica Agrícola ubicados en la AK 20 N 87-81 de la ciudad de Bogotá. Todas las pruebas fueron realizadas a nivel laboratorio como se evidencia en la imagen 5; en esta se muestra el esquema completo de las instalaciones del equipo donde se llevó a cabo el proceso de pirólisis utilizado en la experimentación.

**Imagen 5. Instalación del equipo de pirólisis**



1. Reactor Batch 2. Conector de gases 3. Condensador en Húmedo 4. Tea (Quemador) 5. Controladores de temperatura 6. Medidor de presión 7. Medidor de gas.

Fuente: elaboración propia.

A continuación, se muestran las especificaciones y la descripción detallada de cada uno de los equipos.

- **Reactor Batch.** El reactor consta de un cilindro vertical construido en acero inoxidable, con capacidad volumétrica máxima de 4L (1,5 Kg); está rodeado por una resistencia eléctrica que se encuentra distribuida desde el fondo hasta la parte superior de del reactor, activada por un controlador PID. Este reactor se introduce en una cobertura de lana de cerámica que hace disminuir las pérdidas de calor en el exterior. En la tabla 9, se muestran las dimensiones del reactor

**Tabla 9. Dimensiones del reactor de pirólisis**

Reactor	Descripción	Medida (mm)
	<b>Diámetro Externo</b>	207
	<b>Diámetro interno</b>	150
	<b>Altura</b>	400

Fuente: elaboración propia.

- **Conector de gases.** El reactor de pirólisis se conecta al condensador en húmedo por la parte superior de ambos equipos mediante un tubo de acero inoxidable; este conector va a permitir el desplazamiento de los gases y los productos líquidos. En la tabla 10, se muestran las dimensiones del conector de gases.

**Tabla 10. Dimensiones del conector de gases.**

Tubo conector de gases	Descripción	Medida (mm)
	<b>Diámetro Externo</b>	49,5
	<b>Diámetro interno</b>	40
	<b>Largo</b>	560

Fuente: elaboración propia.

- **Condensador en Húmedo.** Es un equipo que está conformado por un cilindro de vidrio y una malla de acero inoxidable protectora alrededor del vidrio; el recipiente de vidrio es llenado con 2500 ml de agua a temperatura ambiente para la ciudad de Bogotá.

La función del condensador en húmedo es disminuir la temperatura de los gases que recibe del reactor de pirólisis permitiendo la condensación en húmedo del aceite de pirólisis, extraído posteriormente por decantación. Este cuenta con una conexión al quemador de gases (tea) para los gases no condensables. En la tabla 11, se muestran las dimensiones del condensador en húmedo.

**Tabla 11. Dimensiones del condensador en húmedo.**

Condensador en Húmedo	Descripción	Medida (mm)
	<b>Diámetro Externo</b>	155
	<b>Diámetro interno</b>	140
	<b>Alto</b>	350

Fuente: elaboración propia.

- **Quemador de gases (Tea).** En la parte exterior del condensador húmedo, se encuentra ubicada una conexión hacia un quemador de gases (tea); este equipo recibe los gases no condensables salientes del proceso y los expulsa al exterior del sistema; esta operación se refleja en una llama que se mantiene mientras exista salida de gas combustible. En la tabla 12, se muestran las dimensiones del quemador de gas (Tea).

**Tabla 12. Dimensiones del quemador**

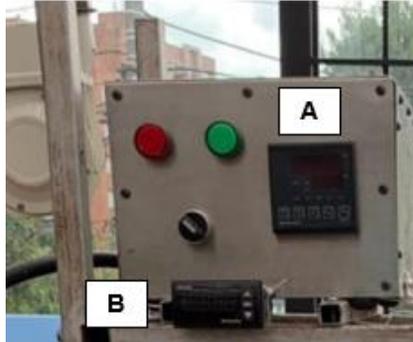
Tea	Descripción	Medida (mm)
	<b>Diámetro interior</b>	59,97
	<b>Diámetro superior</b>	89,3
	<b>Alto</b>	135

Fuente: elaboración propia

- **Controladores de Temperatura.** El equipo de pirólisis cuenta con dos controladores de temperatura conectados al reactor por medio de resistencias eléctricas que permiten conocer de manera constante la temperatura alrededor del proceso; el controlador (a) que se encuentra ubicado en la parte superior indica la temperatura de entrada del proceso que registran las resistencias al

interior del reactor , mientras que el controlador (b) que está ubicado en la parte inferior indica la temperatura que alcanzan los vapores en la salida hacia el condensador a lo largo del proceso. (Ver imagen 6).

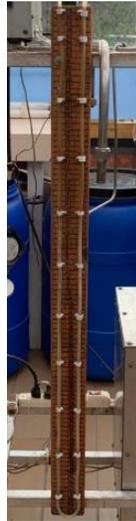
#### Imagen 6. Controladores de temperatura



Fuente: elaboración propia.

- **Medidor de Presión.** El equipo de pirólisis hace uso de un manómetro de tubo en U para medir la presión en el reactor en milímetros de agua (mm.H<sub>2</sub>O). (Ver imagen 7).

#### Imagen 7. Medidor de presión



Fuente: elaboración propia.

- **Contador de gas.** Al montaje de pirólisis se le implementó un contador de gas para medir el volumen saliente del proceso de pirólisis (ver imagen 8).

**Imagen 8. Contador de gas**



Fuente: elaboración propia.

### **3.4 RESULTADOS DEL PROCESO DE PIROLISIS DE LA REBABA DE CAUCHO**

**3.4.1 Análisis estadístico de los datos.** Para realizar el análisis estadístico de los datos se identifican los valores de la variable  $F_{Máx\ c}$  y  $F_{Tablas}$ , este valor nos permite tomar una decisión acertada frente a la aceptación o rechazo de la hipótesis planteada con el criterio de  $F_{Máx\ c} > F_{Tablas}$ , en caso de cumplirse se rechaza la hipótesis nula, por ende se acepta la alterna.

Con un nivel de confiabilidad del 95% en la prueba F se obtiene:

$F_{0.05,3,18} = 3,55$	$329,42 > 3,55$ Se Rechaza la Hipótesis nula.
$F_{0.05,2,18} = 3,55$	$4,14 > 3,55$ Se Rechaza la Hipótesis nula.
$F_{0.05,4,18} = 2,93$	$3,54 > 2,93$ Se Rechaza la Hipótesis nula.

En la tabla 13 se presentan los resultados del análisis estadístico para la temperatura, tipo de rebaba de alimentación al reactor y la interacción entre estos dos factores. El nivel de significancia escogido es de 0,05, que es la probabilidad de cometer errores durante el experimento; los datos por lo general se interpretan a partir de la columna F porque mediante esta se hace una comparación con valores establecidos en tablas; de acuerdo a los datos reportados permite rechazar la hipótesis nula cuando los valores de  $F > F_{tablas}$ ; en este caso los datos de significancia obtenidos para los dos factores y la interacción entre ellos son menores, por lo cual se rechaza la hipótesis nula en todos los casos, es decir que se confirma que tanto los dos factores como su interacción tienen efecto en la variable respuesta. El diseño factorial de dos factores, se encierra en que hay efecto de la temperatura del proceso de pirólisis, tipo de rebaba y su interacción si tienen efecto en el rendimiento del gas del proceso de pirólisis de rebaba de caucho.

**Tabla 13. Análisis de varianza para el diseño factorial para dos factores para el rendimiento del gas del proceso**

Origen de las variaciones	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Promedio de los cuadrados	F	Probabilidad	F tablas
Temperatura ( $\alpha$ )	1407,68	2	703,87	329,42	6,65E-15	3,55
Tipo de rebaba ( $\beta$ )	17,67	2	8,83	4,14	0,03	3,55
Interacción ( $\alpha\beta$ )	30,23	4	7,56	3,54	0,03	2,93
Error	38,46	18	2,14			
<b>Total</b>	<b>1494,03</b>	<b>26</b>				

Fuente: elaboración propia

La conclusión del diseño factorial, se encierra en que si hay efecto de la temperatura de operación, tipo de rebaba y su interacción en el rendimiento de gas del proceso de pirólisis de rebaba de caucho. Suponiendo un comportamiento lineal se obtiene el siguiente comportamiento.

**Ecuación 6. Diseño factorial aplicado al rendimiento de gas del proceso de pirólisis de rebaba de caucho**

$$Y_{ijk} = \alpha A + \beta B + \alpha\beta AB + E$$

Fuente: elaboración propia

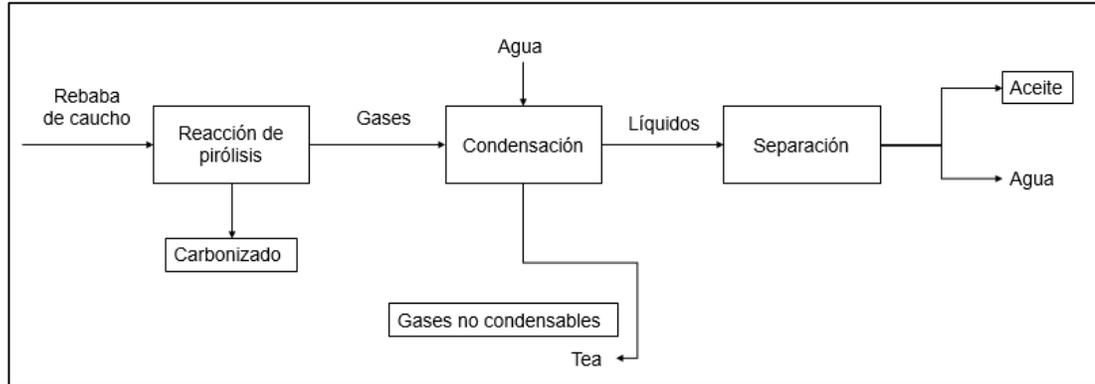
**3.4.2 Distribución de los productos de pirólisis.** El desarrollo experimental descrito anteriormente puede ser representado mediante un diagrama general de proceso, en donde se pueden observar 2 etapas básicas; que conforman el proceso de pirólisis, 1. Operación unitaria de pre tratamiento de la rebaba de caucho (reducción de tamaño) y 2. El proceso de pirólisis que implica la reacción en donde se obtienen los 3 productos principales de la pirólisis: sólido, el líquido y el gas.

A pesar de no conocer con detalle el sistema reaccionante que modele el proceso exacto de pirólisis de la rebaba de caucho que se llevó a cabo durante la experimentación, como se puede observar en la ecuación 1, en términos generales esta reacción parte de una materia prima que mediante la intervención de calor se descompone en 3 productos principales (sólido, líquido y gas); por otra parte es posible a través de los datos obtenidos en la experimentación hacer una estimación de la distribución de los productos de la pirólisis.

La transformación de la rebaba de caucho, se realiza mediante un proceso de pirólisis, en sistema batch donde no se suministran corrientes de oxígeno ni de ningún otro tipo de atmósfera al reactor. En el diagrama 3 se puede observar el

esquema que modela la operación de reacción, así como la corriente de alimentación al proceso y las 3 resultantes, correspondientes a los productos generados durante el proceso: sólido, líquido y gas pudiendo identificar entradas y salidas para un balance global.

**Diagrama 3. Proceso de pirólisis experimental de la rebaba de caucho**



Fuente: elaboración propia.

El balance de masa global correspondiente al diagrama 3 se define en la siguiente ecuación:

$$M_R = M_C + M_A + M_G$$

Donde:

- $M_R$  = Masa tipo de rebaba
- $M_C$  = Masa carbonizado
- $M_A$  = Masa Aceite
- $M_G$  = Masa Gas

Una vez realizados los procesos de pirólisis de acuerdo al diseño experimental planteado se obtuvieron los siguientes resultados para el balance de masa global que están expuesto en el (ver anexo C).

Para calcular el balance de masa, se tomaron en cuenta todos los ensayos del diseño experimental (ver anexo C).

A continuación se muestran los resultados obtenidos en el proceso de pirólisis de la rebaba de caucho negra a una temperatura de 700 °C; ya que a esta temperatura es a la que se obtienen los mejores rendimientos de gas. (Ver tabla 14).

Para realizar el balance de masa se tiene en cuenta:

- La cantidad de materia prima alimentada en cada proceso fue equivalente a 0,400 kg de rebaba de caucho.

- El gas estimado se obtiene por la diferencia entre la masa inicial menos lo obtenido para carbonizado y aceite, sin embargo este dato no coincide con el gas medido por el contador del gas.
- El gas medido se obtiene por el valor medido por el contador de gas el cual reporto un valor de 0,193 m<sup>3</sup>; con una densidad experimental tomada por la cromatografía realizada al gas de 1,13 kg/m<sup>3</sup> (ver anexo D) para dar un total de gas medido de 0,219 kg.

La tabla 14 evidencia un valor de perdidas equivalente al (24,39%), el cual resulta de la suma en (kg) de los productos obtenidos del proceso (carbonizado 0,026 kg, aceite 0,053 kg, gas 0,219 kg) dando un valor de 0,498 kg. Este exceso se asocia a un error al equipo de medición de volumen de gas; para ello se realiza una normalización.

$$M_R = M_C + M_A + M_G$$

$$M_R = 0,226 + 0,053 + 0,219 = 0,498 \text{ kg}$$

**Tabla 14. Balance de masa rebaba negra a 700°C**

Temperatura del proceso 700 °C		
Masa inicial (kg)	0,400	<b>% peso</b>
Carbonizado (kg)	0,226	56,50
Aceite (kg)	0,053	13,25
Gas estimado (kg)	0,121	30,25
Gas medido (kg)	0,219	54,64
<b>Perdidas (kg)</b>	<b>-0,098</b>	<b>-24,39</b>

Fuente: elaboración propia.

Para la normalización de los datos se escoge el valor máximo de pérdidas obtenido en toda la experimentación, el cual equivale a (24,39%), de acuerdo a esto se estima un factor de corrección como se muestra a continuación:

$$\text{Normalización de datos} = \frac{\% \text{ Gas estimado}}{\% \text{ Gas medido}}$$

$$\text{Normalización de datos} = \frac{30,25}{54,64} = 0,5536$$

Teniendo en cuenta este factor se aplica la corrección al gas medido en el proceso y se normalizan todos los datos experimentales que se ven afectados por este hecho. Obteniendo los datos presentes en el balance de masa del (ver anexo C).

En la tabla 15 se evidencia la normalización de datos para el proceso de pirólisis de rebaba de caucho a 700 °C y su respectivo balance de masa.

**Tabla 15. Normalización de datos**

Masa inicial (Kg)	0,400	% Peso
Carbonizado (Kg)	0,226	56,50
Crudo (Kg)	0,053	13,25
Gas Corregido (Kg)	0,121	30,32
Balance de masa		100
Perdidas (Kg)	0	0

Fuente: elaboración propia.

$$M_R = M_C + M_A + M_G$$

$$M_R = 0,226 + 0,053 + 0,121 = 0,400 \text{ Kg}$$

Después de realizada la normalización de datos se analiza la distribución de los productos del proceso. Los productos que se obtienen del proceso de pirólisis a nivel general se clasifican en tres tipos principalmente: producto sólido (ceniza o carbonilla), producto líquido (aceite) y el producto gaseoso (gases condensables y no condensables).

Un aumento en la temperatura de operación para la reacción de pirólisis produce mayores cantidades de productos gaseosos en comparación con las producciones de aceites y carbonizados<sup>141</sup>. Sin embargo, se ha mostrado que esta tendencia se revierte hacia temperaturas menos elevadas, como 500 y 550°C, produciéndose una menor cantidad de gases a estas temperaturas y una consecuente mayor producción de carbonizado.

Considerando lo anterior y como se muestra en la gráfica 4, los resultados de la distribución de los productos evidencia un incremento en la producción de gases al aumentar la temperatura del proceso de pirólisis y en consecuencia una disminución en peso del carbonizado y el aceite. El aumento de la temperatura produce el craqueo de las moléculas orgánicas en el gas de pirólisis, favoreciendo a formación de compuestos de menos peso molecular que constituye los gases no condensables. Al mismo tiempo, un incremento de la temperatura 700°C favorece la descomposición térmica del carbonizado mediante las diferentes transformaciones; a este rango de temperatura se logra una disminución del mismo.

De manera similar se evidencia el mismo comportamiento o tipo de tendencia para la distribución de productos en los otros tipos de rebaba (rebaba café y rebaba de mezcla), por lo tanto, uno de los factores que más afectan la distribución de los productos de pirólisis es la temperatura.

<sup>141</sup> BASU. Op. Cit., p 77.

Estos resultados son coherentes con los que aparecen en la literatura, referidos a procesos de pirólisis<sup>142</sup>, al estudiar la pirólisis de caucho, es posible clasificar el proceso de degradación de la materia prima en fases: La primera fase es aquella que se da en un rango de temperatura de 80 - 120°C en esta etapa la humedad superficial de la partícula se evapora, la segunda fase se da en un rango de 120 - 300°C en ésta se comienzan a presenciar pérdidas de peso donde se libera gases ligeros como CO o CO<sub>2</sub>, en la tercera fase se presenta la mayor pérdida de peso correspondiente a la liberación de compuestos volátiles esta etapa se presenta en un rango de temperatura de 300 - 400°C, finalmente en la cuarta fase se da la degradación de la materia sólida donde se libera una mezcla de gases condensables y no condensables 500 – 800 °C generando de esta manera mayor distribución en los productos líquidos y gaseosos<sup>143 144 145</sup>, la fracción líquida tiene un rendimiento máximo a 550 - 600°C, lo que sugiere que por encima de esta temperatura, la fracción de gas aumenta su peso a expensas del craqueo de los compuestos presentes en los líquidos y la volatilización de los componentes del sólido.<sup>146</sup>

---

<sup>142</sup>BRUUN, E.W., NIELSEN, H., IBRAHIM, N., EGSGAARD, H., AMBUS, P., JENSEN, P.A., DAMJOHANS EN, K. Influence of fast pyrolysis temperature on biochar labile fraction and short-term carbon loss in a loamy soil. *Biomass and Bioenergy* 35(3): 1182-1189. (2010)

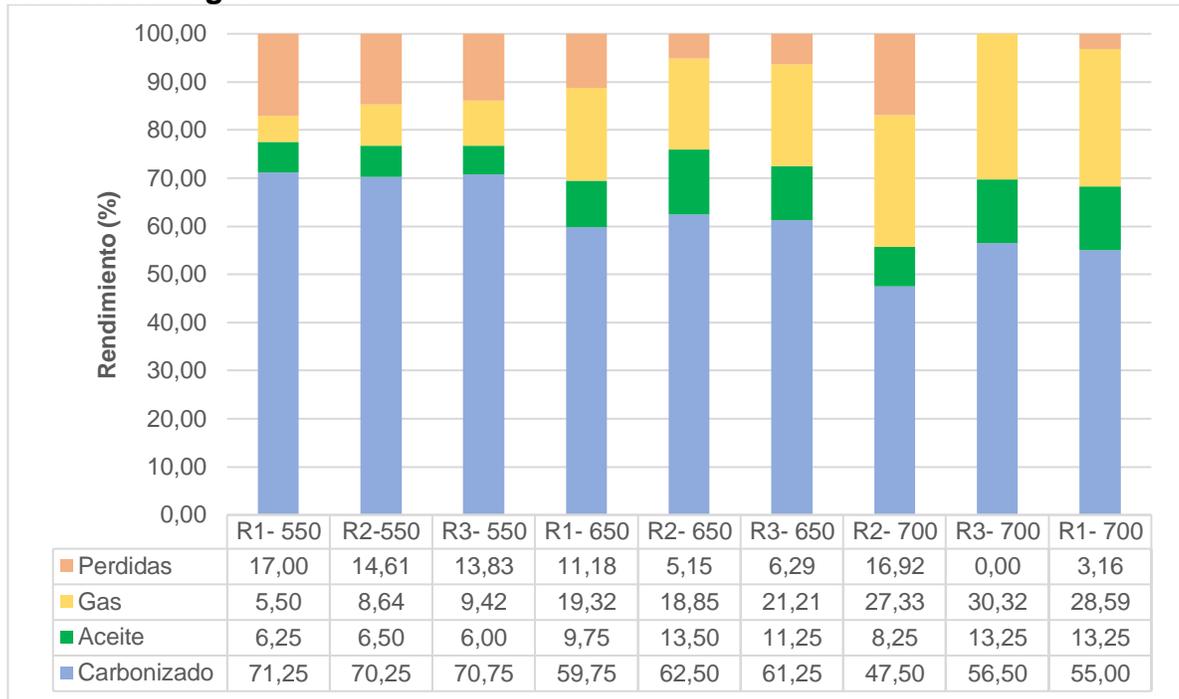
<sup>143</sup> MARTINEZ, J. D. LAPUERTA, M. GARCIA, R. MURILLO, R. GARCÍA, T “Fuel Properties of Tire Pyrolysis Liquid and Its Blends with Diesel Fuel,” *Energy Fuels*, vol. 27, no. 6, pp. 3296–3305, Jun. 2013.

<sup>144</sup>HAARLEMMER, G. GUIZANI, C. ANOUTI, S. DÉNIEL, M. ROUBAUD, A AND VALIN, S “Analysis and comparison of bio-oils obtained by hydrothermal liquefaction and fast pyrolysis of beech wood,” *Fuel*, vol. 174, pp. 180–188, Jun. 2016

<sup>145</sup> SATHISKUMAN, S and MOORTHY, S “Effect of process parameters on tire pyrolysis: a review,” *J. Sci. Ind. Res.*

<sup>146</sup> C.J. Ellens, “Design, optimization and evaluation of a free-fall biomass fast pyrolysis reactor and its products,” University State Iowa, 2009.

**Gráfica 4. Distribución de productos de los procesos llevados a cabo con tipo de rebaba negra**



Fuente: elaboración propia.

**3.4.3 Caracterización de los productos de pirólisis.** Luego de realizar el proceso de pirólisis, tal como se ha mencionado anteriormente se obtienen tres productos combustibles, los cuales tienen un gran potencial de uso, especialmente el producto gaseoso. A continuación se listan sus propiedades.

**3.4.3.1 Carbonizado (Sólido).** El carbonizado, char, o carbonilla se define como el residuo carbonoso que queda tras un proceso de pirólisis, este es recolectado luego de la parada, enfriamiento y descarga del reactor. El producto carbonizado del proceso de pirólisis de rebaba de caucho, por lo general es un material sólido en coloración oscura, en cuanto a la incidencia del colorante del caucho en el carbonizado, para el producto resultante del proceso con la rebaba café su coloración es menos intensa al igual que para el producto proveniente de la mezcla.

Además el carbonizado tiende a presentar diferencias en su contextura dependiendo de la temperatura a la cual se lleva a cabo el proceso, ya que a mayor temperatura de operación el producto sólido remanente en el reactor se degrada completamente, tal como se evidencia en la tendencias del rendimiento, sin embargo para rangos de temperatura menores a los 700°C la rebaba queda con trazas de alquitranes y aceite, lo que provoca el cambio de textura, tal como se evidencia en la imagen 9 y en el anexo C.

**Imagen 9. Carbonizado producto de la pirólisis de rebaba negra**



Fuente: elaboración propia.

En lo que respecta a la caracterización del carbonizado se llevó a cabo un análisis próximo y se toma en cuenta un análisis elemental realizado a nivel teórico, al igual que se hizo previamente con la materia prima. Además se toman en cuenta valores relacionados al caucho de neumáticos con el fin de establecer el poder calorífico y su potencial como combustible sólido.

La fracción sólida está en gran parte compuesta de carbono amorfo, la presencia de otros elementos está fuertemente relacionada con la composición de la matriz polimérica y uso de rellenos y aditivos<sup>147</sup>. Como es el caso del caucho en general, especialmente la rebaba de caucho negra, ya que este carbonizado al igual que obtenido a partir de la pirólisis de los neumáticos se compone de la suma del negro de humo, ya incluido en la formulación del neumático y lo que está formado por la degradación térmica de la matriz orgánica. Los altos rendimientos y su Valor Calorífico Bruto (GCV), de aproximadamente 28.8 MJ / kg, lo convierte en un buen candidato como combustible<sup>148</sup>.

---

<sup>147</sup> LEONARDI, Chiara. Development of an innovative pyrolysis plant for the production of secondary raw materials. Dottorato di ricerca in chimica. Università di Bologna. 2015

<sup>148</sup> *Ibid.*, p. 52

## Análisis elemental

En cuanto a la composición elemental del residuo carbonoso está más cercana al coque proveniente de la pirólisis de carbón mineral<sup>149</sup>; sin embargo el residuo sólido es el producto más sensible a la variabilidad compositiva de la rebaba de caucho y los neumáticos procesados, porque en el carbón se concentran, entre otros, azufre y metales; que se introducen como rellenos y adyuvantes en el proceso de vulcanización<sup>150</sup>. Es por esa razón, más allá del análisis de CHONS presentado en la Tabla 1 para carbón pirólítico cuyo precursor es el caucho de neumáticos; es importante destacar la presencia de otros elementos tal como se ve en la tabla 16.

**Tabla 16. Datos de revisión bibliográficamente del análisis elemental para el producto carbonizado en base a caucho de neumáticos**

Referencia Composición (wt%)	NT <sup>151</sup>	ELTs <sup>152</sup>	Conesa et al. <sup>153</sup>
Zn	4,06	3,37	6,68
S	2,51	2,67	1,9
Mg	0,06	0,07	0,147
Al	0,04	0,05	-
Si	0,29	0,31	1,69
K	0,12	0,08	0,0969
Ca	0,18	0,16	0,127
Ti	0	0,02	0,0171
Fe	0,003	0,03	0,0393

Fuente: elaboración propia. Basado en: LEONARDI, Chiara. Development of an innovative pyrolysis plant for the production of secondary raw materials. Dottorato di ricerca in chimica .Università di Bologna. 2015.

Teniendo en cuenta, la revisión bibliográfica se obtiene nuevamente un alto contenido de carbono con un 94,38% aproximadamente, lo cual concuerda con el porcentaje inicial reportado para la materia prima, más el generado a través de la degradación térmica. Esta composición a su vez indica un alto potencial como combustible. Por otro lado la presencia de aditivos del caucho en el carbonizado; se puede inferir que la mayor parte del contenido de cenizas correspondiente a los componentes inorgánicos queda presente en el char.

<sup>149</sup> MEDINA VALTIERRA, J., GUERRERO ESPARZA, M. M. Obtención de carbón de la pirólisis catalítica de hule de llanta y pruebas de adsorción mediante un método indirecto. Investigación y Ciencia de la Universidad Autónoma de Aguascalientes. Número 63: 24-31, Septiembre-diciembre 2014.

<sup>150</sup> LEONARDI, Op. Cit., p. 54

<sup>151</sup> *Ibíd.*, p.62

<sup>152</sup> *Ibíd.*, p.62

<sup>153</sup> CONESA J. A., MARTIN - GULLON I., FONT R., JAUHAINEN J. Complete Study of the Pyrolysis and Gasification of Scrap Tires in a Pilot Plant Reactor, Environmental Science & Technology, 38 (2004) 3189-3194

## Análisis próximo

Para el análisis próximo se realizaron las mismas pruebas descritas anteriormente en la caracterización de la materia prima. De las cuales los resultados se muestran en el anexo D y se realiza una comparación de los valores establecidos para carbonizado proveniente de procesos de pirólisis de caucho de neumático a temperaturas entre 450 y 550°C, tal como se observa en la tabla 17.

**Tabla 17. Comparación de las propiedades concernientes al análisis próximo del carbonizado de caucho.**

Muestra	Análisis próximo (%en peso)						
	NT <sup>154</sup>	ELTs <sup>155</sup>	Conesa et al. <sup>156</sup>	Galvagno et al. <sup>157</sup>	R. Café	R. Negra	R. Mezcla
Temperatura de operación (°C)	500	500	450	500	550	550	550
Humedad	2,1	1	0,37	3,57	1,55	1,88	1,6
Material volátil	0	1,5	7,78	12,78	69,45	65,37	66,39
Contenido de ceniza	9,9	9,5	8,27	15,33	25,45	49,89	54,98

Al analizar los resultados obtenidos para los ensayos realizados a 550°C (tabla 17.), se puede establecer que el contenido de humedad esta se encuentra dentro del rango reportado (1- 3,57%), sin embargo esta puede variar de acuerdo a las condiciones de almacenamiento posterior a su remoción del reactor. Por otro lado el contenido de material volátil en el carbonizado de rebaba de caucho es bastante alto en comparación, pues es en promedio 12 veces mayor; lo cual se debe a que la degradación en el reactor batch no fue completa; pues en este presenta un perfil térmico (ver gráfica 5.), que muestra que la sección superior del mismo no alcance la temperatura determinada para la operación. Este fenómeno altera el carbonizado pues queda como una mezcla de material solido con alto contenido de alquitranes y aceite; tal como se ve en la imagen 10, lo cual se confirma en la prueba de determinación de volátiles. En el anexo C se presentan a detalle las temperaturas obtenidas durante el proceso experimental.

<sup>154</sup> LEONARDI, Op. Cit., p. 55

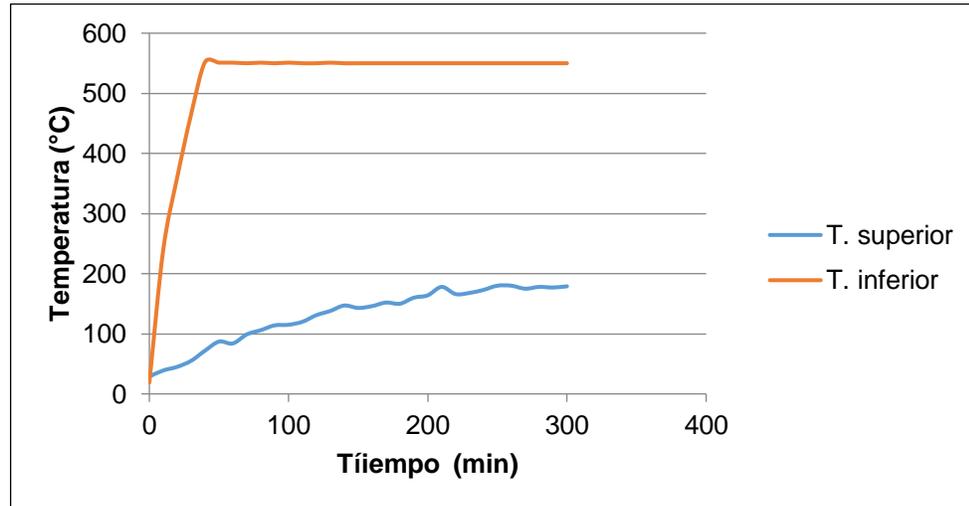
<sup>155</sup> *Ibid.*, p. 55

<sup>156</sup> CONESAJ. Op Cit. p.10

<sup>157</sup> GALVAGNO S., CASU S., CARABIANCA T., CALABRESE A., CORNACCHIA G. Pyrolysis process for the treatment of scrap tyres: preliminary experimental results, Waste Management, 22, (2002), p. 917-923

En cuanto al contenido de cenizas conserva la misma particularidad inicial de la materia prima y se mantiene en un porcentaje alto, debido a la calidad de los aditivos de relleno.

**Grafica 5. Perfil térmico del reactor en el proceso de pirólisis de la rebaba de caucho R. mezcla a 550°C**



Fuente: Elaboración propia.

**Imagen 10. Carbonizado con degradación incompleta del proceso de pirólisis a 550°C**



Fuente: elaboración propia.

**3.4.3.2 Aceite (Líquido).** En cuanto al combustible líquido se obtiene por lo general en menor proporción acorde a la distribución de productos, menor al 20% en rendimiento para las temperaturas evaluadas. Se obtiene por enfriamiento y condensación de los gases generados en la degradación térmica de la rebaba de caucho; es un líquido que al inicio del proceso sale como micelas de color amarillo y mientras se va acumulando adquiere una tonalidad oscura en tonos café pardo-rojizo y destellos verdosos en el caso del producido por la rebaba de color negro. (Ver imagen 11).

A medida que aumenta la temperatura disminuye el rendimiento en peso de los aceites. Ello se debe, como se ha explicado anteriormente, a que el incremento de la temperatura favorece el craqueo de los compuestos volátiles que enriquecen la fracción gaseosa a expensas de la fracción sólida y líquida<sup>158</sup>.

**Imagen 11. Fracción líquida del proceso de pirólisis (Derecha aceite inicial, izquierda aceite acumulado)**



A pesar de su proporción varios autores ha reportado un alto potencial de esta sustancia luego de un tratamiento previo, para su posterior uso como sustituto del diesel, ya que en promedio se estima un poder calorífico entre 9952 y 10300 kcal/kg.<sup>159</sup> (41,639 y 43,095 MJ/kg).

**3.4.3.3 Gas.** La fracción de gas del proceso de pirólisis corresponde a la fracción gaseosa no condensable, el cual es un gas combustible compuesto principalmente de H<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub> e hidrocarburos de cadena corta (hasta C<sub>4</sub> / C<sub>5</sub>). También hay CO, CO<sub>2</sub> y, en el caso de gas de síntesis derivado de la pirólisis de neumáticos, H<sub>2</sub>S debido a la presencia de azufre utilizado para la vulcanización de los neumáticos<sup>160</sup>.

A causa de los datos obtenidos de la distribución de productos, en los cuales se evidencia un gran proporción de gas, cercana al 30%, se procede a analizar el gas saliente del proceso de pirólisis, del cual se tomaron muestras transcurridas dos horas y media del proceso a una réplica por ensayo de los procesos llevado a cabo a 700°C, teniendo en cuenta que el mejor rendimiento de gas (30,32% R3-700, ver

<sup>158</sup> PINEDO, Op. Cit., p 45.

<sup>159</sup> LEONARDI, Op. Cit., p. 44

<sup>160</sup> RODRIGUEZ I. de Marco, LARESGOITI M. F., CABREBRO M. A., TORRES A., CHOMON M. J., CABALLERO B. Pyrolysis of scrap tyres, Fuel Processing Technology, 72 .2001., p. 9-22

gráfica 4) se obtuvo a esta temperatura, especialmente en la rebaba de color negro. El muestreo se llevó a cabo a través de una bolsa Tedlar, la cual se adaptó al montaje en el tubo de escape que originalmente enviaba los gases a su quema en la tea, como se demuestra en la imagen 12 y para su análisis se le realizó a una muestra una cromatografía de gases, con el fin de establecer una composición aproximada del mismo. Este análisis se realizó en la Pontificia universidad Javeriana (Dpto. Química), donde se trabajó con un cromatógrafo de gases/masa (GC-MS) acoplado a detector de masas y los resultados están disponibles la tabla 18 y en el anexo D.

**Imagen 12. Recolección gas del proceso**



Fuente: elaboración propia.

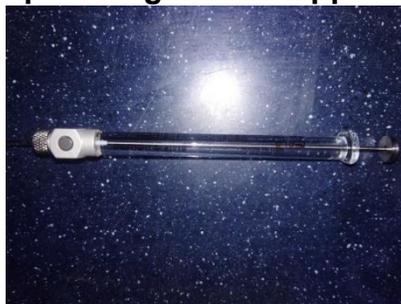
La muestra seleccionada para el análisis cromatográfico tuvo un rendimiento mayor al 30% en peso de gas, y de ella se captura 1L que es la capacidad de la bolsa Teldar, la cual está compuesta por polivinil fluoruro (PVF), el cual es resistente, durable, y químicamente inerte a un amplio rango de compuestos. Las bolsas utilizadas en aplicaciones ambientales típicamente tienen un espesor de 2 mm (80  $\mu\text{m}$ ) y se utilizan para un amplio rango de temperaturas (98-225 °F). Las bolsas son selladas al calor, libres de filtraciones y pueden ser usadas para coleccionar tanto muestras líquidas como gaseosas<sup>161</sup>.

El gas finalmente es inyectado al equipo forma manual utilizando una jeringa de 5 ml “siringe PTEE tupper levuerlock”, especial para inyectar muestras gaseosas de forma manual al cromatógrafo. (Ver imagen 13).

---

<sup>161</sup> PEÑA, Laura. Evaluación de la producción de gas y líquido combustible mediante el proceso de pirólisis de madera para aplicación en la zona del resguardo Yaigojé en el Vaupés colombiano. Fundación Universidad de América. Facultad de Ingenierías. Programa de Ingeniería Química. Bogotá D.C., 2019

**Imagen 13. Jeringa de 100  $\mu$  “siringe PTEE tupper leuerlock**



Fuente: elaboración propia.

**Tabla 18. Resultados de la cromatografía de gases, de la muestra de la réplica de rebaba negra a 700°C**

Compuesto	% Dentro de la muestra
<b>Metano</b>	23,82
<b>Monóxido de carbono</b>	39,2
<b>Dióxido de carbono</b>	14,94
<b>2-buteno, 2-metil</b>	2,36
<b>Isopreno</b>	4,05
<b>2-Metil-1-buteno</b>	4,78
<b>3-Penten-1-yne, E</b>	1,68
<b>Ciclopenteno</b>	1,17
<b>Ciclopentano</b>	1,04
<b>1-hexeno</b>	0,88
<b>Ciclopenteno, 1- metil</b>	0,91
<b>Ciclopenteno, 1- metil</b>	1,43
<b>Benceno</b>	1,47
<b>Ciclohexeno</b>	1,01
<b>Tolueno</b>	1,28
<b>Total</b>	100

Fuente: Elaboración propia.

Dentro de lo esperado no se logra detectar  $H_2$  ni  $H_2S$ , sin embargo para el gas de pirolisis de caucho granulado suelen encontrarse en baja proporción, tal como se observa en la tabla 19. Por lo general las trazas de  $H_2S$  se generan por degradación de los enlaces de azufre, en la literatura se reporta que por lo general la proporción de este gas en la mezcla del gas producto de la pirolisis de caucho no varía con el aumento de la temperatura pues se considera que la descomposición se da de forma completa a 550°C, considerando un calentamiento uniforme en el proceso.<sup>162</sup> De forma contraria se reporta un aumento del contenido de  $H_2$  al aumentar la temperatura de pirólisis; una tendencia similar, se observa en los contenidos en  $CH_4$ . Los contenidos en  $CO$  y  $CO_2$  crecen, en general con la

<sup>162</sup> FERNÁNDEZ.A. M., BARRIOCANAL. C. and ALVAREZ. R Op. Cit., p 240-241.

temperatura, como consecuencia de mayor degradación de las estructuras orgánicas de la alimentación, especialmente para el granulo de caucho, varios autores sugieren un aumento de CO<sub>x</sub>; por la descomposición de los compuestos inorgánicos presentes en la formulación original<sup>163</sup>. En cuanto a los compuestos de C4 reportados en los análisis, estos son originados por la descomposición del estireno-butadieno y disminuyen con el aumento de la temperatura aumentando la cantidad de hidrocarburos ligeros (C < 1) que en general tienden a aumentar ligeramente al incrementarse la temperatura de pirólisis<sup>164</sup>.

**Tabla 19. Compuestos químicos en (%mol) y poder calorífico (MJ/Nm<sup>3</sup>) del gas de síntesis del proceso de pirólisis de caucho de neumáticos a diferentes temperaturas**

Componentes	NT*					ELTs*				
	Temperatura de proceso					Temperatura de proceso				
	400	450	500	550	600	400	450	500	550	600
<b>Syngas</b>										
H <sub>2</sub>	8	9,1	11,6	17,3	19,6	5,3	7,8	13,5	16,7	23,5
CH <sub>4</sub>	20,3	21,8	27,5	32,1	39,6	17	17,1	27,2	31,4	34,3
CO	4,5	2,7	3,1	2	2,1	3,4	4,5	3,3	2,8	1,9
CO <sub>2</sub>	5,8	5,2	4,6	3,1	2,8	6	7,6	5,3	4	3,5
C <sub>2</sub> H <sub>4</sub>	9,2	9,9	9,1	8,2	6,6	11,6	6,7	8,4	8	7,7
C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>	6,6	8,6	10,6	10	9,9	5,9	6,1	10,1	10	8,7
H <sub>2</sub> S	0,9	1,3	1	1	0,2	0,3	0,3	0,2	0,5	0,5
C <sub>3</sub>	6,5	6,3	5,7	6,4	3,9	7,3	4,7	6,9	6,3	5,1
C <sub>4</sub>	31,8	27,2	19	14,1	7,8	39,2	31,9	21,9	13,9	9,6
<b>Otros</b>	6,4	7,9	7,8	5,8	7,5	4	13,3	3,2	6,4	5,2
<b>GCV (MJ/ Nm<sup>3</sup>)</b>	62,5	61,9	57	52,6	47,9	67	63,9	55,7	52,4	46,9
<b>GCV (MJ/ kg)</b>	45,3	46,1	46,5	48,2	49,1	45,7	44,7	46,2	47,4	48,6

Fuente: LEONARDI, Chiara. Development of an innovative pyrolysis plant for the production of secondary raw materials. Dottorato di ricerca in chimica .Università di Bologna. 2015 \***Diferentes tipos de neumáticos**

### **Poder Calorífico del gas**

Para determinar el poder calorífico del gas resultante del proceso de pirólisis de rebaba de caucho, se considera inicialmente la mezcla reportada por la cromatografía de gases y la incidencia de cada uno de acuerdo a su fracción correspondiente en el gas, a través de la ecuación 7.

<sup>163</sup> *Ibíd.*, p- 241

<sup>164</sup> PINEDO,. Op. Cit., p 67.

### Ecuación 7. Cálculo del poder calorífico de gas

$$PC_{Mezcla} = \sum y_i * PC_i$$

Donde:

- $PC_{Mezcla}$ = Poder calorífico de la mezcla (kJ/g).
- $y_i$ = Fracción molar o másica.
- $PC_i$ = Poder calorífico del compuesto (kJ/g).

Al aplicar esta ecuación, tal como se evidencia en el anexo D, con los datos reportados de poder calorífico de cada compuesto, se obtiene que la mezcla tiene un poder calorífico de 23347,59 KJ/kg (23,347 MJ/kg); lo cual en comparación a lo reportado en la tabla 19 equivale casi a la mitad del poder calorífico reportado, que en promedio es de 42MJ/kg, lo cual se debe a la composición reportada por el análisis cromatográfico, el cual cuenta con una proporción menor en un 16% aproximadamente de gas metano y este es el gas presente con mayor poder calorífico. Adicionalmente en la literatura se logran detectar más especies dentro de la mezcla gaseosa producida en pirolisis de neumáticos que pueden influir en el poder calorífico de las muestras a diferencia de lo hallado para la rebaba de caucho. De igual manera al comparar el poder calorífico del gas de síntesis obtenido con el gas natural se encuentra que este último posee 46,8MJ/kg en poder calorífico<sup>165</sup>, es decir, el gas de síntesis del procesos de pirolisis solo cuenta con el 50% aproximadamente de la cantidad de calor por kilogramo que genera el gas natural al oxidarse completamente, lo cual indica que el aporte de energía por parte del proceso será inferior.

### 3.5 RENDIMIENTO PROCESO DE PIROLISIS

Considerando los resultados obtenidos de la distribución de productos a nivel experimental, se evidencia un efecto considerable de las variables utilizadas, especialmente de la temperatura; tal como se evidencia en las siguientes gráficas. En vista que al aumentarse la temperatura se obtiene una disminución del producto carbonizado, tal como se ve en la gráfica 6 y en consecuencia un aumento en la fracción de aceite y de gas (graficas 7 y 8).

Esto se debe a que en el proceso de degradación térmica del sólido dentro del reactor se llevan a cabo dos procesos; un proceso de degradación, descomposición y carbonización lenta y una volatilización rápida, acompañada de la formación de compuestos volátiles y gases a temperaturas más elevadas. Mejorando así el rendimiento en los otros dos productos, de igual manera se debe considerar que el char también suele contener una parte de cenizas, que como ya se ha dicho en el apartado anterior es importante porque promueve la formación de la fracción

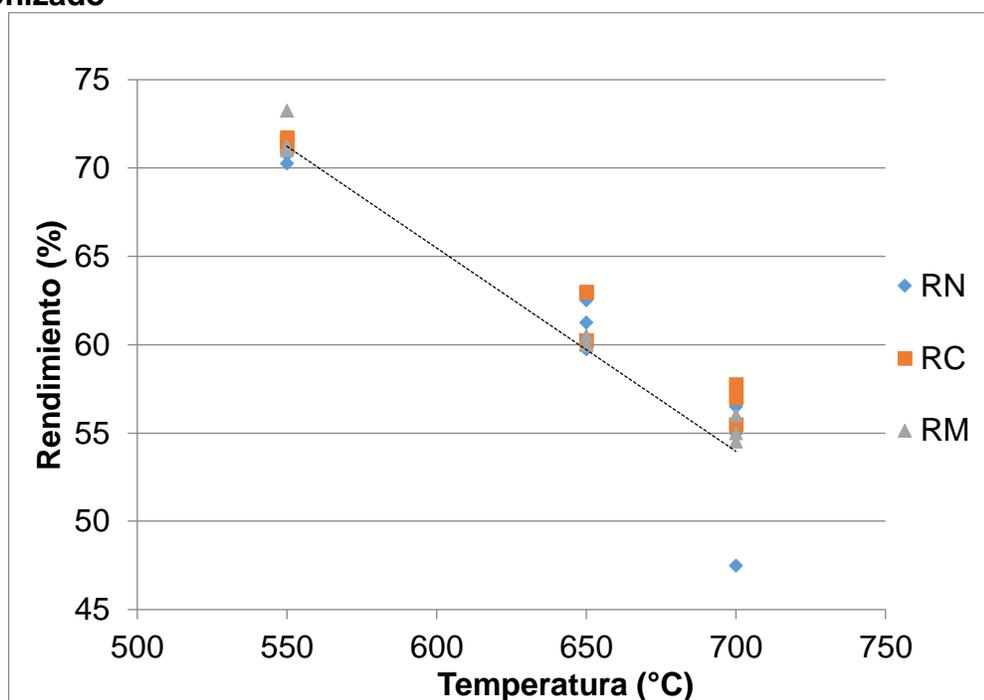
---

<sup>165</sup>LIMA. Antonio. Generación térmica. Poder calorífico. Disponible en: <http://www.antoniolima.web.br.com/arquivos/podercalorifico.htm> [en línea][13 de junio 2019]

gaseosa y tal como expresa Pinedo<sup>166</sup>, también tiene un efecto catalítico sobre procesos de gasificación. Lo cual lleva a considerar la temperatura de operación de gran importancia para la capacidad y la conveniencia de recuperar el char, pues el rendimiento y la cantidad producida están directamente relacionados a ella; y según lo obtenido experimentalmente hasta una temperatura de 700°C presenta una alta proporción considerable. El cual de acuerdo al análisis de la gráfica 6 corresponde aproximadamente a un 53,98%, la cual toma en cuenta los tipos de alimentación utilizados.

Considerando lo anterior y lo reportado en la gráfica 7, se cuenta con un rendimiento aproximado de 13,417% de aceite del proceso de pirólisis el cual si bien es directamente proporcional a la temperatura, su pendiente es menor a la reportada en la gráfica 8 que representa el rendimiento del gas y por ende el aceite tiende a aumentar a una tasa menor.

**Grafica 6. Efecto de la temperatura en el rendimiento del producto carbonizado**



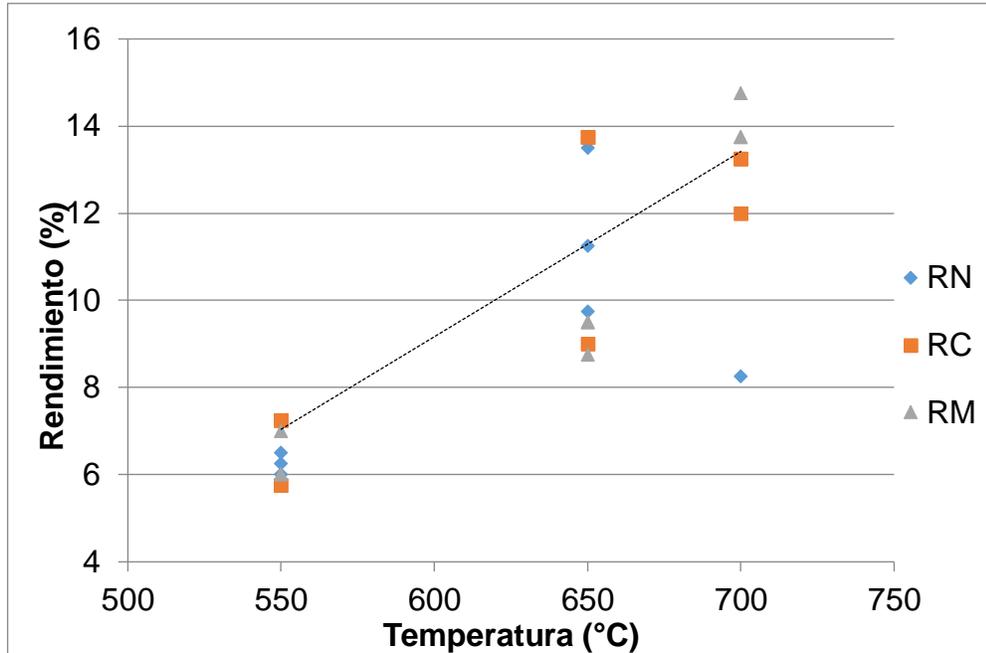
Fuente: elaboración propia.

Continuando desde esa perspectiva, al aumentar de la temperatura del proceso de pirólisis, este incremento en la producción de gases a su vez también genera craqueo de las moléculas orgánicas existentes en el gas de pirólisis, lo cual favorece la formación de compuestos de menor peso molecular que constituyen los gases no condensables, reduciendo así los productos pesados pertenecientes a la fase

<sup>166</sup> *Ibíd.*, p. 45

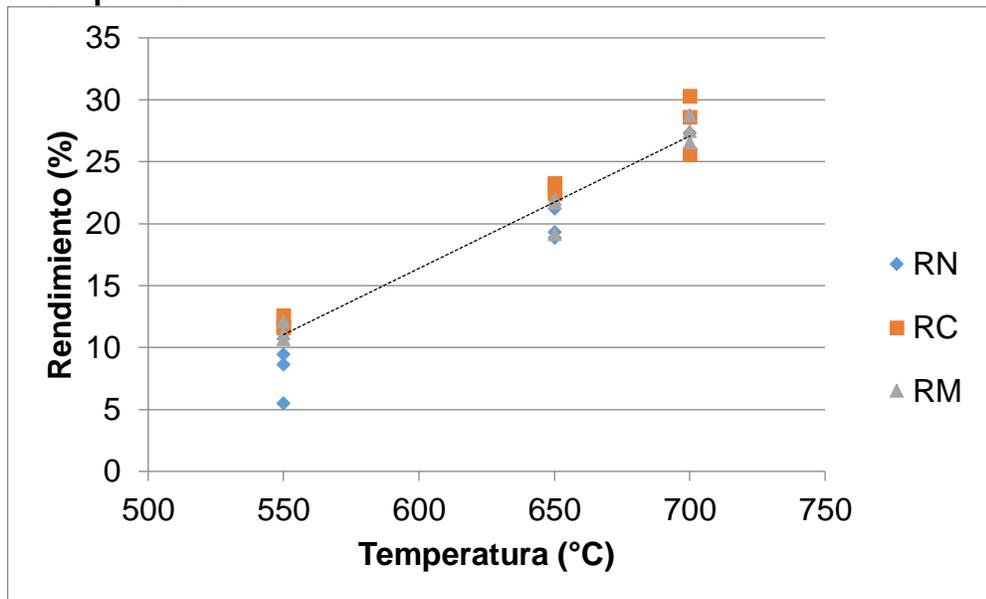
líquida. Entre tanto, de acuerdo a los datos experimentales representados en la gráfica 8. Se obtiene un rendimiento aproximado a 700°C, de 27,06% en gas.

**Grafica 7. Efecto de la temperatura en el rendimiento de aceite del proceso de pirolisis**



Fuente: elaboración propia.

**Grafica 8. Efecto de la temperatura en el rendimiento de gas de síntesis del proceso de pirolisis**



Fuente: elaboración propia.

## 4. ESPECIFICACIONES TÉCNICAS DEL PROCESO DE PIRÓLISIS DE LA REBABA DE CAUCHO

Una vez realizado el proceso de pirólisis de la rebaba de caucho mediante el desarrollo experimental, se determinarán las especificaciones técnicas del proceso de pirólisis de la rebaba de caucho, de acuerdo al diagnóstico realizado para la empresa CROYDON COLOMBIA S.A. que permita la valorización energética de este desperdicio y de pautas para a su posterior implementación.

### 4.1 CRITERIOS DE DISEÑO

**4.1.1 Cantidad de materia prima requerida.** Tal como se ha mencionado a lo largo del desarrollo del proyecto, la importancia de darle un tratamiento final adecuado a los residuos de caucho vulcanizado ha llevado a múltiples soluciones, entre ellas una valorización energética.

Actualmente este residuo de la empresa incurre en costos por concepto de materia prima y disposición final; al proponerse la implementación de un proceso de pirolisis para tratar este material y generara una valorización energética dentro de la empresa, se busca producir energía que pueda complementar el suministro de servicios actuales de la compañía y mitigar los costos asociados a estos. Para ello considerando el diagnóstico inicial se tendrá en cuenta la producción de 1,2 Ton (1200kg) de rebaba mensuales para posteriormente determinar la energía que esta alimentación logra suplir de acuerdo a los rendimientos obtenidos y a los poderes caloríficos establecidos para las diferentes etapas del proceso.

En la etapa de pirólisis se busca utilizar la mayoría de los productos es por ello que se alimentará el gas producido a una caldera de 300BHP, cuya capacidad de vapor es de 10350lb/h y de acuerdo al informe de mantenimiento presentado a la empresa durante el año 2017, trabaja con una eficiencia del 86%.

**4.1.2 Cantidad de energía a producir.** Considerando los criterios expuestos anteriormente para elaborar la propuesta, de la cantidad de materia prima y la eficiencia de la caldera; se busca maximizar la fracción gaseosa y a su vez utilizar la mayoría de los productos combustibles de la pirolisis para aprovechar al máximo el valor energético de la rebaba de caucho tratada, es por ello que se decide proponer un proceso de gasificación posterior a la pirolisis de la fracción sólida.

Teniendo en cuenta esto y los rendimientos previamente establecidos en el capítulo anterior se establece que de la materia prima de alimentación al proceso de pirolisis se obtendrá como fracción gaseosa el 30% y como fracción sólida el 56% aproximadamente, resultando en un 86% de la materia prima convertida en gas; después de haber pasado por el proceso de pirolisis y la gasificación posterior del carbonizado, tal como se plantea continuación en la ecuación 8.

**Ecuación 8. Cálculos de la energía a producir por mes, asumiendo como poder calorífico total el reportado para el proceso de pirolisis en su caracterización**

$$Q_{producida} = \dot{m} * 0,86 * 0,86 * PC_{gas}$$

$$Q_{producida} = 1200 \frac{kg}{mes} * 0,86 * 0,86 * 23347,5995 \frac{kJ}{kg} = 20239567,05 \frac{kJ}{mes}$$

Sin embargo, al considerar rendimientos estándar del proceso de gasificación, se encuentra que el gas producto de este proceso tiene características diferentes al analizado por cromatografía en el capítulo anterior; es por ello que con base a los datos reportados por Barco<sup>167</sup> para gasificación de cuesco de palma, se estimaron los porcentaje en peso de los compuestos de este gas resultante, tal como se demuestra en el anexo E; del cual se obtuvo que el gas del proceso de gasificación puede contar con un poder calorífico de 19460,9692 kJ/kg (19,4609 MJ/kg) aproximadamente teniendo en cuenta un origen distinto de la materia prima.

Al realizar esta consideración se obtiene que la energía total producida por la combinación de estos dos procesos es de 18475300,14 kJ/mes (18475,3 MJ/mes), de acuerdo a la ecuación 9.

**Ecuación 9. Cálculos de la energía a producir mensual, con estimación del poder calorífico del gas del proceso de gasificación**

$$Q_{producida Total} = Q_{producida Pirólisis} + Q_{producida Gasificación}$$

$$Q_{producida pirólisis} = \dot{m} * 0,3 * 0,86 * PC_{gas pirolisis}$$

$$Q_{producida} = 1200 \frac{kg}{mes} * 0,3 * 0,86 * 23347,5995 \frac{kJ}{kg} = 7228416,805 \frac{kJ}{mes}$$

$$Q_{producida Gasificación} = \dot{m} * 0,56 * 0,86 * PC_{gas gasificación}$$

$$Q_{producida} = 1200 \frac{kg}{mes} * 0,56 * 0,86 * 19460,9692 \frac{kJ}{kg} = 11246883,34 \frac{kJ}{mes}$$

$$Q_{producida Total} = 7228416,805 \frac{kJ}{mes} + 11246883,34 \frac{kJ}{mes} = 18475300,14 \frac{kJ}{mes}$$

<sup>167</sup> BARCO, Jimmy. Gasificación de cuesco de palma para la obtención de gas combustible en un reactor de lecho fijo. Universidad Nacional de Colombia. Facultad de Ingeniería. Departamento de Ingeniería Mecánica y Mecatrónica. Bogotá, Colombia.2015.,p-93

**4.1.3 Tamaño de partícula.** Adicionalmente se toma en cuenta un tamaño de partícula medio de 4,69 mm, el cual se obtiene del pretratamiento previo de molienda.

**4.1.4 Tipo de pirólisis.** Para la elección del tipo de pirólisis depende del producto de interés que se pretenda obtener en mayor proporción de los tres tipos posibles (sólido, líquido y gas).

De acuerdo a la experimentación realizada la pirólisis convencional permite obtener la gama de los tres productos en comparación a los demás tipos de pirólisis que permiten obtener ya sea sólo productos en fase sólida o en fase líquida (ver tabla 1).

Este tipo de pirólisis se caracteriza por: ausencia de catalizadores, tasa de calentamiento baja, tiempo de retención del orden de horas, de calentamiento indirecto, a presión atmosférica y la obtención de los tres productos en fase sólida, líquida y gas<sup>168</sup>. Se establece el tipo de calentamiento indirecto para llevar a cabo la propuesta de diseño.

**4.1.5 Tipo de reactor.** Considerando las diferentes etapas del proceso y que se busca obtener la mayor fracción gaseosa posible de la degradación térmica de la rebaba de caucho, se consideran dos etapas: la etapa de pirólisis y una etapa de gasificación posterior del producto sólido. A continuación se describen las características de los reactores que pueden utilizarse bajo esta configuración para cada etapa.

**4.1.5.1 Caracterización del reactor de pirólisis.** Entre las distintas configuraciones disponibles y aplicadas al proceso de pirólisis de diferentes tipos de residuos, se destaca los reactores de lecho fijo, el horno rotatorio, los reactores tubulares y los reactores de lecho fluidizado<sup>169</sup>; dado que su selección y configuración del equipo reactivo es de gran importancia pues de estos dependerán los rendimientos resultantes del proceso.

Durante la sección experimental se utilizó un equipo de lecho fijo, sin embargo estos reactores se caracterizan por un baja velocidad de calentamiento, lo cual resulta en una baja tasa de transferencia de calor; es decir, la temperatura no es uniforme para el toda la muestra de alimentación y en consecuencia, se descompone en diferentes temperaturas de acuerdo al perfil térmico, como se evidencia en la gráfica 5. Por lo tanto para procesos a escala o con una muestra mayor no son recomendables.

---

<sup>168</sup> MARTÍNEZ. Op. Cit., p 179 -213.

<sup>169</sup> KLOSE, Wolfgang. RINCÓN, Sonia. GÓMEZ, Alexánder. Procesos de transporte de biomasa y carbonizados en hornos rotatorios. Instituto de Ingeniería térmica. Departamento de Ingeniería mecánica. Universidad de Kassel. Kassel, Alemania. 2016., p- 2

Tal como se ha mencionado a lo largo del proyecto el producto de interés directo de este proceso es la obtención del gas de síntesis, y tal como lo reporta Leonardi<sup>170</sup> en la tabla 20, al comparar los diversos sistemas experimentales encuentra que para mayores rendimientos de gas a temperaturas cercanas a 700°C, se pueden evaluar el uso de un reactor de lecho fluidizado, un horno rotatorio; en vez del reactor de lecho fijo; sin embargo también reporta un excelente rendimiento a considerar para este tipo de reactores.

**Tabla 20. Revisión bibliográfica de rendimientos de procesos de pirolisis para caucho de neumáticos y sus respectivos sistemas experimentales**

Sistema experimental	Proceso (°C)	Notas	Rendimientos (%)		
			Char	Aceite	Gas de síntesis
Horno horizontal	400-900	Tamaño de la alimentación <2cm	68-38	31-57	1-5
	500	Velocidad de calentamiento 10°C/min	47	42	11
	550-800	Velocidad de calentamiento 7°C/min	34-33	56-55	8-9
Reactor de lecho cónico	425-600	Tamaño de la alimentación <1mm	34-36	64-56	2-8
Reactor batch de lecho estático	450-600	Tamaño de la alimentación 4,5 cm <sup>3</sup> incluye parte metálicas y textiles	37-38	58-53	4-9
	400-700	Tamaño de la alimentación 2cm incluye parte metálicas y textiles	64-51	30-43	2-4
Reactor de lecho fluidizado	360-810	Tamaño de la alimentación 0,32mm	40-30	50-30	10-40
	500-600	Tamaño de la alimentación 1-2mm	30-40	65-51	5-9
Proceso pirocíclico	500	Tamaño de la alimentación 1-2mm, presencia de vapor	31	65	3,5
	500	A vacío (7kPa), neumáticos enteros. 10% de acero	37	47	5
Horno rotatorio	550-680	Tamaño de la alimentación <2cm	49	38-32	2-11
Reactor de lecho fijo	400-700	Muestra triturada	62-41	31-40	7-19
	375-575	Neumáticos de moto, tamaño de la alimentación 4 cm <sup>3</sup>	50-40	42	8-18

Fuente: elaboración propia en base a LEONARDI, Chiara. Development of an innovative pyrolysis plant for the production of secondary raw materials. Dottorato di ricerca in chimica .Università di Bologna. 2015.

<sup>170</sup> LEONARDI, Op. Cit., p. 43

En cuanto al reactor de lecho fluidizado, se caracterizan por una alta velocidad de calentamiento; sin embargo es más utilizada para describir la influencia de temperatura y de residencia en los productos relacionados con el medio ambiente<sup>171</sup>. También este tipo de reactores se utilizan generalmente para investigar los comportamientos de pirolisis flash y explorar reacciones de craqueo secundarias, pero a nivel industrial no tienen gran aplicación en pirólisis debido a la difícil separación del carbonizado del lecho del reactor y requiere de pretratamientos costosos.

Por otro lado, un reactor de horno rotatorio tiene una mejor eficiencia en el calentamiento de la materia prima, dada la rotación lenta en la que trabaja; sin embargo esta tasa de transferencia de calor se da solo a través de las paredes del mismo por ende en algunos caso implica un mayor tiempo de residencia del proceso. Las principales ventajas que ofrecen los hornos rotatorios para procesos industriales están asociadas a su elevada tolerancia para el procesamiento de materias primas con un intervalo amplio de variación de sus propiedades físicas y químicas y al buen control de la temperatura en el reactor, es por ello que considerando la evaluación anterior y la escala de la experimentación realizada, se sugiere el uso de un reactor de horno rotatorio<sup>172</sup>.

**4.1.5.2 Caracterización del reactor de gasificación.** En la etapa de gasificación de la propuesta, se busca aumentar la fracción gaseosa, con el tratamiento y aprovechamiento del producto carbonizado obtenido en el proceso previo de pirolisis. Es por eso que en base a la gasificación del carbón, que es un proceso que transforma el carbón desde su estado sólido, en un combustible gaseoso (compuesto fundamentalmente por CO e H<sub>2</sub>), también conocido como syngas, mediante una oxidación parcial, al que hay que retirar una serie de sustancias indeseables, como son los compuestos de S y la ceniza del carbón original, mediante técnicas bien desarrolladas. El resultado es una fuente energética gaseosa, limpia y transportable<sup>173</sup>. Sin embargo el cómo el proceso se va a alimentar con el carbonizado del proceso de pirolisis de la rebaba de caucho es posible que esta situación difiera, especialmente en cuanto a las sustancias indeseables debido a las trazas de otros compuestos con los que ingrese la muestra al reactor; sin embargo para esta propuesta se va a considerar un comportamiento similar y una conversión total; dado que a su vez el proceso varía de acuerdo a la proporción de oxígeno, por lo general menor a la estequiométrica<sup>174</sup>, de ingreso y de esta depende a su vez de su fuente.

---

<sup>171</sup> *Ibíd.*,p-34

<sup>172</sup> KLOSE, Wolfgang. RINCÓN, Sonia. GÓMEZ, Alexánder. Op.Cit.,p -3

<sup>173</sup> FERNANDEZ. Gasificación del carbón. Centrales térmicas. [En Línea]. Disponible en:<http://files.pfernandezdiez.es/CentralesTermicas/PDFs/17CT.pdf>

<sup>174</sup> PLIEGO-BRAVO, Y.S., GARCIA REYES, M. E., URREA-GARCIA, G. R. y VERGARA-HERNÁNDEZ, M. Simulación del proceso termoquímico sugerido para el aprovechamiento de los lodos residuales como fuente de energía alterna. Instituto Tecnológico de Orizaba. Revista Mexicana de Ingeniería Química Volumen 8, número 3, Vol. 13, No. 2 (2014) 619-629

El tipo de reactores que normalmente se utilizan para estos procesos son variados, y su elección depende de varios factores como pueden ser la granulometría del residuo, la humedad de este, o la limpieza del gas requerida.

En la propuesta se sugiere el uso de un gasificador de lecho fijo, considerando la cantidad a tratar y que por lo general estos reactores suelen ser implementados en procesos cuya alimentación se realiza por lotes y su funcionamiento se resume como explica Garcia a una “cama fija de partículas sólidas de biomasa a través de las cuales se mueve el agente de gasificación. En los reactores de lecho fijo la fase solida se mueve lentamente hacia la parte baja del reactor, a medida que ocurre la descomposición de la biomasa. Este tipo de gasificadores presentan las condiciones técnicas más simples, siendo relativamente fáciles de diseñar y de operar”<sup>175</sup>. Del mismo modo se sugiere especialmente uno con tecnología downdraft, que de acuerdo a lo reportado permite obtener un gas con menor contenido de alquitranes, lo cual eventualmente evitara un tratamiento posterior, a pesar de que sacrifica en el proceso el poder calorífico del gas resultante.

## 4.2 PROPUESTA DE DISEÑO

La propuesta de diseño del proceso de pirólisis de rebaba de caucho para la producción de energía bajo los criterios de diseño planteados anteriormente, consta de una propuesta para el proceso de pretratamiento de la rebaba de caucho que incluye la operación de reducción de tamaño, así mismo las descripción de las etapas de pirólisis y gasificación; identificando de esta manera los posibles usos para los productos líquido y sólido del proceso de pirólisis.

A continuación se muestra el diagrama de proceso:

### Diagrama 4. Esquema general del proceso de pirólisis de rebaba de caucho



Fuente: elaboración propia

**4.2.1 Pre tratamiento de la rebaba de caucho.** El conjunto de procesos o tratamientos previos tienen dos objetivos fundamentales; el homogeneizar la entrada de la alimentación en el reactor, de manera que en el reactor se maneje un flujo de energía constante y de valor similar y disminuir su granulometría para aumentar su superficie específica<sup>176</sup>. Todo ello debe hacerse además con el menor

<sup>175</sup> GARCIA PATIÑO, Harold Jhair. Modelación de la gasificación de biomasa en un reactor de lecho fijo. Tesis Magíster en Ingeniería - Ingeniería Mecánica. Universidad Nacional de Colombia, 2011. p. 12.

<sup>176</sup> GARCIA GARRIDO Santiago. Centrales termoeléctricas de biomasa. RENOVETEC. 2009-20015., P 147.

consumo de energía posible tal como expresa Garcia<sup>177</sup>, ya que toda la energía consumida en estos procesos, a menos que sean energías residuales o energía que puedan utilizarse sin coste, supondrán una disminución de la energía neta generada por el proceso propuesto.

**4.2.1.1 Reducción tamaño de partícula.** Para la propuesta, la rebaba de caucho va a pasar por un proceso previo de molienda en un molino de cuchillas. El cual es ideal para la trituración de materiales blandos a medio duros, frágiles, fibrosos, resistentes o sensibles a la temperatura<sup>178</sup>; la rebaba es triturada por fuerzas de corte, de acuerdo al tamaño de la cuchilla se determina la finura final, diseñado primero para cortar y luego triturar el producto.

Este molino permitirá reducir el tamaño de partícula del material a 4mm aproximadamente, como el flujo de materia prima es bajo se puede dar uso aun molino de baja capacidad y potencia, como por ejemplo el molino de cuchillas serie MCV 30/20; cuyo rendimiento es de 50 kg/h y tiene una potencia del motor de 1,5 kW<sup>179</sup>.

**4.2.2 Etapa de pirólisis.** La etapa de reacción de pirólisis corresponde a la segunda etapa dentro del proceso, donde la rebaba de caucho se va a descomponer por causa del calor en ausencia de oxígeno, para la generación de productos sólidos, líquidos y gaseosos, teniendo en cuenta los porcentajes de rendimiento del proceso experimental de la rebaba de caucho correspondientes: producto sólido (carbonizado) 56%, producto líquido (aceite) 14% y el producto gaseoso (gas) 30%.

El desarrollo de la pirólisis es de gran importancia ya que constituye el paso inicial para el desarrollo de la gasificación, además allí se define las características de los productos generados y las fracciones finales que se obtienen en cada uno de ellos. Para la etapa de reacción de pirólisis se tendrá en cuenta lo expuesto en el capítulo 3, de acuerdo al rendimiento máximo en el gas.

**4.2.2.1 Uso de los productos de la etapa de reacción de pirólisis.** Se determina el posible uso para los productos salientes de la etapa de pirólisis de rebaba de caucho, con el fin visualizar completamente el ciclo del proceso y generar alternativas prácticas que permitan el mayor aprovechamiento de los productos del proceso en su totalidad.

- **Producto sólido (Carbonizado).** El producto sólido obtenido de la etapa de pirólisis, a pesar de no ser el producto de interés dentro del proyecto; para dar

---

<sup>177</sup> Ibíd., p. 167. VEYCO. Molinos y mezcladoras.

<sup>178</sup> VEYCO. Molinos y mezcladoras. Molinos de cuchillas. [En línea] Disponible en: <http://molinosymezcladoras.com/molinos-de-cuchillas.html>

<sup>179</sup> WITTMAN. Molinos y trituradores. Reciclaje óptimo de piezas de plástico. [En línea] Disponible en: [https://www.wittmann-group.com/uploads/tx\\_wpsidebar/Molinos\\_span\\_2017-09\\_lowres.pdf](https://www.wittmann-group.com/uploads/tx_wpsidebar/Molinos_span_2017-09_lowres.pdf)

una la valorización energética dentro del proceso se decide alimentar en su totalidad al reactor de la etapa de gasificación para generar de esta manera mayor producción del producto de interés (gas).

- **Producto líquido (Aceite).** El producto líquido obtenido de la etapa de pirólisis, a pesar de no ser el producto de interés dentro del proyecto, es un producto que luego de posteriores tratamientos tiene un poder combustible importante entre 9952 y 10300 kcal/kg<sup>180</sup>; este producto no se recirculaba ni alimentaba a posteriores etapas en el proceso por consiguiente se almacenaba para posterior venta y o distribución en otro tipo de valorización energética para la empresa.
- **Producto Gaseoso (Gas).** Como se mencionó anteriormente el gas es el producto de mayor interés para el proyecto y será utilizado en su totalidad para la producción de energía térmica mediante el uso de una caldera; el gas sale de la etapa de reacción de pirólisis y será alimentado directamente al quemador de caldera.

**4.2.3 Proceso de gasificación.** La gasificación corresponde a la tercera etapa del proceso. La temperatura final del proceso se evalúa en el rango entre 25°C y 900°C, y se considera constante en el gasificador. En esta etapa proceso, sólo se considera la reacción global del carbonizado producido en la etapa de reacción de pirólisis y su conversión completa; y el agente gasificante.

**4.2.4 Selección del reactor para el proceso de valorización de rebaba de caucho.** Conforme a los criterios de diseño y a la baja cantidad de materia prima a procesar, se considera el uso de un único reactor que lleve a cabo ambas etapas. Para lo cual en base a las sugerencias anteriores se decide utilizar un reactor de lecho fijo el cual permitiría un buen rendimiento en el proceso en la fracción gaseosa, una adecuada recuperación de cenizas y facilita la implementación tecnológica del equipo con su respectivo mantenimiento; sin embargo esta selección se tendrá en cuenta para establecer y disminuir los costos fijos del proceso<sup>181</sup>. Pues como se demostró en la sección anterior, la estimación de la energía producida se da en base a datos experimentales de otra materia prima y por tanto los costos variables por este concepto de consumo energético también llevan asociado esta consideración en el balance de energía de las dos etapas reactivas.

**4.2.5 Diagrama PFD.** El proceso de pirólisis anteriormente planteado, el cual consta de una operación de pre tratamiento de la rebaba de caucho (reducción de tamaño), etapa de reacción de pirólisis y gasificación contara de un reactor de lecho fijo y sus respectivos sistemas de condensación y almacenamiento, este se puede

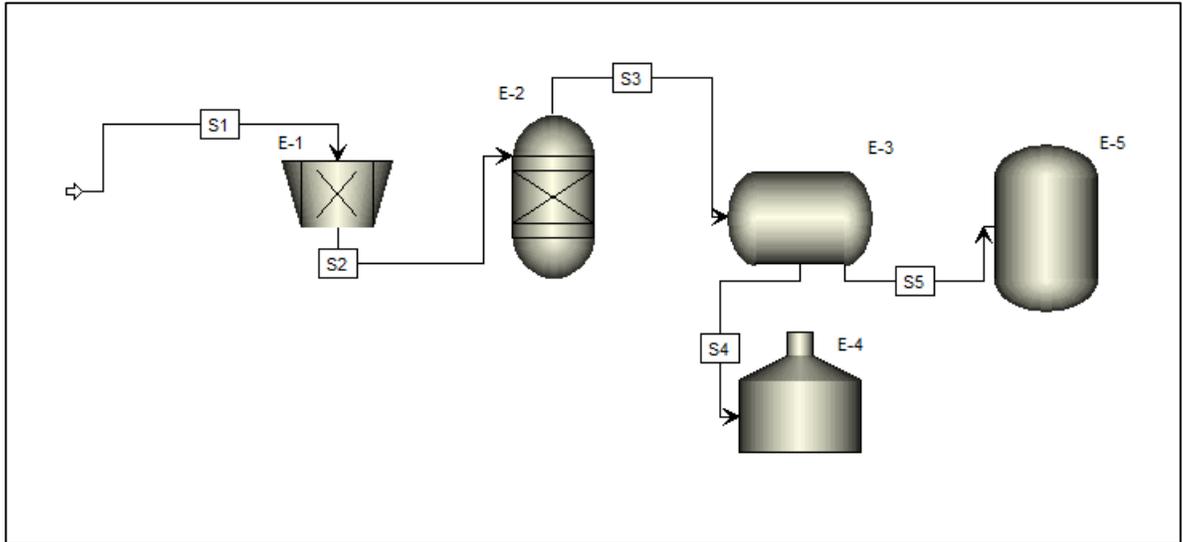
---

<sup>180</sup> LEONARDI, Op. Cit., p. 44

<sup>181</sup> MENDOZA, Libardo. Fundación Universidad de América. Bogotá, Colombia. Observación Inédita 2019

ver reflejado mediante el siguiente diagrama PFD (ver diagrama 5), así mismo la función y nombre de los equipos y las corrientes de proceso pueden observarse en las tabla 21.

**Diagrama 5. Diagrama PDF del proceso de valorización de pirólisis de rebaba de caucho**



Fuente: elaboración propia.

**Tabla 21. Descripción y función de equipos y corrientes en el diagrama PFD del proceso**

Equipo/ Corriente	Descripción	Operación
E-1	Molino de cuchillas	Molienda
E-2	Reactor de lecho fijo	Etapas de pirólisis y gasificación
E-3	Separador	Condensación de producto líquido y paso de gas
E-4	Caldera	Combustión interna de gases
E-5	Tanque	Almacenamiento de aceite
S1	Rebaba de caucho	N.A
S2	Rebaba de caucho molida	N.A
S3	Productos gaseosos condensables y no condensables	N.A
S4	Gases no condensable	N.A
S5	Aceite condensado	N.A

Fuente: elaboración propia

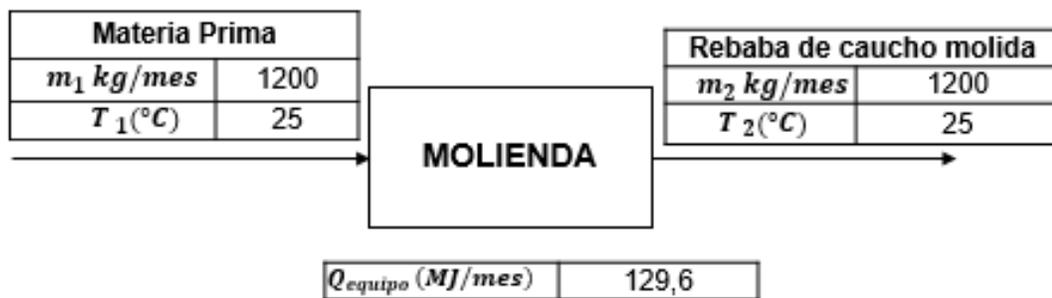
Teniendo en cuenta el cambio en la operación al hacer uso de un solo reactor, el comportamiento ideal de la propuesta generaría un gas de alimentación a la caldera y cenizas durante el proceso. Sin embargo, al considerar la presencia de algunos compuestos condensables dentro de la mezcla gaseosa resultante; se sugiere el uso de un separador o una trampa de agua que permita el flujo del gas hacia la caldera para su uso final, disminuyendo el riesgo de incrustaciones a futuro en el sistema de generación de energía térmica. Por consiguiente también se sugiere el uso de un tanque adicional para recolectar estas trazas aceitosas, no obstante, esta adaptación final al proceso no se tomará en cuenta dentro de los costos de inversión dado que la cantidad de materia prima a procesar es baja, equivalente a 1,2 Ton/mes y así pues las trazas esperadas son mínimas.

#### 4.3 BALANCE DE MASA Y ENERGÍA

Se realiza el balance de masa de manera similar a como se desarrolló para el proceso de pirólisis experimental (ver capítulo 3), con una alimentación de rebaba de caucho de 1200 kg/mes (ver sección 4.1.1).

- **Balance de masa para la etapa de pre tratamiento (Reducción tamaño de partícula) del proceso.**

**Diagrama 6. Etapa de pre tratamiento (Reducción de tamaño de partícula) del proceso de pirólisis de rebaba de caucho**



Fuente: elaboración propia.

El balance de masa global correspondiente al diagrama 6 se define en la siguiente ecuación, sin considerar pérdidas en la operación:

#### Ecuación 10. Balance de masa pre tratamiento

$$M_1 = M_2$$

Donde:

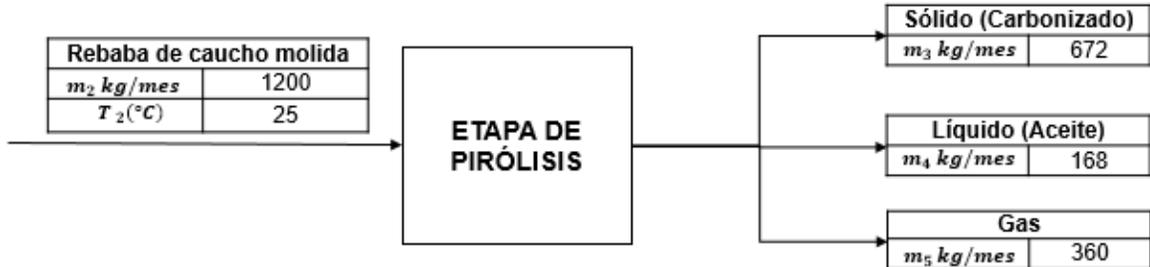
- $M_1$  = Masa tipo de rebaba de caucho
- $M_2$  = Masa rebaba de caucho molida

$$M_1 = M_2$$

$$1200 \frac{kg}{mes} = 1200 \frac{kg}{mes}$$

- Balance de masa para la etapa de reacción de pirólisis del proceso.

Diagrama 7. Etapa de reacción de pirólisis del proceso de pirólisis de rebaba de caucho



Fuente: elaboración propia.

El balance de masa global correspondiente al diagrama 7 se define en la siguiente ecuación:

**Ecuación 11. Balance de masa etapa de reacción de pirólisis**

$$M_2 = M_3 + M_4 + M_5$$

Se tiene en cuenta que para el balance de masa en la etapa de pirólisis

Donde:

- $M_2 =$  Masa rebaba de caucho molida
- $M_3 =$  Masa carbonizado
- $M_4 =$  Masa Aceite
- $M_5 =$  Masa Gas

$$M_2 = M_3 + M_4 + M_5$$

$$M_{3(\text{Sólido-Carbonizado})} = 1200 \text{ kg} * 0,56 = 672 \text{ kg}$$

$$M_{4(\text{Líquido-Aceite})} = 1200 \text{ kg} * 0,14 = 168 \text{ kg}$$

$$M_{5(\text{Gas})} = 1200 \text{ kg} * 0,30 = 360 \text{ kg}$$

$$M_2 = 672 \text{ kg} + 168 \text{ kg} + 360 \text{ kg} = 1200 \text{ kg}$$

- Balance de masa para la etapa de gasificación del proceso.

**Diagrama 8. Etapa de gasificación del proceso de pirólisis de rebaba de caucho**



Fuente: elaboración propia.

**Ecuación 12. Balance de masa etapa de gasificación**

$$M_4 = M_6$$

**Donde:**

- $M_1 =$  Masa carbonizado
- $M_2 =$  Masa gas saliente de la etapa de gasificación

$$672 \frac{kg}{mes} = 672 \frac{kg}{mes}$$

Para el balance de energía del proceso, la etapa de reacción de pirólisis se estableció una temperatura de 700°C y la etapa de gasificación a una temperatura 900°C, temperatura característica para este.

Se realiza el balance de energía correspondiente para cada uno, sabiendo que “el principio que rige los balances de energía es la ley de conservación de la energía que establece que la energía no puede crearse ni destruirse”<sup>182</sup>, el balance de energía integral para un sistema cerrado puede definirse como:

**Ecuación 13. Balance de energía para un sistema cerrado**

$$(E. final sistema - E. inicial sistema) = E. neta transferida al sistema$$

Con base en lo anterior se tiene que la “energía total de un sistema corresponde a la sumatoria de tres tipos de energía”<sup>183</sup>, la energía cinética que es la “energía debida al movimiento traslacional del sistema considerado como un todo, respecto

<sup>182</sup> GREENPOWER. [Sitio web]. Pirólisis de la madera (Destilación de madera). [Consultado en 28 de diciembre del 2018]. Disponible en: <http://carboneros.org/clients/articles/woodpyrolysis/esp/>

<sup>183</sup> Balances de energía. Procesos industriales. [Anónimo]. [En línea]. [Consultado en 30 de enero del 2019]. p. 3. Disponible en: <http://www3.fi.mdp.edu.ar/procesosindustriales1/archivos/Balance%20de%20energia>

a una referencia o a la rotación del sistema alrededor de un eje”<sup>184</sup>, la energía potencial que es “la energía debida a la posición del sistema en un campo potencial (campo gravitatorio o campo electromagnético)”<sup>185</sup> y finalmente la energía interna que se considera como “toda energía que posee un sistema que no sea cinética ni potencial, tal como la energía debida al movimiento relativo de las moléculas respecto al centro de masa del sistema o energía debida a la vibración de las moléculas o la energía producto de las interacciones electromagnéticas de las moléculas e interacciones entre los átomos y/o partículas subatómicas que constituyen las moléculas”<sup>186</sup>; con base en lo anterior los términos de la ecuación 19 se pueden definir como:

- Energía inicial del sistema =  $U_i + E_{ci} + E_{pi}$
- Energía final del sistema =  $U_f + E_{cf} + E_{pf}$
- Energía transferida =  $Q + W$

Donde “los subíndices i y f se refieren a los estados inicial o final del sistema, U, Ek, Ep, Q y W representan energía interna, energía cinética, energía potencial, calor transferido al sistema por los alrededores y trabajo realizado por los alrededores sobre el sistema”<sup>187</sup>; Reagrupando los términos tenemos entonces:

#### **Ecuación 14. Primera ley de la termodinámica para sistemas cerrados**

$$(U_f + U_i) + (E_{cf} - E_{ci}) + (E_{pf} - E_{pi}) = Q + W$$

$$\Delta U + \Delta E_c + \Delta E_p = Q + W$$

Con base en lo anterior se puede decir que la energía cinética y potencial son igual a cero (0) debido a que en primera instancia el sistema no se está acelerando o retardando y en segunda instancia no está ascendiendo ni cayendo; por otra parte se considera que el trabajo también es igual a cero bajo la suposición de que no hay “partes móviles, ni corrientes eléctricas, ni radiación en los límites del sistema”<sup>188</sup>. De igual manera se supone que el conjunto de reacciones endotérmicas y exotérmicas que tienen lugar a lo largo del proceso de degradación térmica, energéticamente se anulan entre sí.

De igual manera para la estimación del balance de energía se tienen en cuenta los valores de calor específico reportados por Napoli et. al<sup>189</sup> para el procesamiento de caucho de neumáticos.

---

<sup>184</sup> *Ibíd.*, p. 1.

<sup>185</sup> *Ibíd.*, p. 1.

<sup>186</sup> *Ibíd.*, p. 1.

<sup>187</sup> *Ibíd.*, p. 4.

<sup>188</sup> *Ibíd.*, p. 4.

<sup>189</sup> NAPOLI, A. SOUDAIS, Y. LECOMTE, D. Scrap tire pyrolysis: experiment and modeling. Ecole des Mines d' Albi -Carmaux Centre Energetique-Environnement Campus Iarlard. S. Castillo Laboratoire Materiaux et Energie Universite Paul Sabatier . Toulouse. Francia .,p-560

- **Balance de energía para la etapa de molienda**

$$(U_f + U_i) + (E_{cf} - E_{ci}) + (E_{pf} - E_{pi}) = Q + W$$

$$\Delta U + \Delta E_c + \Delta E_p = Q + W$$

$$\Delta U = Q_{R \text{ caucho}} = \dot{m} \cdot PC_{R \text{ caucho}}$$

$$\Delta U = Q_{R \text{ caucho}} = 1200 \frac{\text{kg}}{\text{mes}} * 39,2 \frac{\text{MJ}}{\text{kg}} = 47040 \frac{\text{MJ}}{\text{mes}}$$

$$Q_{\text{molino}} = 129,6 \frac{\text{MJ}}{\text{mes}}$$

$$Q_{R \text{ caucho}} + Q_{\text{molino}} = Q_{R \text{ caucho molida}}$$

$$47040 \frac{\text{MJ}}{\text{mes}} + 129,6 \frac{\text{MJ}}{\text{mes}} = 47169,6 \frac{\text{MJ}}{\text{mes}}$$

Considerando la energía requerida para el funcionamiento del molino, establecida en la sección anterior y su equivalencia, se encuentra una salida del proceso de 47050,8 MJ/mes, sin embargo puede ser despreciable porque la energía se invierte en el cambio físico de la materia.

- **Balance de energía para la etapa de reacción de pirólisis del proceso.**

**Ecuación 15. Balance de energía para la etapa de pirólisis**

$$(U_f + U_i) + (E_{cf} - E_{ci}) + (E_{pf} - E_{pi}) = Q + W$$

$$\Delta U + \Delta E_c + \Delta E_p = Q + W$$

$$\Delta U = Q_{R \text{ caucho molida}} = \dot{m} \cdot PC_{R \text{ caucho}}$$

$$\Delta U = Q_{R \text{ caucho molida}} = 1200 \frac{\text{kg}}{\text{mes}} * 39,2 \frac{\text{MJ}}{\text{kg}} = 47040 \frac{\text{MJ}}{\text{mes}}$$

$$\Delta U = Q_{\text{Reactor Pirólisis}} = m * C_{p \text{ caucho}} * \Delta T$$

$$\Delta U = Q_{\text{Reactor Pirólisis}} = 1200 \frac{\text{kg}}{\text{mes}} * 1,417 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}^\circ\text{C}} * (700^\circ\text{C} - 25^\circ\text{C})$$

$$\Delta U = Q_{\text{Reactor Pirólisis}} = 1147770 \frac{\text{kJ}}{\text{mes}} = 1147,77 \frac{\text{MJ}}{\text{mes}}$$

$$Q_{R \text{ caucho molida}} + Q_{\text{Reactor Pirólisis}} = Q_{\text{Carbonizado}} + Q_{\text{Aceite}} + Q_{\text{Gas}}$$

$$Q_{\text{Carbonizado}} = \dot{m} \cdot PC_{\text{carbonizado}} = 672 \frac{\text{kg}}{\text{mes}} * 28,8 \frac{\text{MJ}}{\text{kg}} = 19353,6 \frac{\text{MJ}}{\text{mes}}$$

$$Q_{\text{Aceite}} = \dot{m} \cdot PC_{\text{aceite}} = 168 \frac{\text{kg}}{\text{mes}} * 42,367 \frac{\text{MJ}}{\text{kg}} = 7117,656 \frac{\text{MJ}}{\text{mes}}$$

$$Q_{\text{Gas}} = \dot{m} \cdot PC_{\text{gas}} = 360 \frac{\text{kg}}{\text{mes}} * 23,35 \frac{\text{MJ}}{\text{kg}} = 8405,13 \frac{\text{MJ}}{\text{mes}}$$

$$Q_{R \text{ caucho molida}} + Q_{\text{Reactor Pirólisis}} = 47040 \frac{\text{MJ}}{\text{mes}} + 1147,77 \frac{\text{MJ}}{\text{mes}}$$

$$Q_{R \text{ caucho molida}} + Q_{\text{Reactor Pirólisis}} = 48187,77 \frac{\text{MJ}}{\text{mes}}$$

$$Q_{\text{Carbonizado}} + Q_{\text{Aceite}} + Q_{\text{Gas}} = 19353,6 \frac{\text{MJ}}{\text{mes}} + 7117,656 \frac{\text{MJ}}{\text{mes}} + 8405,13 \frac{\text{MJ}}{\text{mes}}$$

$$Q_{\text{Carbonizado}} + Q_{\text{Aceite}} + Q_{\text{Gas}} = 34876,386 \frac{\text{MJ}}{\text{mes}}$$

$$48187,77 \frac{\text{MJ}}{\text{mes}} \neq 34876,386 \frac{\text{MJ}}{\text{mes}}$$

$$\text{Perdidas} = 13311,384 \frac{\text{MJ}}{\text{mes}}$$

Al evaluar las entradas y salidas de la etapa de pirólisis no se encuentra una igualdad, esto se debe a los valores de poder calorífico utilizados, pues muchos de estos son de carácter teórico y solo el relacionado al gas es experimental, es por ello que el valor faltante en la salida se considera como perdida.

- Balance de energía para la etapa de gasificación del proceso.

**Ecuación 16. Balance de energía para la etapa de gasificación**

$$(U_f + U_i) + (E_{cf} - E_{ci}) + (E_{pf} - E_{pi}) = Q + W$$

$$\Delta U + \Delta E_c + \Delta E_p = Q + W$$

$$\Delta U = Q = m \cdot C_p_{\text{carbonizado}} \cdot \Delta T$$

$$\Delta U = Q = 672 \frac{\text{kg}}{\text{mes}} * 1,779 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}^\circ\text{C}} * (900^\circ\text{C} - 25^\circ\text{C})$$

$$\Delta U = Q_{\text{Reactor de Gasificación}} = 1046052 \frac{\text{kJ}}{\text{mes}} = 1046,052 \frac{\text{MJ}}{\text{mes}}$$

$$Q_{\text{Carbonizado}} + Q_{\text{Reactor de Gasificación}} = Q_{\text{Gas Final}}$$

$$Q_{\text{Carbonizado}} = \dot{m} \cdot PC_{\text{carbonizado}} = 672 \frac{\text{kg}}{\text{mes}} * 28,8 \frac{\text{MJ}}{\text{kg}} = 19353,6 \frac{\text{MJ}}{\text{mes}}$$

$$Q_{\text{Gas}} = \dot{m} \cdot PC_{\text{gas}} = 672 \frac{\text{kg}}{\text{mes}} * 19,46 \frac{\text{MJ}}{\text{kg}} = 13077,77 \frac{\text{MJ}}{\text{mes}}$$

$$Q_{\text{Carbonizado}} + Q_{\text{Reactor de Gasificación}} = 19353,6 \frac{\text{MJ}}{\text{mes}} + 1046,052 \frac{\text{MJ}}{\text{mes}}$$

$$Q_{\text{Carbonizado}} + Q_{R.\text{Gasificación}} = 20399,652 \frac{\text{MJ}}{\text{mes}}$$

$$20399,652 \frac{\text{MJ}}{\text{mes}} \neq 13077,77 \frac{\text{MJ}}{\text{mes}}$$

$$\text{Perdidas} = 7321,882 \frac{\text{MJ}}{\text{mes}}$$

El balance de energía de la etapa de gasificación parte nuevamente del valor de poder calorífico establecido a través del comportamiento reportado por Barco, considerando esta aproximación y los valores teóricos referentes al carbonizado utilizados, es que se encuentra nuevamente un valor para pérdidas en el balance.

Por otro lado no se considera para ninguna de las etapas reactivas, la cinética del proceso por ende se atañen estas pérdidas al fenómeno de conversión química que pueda ocurrir en los reactores durante las etapas.

Como podemos observar, la energía interna asociada al proceso de gasificación es menor que la obtenida en el proceso de pirólisis, pues se obtuvieron valores de 1147770 kJ y 1046052 kJ aproximadamente a temperaturas de operación de 700°C y 900°C respectivamente en donde una vez más este valor aumenta con el aumento de la temperatura pasando de rendimientos para el gas del 30% en pirólisis a 700°C a rendimientos para el gas cercanos al 86% en el proceso, al contemplar la etapa de gasificación a una temperatura de operación de 900°C.

A continuación se muestra el resumen del balance de masa y energía en los diagramas 9 y 10 para el proceso de pirólisis de rebaba de caucho. Del cual considerando los datos anteriores se obtiene una producción neta de 16277590,1 kJ/mes, al descontar la energía necesaria para la operación del proceso:

#### **Ecuación 17. Balance de energía del proceso de valorización de rebaba de caucho**

$$Q_{ENTRADA A EQUIPOS} = Q_{PRODUCIDA TOTAL}$$

$$Q_{producida Total} = Q_{Molino} + Q_{Reactor Pirólisis} + Q_{Reactor Gasificación}$$

$$18475300,14 \frac{kJ}{mes} \neq 2323422 \frac{kJ}{mes}$$

$$18475300,14 \frac{kJ}{mes} > 2323422 \frac{kJ}{mes}$$

$$18475,30014 \frac{MJ}{mes} > 2323,422 \frac{MJ}{mes}$$

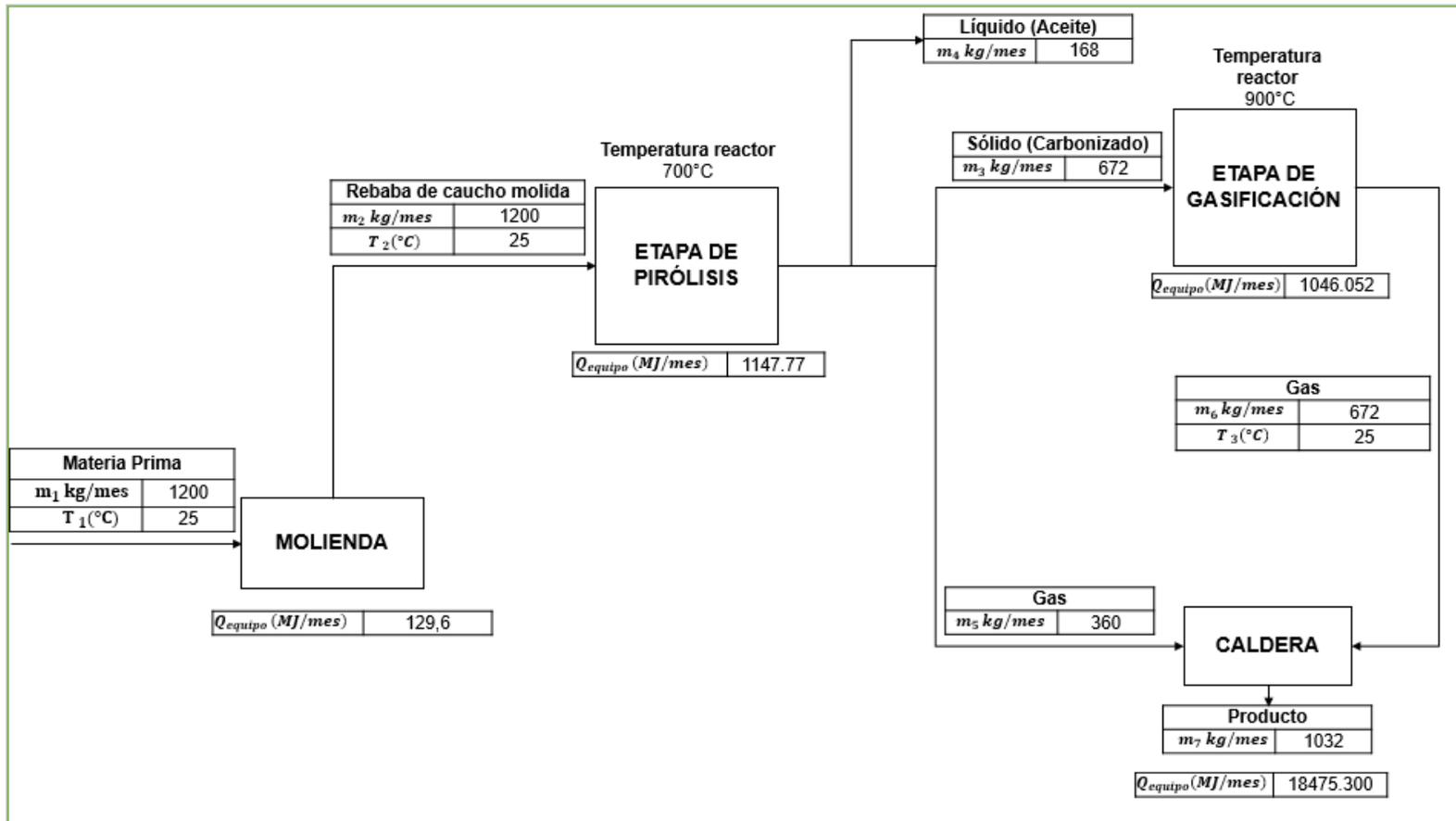
#### **Ecuación 18. Cálculo de energía neta producida por el proceso**

$$Q_{PRODUCIDA NETA} = Q_{PRODUCIDA TOTAL} - Q_{ENTRADA A EQUIPOS}$$

$$Q_{PRODUCIDA NETA} = 18475300,14 \frac{kJ}{mes} - 2323422 \frac{kJ}{mes}$$

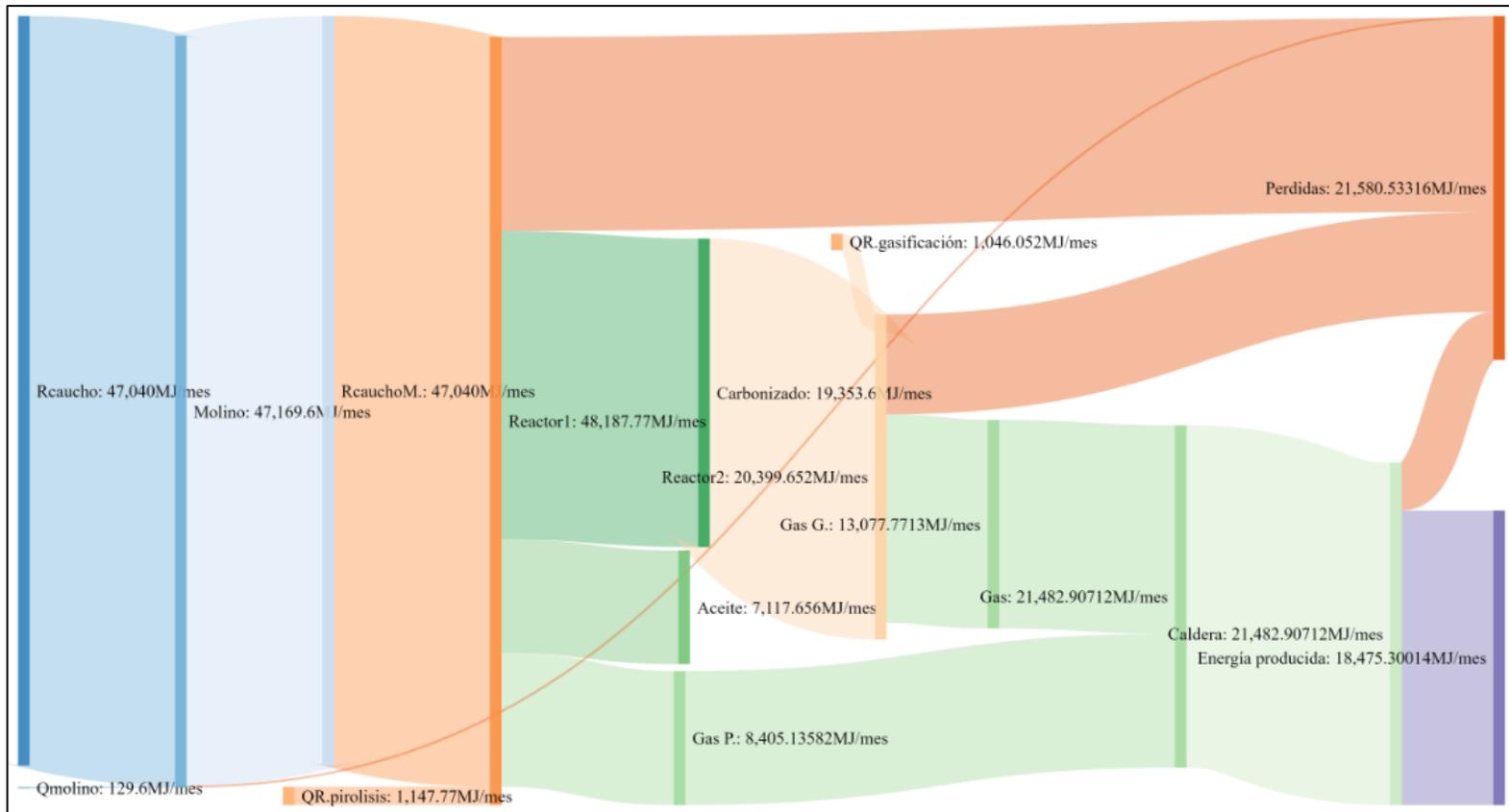
$$Q_{PRODUCIDA NETA} = 16277590,1 \frac{kJ}{mes} = 16277,5901 \frac{MJ}{mes}$$

Diagrama 9. Balance de masa y energía de las especificaciones técnicas del proceso de pirólisis de la rebaba de caucho.



Fuente: elaboración propia.

**Diagrama 10. Diagrama de Sankey del balance de energía.**



Fuente: elaboración propia.

Luego de establecer el comportamiento energético y evidenciar el suministro necesario para cada equipo, se plantea el uso de un único reactor, tal como se evidencia en el diagrama 5, variando las condiciones de operación de 25°C a 900°C en el reactor se obtiene un consumo de energía de 1487,85 MJ/mes con el cual se ve una disminución en el suministro de energía de 705,97 MJ/mes y en consecuencia un aumento de la energía neta producida. Todo esto considerando un comportamiento igual al planteado en el modelo anterior de dos etapas reactivas y sus respectivas condiciones.

**Ecuación 19. Cálculo de energía neta producida por el proceso con un solo reactor**

$$(U_f + U_i) + (E_{cf} - E_{ci}) + (E_{pf} - E_{pi}) = Q + W$$

$$\Delta U + \Delta E_c + \Delta E_p = Q + W$$

$$\Delta U = Q = m * C_{p_{R.Caicho}} * \Delta T$$

$$\Delta U = Q = 1200 \frac{kg}{mes} * 1,417 \frac{kJ}{kg^{\circ}C} * (900^{\circ}C - 25^{\circ}C)$$

$$\Delta U = Q = 1487850 \frac{kJ}{mes} = 1487,85 \frac{MJ}{mes}$$

$$Q_{producida\ NETA} = Q_{producida\ TOTAL} - Q_{entrada\ a\ EQUIPOS}$$

$$Q_{producida\ NETA} = 18475,300 \frac{MJ}{mes} - 1617,45 \frac{MJ}{mes}$$

$$Q_{producida\ NETA} = 16857,85 \frac{MJ}{mes}$$

## 5. ANÁLISIS FINANCIERO

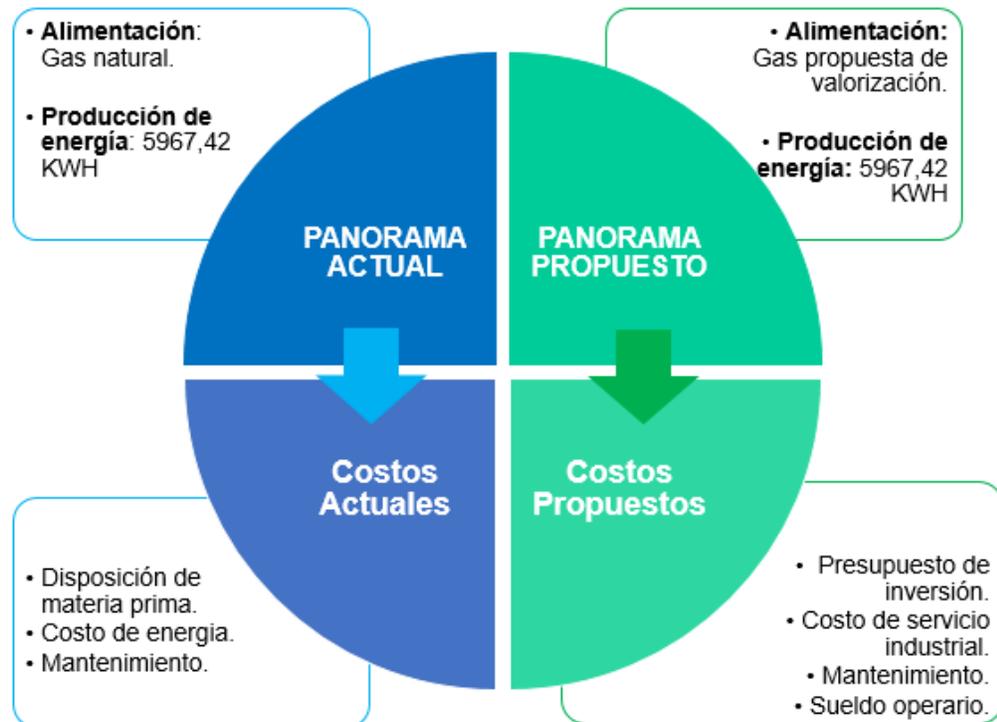
El presente capítulo tiene como objeto hacer una presentación de la viabilidad financiera de la valorización del proceso de pirólisis de la rebaba de caucho, asociando sus costos operacionales y las inversiones necesarias para ponerlo en funcionamiento; toda esta información proyectada al periodo (5 años), que corresponde al periodo de tiempo (2020-2024) y de esta manera lograr realizar una comparación con el actual de la empresa.

A través de esto, se busca determinar qué tan viable desde el punto de vista financiero es llevar a cabo la implementación de este proyecto mediante la medición de la rentabilidad económica del mismo. Esta medición se realizó por medio del cálculo de indicadores financieros dentro de los cuales se encuentran: la Tasa interna de oportunidad (TIO), el costo anual uniforme (CAUE) y valor presente (VP).

### 5.1 DISCRIMINACIÓN DE COSTOS

A continuación se evidencian los costos actuales y costos propuestos, con el objetivo de realizar una comparación entre estos dos escenarios; se establece como caso de referencia la producción total de energía 5967,42 KWH de la propuesta de valorización.

**Figura 12. Comparación del panorama actual y el panorama propuesto**



Fuente: elaboración propia.

**5.1.1 Costos actuales.** Actualmente la empresa CROYDON COLOMBIA S.A tiene implementado un proceso donde se evidencian unos costos por disposición de materia prima, costo de energía y mantenimiento.

**5.1.1.1 Disposición de materia prima.** El costo por disposición de materia prima se da de acuerdo al costo del servicio de aseo según las tarifas ofrecidas por la empresa LIME S.A. E.S.P, para un cliente tipificado como gran productor industrial con aforo O/E, tal como se evidencia en el (Ver anexo F).

**Tabla 22. Costo por disposición de materia prima**

CONCEPTO		CONSUMO Ton	VALOR / 0,25Ton	VALOR MES	VALOR ANUAL
Disposición de materia prima	Costo de servicio de aseo	1,2	73.656	353.549	4.242.586

Fuente. elaboración propia.

**5.1.1.2 Costo de energía.** Estos costos son estimados de acuerdo al costo de energía térmica contemplado por la empresa (ver anexo F).

**Tabla 23. Costo de energía térmica**

CONCEPTO		CONSUMO KWH	VALOR /KWH	VALOR MES	VALOR ANUAL
Consumo de energía	Gas natural	5967,47	163,6	976.278	11.715.337

Fuente. elaboración propia.

**5.1.1.3 Mantenimiento.** La empresa Croydon Colombia S.A tiene un costo anual de mantenimiento interno ya establecido este valor se reporta en la tabla 24, el cual está bajo condiciones de confidencialidad.

**Tabla 24. Costo de mantenimiento**

CONCEPTO	VALOR MES	VALOR ANUAL
Mantenimiento	10.000.000	120.000.000

Fuente. elaboración propia.

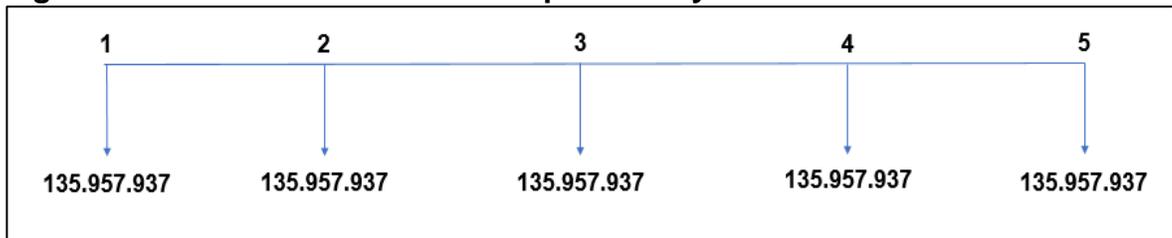
A continuación se muestra el panorama que corresponde a los costos actuales de la empresa.

**Tabla 25. Costos actuales de la empresa Croydon Colombia S.A**

<b>Disposición de materia prima</b>	4.242.600
<b>Costo de energía</b>	11.715.337
<b>Mantenimiento</b>	120.000.000
<b>TOTAL AÑO</b>	<b>135.957.937</b>

Fuente: elaboración propia.

**Figura 13. Costos actuales de la empresa Croydon Colombia S.A**



Fuente: elaboración propia.

**5.1.2 Costos propuestos.** Los costos propuestos del proyecto de pirólisis de la rebaba de caucho están asociados a la implementación de la propuesta de valorización de la rebaba de caucho dentro de la empresa.

**5.1.2.1 Costos operacionales.** Son todos aquellos que se dan desde la puesta en marcha del proyecto hasta el final de su vida útil. Abarca entonces los recursos necesarios para que el proyecto de la valorización de la rebaba de caucho pueda operar, estos son: presupuesto de inversión, costos servicios industriales, mantenimiento, mano de obra (sueldo operario).

**5.1.2.1.1 Presupuesto de inversión.** Los costos de inversión están asociados a la compra de los equipos que se dan una sola vez (salvo los costos de reposición). Considerando la propuesta de valorización del proceso de pirólisis de rebaba de caucho se deben adquirir los siguientes equipos para el adecuado funcionamiento del proceso:

**Tabla 26. Presupuesto de inversión**

RECURSOS	CONCEPTO	VALOR	CANTIDAD	TOTAL	
<b>Inversión</b>	<b>Molino de cuchillas</b>	Molino Serie MCV 30/20	15.330.000	1	15.330.000
	<b>Reactor del proceso</b>	Reactor de lecho fijo	23.000.000	1	27.000.000
<b>TOTAL</b>				<b>42.330.000</b>	

Fuente: elaboración propia.

Sus respectivas especificaciones técnicas y cotizaciones (ver anexo F).

**5.1.2.1.2 Costo de servicio industrial (energía por equipos).** Los costos de servicios para la propuesta de valorización se tendrán para los equipos como el molino y el reactor. En las fichas técnicas (ver anexo F) se ven los consumos y voltaje usado por los equipos. Se considera el costo de kWh de 287,39<sup>190</sup>.

**Tabla 27. Costo de servicio industrial (energía por equipos)**

ENERGÍA				
CONSUMO POR EQUIPO				
EQUIPO	COSTO (\$) KWH	CONSUMO PROMEDIO MENSUAL KWH	COSTO MENSUAL	COSTO ANUAL
Molino		3	862	10.346
Reactor del proceso	287,39	413,3	118.778	1.425.339
TOTAL				1.435.685

Fuente. elaboración propia.

**5.1.2.1.3 Mantenimiento.** Todos los equipos que se implementan en el proceso son nuevos aun así se deben mantener en constante limpieza y mantenimiento anual, el costo anual de mantenimiento (ver tabla 23) para el cual la empresa CROYDON COLOMBIA S.A tiene un costo anual de mantenimiento ya establecido.

**Tabla 28. Costo de mantenimiento**

CONCEPTO	VALOR MES	VALOR ANUAL
Mantenimiento	10.000.000	120.000.000

Fuente. Elaboración propia.

**5.1.2.1.4 Mano de obra (Sueldo operario).** Para el proceso de pirólisis de la rebaba de caucho se necesita un operario para la recepción de los residuos de la materia prima y el manejo de equipos (proceso general), quien tendrá un salario equivalente a \$1.000.000; con auxilio de transporte de \$88.211 y todas las prestaciones de ley como son: Pensión 12%, salud 8,5%, cesantías 8,33%, intereses a las cesantías 1%, vacaciones 4,17%, prima de servicios 8,33%, aportes parafiscales 9%<sup>191</sup>.

<sup>190</sup> ENEL CODENSA. [En línea]: <https://www.codensa.com.co/hogar/valor-del-kilovatio-en-colombia-disminuye>

<sup>191</sup> Banco de la República. Disponible en: <https://www.larepublica.co/finanzas/el-abc-de-las-prestaciones-sociales-y-los-aportes-parafiscales-2249321>. Colombia 2018.

**Tabla 29. Costo asociado a mano de obra**

CONCEPTO	VALOR MES	VALOR ANUAL
Salario básico	1.000.000	12.000.000
Auxilio de transportes	88.211	1.058.532
Pensión	120.000	1.440.000
Salud	85.000	1.020.000
Cesantías	83.333,33	1.000.000
Interés cesantías	10.000	120.000
Vacaciones	41.700	500.400
Prima de servicios	83.333,33	1.000.000
Parafiscales	90.000	1.080.000
<b>Total</b>	<b>1.601.578</b>	<b>19.218.932</b>

Fuente: elaboración propia.

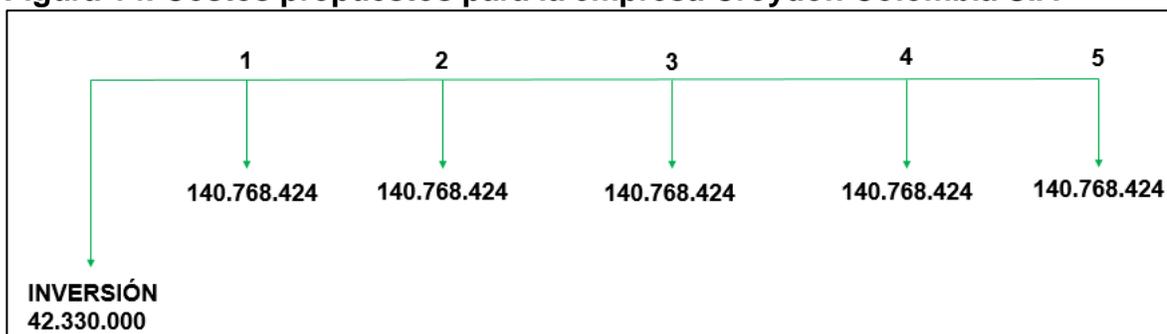
A continuación se muestra el panorama que corresponde a los costos propuestos para la empresa.

**Tabla 30. Costos propuestos para la empresa Croydon Colombia S.A.**  
**Costo de Inversión**

<b>Equipos</b>	42.330.000
<b>Costos Operacionales</b>	
<b>Mantenimiento</b>	120.000.000
<b>Mano de obra</b>	19.218.932
<b>Costo de energía equipos</b>	1.549.492
<b>TOTAL AÑO</b>	<b>140.768.424</b>

Fuente: elaboración propia.

**Figura 14. Costos propuestos para la empresa Croydon Colombia S.A**



Fuente: elaboración propia.

## 5.2 ANÁLISIS DE INDICADORES FINANCIEROS

Los indicadores financieros permiten el análisis de la realidad financiera, de manera individual, y facilitan la comparación de la misma con la competencia y con entidades u organizaciones que hacen parte del mercado<sup>192</sup>.

Para este proyecto, los parámetros a estimar en el proyecto serán: la tasa interna de oportunidad (TIO), el valor presente del proyecto (VP) y el costo anual equivalente (CAUE).

**5.2.1 TIO.** La tasa interna de oportunidad o tasa mínima de descuento, es la tasa de interés mínima a la que el dueño o el inversor del proyecto, está dispuesto a ganar al invertir en un proyecto. La empresa CROYDON COLOMBIA S.A tiene establecida un TIO del 14%.

**5.2.2 VP.** El valor presente del proyecto se determina con la siguiente ecuación:

### Ecuación 20. Valor presente del proyecto

$$VP = I + R \left[ \frac{(1 + i)^n - 1}{i * (1 + i)^n} \right]$$

Donde:

*I = Inversión*

*R = Costos propuestos*

*i = Interes*

*n = periodo*

$$VP = 42.330.000 + 140.768.424 * \left[ \frac{(1 + 0,14)^5 - 1}{0,14 * (1 + 0,14)^5} \right] = 628.591.714$$

**5.2.3 CAUE.** Será aplicable para los costos propuestos, se calculó con la siguiente ecuación teniendo en cuenta el valor presente calculado anteriormente.

### Ecuación 21. Costo anual uniforme del proyecto

$$CAUE = VPN \left[ \frac{(1 + i)^n * i}{(1 + i)^n - 1} \right]$$

---

<sup>192</sup> ACTUALÍCESE, Investigación Contable y Tributaria en Profundidad. Indicadores Financieros. [En línea]. [Citado 11 noviembre,2019] disponible en: (<https://actualicese.com/2015/02/26/definicion-de-indicadores-financieros/>)

**Donde:**

*VPN = Valor presente del proyecto*

*i = Interes*

*n = periodo*

$$CAUE = 628.591.714 * \left[ \frac{(1 + 0,14)^5 * 0,14}{(1 + 0,14)^5 - 1} \right] = 183.098.423$$

Como se puede observar la implementación de un proceso de pirólisis de rebaba de caucho no es rentable financieramente, esto se demuestra porque al comparar los CAUE del proceso actual (\$ 135.957.937) y el propuesto (\$ 183.098.423) se evidencia una diferencia de \$47.140.486, es decir, un costo mayor para el propuesto, esto indica que el proyecto no es recomendable desde el punto de vista financiero sin embargo a la hora de una posible implementación se deben tener en cuenta la reducción del impacto ambiental generado por la rebaba de caucho al ambiente y que este es solo un sector de los residuos de la empresa, pues a futuro se puede considerar el integrar otros desechos de origen polimérico al proceso.

Por otro lado, dentro de la legislación colombiana se ha contemplado la ley 1715 de 2014<sup>193</sup>, que traza una política clara de incentivos para la generación de energía a partir de Fuentes No Convencionales de Energía (FNCE) y para los proyectos de Gestión Eficiente de la Energía (GEE). De igual manera la misma Ley incluye incentivos a la inversión en proyectos de FNCE y GEE en sus artículos 11, 12, 13 y 14 consistentes en: La deducción de renta, exclusión de IVA, exención de pago de Derechos Arancelarios de Importación y l depreciación acelerada de activos. Para ser acreedores a estos beneficios la empresa debe regirse cuidadosamente por la normatividad y debido a ello la empresa en base a estos costos propuestos puede plantear y modificar el análisis presentado anteriormente

No obstante lo anterior, con la aprobación del Plan Nacional de Desarrollo 2018-2022 (Ley 1955 de 2019) este régimen ha surtido las siguientes modificaciones, especialmente en el artículo 179 en el que se amplía el plazo de aprovechamiento de la deducción especial en renta para las inversiones en generación de energía con fuentes de renovables no convencionales<sup>194</sup> de cinco a 15 años y tal como se determinó al inicio del capítulo este análisis financiero solo está contemplado a 5 años. Es por esta razón y por la clasificación de datos sensibles que agrupa, que estos beneficios no se tienen en cuenta en el presente análisis financiero.

---

<sup>193</sup> ESTUDIO LEGAL HERNÁNDEZ. Sistema de incentivos tributarios por energías renovables en Colombia. Disponible en: <http://www.estudiolegalhernandez.com/energia-renovable/sistema-de-incentivos-tributarios-energias-renovables-en-colombia/> [en línea] [13 de agosto 2019]

<sup>194</sup> LA REPUBLICA. Gobierno dará beneficios tributarios por invertir en energías renovables. Disponible en: <https://www.larepublica.co/economia/gobierno-dara-beneficios-tributarios-por-invertir-en-energias-renovables-2863339>[en línea] [13 de agosto 2019]

## 6. CONCLUSIONES

Mediante la evaluación de la rebaba en el proceso de pirolisis, como alternativa de valorización para aprovechar este residuo y aumentar su vida útil dentro del ciclo productivo; especialmente el producto gaseoso resultante para producción de energía térmica, se puede concluir que:

- Se realizó la caracterización de las referencias de rebaba de caucho que se producen en mayor proporción en la empresa (Z24, Z29, Z8, Z31). De esta se encontró experimentalmente que no es necesario un pretratamiento de secado de la materia prima para el proceso de pirolisis por su baja humedad, un bajo contenido en material orgánico y se determinó la molienda como operación de reducción de partícula a un tamaño de 4,69mm para la alimentación del proceso con el fin de contribuir a la transferencia de calor.
- Se lleva a cabo el proceso de pirolisis a nivel de laboratorio, para el cual se determina en el desarrollo del diseño experimental la influencia de las variables de proceso seleccionadas sobre los rendimientos de las corrientes; del cual la temperatura se presenta como la variable con mayor injerencia en el proceso y en especial en la distribución de productos obtenidos. De acuerdo a esto se evidencia un mayor rendimiento en gas aumentando este factor, es por ello que para 700°C se reporta un 30% en este producto, 56% en carbonizado y 14% en aceite aproximadamente.
- Teniendo en cuenta los rendimientos obtenidos a nivel laboratorio, se realizó la caracterización de los productos sólido y gaseoso del proceso experimental; de los cuales se evidencia un alto potencial como combustible y en base a ello la oportunidad de aprovechar en un mayor porcentaje la rebaba de caucho al incluir una etapa de gasificación del carbonizado, dentro del proceso de valorización planteado. Simultáneamente se realiza una cromatografía de gases y se logra determinar el poder calorífico de la mezcla gaseosa resultante (23,347 MJ/kg), la cual cuenta con una fracción importante de metano y monóxido de carbono; sin embargo este poder calorífico si bien es considerable es menor a lo esperado del caucho de llantas y el gas natural.
- Considerando los criterios de diseño de acuerdo a las necesidades y flujos de generación de rebaba de caucho mensual, se logran definir especificaciones técnicas básicas para el proceso; el cual cuenta con una operación de molienda, un reactor de lecho fijo para la etapa de pirolisis y gasificación y un sistema de condensación y almacenamiento de los productos líquidos. Estas etapas tendrán un consumo total de energía correspondiente a 1617,45 MJ/mes y producirán una energía neta de 16857,85 MJ/mes.

- Al determinar los indicadores financieros de VP y CAUE, que corresponden a \$628.591.714 y \$183.098.423 respectivamente, se establece que el proyecto no es recomendable financieramente, debido a que el costo anual uniforme de la propuesta planteada es mayor al actual, que corresponde a \$ 135.957.937, lo cual implica que a pesar de la inversión a realizar no se suple con ahorros obtenidos con la propuesta, los costos dados por el proceso actual.

## 7. RECOMENDACIONES

- Caracterizar el producto líquido obtenido del proceso experimental de la pirólisis de la rebaba de caucho, con el fin de evaluar sus posibles usos alternos como combustible.
- Evaluar un proceso de destilación aplicable al procesamiento del producto líquido obtenido, con el fin de obtener productos de mayor valor agregado.
- Determinar  $H_2$  y  $H_2S$  con el fin de corroborar el análisis cromatográfico realizado
- Implementar en el desarrollo experimental del proceso de pirólisis de rebaba de caucho, otros tipos de reactores con tecnologías más avanzadas que maximicen los rendimientos del proceso y reduzcan problemas de transferencia de calor y masa, así como la aparición de reacciones secundarias.
- Se recomienda incluir la cinética de reacción en el proceso de pirólisis de la rebaba de caucho, así mismo, para al etapa de gasificación las reacciones de la fase gaseosa y de degradación de alquitranes ya que influyen de forma significativa en la distribución de productos en dicho proceso.
- Evaluar un proceso total de gasificación de la rebaba de caucho, teniendo en cuenta realizar una caracterización del gas resultante y su comparación con el gas proveniente del proceso de gasificación del carbonizado.
- Realizar una caracterización profunda del gas resultante con el fin de detectar, posibles pretratamientos en caso de requerirlos para su uso, factores que influyan en su poder calorífico y en su uso sostenible.
- Considerar en alimentar el gas del proceso a otro tipo de sistema de generación de energía, para dar una mayor valorización y evaluar su viabilidad.
- Desarrollar una investigación y optimización del proceso de prensado de suelas con el fin de minimizar el desperdicio de materia prima por este concepto o contemplar la reincorporación del material vulcanizado al proceso en alguna proporción, dado que el costo asociado a la rebaba es importante.

## BIBLIOGRAFÍA

ACOSTA, R., et al. Estudio preliminar de la producción de aceite y carbón mediante pirólisis intermedia de caucho de llantas usadas. En: Revista de Investigación Universidad del Quindío. Agosto, 2013. vol. 24, p. 139-141.

ACOSTA Rolando Andrés, MONCADA Silvia Juliana, GAUTHIER-MARADEI Paola, NABARLAT Debora Alcida Estudio preliminar de la producción de aceite y carbón mediante pirólisis intermedia de caucho de llantas usadas. Universidad Industrial de Santander, Grupo de Investigación INTERFASE, Escuela de Ingeniería Química. Bucaramanga, Santander, Colombia.

ACTUALÍCESE, Investigación Contable y Tributaria en Profundidad. Indicadores Financieros. [En línea]. [Citado 11 de mayo de 2019] disponible en: (<https://actualicese.com/2015/02/26/definicion-de-indicadores-financieros/>)

AGROWASTE. Gasificación. [En Línea] Disponible en: <http://www.agrowaste.eu/wp-content/uploads/2013/02/GASIFICACI%C3%93N.pdf>. 2013.

ALS. ANÁLISIS CALIDAD DE COMBUSTIBLES ALTERNATIVOS Disponible: [https://www.alsglobal.es/noticias/ANALISIS-CALIDAD-DE-COMBUSTIBLES-ALTERNATIVOS\\_436](https://www.alsglobal.es/noticias/ANALISIS-CALIDAD-DE-COMBUSTIBLES-ALTERNATIVOS_436). 2015

ARENAS CASTELLANOS, D. Propuesta De Diseño De Un Proceso Para La Generación De Energía Eléctrica a Partir De Los Residuos De La Producción De Café., Pontificia Universidad Javeriana, Bogotá, Octubre 2009.

ASOCIACIÓN ESPAÑOLA DE NORMALIZACIÓN. Biocombustibles sólidos. Determinación de la densidad a granel. UNE-EN15103.2010

Balances de energía. Procesos industriales. [Anónimo]. [En línea]. [Consultado en 30 de mayo del 2019]. p. 3. Disponible en: <http://www3.fi.mdp.edu.ar/procesosindustriales1/archivos/Balance%20de%20energia>

BARCO, Jimmy. Gasificación de cuesco de palma para la obtención de gas combustible en un reactor de lecho fijo. Universidad Nacional de Colombia. Facultad de Ingeniería. Departamento de Ingeniería Mecánica y Mecatrónica. Bogotá, Colombia.2015.,p-93

BASU, Prabir. Biomass Gasification and Pyrolysis. Practical Design and Theory. Burlington, USA 2010.

BELICZKY, Louis S, FAJEN, John. Enciclopedia de Salud y Seguridad en el trabajo. Sección 8. Industrias del Caucho, Industrias Químicas.

BETANCUR, M., et al. Production of activated carbon by waste tyre thermochemical degradation with CO<sub>2</sub>. En: Journal of Hazardous Materials. septiembre, 2009. vol. 168, p. 882-887.

BETANCUR, M. Obtención de carbón activado a partir de neumáticos usados mediante la incorporación de calcio y su aplicación en procesos de adsorción. Tesis Doctoral. (Doctor en Ingeniería). Universidad Pontificia Bolivariana. Área Energía y Termodinámica, Medellín.2010

BERRUECO, C, et al. Pyrolysis of waste tyres in an atmospheric static-bed batch reactor: Analysis of the gases obtained. En: Journal of Analytical and Applied Pyrolysis. Agosto, 2005. Vol. 74, p. 245–253.

BLANCO, A. Formulación de proyectos. Editorial Teto. 5ta edición. Caracas, Venezuela. 2006.

BORSODI, Nikollett.,et al. Hydrocarbons obtained of contaminated waste plastics. University of Pannonia, Departament of MOL Hydrocarbon and Coal Processing. Veszprém,Hungary.2011

BOTTA Néstor Adolfo. En: Red Proteger. [Sitio web]. Poder Calorífico. [Consultado el 04 de mayo del 2019]. Disponible en: [http://www.redproteger.com.ar/poder\\_calorifico.htm](http://www.redproteger.com.ar/poder_calorifico.htm).

BOSQUES, Gabriela, Síntesis de polibutadieno cis-1,4 en solución con estireno y su uso como hule precursor en poliestireno de alto impacto obtenido mediante el proceso in Situ. Centro de investigación en Química aplicada. Octubre del 2014.

BRUUN,E.W.,NIELSEN,H.,IBRAHIM,N.,EGSGAARD,H.,AMBUS,P.,JENSEN,P.A, DAMJOHANSEN,K. Influence of fast pyrolysis temperature on biochar labile fraction and short-term carbon loss in a loamy soil. Biomass and Bioenergy 35(3): 1182-1189. (2010).

BURTO, Andrea, La licuefacción de los gases o hacia las bajas temperaturas, Universidad Nacional Autónoma de México, Junio, 2006.

CALDERÓN, Felipe S. La producción de combustibles vehiculares a partir de plástico de desecho. 1ed. Dr. Calderón Laboratorios. Bogotá D.C., Colombia, 2016. p. 163-165.

CANO, Encarnación, et al. Valorización material y energética de neumáticos fuera de uso actualización. Circulo de innovación en materiales tecnología aeroespacial y

nanotecnología Universidad Carlos III de Madrid, Parque Científico de Leganés. 2008.

CARDONA, Luisa. Transformación termoquímica de neumáticos usados en una sola etapa en atmósfera de  $CO_2$ , para la obtención de carbón activado. Universidad pontificia bolivariana. Escuela de ingenierías. Facultad de ingeniería química. Medellín. 2014.

CASTELLS, Xavier Elías y VELO GARCÍA, Enric. La pirólisis. Tratamiento y valorización energética de residuos. Ediciones Díaz de Santos. España. 2013. p. 88.

CASTRO, Guillermo. Reutilización, reciclado y disposición final de neumáticos. Universidad de Buenos aires. 2007.

CASTRO, Guillermo. Materiales y compuestos para la industria del neumático. Departamento de Ingeniería mecánica. F.I.U.B.A. Diciembre. 2008

CHANG, YU-MIN. On pyrolysis of waste tyre: Degradation rate and product yields. En: Resources, Conservation and Recycling. agosto, 1996. vol. 17, p. 125-139

CHIVATA, Daniel., DUARTE, Cristian. Diseño conceptual de una planta para el aprovechamiento de caucho molido de neumáticos usados a partir de pirólisis. Fundación Universidad de América. 2018.

CONESA J. A., MARTIN - GULLON I., FONT R., JAUHAINEN J. Complete Study of the Pyrolysis and Gasification of Scrap Tires in a Pilot Plant Reactor, Environmental Science & Technology, 38 (2004) 3189-3194.

DIDIER VARIECO, José. Valor presente neto. Ibagué, Colombia. 2013. p.2.

ECOPETROL, Colombia. Catálogo de productos. [En Línea]. [Citado 8 mayo, 2019] disponible en: ([http://www.ecopetrol.com.co/especiales/Catalogo\\_de\\_Productos/pdf/Ecopetrol%20Combustoleo%20VSM-01.pdf](http://www.ecopetrol.com.co/especiales/Catalogo_de_Productos/pdf/Ecopetrol%20Combustoleo%20VSM-01.pdf).)

EDUARD, L., et al. Tyre char preparation from waste tyre rubber for dye removal from effluents. En: Journal of Hazardous Materials. Marzo, 2010. Vol. 175, p. 151-158.

ELLENS, C.J., "Design, optimization and evaluation of a free-fall biomass fast pyrolysis reactor and its products," University State Iowa, 2009.

ELÍAS, Xavier. La Pirólisis. En: Tratamiento y valorización energética de residuos. 1 ed. Ediciones Díaz de Santos. Madrid, España. 2012. p. 478-481.

FERNANDEZ. Gasificación del carbón. Centrales térmicas. [En Línea]. Disponible en:<http://files.pfernandezdiez.es/CentralesTermicas/PDFs/17CT.pdf>

FERNÁNDEZ.A. M., BARRIOCANAL. C. and ALVAREZ. R. Pyrolysis of a waste from the grinding of scrap tyres. *Journal of Hazardous Materials*, vol. 203–204, pp. 236–43, Feb. 2012.

FONSECA, William. Evaluación de un reactor de lecho fluidizado en el proceso de pirólisis catalítica usando desecho de caucho de llanta. Universidad de los Andes. Departamento de Ingeniería química.2016.

FULLANA, Andres. Pirólisis y combustión de neumáticos usados y lodos de depuradora. Trabajo de grado. Universidad de Alicante. 2001.

GALVAGNO S., CASU S., CARABIANCA T., CALABRESE A., CORNACCHIA G. Pyrolysis process for the treatment of scrap tyres: preliminary experimental results, *Waste Management*, 22, (2002), p. 917-923

GARCIA CORTEZ, Ángela Nubia. Estudio termoquímico y cinético de la pirólisis de residuos sólidos urbanos. Trabajo de grado Doctor en ciencias químicas. Alicante, España: Universidad de Alicante. Facultad de ingeniería. Departamento de química, 1993.

GARCIA GARRIDO Santiago. Centrales termoeléctricas de biomasa. *RENOVETEC*. 2009-20015., P 147.

GARCÍA, Andreu César, et al. Prácticas de materiales de construcción – I.T. Obras Públicas. [En línea], 2009. p. 2. [Consultado en 06 de mayo del 2019]. Disponible en: <https://rua.ua.es/dspace/>.

GARCIA PATIÑO, Harold Jhair. Modelación de la gasificación de biomasa en un reactor de lecho fijo. Tesis Magíster en Ingeniería - Ingeniería Mecánica. Universidad Nacional de Colombia, 2011. p. 12.

GONZÁLEZ, J.F, et al. Pyrolysis of automobile tyre waste. Influence of operating variables and kinetics study. En: *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*. Octubre, 2001. Vol. 58-59, p. 667-683.

GREENPOWER. [Sitio web]. Pirólisis de la madera (Destilación de madera). [Consultado en 28 de mayo de 2019]. Disponible en: <http://carboneros.org/clients/articles/woodpyrolysis/esp/>.

GUTIÉRREZ PULIDO, Humberto; VARA SALAZAR, Román. Análisis y diseño de experimentos. Segunda Edición, México.

HAARLEMMER, G., GUIZANI, C., ANOUTI, S., M., DÉNIEL, ROUBAUD, A., and VALIN, S., "Analysis and comparison of bio-oils obtained by hydrothermal liquefaction and fast pyrolysis of beech wood," Fuel, vol. 174, pp. 180–188, Jun. 2016

HERNANDEZ FÉREZ. Maria de Remedio. Evaluación de la pirolisis térmica y catalítica de polietileno en lecho fluidizado como técnica de reciclado. Influencia de las variables sobre los productos generados. Tesis doctoral en ciencias químicas. Alicante, España: Universidad de Alicante. Facultad de Ciencias. Departamento de Ingeniería química.2007.

HERVAS RAMIREZ, Lorenzo. Los residuos urbanos y asimilables. Andalucía.: Consejería de medio ambiente, 2003., p. 281.

INSTITUTO COLOMBIANO DE NORMAS TÉCNICAS Y CERTIFICACIÓN. Compendio de normas para trabajos escritos NTC-1486-6166. Bogota D.C. El instituto, 2018. ISBN 97895885856773 153p.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARIZATION. Solid biofuels-Determination of the content of volatile matter. ISO18123.First edition.2015.

\_\_\_\_\_. Solid biofuels-Determination of moisture content-Oven dry method. ISO18134.First edition.2015.

\_\_\_\_\_. Solid biofuels-Determination of ash content. ISO18122. First edition.2015.

\_\_\_\_\_. Solid biofuels-Determination of particle size distribution for uncompressed fuels. ISO17827. First edition.2016.

JIMÉNEZ, Johanna., TORRES, Johanna. Evaluación del proceso de desvulcanización química a nivel laboratorio para los residuos de caucho procedentes de la suela en Croydon Colombia S.A. Fundación Universidad de América. Bogotá, Colombia. 2014. P.35-41.

JUMA, M, et al. Pyrolysis and Combustion of scrap Tyre. En: Petroleum & Coal. febrero, 2006. vol. 48, no. 1, p. 15-16.

KLOSE, Wolfgang. RINCÓN, Sonia. GÓMEZ, Alexánder. Procesos de transporte de biomasa y carbonizados en hornos rotatorios. Instituto de Ingeniería térmica. Departamento de Ingeniería mecánica. Universidad de Kassel. Kassel, Alemania. 2016., p- 2.

LARESGOITI, M.F, et al. Chromatographic analysis of the gases obtained in tyre pyrolysis. En: Journal of Analytical and Applied Pyrolysis. mayo, 2000. vol. 55, p. 43-54.

LARESGOITI, M.F, et al. Characterization of the liquid products obtained in tyre pyrolysis. En: Journal of Analytical and Applied Pyrolysis. Junio, 2004. vol. 71, p. 917-934.

LEONARDI, Chiara. Development of an innovative pyrolysis plant for the production of secondary raw materials. Dottorato di ricerca in chimica .Università di Bologna. 2015.

LIMA. Antonio. Generación térmica. Poder calorífico. Disponible en: <http://www.antoniolima.web.br.com/arquivos/podercalorifico.htm> [en línea][13 de junio 2019]

LI, S.Q. et al. Pyrolysis process for the treatment of scrap tyres: preliminary experimental results. En: Waste Management. Junio, 2002. vol 22, p. 917-923.

\_\_\_\_\_ Pilot-Scale pyrolysis of scrap tyres in a continuous rotatory kiln reactor. En: Industrial & Engineering Chemistry Research. Junio, 2004. vol 43, p. 5141-5143

LOPEZ COSTA, J; CERVERA, S. Curso de ingeniería química: Introducción a los procesos, las operaciones unitarias y los fenómenos de transporte. Barcelona.: Reverté, S.A, 1991. 84 P

MARTÍNEZ COVALEDA, Héctor J., SALAZAR SOLER, Marcela., BARRIOS URRUTIA, Camilo A. Cadena del caucho en Colombia, Bogotá, Colombia, Marzo 2005.

MARTÍNEZ, J., et al. Waste tyre pyrolysis-A review. En: Renewable and Sustainable Energy Reviews. Marzo, 2013.

MARTINEZ, J. D. LAPUERTA, M. GARCIA, R. MURILLO, R. GARCÍA, T “Fuel Properties of Tire Pyrolysis Liquid and Its Blends with Diesel Fuel,” Energy Fuels, vol. 27, no. 6, pp. 3296–3305, Jun. 2013.

MEDINA VALTIERRA, J., GUERRERO ESPARZA, M. M. Obtención de carbón de la pirólisis catalítica de hule de llanta y pruebas de adsorción mediante un método indirecto. Investigación y Ciencia de la Universidad Autónoma de Aguascalientes. Número 63: 24-31, Septiembre-diciembre 2014.

MEJÍA, Juan. Análisis de sensibilidad de un proyecto de reciclaje de llantas. Universidad Militar. Disponible en: <https://repository.unimilitar.edu.co/handle/10654/11952>.

MESA, María Paula; ORTÍZ, Carol Ivonne. Evaluación del proceso de pirólisis para la producción de diésel a nivel de laboratorio a partir de residuos plásticos de

industrias de alimentos. Trabajo de grado para optar al título de Ingeniero Químico. Bogotá D. C.: Fundación Universidad de América, 2016. p. 33.

MINISTERIO DE AMBIENTE Y DESARROLLO SOSTENIBLE, Colombia. Resolución 898 de 1995. Por el cual se regulan los criterios ambientales de la calidad de los combustibles líquidos y sólidos utilizados en hornos, calderas de uso comercial e industrial y en motores de combustión interna de vehículos automotores.

MIRANDA, Rosa del Carmen; SEGOVIA MARTÍNEZ, Ciro César y SOSA BLANCO, Cesar Alberto. Pirolisis de llantas usadas: Estudio cinético. En: Información tecnológica. 2006. Vol. 17, no. 2, p 8.

MEMORIAS DEL IV SIMPOSIO DE QUÍMICA APLICADA-SIQUIA 2009. HOYOS L.J., FIGUEROA D.R. Efecto del tamaño de partícula y de la temperatura de secado en la pirólisis a la velocidad media de aserrín. Universidad del Quindío. 9,10 y 11 de septiembre. Armenia, Colombia.

MONTGOMERY, Douglas C; Diseño y análisis de experimentos, Universidad estatal de Arizona, Segunda edición, Limusa Wiley, Grupo Noriega Editores, Mexico.

NAPOLI, A. SOUDAIS, Y. LECOMTE, D. Scrap tire pyrolysis: experiment and modeling. Ecole des Mines d' Albi -Carmaux Centre Energetique-Environnement Campus Iarlard. S. Castillo Laboratoire Materiaux et Energie Universite Paul Sabatier . Toulouse. Francia .,p-560

NOGUES, Fernando Sebastián, GARCÍA GALINDO, Daniel y REZEAU, Adeline. Energía de la Biomasa. Zaragoza, España: Prensas Universitarias de Zaragoza, 2010. p. 47. ISBN 978-84-92774-91-3.

OBANDO, Gabriel. Condiciones de Diseño de un Reactor de Pirólisis a escala de laboratorio para la obtención de Biocarbón a partir de Residuos Orgánicos Sólidos. Trabajo de Grado Magister en Desarrollo Sostenible y Medio Ambiente. Manizales, Colombia. Universidad de Manizales, 2015. p. 14-23.

O. B. B and C. R. S, "Situación y Perspectivas de la Industria del Caucho en el Mundo y en Colombia," Revista Facultad Nacional De Agronomía, vol. 46, (1 y 2), pp. 71-106, 1993.

PELÁEZ ARROYAVE, G. J., VELÁSQUEZ RESTREPO, S. M., GIRALDO VÁSQUEZ ,D. H. Aplicaciones de caucho reciclado: una revisión de la literatura. Ciencia e ingeniería Neogranadina, vol. 27, no. 2, pp. 27-50. DOI: <http://dx.doi.org/10.18359/rcin.2143>.

PEÑA, Laura. Evaluación de la producción de gas y líquido combustible mediante el proceso de pirólisis de madera para aplicación en la zona del resguardo Yaigójé

en el Vaupés colombiano. Fundación Universidad de América. Facultad de Ingenierías. Programa de Ingeniería Química. Bogotá D.C., 2019.

PINEDO, Andrea Urien. Obtención de biocarbones y biocombustibles mediante pirolisis de biomasa residual”, Septiembre 2013.

PRUCOMMERCIALRE. ¿Qué es la densidad a granel? [Sitio WEB].Octubre 2010. [06, mayo. 2019].Disponible en: <https://www.prucomercialre.com/que-es-la-densidad-a-granel/>.

PLIEGO-BRAVO, Y.S., GARCIA REYES, M. E., URREA-GARCIA, G. R. y VERGARA-HERNÁNDEZ, M. Simulación del proceso termoquímico sugerido para el aprovechamiento de los lodos residuales como fuente de energía alterna. Instituto Tecnológico de Orizaba. Revista Mexicana de Ingeniería Química Volumen 8, número 3, Vol. 13, No. 2 (2014) 619-629.

QUEK, Augustine, et al. Liquefaction of waste tyres by pyrolysis for Oil and chemicals- A review. En: Journal of Analytical and Applied Pyrolysis. mayo, 2013. vol. 101, p. 1-16.

REYES, Eugenio, "Biodegradación del caucho por Alternaria alternata”, Universidad Nacional Andrés Bello, Facultad de medicina, escuela de tecnología médica, Septiembre, 2015.

RODRIGUEZ GALBARRO, Hermenegildo. Tablas con los valores del poder calorífico de materiales y combustibles. [En línea]. [Consultado el 04 de mayo del 2019]. Disponible en: [https://ingemecanica.com/tutoriales/poder\\_calorifico.html](https://ingemecanica.com/tutoriales/poder_calorifico.html)

ROY, C et al. Recycling of scrap tyres to Oil and carbon black by vacuum pyrolysis. En: Resources, Conservation and Recycling. septiembre, 1990. vol. 4, p. 203-213.

ROY, C. et al. Conversion of used tyres to Carbon Black an Oil by pyrolysis. En: Rubber Recycling. Taylor & Francis Group, 2005. p. 437-460.

SÁNCHEZ MALDONADO, Cristóbal. La pirolisis como método para la generación de electricidad en Magallanes, Diciembre 2013.

SÁNCHEZ, Daniel Jose. Synthetic diésel production through catalytic pyrolysis of biomass-waste tyre mixtures. Trabajo de grado Maestría en ciencias en ingeniería Química. Universidad de los Andes. Bogotá, 2015. P.9-10.

SAPAG CHAIN, Nassir. Proyectos de inversión, Formulación y Evaluación, Naucalpán de Juárez, Ed. Prentice Hall, 2007, p. 253.

SATHISKUMAN, S.C., and KARTHIKEYAN, R. Srinivasa Moorthy, “Effect of process parameters on tire pyrolysis: a review,” J. Sci. Ind. Res.

SILVA LORA, Electro Eduardo y RINCÓN MARTÍNEZ, José María. Bioenergía Fuentes, Conversión y Sustentabilidad. Bogotá, Colombia: Red Iberoamericana de Aprovechamiento de Residuos Orgánicos en Producción de Energía, 2014. p. 100. ISBN 978-958-58880-0-5

SIMANCAS, Marilyn., CASTILLO, Shirley. Estudio de prefactibilidad para la recolección y aprovechamiento de llantas en desuso en la ciudad de Bogotá. Universidad Católica de Colombia, 2017.p. 15-19.

SUHANYA, M. et al. Recovery of Oil from Waste Tyres using Pyrolysis Method: A Review. En: International Journal of Research in Engineering & Technology. Julio, 2013. vol. 1, no. 2, p. 81-85.

TAVERA, C., et al. Production of Oil and Char by Intermediate Pyrolysis of Scrap Tyres: Influence on Yield and Product Characteristics. En: Chemical Engineering Journal. 2015. vol. 13, p. 189-200.

UBA, Industrias I: Molienda. Universidad de Buenos Aires. Facultad de ingeniería. 2015.

UNIÓN TEMPORAL OCADE LTDA. (COLOMBIA) SANIPLAN (R.J.-BRASIL) AMBIENTAL S.A. (ARGENTINA). Diagnóstico ambiental sobre el manejo actual de llantas y neumáticos usados generados por el parque automotor de Santa Fe de Bogotá.

VEYCO. Molinos y mezcladoras. Molinos de cuchillas. [En línea] Disponible en: <http://molinosymezcladoras.com/molinos-de-cuchillas.html>.

WITTMAN. Molinos y trituradores. Reciclaje óptimo de piezas de plástico. [En línea] Disponible en: [https://www.wittmann-group.com/uploads/tx\\_wpsidebar/Molinos\\_span\\_2017-09\\_lowres.pdf](https://www.wittmann-group.com/uploads/tx_wpsidebar/Molinos_span_2017-09_lowres.pdf).

## **ANEXOS**

**ANEXO A. MUESTREO Y CARACTERIZACIÓN DE LA REBABA DE CAUCHO**  
**MUESTREO DE REBABA**

**MUESTRAS A CARACTERIZAR**



Fuente: Elaboración propia

**Material pulverizado**



Fuente: elaboración propia

## CARACTERIZACIÓN

### Muestras materia prima de 1g antes del análisis próximo



Fuente: elaboración propia

### Mufla Thermolyne 1500



Fuente: elaboración propia

### Muestras de materia prima después del análisis próximo



Fuente: elaboración propia

### DETERMINACIÓN DE CONTENIDO DE HUMEDAD

Ref.	Muestra	$m_1$ (g)	$m_2$ (g)	$m_3$ (g) (1h*)	$m_3$ (g) (2h**)	%H*	%H**	H% <sub>prom</sub>	H% <sub>prom</sub>
<b>Z24</b>	<b>1</b>	31,71	32,71	32,71	32,71	0,28	0,35	0,31	0,39
		9	9	6	6	0	0	5	6
	<b>2</b>	33,04	34,04	34,03	34,03	0,51	0,44	0,47	
		0	0	5	5	0	4	7	
<b>Z31</b>	<b>1</b>	33,00	34,00	34,00	34,00	0,25	0,36	0,30	0,27
		5	5	2	1	0	0	5	8
	<b>2</b>	32,83	33,83	33,83	33,83	0,21	0,29	0,25	
		4	4	2	1	0	0	0	
<b>Z8</b>	<b>1</b>	32,20	33,20	33,20	33,20	0,66	0,61	0,64	0,70
		8	8	1	2	5	9	2	9
	<b>2</b>	29,84	30,84	30,83	30,83	0,76	0,79	0,77	
		3	3	5	5	0	0	5	
<b>Z29</b>	<b>1</b>	31,19	32,20	32,19	32,19	0,59	0,78	0,69	0,59
		2	0	4	2	6	4	0	5
	<b>2</b>	30,23	31,23	31,23	31,23	0,45	0,55	0,50	
		6	6	1	0	0	0	0	
								<b>H% promtotal</b>	<b>0,494</b>

Donde:

- $m_1$ : es la masa del crisol vacío.
- $m_2$ : es la masa del crisol y 1g de muestra antes de calentar.
- $m_3$ : es la masa del crisol y la muestra, luego de calentar.

Fuente: elaboración propia

### DETERMINACIÓN DE MATERIAL VOLÁTIL

Referencia	Muestra	$m_1$ (g)	$m_2$ (g)	$m_3$ (g)	%V <sub>d</sub>	%V <sub>d</sub> <sub>prom</sub>
<b>Z24</b>	<b>1</b>	31,2	32,2	31,4	79,51	73,01
	<b>2</b>	33,04	34,04	33,37	66,51	
<b>Z31</b>	<b>1</b>	31,75	32,75	31,98	76,51	73,01
	<b>2</b>	32,21	33,21	32,51	69,51	
<b>Z8</b>	<b>1</b>	29,33	30,33	29,57	75,51	71,01
	<b>2</b>	31,72	32,72	32,05	66,51	
<b>Z29</b>	<b>1</b>	29,62	30,62	29,9	71,51	74,51
	<b>2</b>	31,2	32,2	31,42	77,51	

Fuente: elaboración propia

Donde:

- $V_d$ : material volátil en la muestra expresado como porcentaje en masa.
- $m_1$ : es la masa del crisol vacío.
- $m_2$ : es la masa del crisol y 1g de muestra antes de calentar.
- $m_3$ : es la masa del crisol y la muestra, luego de calentar.

#### DETERMINACIÓN DEL CONTENIDO DE CENIZAS

Referencia	Muestra	$m_1$ (g)	$m_2$ (g)	$m_3$ (g)	$\%A_d$	$\%A_{dprom}$
<b>Z24</b>	<b>1</b>	33,03	34,03	33,35	32,16	30,15
	<b>2</b>	29,99	30,99	30,27	28,13	
<b>Z31</b>	<b>1</b>	31,75	32,75	32,04	29,14	27,65
	<b>2</b>	22,73	23,73	22,99	28,12	
<b>Z8</b>	<b>1</b>	32,28	33,28	32,52	24,12	25,12
	<b>2</b>	29,58	30,58	29,77	19,09	
<b>Z29</b>	<b>1</b>	29,62	30,62	29,9	28,14	27,13
	<b>2</b>	31,20	32,20	31,46	26,13	
					$\%A_{dprom}$	29,02

Fuente: Elaboración propia

Donde:

- $A_d$ : contenido de cenizas en la muestra expresado como porcentaje en masa
- $m_1$ : es la masa del crisol vacío
- $m_2$ : es la masa del crisol y 1g de muestra antes de calentar.
- $m_3$ : es la masa del crisol y la muestra, luego de calentar.

#### DETERMINACIÓN DE LA DENSIDAD A GRANEL

Referencia	Muestra	Masa (g)	$\rho$ (g/mL)	$\rho_{promedio}$ (g/mL)
<b>Z24</b>	<b>1</b>	79,85	0,3194	0,32085333
	<b>2</b>	80,7	0,3228	
	<b>3</b>	80,09	0,3203	
<b>Z31</b>	<b>1</b>	88,17	0,3526	0,34892
	<b>2</b>	85,38	0,3415	
	<b>3</b>	88,14	0,3525	
<b>Z8</b>	<b>1</b>	75,42	0,3016	0,29050667
	<b>2</b>	70,96	0,2838	
	<b>3</b>	71,5	0,2860	
<b>z29</b>	<b>1</b>	77,51	0,3100	0,30061333
	<b>2</b>	73,99	0,2959	
	<b>3</b>	73,96	0,2958	
<b>Volumen probeta(mL)</b>		250	$\rho_{promedio\ total}$ (g/mL)	0,31522333

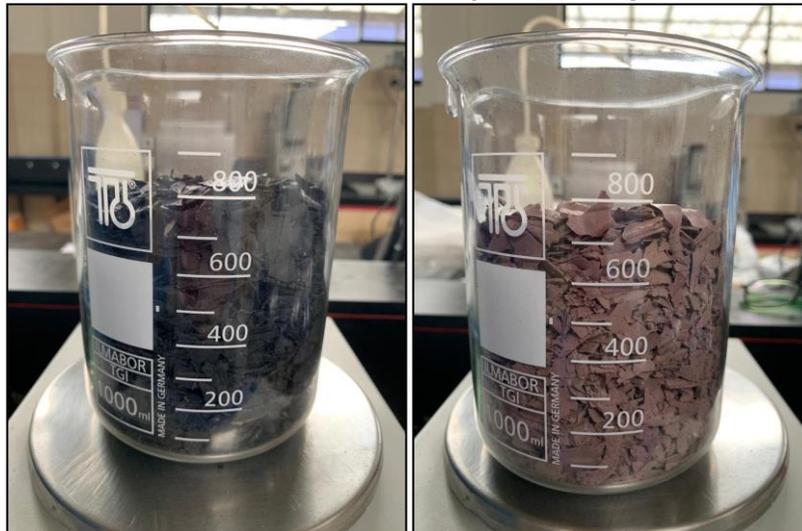
Fuente: Elaboración propia

**Prueba de densidad a granel en probeta de 250 mL.**



Fuente: elaboración propia

**Prueba de densidad en beaker de 800 mL. (Densidad promedio de 0,3g/mL)**



Fuente: elaboración propia

## GRANULOMETRÍA - TAMIZADO REBABA PULVERIZADA

Tamizado muestra de rebaba negra- suela de bota (Z8) Masa=200 g								
N° Tamiz	Malla (AST ME 11-87)	Abertura (mm)	Masa retenida (g)	Xi	%Xi	Xia	Dpi (mm)	Xi•Dpi
	7	2,803	-	-	-	-	-	-
0	8	2,357	81,6	0,408	40,8	0,408	2,58	1,0528
1	10	1,982	18,6	0,093	9,30	0,501	2,169	0,2019
2	12	1,667	20,2	0,101	10,1	0,602	1,824	0,1840
3	14	1,402	23,4	0,117	11,7	0,719	1,534	0,1790
4	16	1,179	11,1	0,055	5,55	0,774	1,290	0,0714
5	18	0,991	11,6	0,058	5,80	0,832	1,085	0,0625
<b>Fondos</b>	<b>20</b>	<b>0,833</b>	<b>31,1</b>	<b>0,155</b>	<b>15,5</b>	<b>0,985</b>	<b>0,912</b>	<b>0,1418</b>
		<b>TOTAL</b>	<b>197,6</b>	<b>Perdidas</b>	<b>2,4 g</b>		<b>Dm</b>	<b>0,841</b>

Fuente: elaboración propia

Tamizado muestra de rebaba negra- suela convencional (Z31) Masa=200 g								
N° Tamiz	Malla (AST ME 11-87)	Abertura (mm)	Masa retenida (g)	Xi	%Xi	Xia	Dpi (mm)	Xi•Dpi
0	7	2,803	-	-	-	-	-	-
1	8	2,357	40,6	0,203	20,3	0,203	2,583	0,5233
2	10	1,982	19,2	0,096	9,6	0,299	2,169	0,2089
3	12	1,667	29	0,145	14,5	0,444	1,824	0,2644
4	14	1,402	35,7	0,178	17,8	0,625	1,534	0,2735
5	16	1,179	25,6	0,128	12,8	0,750	1,290	0,1650
6	18	0,991	11,6	0,058	5,8	0,808	1,085	0,0628

<b>Fondos</b>	<b>20</b>	0,833	35,1	0,175	17,55	0,984	0,912	0,160
	<b>TOTAL</b>		196,8	<b>Perdidas</b>	3,2 g		<b>Dm</b>	1,134

Fuente: elaboración propia

<b>Tamizado muestra de rebaba café - suela convencional (Z24) Masa=200 g</b>								
N° Tamiz	Malla (AST M E 11-87)	Abertura (mm)	Masa retenida (g)	Xi	%Xi	Xia	Dpi (mm)	Xi•Dpi
	7	2,803	-	-	-	-	-	-
<b>0</b>	<b>8</b>	2,357	29,7	0,148	14,85	0,148	2,58	0,383
<b>1</b>	<b>10</b>	1,982	21,7	0,108	10,85	0,257	2,169	0,235
<b>2</b>	<b>12</b>	1,667	22,6	0,113	11,3	0,374	1,824	0,206
<b>3</b>	<b>14</b>	1,402	26,1	0,130	13,05	0,504	1,534	0,200
<b>4</b>	<b>16</b>	1,179	12,3	0,061	6,15	0,562	1,290	0,079
<b>5</b>	<b>18</b>	0,991	11,9	0,059	5,95	0,621	1,085	0,064
<b>Fondos</b>	<b>20</b>	0,833	71,5	0,357	35,75	0,979	0,912	0,326
	<b>TOTAL</b>		195,8	<b>Perdidas</b>	4,2 g		<b>Dm</b>	1,111

Fuente: elaboración propia

<b>Tamizado muestra de rebaba natural - suela convencional (Z29) Masa=200 g</b>								
N° Tamiz	Malla (AST M E 11-87)	Abertura (mm)	Masa retenida (g)	Xi	%Xi	Xia	Dpi (mm)	Xi•Dpi
	7	2,803				-	-	
<b>0</b>	<b>8</b>	2,357	30,5	0,152	15,25	0,152	2,58	0,393
<b>1</b>	<b>10</b>	1,982	16,9	0,084	8,45	0,237	2,169	0,183
<b>2</b>	<b>12</b>	1,667	23,2	0,116	11,6	0,353	1,824	0,211
<b>3</b>	<b>14</b>	1,402	23,6	0,118	11,8	0,471	1,534	0,181

<b>4</b>	<b>16</b>	1,179	16,4	0,082	8,2	0,55 3	1,29 0	0,105
<b>5</b>	<b>18</b>	0,991	16,9	0,084	8,45	0,63 7	1,08 5	0,091
<b>Fondos</b>	<b>20</b>	0,833	69,8	0,349	34,9	0,98 6	0,91 2	0,318
<b>TOTAL</b>		197,3	<b>Perdidas</b>	2,7 g			<b>Dm</b>	1,091

Fuente: elaboración propia

#### Diámetro medio de partícula de las muestras

Referencia	Dm (mm)
<b>Z24</b>	1,112
<b>Z31</b>	1,135
<b>Z8</b>	0,842
<b>Z29</b>	1,092

Fuente: elaboración propia

## ANEXO B. PRETRATAMIENTO DE LA MATERIA PRIMA



Fuente: elaboración propia

### TAMIZADO REBABA MOLIDA

Tamizado muestra de rebaba negra- suela de bota (Z8) Masa=200 g

N° Tamiz	Malla (AST ME 11-87)	Abertura (mm)	Masa retenida (g)	Xi	%Xi	Xia	Dpi (mm)	Xi•Dpi
0	3 1/2	5,607	-	-	-	-	-	-
1	4	4,715	161,7	0,808	80,8	0,808	5,161	4,172
2	5	3,965	8,2	0,041	4,1	0,849	4,34	0,177
3	6	3,334	11,4	0,057	5,7	0,906	3,649	0,208
4	8	2,357	10,3	0,051	5,15	0,958	2,845	0,146
5	10	1,982	1,3	0,006	0,65	0,964	2,169	0,014
<b>Fondos</b>	<b>12</b>	<b>1,667</b>	<b>5,3</b>	<b>0,026</b>	<b>2,65</b>	<b>0,991</b>	<b>1,824</b>	<b>0,048</b>
		<b>TOTAL</b>	<b>198,2</b>	<b>Perdidas</b>	<b>1,8</b>		<b>DM</b>	<b>4,767</b>

Fuente: elaboración propia

**Tamizado muestra de rebaba negra- suelo convencional (Z31) Masa=200 g**

N° Tamiz	Malla (AST M E 11-87)	Abertura (mm)	Masa retenida (g)	Xi	%Xi	Xia	Dpi (mm)	Xi•Dpi
0	3 1/2	5,607	-	-	-	-	-	-
1	4	4,715	144,3	0,721	72,15	0,721	5,161	3,7235
2	5	3,965	13,2	0,066	6,6	0,787	4,34	0,286
3	6	3,334	16,6	0,083	8,3	0,870	3,649	0,302
4	8	2,357	14,5	0,072	7,25	0,943	2,845	0,206
5	10	1,982	2,7	0,013	1,35	0,956	2,169	0,029
Fondos	12	1,667	6,4	0,032	3,2	0,988	1,824	0,058
<b>TOTAL</b>			<b>197,7</b>	Perdidas	2,3		DM	4,607

Fuente: elaboración propia

**Tamizado muestra de rebaba café - suelo convencional (Z24) Masa=200 g**

N° Tamiz	Malla (AST M E 11-87)	Abertura (mm)	Masa retenida (g)	Xi	%Xi	Xia	Dpi (mm)	Xi•Dpi
0	3 1/2	5,607	-	-	-	-	-	-
1	4	4,715	161,4	0,807	80,7	0,807	5,161	4,1647
2	5	3,965	8,7	0,043	4,35	0,850	4,340	0,1885
3	6	3,334	9,9	0,049	4,95	0,900	3,649	0,1805
4	8	2,357	10,8	0,054	5,4	0,954	2,845	0,153
5	10	1,982	1,8	0,009	0,9	0,963	2,169	0,019
Fondos	12	1,667	3,1	0,015	1,55	0,978	1,824	0,0285
<b>TOTAL</b>			<b>195,7</b>	Perdidas	4,3		DM	4,735

Fuente: elaboración propia

**Tamizado muestra de rebaba natural - suela convencional (Z29) Masa=200 g**

N° Tamiz	Malla (AST M E 11-87)	Abertura (mm)	Masa retenida (g)	Xi	%Xi	Xia	Dpi (mm)	Xi•Dpi
0	3 1/2	5,607	-	-	-	-	-	-
1	4	4,715	154,4	0,772	77,2	0,772	5,161	3,984
2	5	3,965	10,7	0,053	5,3	0,825	4,34	0,232
3	6	3,334	12,5	0,062	6,2	0,888	3,649	0,228
4	8	2,357	10,6	0,053	5,3	0,941	2,845	0,150
5	10	1,982	4,7	0,023	2,3	0,964	2,169	0,051
Fondos	12	1,667	4,2	0,021	2,1	0,985	1,824	0,038
<b>TOTAL</b>			197,1	perdidas	2,9		DM	4,684

Fuente: elaboración propia

**Diámetro medio de partícula de las muestras**

Referencia	Dm (mm)
Z24	4,7358
Z31	4,6070
Z8	4,7676
Z29	4,6847

Fuente: elaboración propia

**Mallas y su configuración en el equipo de tamizado**



Fuente: elaboración propia

## ANEXO C. PROCESO DE PIROLISIS DE REBABA DE CAUCHO

### Desarrollo del proceso para rebaba negra a 550°C R2

t(min)	Hora	T. Superior (°C)	T. Inferior (°C)	P operación (Pa)	V (m3)	Observaciones
0	10:15	30	22	0,00	0	Inicio de proceso.
10	10:25	32	175	1.666	0	
20	10:35	40	360	1.666	0	Inicio del burbujeo.
30	10:45	54	487	1.666	0,002	Se enciende la tea intermitente.
40	10:55	68	551	1.666	0,004	
50	11:05	84	558	1.666	0,006	Se forma una fina capa de aceite.
60	11:15	88	550	1.666	0,003	
70	11:25	94	551	1.666	0,003	
80	11:35	104	551	1.666	0,003	
90	11:45	110	550	1.666	0,002	Se apaga la tea.
100	11:55	121	550	1.666	0,002	
110	12:05	124	550	1.666	0,003	
120	12:15	134	551	1.666	0,002	
130	12:25	143	550	1.666	0,002	
140	12:35	150	549	1.666	0,002	
150	12:45	153	550	1.666	0,002	
160	12:55	153	550	1.666	0,002	
170	13:05	163	550	1.666	0,002	
180	13:15	165	550	1.666	0,001	

<b>190</b>	<b>13:2 5</b>	166	550	1.666	0,001	
<b>200</b>	<b>13:3 5</b>	153	550	1.666	0,002	
<b>210</b>	<b>13:4 5</b>	170	550	1.666	0,001	
<b>220</b>	<b>13:5 5</b>	173	550	1.666	0,001	
<b>230</b>	<b>14:0 5</b>	173	551	1.666	0,002	
<b>240</b>	<b>14:1 5</b>	172	550	1.666	0,001	Pequeña fuga de líquido en unión al manómetro.
<b>250</b>	<b>14:2 5</b>	171	550	1.666	0,001	
<b>260</b>	<b>14:3 5</b>	175	551	1.666	0,001	
<b>270</b>	<b>14:4 5</b>	177	550	1.666	0,001	
<b>280</b>	<b>14:5 5</b>	177	550	1.666	0,001	
<b>290</b>	<b>15:0 5</b>	179	551	1.666	0,001	
<b>300</b>	<b>15:1 5</b>	180	550	1.666	0,001	Fin del proceso se reporta en total 0,055 m <sup>3</sup> de gas producido.

### Desarrollo del proceso para rebaba negra a 650°C R2

t(min)	Hora	T. Superior (°C)	T. Inferior (°C)	P operación (Pa)	V (m3)	Observaciones
0	9:00	35	22	0,00	0	Inicio de proceso.
10	9:10	37	168	2.352	0	
20	9:20	45	324	2.940	0	Inicio del burbujeo.
30	9:30	58	450	2.352	0,001	Cambio en el medidor de gas 1dm3.
40	9:40	75	534	2.352	0,005	Aparecen las primeras micelas de crudo.
50	9:50	86	601	2.352	0,007	Se forma la capa de aceite, 7dm3.
60	10:00	116	650	3.038	0,009	La capa de aceite alcanza 7mL aprox.
70	10:10	140	657	2.352	0,007	Burbujeo medio y constante.
80	10:20	153	650	2.352	0,006	
90	10:30	157	650	2.352	0,007	
100	10:40	170	651	2.352	0,006	Se enciende la tea.
110	10:50	181	649	2.352	0,005	
120	11:00	183	650	2.156	0,006	
130	11:10	188	650	2.254	0,005	
140	11:20	196	651	2.352	0,005	Se evidencia aumento del aceite 1,3 cm.
150	11:30	198	650	2.156	0,006	Tea permanece encendida.
160	11:40	206	648	2.156	0,006	
170	11:50	204	651	2.156	0,005	
180	12:00	213	553	2.156	0,005	
190	12:10	213	650	2.156	0,006	
200	12:20	215	649	2.156	0,005	
210	12:30	216	650	2.156	0,004	Disminución de la llama de la tea.
220	12:40	216	650	2.156	0,005	
230	12:50	217	650	2.156	0,005	Burbujeo bajo.
240	13:00	218	650	2.156	0,005	
250	13:10	219	650	2.156	0,003	

<b>260</b>	<b>13:20</b>	219	650	2.156	0,004	
<b>270</b>	<b>13:30</b>	222	650	2.156	0,003	
<b>280</b>	<b>13:40</b>	220	650	2.156	0,002	
<b>290</b>	<b>13:50</b>	220	650	2.156	0,004	
<b>300</b>	<b>14:00</b>	221	650	2.156	0,002	Fin del proceso se reporta en total 0,139 m <sup>3</sup> de gas producido.

### Desarrollo del proceso para rebaba negra a 700°C R2

t(min)	Hora	T. Superior (°C)	T. Inferior (°C)	P operación (Pa)	V (m3)	Observaciones
0	9:05	31	22	0,00	0	Inicio de proceso
10	9:15	35	213	1.568	0	
20	9:25	47	300	1.568	0	Inicio de burbujeo
30	9:35	61	488	1.568	0,003	
40	9:45	82	585	1.568	0,008	Se forma la capa de aceite
50	9:55	95	661	1.764	0,011	
60	10:05	121	701	1.764	0,009	
70	10:15	151	704	1.764	0,014	
80	10:25	159	701	1.764	0,004	
90	10:35	175	700	1.764	0,011	
100	10:45	183	700	1.764	0,006	
110	10:55	175	701	1.764	0,009	
120	11:05	192	700	1.764	0,011	
130	11:15	197	700	1.764	0,007	Muestreo de gas en la bolsa Teldar
140	11:25	201	700	1.764	0,009	
150	11:35	200	700	1.764	0,009	
160	11:45	201	698	1.764	0,008	Se enciende la tea
170	11:55	205	701	1.764	0,008	
180	12:05	210	699	1.764	0,008	
190	12:15	209	701	1.764	0,008	
200	12:25	213	700	1.764	0,006	
210	12:35	211	701	1.764	0,006	

<b>220</b>	<b>12:4 5</b>	211	701	1.764	0,007	
<b>230</b>	<b>12:5 5</b>	208	700	2.744	0,007	
<b>240</b>	<b>13:0 5</b>	212	700	1.764	0,006	
<b>250</b>	<b>13:1 5</b>	215	700	1.764	0,005	
<b>260</b>	<b>13:2 5</b>	212	701	1.764	0,005	
<b>270</b>	<b>13:3 5</b>	210	700	1.764	0,003	
<b>280</b>	<b>13:4 5</b>	205	700	1.764	0,006	
<b>290</b>	<b>13:5 5</b>	205	700	1.764	0,002	
<b>300</b>	<b>14:0 5</b>	208	700	1.764	0,002	Fin del proceso se reporta en total 0,198 m <sup>3</sup> de gas producidos

### Desarrollo del proceso para rebaba café a 550°C R2

t(min)	Hora	T. Superior (°C)	T. Inferior (°C)	P operación (Pa)	V (m3)	Observaciones
0	9:00	21	22	0,00	0	Inicio de proceso
10	9:10	29	220	980	0	
20	9:20	39	411	1.568	0	
30	9:30	58	525	1.568	0,005	Inicio de burbujeo leve
40	9:40	71	562	1.764	0,004	
50	9:50	85	555	1.764	0,007	Se forma la capa de aceite
60	10:00	90	550	1.568	0,005	
70	10:10	94	551	1.568	0,003	
80	10:20	100	551	1.568	0,004	
90	10:30	106	551	1.764	0,003	
100	10:40	113	549	1.568	0,004	Se enciende la tea
110	10:50	123	550	1.764	0,002	
120	11:00	140	550	1.764	0,002	
130	11:10	145	550	1.764	0,002	
140	11:20	150	550	1.764	0,002	
150	11:30	156	549	1.764	0,003	
160	11:40	157	550	1.764	0,003	
170	11:50	163	549	1.764	0,002	
180	12:00	170	550	1.764	0,003	
190	12:10	171	550	1.764	0,002	
200	12:20	172	550	1.764	0,002	
210	12:30	175	550	1.764	0,002	

<b>220</b>	<b>12:4 0</b>	177	550	1.764	0,003	
<b>230</b>	<b>12:5 0</b>	174	550	1.764	0,001	
<b>240</b>	<b>13:0 0</b>	174	550	1.764	0,001	
<b>250</b>	<b>13:1 0</b>	174	550	1.764	0,002	
<b>260</b>	<b>13:2 0</b>	175	550	1.764	0,001	
<b>270</b>	<b>13:3 0</b>	177	550	1.764	0,002	
<b>280</b>	<b>13:4 0</b>	176	550	1.764	0,001	
<b>290</b>	<b>13:5 0</b>	179	550	1.764	0,002	
<b>300</b>	<b>14:0 0</b>	180	550	1.764	0,002	Fin del proceso se reporta en total 0,075 m <sup>3</sup> de gas producidos

### Desarrollo del proceso para rebaba café a 650°C R2

t(min)	Hora	T. Superior (°C)	T. Inferior (°C)	P operación (Pa)	V (m3)	Observaciones
0	9:25	20	28	0,00	0	Inicio de proceso
10	9:35	35	246	1.764	0,001	Inicio de burbujeo leve
20	9:45	54	455	1.764	0,003	
30	9:55	63	482	1.764	0,002	
40	10:05	79	546	1.764	0,005	Aparecen las primeras micelas de aceite
50	10:15	95	622	1.764	0,01	
60	10:25	124	661	1.764	0,008	
70	10:35	139	620	1.764	0,008	
80	10:45	159	651	1.764	0,008	
90	10:55	165	656	1.764	0,004	
100	11:05	177	650	1.764	0,009	
110	11:15	179	650	1.764	0,004	
120	11:25	183	650	1.764	0,005	Se enciende la tea
130	11:35	185	649	1.764	0,008	
140	11:45	190	651	1.764	0,004	
150	11:55	193	651	1.764	0,003	
160	12:05	196	650	1.764	0,005	
170	12:15	194	650	1.764	0,005	
180	12:25	200	649	1.764	0,005	
190	12:35	203	651	1.764	0,005	
200	12:45	199	650	1.764	0,007	
210	12:55	200	650	1.764	0,003	
220	13:05	203	650	1.764	0,005	
230	13:15	202	650	1.764	0,004	
240	13:25	201	650	1.764	0,002	
250	13:35	207	651	1.764	0,005	
260	13:45	201	653	1.764	0,003	
270	13:55	202	650	1.764	0,002	
280	14:05	202	649	1.764	0,003	
290	14:15	200	650	1.764	0,003	
300	14:25	197	630	1.764	0,004	Fin del proceso se reporta en total 0,143 m <sup>3</sup>

### Desarrollo del proceso para rebaba café a 700°C R2

t(min )	Hor a	T. Superior (°C)	T. Inferior (°C)	P operación (Pa)	V (m3)	Observaciones
0	1:50	35	29	0,00	0	Inicio de proceso
10	2:00	40	229	1.176	0	
20	2:10	46	357	1.176	0	Inicio de burbujeo leve
30	2:20	64	501	1.568	0,001	
40	2:30	82	581	1.568	0,003	
50	2:40	91	642	1.568	0,006	Se forma la capa de aceite
60	2:50	104	685	1.568	0,008	
70	3:00	139	709	1.568	0,013	
80	3:10	157	701	1.568	0,009	
90	3:20	162	701	1.568	0,007	
100	3:30	150	701	1.568	0,009	
110	3:40	176	701	1.568	0,009	
120	3:50	179	699	1.568	0,011	Se toma la muestra de gas
130	4:00	192	700	1.568	0,004	
140	4:10	188	701	1.568	0,006	
150	4:20	194	700	1.568	0,007	Se enciende la tea
160	4:30	196	701	1.568	0,008	
170	4:40	200	700	1.568	0,009	
180	4:50	203	700	1.568	0,008	
190	5:00	200	701	1.568	0,007	
200	5:10	204	700	1.568	0,009	
210	5:20	206	701	1.568	0,01	
220	5:30	204	700	1.568	0,004	
230	5:40	198	699	1.568	0,004	
240	5:50	197	700	1.568	0,004	
250	6:00	198	700	1.568	0,003	
260	6:10	195	687	1.568	0,002	
270	6:20	188	674	1.568	0,002	
280	6:30	187	703	1.568	0,003	
290	6:40	193	702	1.568	0,002	
300	6:50	192	699	1.568	0,002	Fin del proceso se reporta en total 0,170 m <sup>3</sup> de gas producidos

### Desarrollo del proceso para rebaba mezcla a 550°C R2

t(min)	Hora	T. Superior (°C)	T. Inferior (°C)	P operación (Pa)	V (m <sup>3</sup> )	Observaciones
0	10:05	29	19	0,00	0	Inicio de proceso
10	10:15	39	240	1.764	0	Inicio de burbujeo leve
20	10:25	45	360	1.764	0,002	
30	10:35	55	465	1.764	0,002	
40	10:45	72	552	1.764	0,006	
50	10:55	87	551	1.764	0,007	Aparecen la primera micelas de aceite
60	11:05	84	551	1.764	0,004	Se enciende la tea
70	11:15	99	550	1.764	0,004	Se forma una capa fina de aceite
80	11:25	106	551	1.764	0,003	Disminucion de la llama de la tea
90	11:35	114	550	1.764	0,003	
100	11:45	115	551	1.764	0,003	Se apaga la tea
110	11:55	120	550	1.764	0,002	
120	12:05	131	550	1.764	0,003	La capa de aceite alcanza 1/2 cm de espesor
130	12:15	138	551	1.764	0,002	
140	12:25	147	550	1.764	0,003	
150	12:35	143	550	1.764	0,002	
160	12:45	146	550	1.764	0,002	
170	12:55	152	550	1.764	0,002	
180	13:05	150	550	1.764	0,002	
190	13:15	160	550	1.764	0,003	
200	13:25	164	550	1.764	0,002	
210	13:35	178	550	1.764	0,001	
220	13:45	166	550	1.764	0,001	
230	13:55	168	550	1.764	0,001	
240	14:05	173	550	1.764	0,001	
250	14:15	180	550	1.764	0,001	
260	14:25	180	550	1.764	0,001	
270	14:35	175	550	1.764	0,001	
280	14:45	178	550	1.764	0,002	
290	14:55	177	550	1.764	0,001	
300	15:05	179	550	1.764	0,001	Fin del proceso se reporta en total 0,068 m <sup>3</sup> de gas producidos

### Desarrollo del proceso para rebaba mezcla a 650°C R2

t(min)	Hora	T. Superior (°C)	T. Inferior (°C)	P operación (Pa)	V (m3)	Observaciones
0	10:05	42	28	0,00	0	Inicio de proceso
10	10:15	45	246	980	0	
20	10:25	48	284	980	0	Inicio de burbujeo leve
30	10:35	58	425	1.764	0,001	
40	10:45	72	519	1.764	0,002	Aparecen la primera micelas de aceite
50	10:55	85	592	1.764	0,006	Se enciende la tea, capa fina de aceite
60	11:05	95	642	1.764	0,007	
70	11:15	129	657	1.764	0,01	
80	11:25	153	650	1.764	0,009	La capa de aceite alcanza 1/2 cm de espesor
90	11:35	165	651	1.764	0,008	Pequeña fuga de líquido del reactor
100	11:45	172	651	1.764	0,007	
110	11:55	165	650	1.764	0,007	
120	12:05	170	650	1.764	0,006	
130	12:15	188	650	1.764	0,005	
140	12:25	184	650	1.764	0,005	
150	12:35	188	650	1.764	0,005	
160	12:45	191	651	1.764	0,005	
170	12:55	197	651	1.764	0,004	
180	13:05	202	650	1.764	0,006	
190	13:15	202	650	1.764	0,006	
200	13:25	203	650	1.764	0,007	
210	13:35	203	650	1.764	0,003	
220	13:45	207	650	1.764	0,003	
230	13:55	207	650	1.764	0,005	
240	14:05	208	650	1.764	0,004	Disminución de la llama de la tea
250	14:15	209	650	1.764	0,003	
260	14:25	210	651	1.764	0,003	Se apaga la tea
270	14:35	210	649	1.764	0,003	
280	14:45	211	650	1.764	0,003	

<b>290</b>	<b>14:55</b>	212	650	1.764	0,003	
<b>300</b>	<b>15:05</b>	212	650	1.764	0,002	Fin del proceso se reporta en total 0,138 m <sup>3</sup> de gas producidos

---

### Desarrollo del proceso para rebaba mezcla a 700°C R2

t(min)	Hora	TCY4 (°C)	PX7(°C)	P operación (Pa)	V (m3)	Observaciones
0	10:00	27	22	0,00	0	Inicio de proceso
10	10:10	38	325	588	0	Inicio de burbujeo leve
20	10:20	50	441	1.666	0,001	
30	10:30	65	531	1.666	0,003	
40	10:40	82	622	1.666	0,011	Aparecen las primeras micelas de aceite.
50	10:50	100	675	1.666	0,009	
60	11:00	133	710	1.666	0,012	
70	11:10	144	703	1.666	0,011	
80	11:20	150	698	1.666	0,008	
90	11:30	169	701	1.666	0,01	
100	11:40	181	699	1.666	0,007	
110	11:50	195	699	1.666	0,009	
120	12:00	206	701	1.666	0,009	Se toma muestra del gas en bolsa teldar
130	12:10	211	699	1.666	0,008	
140	12:20	216	701	1.666	0,009	Fuga en la unión
150	12:30	220	700	1.666	0,008	Se enciende la tea
160	12:40	199	701	1.666	0,009	La capa de aceite alcanza 1/2 cm de espesor
170	12:50	206	700	1.666	0,007	
180	13:00	214	700	1.666	0,006	
190	13:10	218	701	1.666	0,006	
200	13:20	233	699	1.666	0,005	Disminución de la llama de la tea
210	13:30	229	700	1.666	0,005	
220	13:40	227	699	1.666	0,003	
230	13:50	225	700	1.666	0,006	
240	14:00	224	700	1.666	0,004	
250	14:10	220	700	1.666	0,004	Se apaga la tea
260	14:20	214	699	1.666	0,004	
270	14:30	193	701	1.666	0,004	
280	14:40	195	700	1.666	0,002	
290	14:50	208	700	1.666	0,002	
300	15:00	210	700	1.666	0,001	Fin del proceso se reporta en total 0,183 m <sup>3</sup> de gas producidos

## DESARROLLO DEL DISEÑO DE EXPERIMENTOS

A continuación se lleva a cabo el desarrollo del diseño factorial, para el rendimiento del gas de pirólisis de rebaba de caucho teniendo en cuenta:

- Se inicia con la selección del factor A y B (Temperatura y Tipo de rebaba), ordenando los datos obtenidos del proceso.
- Se realiza la suma de cada una de las réplicas.
- Se realiza el cálculo de ( $Y_{i\cdot}$ ,  $Y_{\cdot j}$  y  $Y_{\dots}$ ).

La siguiente tabla muestra lo siguiente antes mencionado.

**Tabla. Datos para el rendimiento del gas de pirólisis de rebaba de caucho**

Temperatura	Tipo de Rebaba			Y <sub>i...</sub>
	Rebaba Negra	Rebaba Café	Rebaba Mezcla	
500 °C	5,50		11,62	11,15
	8,64	23,56	11,78	35,97
	9,42		12,57	12,10
650 °C	19,32		23,25	19,16
	18,85	59,38	22,46	68,80
	21,21		23,09	21,99
700 °C	27,33		25,60	26,55
	30,32	86,24	30,32	82,15
	28,59		26,23	27,49
Y <sub>·j</sub>	169,18		186,93	179,54
				Y <sub>...</sub>
				<b>535,65</b>

Fuente: elaboración Propia

Posteriormente se calculan a suma de cuadrados:

$$SCT = SCE_A + SCE_B + SCE_{AB} + SCD_{ER}$$

$$SCE_T = \sum_{i=1}^a \sum_{j=1}^b \sum_{k=1}^n Y_{ijk}^2 - \frac{Y_{\dots}^2}{N}$$

Posteriormente se calculan a suma de cuadrados haciendo uso de la ecuación XX:

$$SCE_A = \frac{1}{bn} \sum_{i=1}^a Y_{i\cdot}^2 - \frac{Y_{\dots}^2}{N}$$

**Ecuación. Suma de cuadrados efecto factor A.**

$$SCE_A = \frac{1}{3 * 3} \sum (93,46^2 + 191,01^2 + 251,17^2) - \frac{535,65^2}{3 * 3 * 3}$$

$$SCE_A = 1407,68$$

$$SCE_B = \frac{1}{an} \sum_{j=1}^b Y_{\cdot j}^2 - \frac{Y_{\dots}^2}{N}$$

**Ecuación. Suma de cuadrados efecto factor B.**

$$SCE_B = \frac{1}{3 * 3} \sum (169,18^2 + 186,93^2 + 179,54^2) - \frac{535,65^2}{3 * 3 * 3}$$

$$SCE_B = 17,67$$

$$SCE_{AB} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^a \sum_{j=1}^b Y_{ij}^2 - \frac{Y_{...}^2}{N} - SCE_A - SCE_B$$

**Ecuación. Suma de cuadrados efecto de la interacción AB.**

$$SCE_{AB} = \frac{1}{3} \sum (23,56^2 + 35,97^2 + 33,93^2 + 59,38^2 + 68,80^2 + 62,83^2 + 86,24^2 + 82,15^2 + 82,78^2) - \frac{535,65^2}{3 * 3 * 3} - 1407,673818 - 17,6687352$$

$$SCE_{AB} = 30,23$$

$$SCE_T = \sum_{i=1}^a \sum_{j=1}^b \sum_{k=1}^n Y_{ijk}^2 - \frac{Y_{...}^2}{N}$$

**Ecuación. Suma de cuadrados total.**

$$SCE_T = \sum (5,50^2 + 8,64^2 + 9,42^2 + 19,32^2 + 18,85^2 + 21,21^2 + 27,33^2 + 30,32^2 + 28,59^2 + 11,62^2 + 11,78^2 + 12,57^2 + 23,25^2 + 22,46^2 + 23,09^2 + 25,60^2 + 30,32^2 + 26,23^2 + 11,15^2 + 10,68^2 + 12,10^2 + 19,16^2 + 21,68^2 + 21,99^2 + 26,55^2 + 12,10^2 + 19,16^2 + 21,68^2 + 21,99^2 + 26,55^2 + 28,75^2 + 27,49^2) - \frac{535,65^2}{3 * 3 * 3}$$

$$SCE_T = 1494,03$$

$$SCE_E = SCT - SCE_A - SCE_B - SCE_{AB}$$

**Ecuación. Error.**

$$SCE_E = 1494,028916 - 1407,673818 - 17,6687352 - 30,22711728$$

$$SCE_E = 38,46$$

Luego, se estiman los grados de libertad para el factor A, el B junto con su interacción, adicionalmente el error.

$Gl_A = a - 1$	$Gl_A = 3 - 1$	$Gl_A = 2$
$Gl_B = b - 1$	$Gl_B = 3 - 1$	$Gl_B = 2$
$Gl_{AB} = (a - 1)(b - 1)$	$Gl_{AB} = (3 - 1)(3 - 1)$	$Gl_{AB} = 2$
$Gl_E = ab(n - 1)$	$Gl_E = 9(3 - 1)$	$Gl_E = 18$
$Gl_T = (abn - 1)$	$Gl_T = (3 * 3 * 3 - 1)$	$Gl_T = 26$

Posteriormente, se procede a estimar el valor correspondiente cuadrados medios como se observa continuación.

$$\begin{aligned}
 CM_A &= \frac{SCE_A}{a-1} = \frac{1407,673818}{3-1} = 703,84 \\
 CM_B &= \frac{SCE_B}{b-1} = \frac{17,6687352}{3-1} = 8,83 \\
 CM_{AB} &= \frac{SCE_{AB}}{(a-1)(b-1)} = \frac{30,22711728}{(3-1)(3-1)} = 7,56 \\
 CM_R &= \frac{SCE_R}{a * b(n-1)} = \frac{38,45924548}{3 * 3(3-1)} = 2,14
 \end{aligned}$$

Para finalizar se identifican los valores de la variable  $F_{Máx c}$  y  $F_{Tablas}$ , este valor nos permite tomar una decisión acertada frente a la aceptación o rechazo de la hipótesis planteada con el criterio de  $F_{Máx c} > F_{Tablas}$ , en caso de cumplirse se rechaza la hipótesis nula, por ende se acepta la alterna.

$$\begin{aligned}
 F_1 &= \frac{CM_A}{CM_R} = \frac{703,8369089}{2,136624749} = 329,42 \\
 F_2 &= \frac{CM_B}{CM_R} = \frac{8,8343676}{2,136624749} = 4,14 \\
 F_3 &= \frac{CM_{AB}}{CM_R} = \frac{7,55677932}{2,136624749} = 3,54
 \end{aligned}$$

Con un nivel de confiabilidad del 95% en la prueba F se obtiene:

$F_{0.05,3,18} = 3,55$	$329,42 > 3,55$ Se Rechaza la Hipótesis nula.
$F_{0.05,2,18} = 3,55$	$4,14 > 3,55$ Se Rechaza la Hipótesis nula.
$F_{0.05,4,18} = 2,93$	$3,54 > 2,93$ Se Rechaza la Hipótesis nula.

BALANCE DE MATERIA REBABA NEGRA								
Normalización	0,5548							
550 °C			650 °C			700 °C		
Masa inicial (Kg)	0,400	% Rendimiento	Masa inicial (Kg)	0,400	% Rendimiento	Masa inicial (Kg)	0,400	% Rendimiento
Carbonizado (Kg)	0,285	71,25	Carbonizado (Kg)	0,239	59,75	Carbonizado (Kg)	0,190	47,50
Crudo (Kg)	0,025	6,25	Crudo (Kg)	0,039	9,75	Crudo (Kg)	0,033	8,25
Gas estimado (Kg)	0,090	22,50	Gas estimado (Kg)	0,122	30,50	Gas estimado (Kg)	0,177	44,25
Gas medido (Kg)	0,040	9,91	Gas medido (Kg)	0,139	34,82	Gas medido (Kg)	0,197	49,26
Perdidas (Kg)	0,050	12,59	Perdidas (Kg)	-0,017	-4,32	Perdidas (Kg)	-0,020	-5,01
NORMALIZACIÓN DE DATOS			NORMALIZACIÓN DE DATOS			NORMALIZACIÓN DE DATOS		
Masa inicial (Kg)	0,400	% Rendimiento	Masa inicial (Kg)	0,400	% Rendimiento	Masa inicial (Kg)	0,400	% Rendimiento
Carbonizado (Kg)	0,285	71,25	Carbonizado (Kg)	0,239	59,75	Carbonizado (Kg)	0,190	47,50
Crudo (Kg)	0,025	6,25	Crudo (Kg)	0,039	9,75	Crudo (Kg)	0,033	8,25

<b>Gas Corregido (Kg)</b>	0,022	5,50
<b>Balance de masa</b>		83,00
<b>Perdidas (Kg)</b>	0,068	17,00

<b>Gas Corregido (Kg)</b>	0,077	19,32
<b>Balance de masa</b>		88,82
<b>Perdidas (Kg)</b>	0,045	11,18

<b>Gas Corregido (Kg)</b>	0,109	27,33
<b>Balance de masa</b>		83,08
<b>Perdidas (Kg)</b>	0,068	16,92

550 °C		
<b>Masa inicial (Kg)</b>	0,400	% Rendimiento
<b>Carbonizado (Kg)</b>	0,281	70,25
<b>Crudo (Kg)</b>	0,026	6,50
<b>Gas estimado (Kg)</b>	0,093	23,25
<b>Gas medido (Kg)</b>	0,068	16,99
<b>Perdidas (Kg)</b>	0,025	6,26

650 °C		
<b>Masa inicial (Kg)</b>	0,400	% Rendimiento
<b>Carbonizado (Kg)</b>	0,25	62,5
<b>Crudo (Kg)</b>	0,054	13,5
<b>Gas estimado (Kg)</b>	0,096	24,00
<b>Gas medido (Kg)</b>	0,136	33,97
<b>Perdidas (Kg)</b>	-0,040	-9,97

700 °C		
<b>Masa inicial (Kg)</b>	0,400	% Rendimiento
<b>Carbonizado (Kg)</b>	0,226	56,50
<b>Crudo (Kg)</b>	0,053	13,25
<b>Gas estimado (Kg)</b>	0,121	30,25
<b>Gas medido (Kg)</b>	0,219	54,64
<b>Perdidas (Kg)</b>	-0,098	-24,39

NORMALIZACIÓN DE DATOS		
<b>Masa inicial (Kg)</b>	0,400	% Rendimiento
<b>Carbonizado (Kg)</b>	0,281	70,25

NORMALIZACIÓN DE DATOS		
<b>Masa inicial (Kg)</b>	0,400	% Rendimiento
<b>Carbonizado (Kg)</b>	0,250	62,50

NORMALIZACIÓN DE DATOS		
<b>Masa inicial (Kg)</b>	0,400	% Rendimiento
<b>Carbonizado (Kg)</b>	0,226	56,50

<b>Crudo (Kg)</b>	0,026	6,50
<b>Gas Corregido (Kg)</b>	0,038	9,42
<b>Balance de masa</b>		86,17
<b>Perdidas (Kg)</b>	0,055	13,83

<b>Crudo (Kg)</b>	0,054	13,50
<b>Gas Corregido (Kg)</b>	0,075	18,85
<b>Balance de masa</b>		94,85
<b>Perdidas (Kg)</b>	0,021	5,15

<b>Crudo (Kg)</b>	0,053	13,25
<b>Gas Corregido (Kg)</b>	0,121	30,32
<b>Balance de masa</b>		100
<b>Perdidas (Kg)</b>	0	0

<b>550 °C</b>		
<b>Masa inicial (Kg)</b>	0,400	<b>% Rendimient</b> o
<b>Carbonizado (Kg)</b>	0,283	70,75
<b>Crudo (Kg)</b>	0,024	6,00
<b>Gas estimado (Kg)</b>	0,093	23,25
<b>Gas medido (Kg)</b>	0,062	15,57
<b>Perdidas (Kg)</b>	0,031	7,68
<b>NORMALIZACIÓN DE DATOS</b>		
<b>Masa inicial (Kg)</b>	0,400	<b>% Rendimient</b> o

<b>650 °C</b>		
<b>Masa inicial (Kg)</b>	0,400	<b>% Rendimient</b> o
<b>Carbonizado (Kg)</b>	0,245	61,25
<b>Crudo (Kg)</b>	0,045	11,25
<b>Gas estimado (Kg)</b>	0,110	27,50
<b>Gas medido (Kg)</b>	0,153	38,22
<b>Perdidas (Kg)</b>	-0,043	-10,72
<b>NORMALIZACIÓN DE DATOS</b>		
<b>Masa inicial (Kg)</b>	0,400	<b>% Rendimient</b> o

<b>700 °C</b>		
<b>Masa inicial (Kg)</b>	0,400	<b>% Rendimient</b> o
<b>Carbonizado (Kg)</b>	0,220	55,00
<b>Crudo (Kg)</b>	0,053	13,25
<b>Gas estimado (Kg)</b>	0,127	31,75
<b>Gas medido (Kg)</b>	0,206	51,53
<b>Perdidas (Kg)</b>	-0,079	-19,78
<b>NORMALIZACIÓN DE DATOS</b>		
<b>Masa inicial (Kg)</b>	0,400	<b>% Rendimient</b> o

<b>Carbonizado (Kg)</b>	0,283	70,75	<b>Carbonizado (Kg)</b>	0,245	61,25	<b>Carbonizado (Kg)</b>	0,220	55,00
<b>Crudo (Kg)</b>	0,024	6,00	<b>Crudo (Kg)</b>	0,045	11,25	<b>Crudo (Kg)</b>	0,053	13,25
<b>Gas Corregido (Kg)</b>	0,035	8,64	<b>Gas Corregido (Kg)</b>	0,085	21,21	<b>Gas Corregido (Kg)</b>	0,114	28,59
<b>Balance de masa</b>		85,39	<b>Balance de masa</b>		93,71	<b>Balance de masa</b>		96,84
<b>Perdidas (Kg)</b>	0,058	14,61	<b>Perdidas (Kg)</b>	0,025	6,29	<b>Perdidas (Kg)</b>	0,013	3,16

### BALANCE DE MATERIA REBABA CAFÉ

<b>Normalización</b>	<b>0,5548</b>							
<b>550 °C</b>			<b>650 °C</b>			<b>700 °C</b>		
<b>Masa inicial (Kg)</b>	0,400	<b>% Rendimiento</b>	<b>Masa inicial (Kg)</b>	0,400	<b>% Rendimiento</b>	<b>Masa inicial (Kg)</b>	0,400	<b>% Rendimiento</b>
<b>Carbonizado (Kg)</b>	0,287	71,75	<b>Carbonizado (Kg)</b>	0,241	60,25	<b>Carbonizado (Kg)</b>	0,228	57
<b>Crudo (Kg)</b>	0,029	7,25	<b>Crudo (Kg)</b>	0,036	9	<b>Crudo (Kg)</b>	0,048	12
<b>Gas estimado (Kg)</b>	0,084	21,00	<b>Gas estimado (Kg)</b>	0,123	30,75	<b>Gas estimado (Kg)</b>	0,124	31
<b>Gas medido (Kg)</b>	0,0838	20,95	<b>Gas medido (Kg)</b>	0,168	41,90	<b>Gas medido (Kg)</b>	0,185	46,15

<b>Perdidas (Kg)</b>	0,000 2	0,05
<b>NORMALIZACIÓN DE DATOS</b>		
<b>Masa inicial (Kg)</b>	0,400	% Rendimient o
<b>Carbonizado (Kg)</b>	0,287	71,75
<b>Crudo (Kg)</b>	0,029	7,25
<b>Gas Corregido (Kg)</b>	0,046	11,62
<b>Balance de masa</b>		90,62
<b>Perdidas (Kg)</b>	0,038	9,38

<b>Perdidas (Kg)</b>	- 0,04 5	-11,15
<b>NORMALIZACIÓN DE DATOS</b>		
<b>Masa inicial (Kg)</b>	0,40 0	% Rendimient o
<b>Carbonizado (Kg)</b>	0,24 1	60,25
<b>Crudo (Kg)</b>	0,03 6	9
<b>Gas Corregido (Kg)</b>	0,09 3	23,25
<b>Balance de masa</b>		92,50
<b>Perdidas (Kg)</b>	0,03 0	7,50

<b>Perdidas de gas (Kg)</b>	- 0,06 1	-15,15
<b>NORMALIZACIÓN DE DATOS</b>		
<b>Masa inicial (Kg)</b>	0,40 0	% Rendimient o
<b>Carbonizado (Kg)</b>	0,22 8	57
<b>Crudo (Kg)</b>	0,04 8	12
<b>Gas Corregido (Kg)</b>	0,10 2	25,60
<b>Balance de masa</b>		94,60
<b>Perdidas (Kg)</b>	0,02 2	5,40

<b>550 °C</b>		
<b>Masa inicial (Kg)</b>	0,400	% Rendimient o
<b>Carbonizado (Kg)</b>	0,285	71,25
<b>Crudo (Kg)</b>	0,029	7,25
<b>Gas estimado (Kg)</b>	0,086	21,50

<b>650 °C</b>		
<b>Masa inicial (Kg)</b>	0,40 0	% Rendimient o
<b>Carbonizado (Kg)</b>	0,25 2	63
<b>Crudo (Kg)</b>	0,05 5	13,75
<b>Gas estimado (Kg)</b>	0,09 3	23,25

<b>700 °C</b>		
<b>Masa inicial (Kg)</b>	0,40 0	% Rendimient o
<b>Carbonizado (Kg)</b>	0,22 2	55,5
<b>Crudo (Kg)</b>	0,05 3	13,25
<b>Gas estimado (Kg)</b>	0,12 5	31,25

Gas medido (Kg)	0,085	21,23	Gas medido (Kg)	0,162	40,48	Gas medido (Kg)	0,193	48,13
Perdidas (Kg)	0,001	0,27	Perdidas (Kg)	-0,069	-17,23	Perdidas (Kg)	-0,068	-16,88
<b>NORMALIZACIÓN DE DATOS</b>			<b>NORMALIZACIÓN DE DATOS</b>			<b>NORMALIZACIÓN DE DATOS</b>		
Masa inicial (Kg)	0,400	% Rendimiento	Masa inicial (Kg)	0,400	% Rendimiento	Masa inicial (Kg)	0,400	% Rendimiento
Carbonizado (Kg)	0,285	71,25	Carbonizado (Kg)	0,252	63	Carbonizado (Kg)	0,222	55,5
Crudo (Kg)	0,029	7,25	Crudo (Kg)	0,055	13,75	Crudo (Kg)	0,053	13,25
Gas Corregido (Kg)	0,047	11,78	Gas Corregido (Kg)	0,090	22,46	Gas Corregido (Kg)	0,107	26,70
Balance de masa		90,28	Balance de masa		99,21	Balance de masa		95,45
Perdidas (Kg)	0,039	9,72	Perdidas (Kg)	0,003	0,79	Perdidas (Kg)	0,018	4,55
<b>550 °C</b>			<b>650 °C</b>			<b>700 °C</b>		
Masa inicial (Kg)	0,4	% Rendimiento	Masa inicial (Kg)	0,4	% Rendimiento	Masa inicial (Kg)	0,4	% Rendimiento
Carbonizado (Kg)	0,286	71,5	Carbonizado (Kg)	0,252	63	Carbonizado (Kg)	0,231	57,75
Crudo (Kg)	0,023	5,75	Crudo (Kg)	0,055	13,75	Crudo (Kg)	0,053	13,25

<b>Gas estimado (Kg)</b>	0,091	22,75	<b>Gas estimado (Kg)</b>	0,093	23,25	<b>Gas estimado (Kg)</b>	0,116	29
<b>Gas medido (Kg)</b>	0,091	22,65	<b>Gas medido (Kg)</b>	0,166	41,62	<b>Gas medido (Kg)</b>	0,189	47,28
<b>Perdidas (Kg)</b>	0,0004	0,10	<b>Perdidas (Kg)</b>	-0,073	-18,37	<b>Perdidas (Kg)</b>	-0,073	-18,28
<b>NORMALIZACIÓN DE DATOS</b>			<b>NORMALIZACIÓN DE DATOS</b>			<b>NORMALIZACIÓN DE DATOS</b>		
<b>Masa inicial (Kg)</b>	0,400	% Rendimiento	<b>Masa inicial (Kg)</b>	0,400	% Rendimiento	<b>Masa inicial (Kg)</b>	0,400	% Rendimiento
<b>Carbonizado (Kg)</b>	0,286	71,5	<b>Carbonizado (Kg)</b>	0,252	63	<b>Carbonizado (Kg)</b>	0,231	57,75
<b>Crudo (Kg)</b>	0,023	5,75	<b>Crudo (Kg)</b>	0,055	13,75	<b>Crudo (Kg)</b>	0,053	13,25
<b>Gas Corregido (Kg)</b>	0,050	12,57	<b>Gas Corregido (Kg)</b>	0,092	23,09	<b>Gas Corregido (Kg)</b>	0,105	26,23
<b>Balance de masa</b>		89,82	<b>Balance de masa</b>		99,84	<b>Balance de masa</b>		97,23
<b>Perdidas (Kg)</b>	0,041	10,18	<b>Perdidas (Kg)</b>	0,001	0,16	<b>Perdidas (Kg)</b>	0,011	2,77

<b>BALANCE DE MATERIA REBABA MEZCLA</b>		
<b>Normalización</b>	<b>0,5548</b>	
<b>550 °C</b>	<b>650 °C</b>	<b>700 °C</b>

<b>Masa inicial (Kg)</b>	0,400	<b>% Rendimiento</b>
<b>Carbonizado (Kg)</b>	0,293	73,25
<b>Crudo (Kg)</b>	0,024	6
<b>Gas estimado (Kg)</b>	0,083	20,75
<b>Gas medido (Kg)</b>	0,080	20,10
<b>Perdidas (Kg)</b>	0,003	0,65
<b>NORMALIZACIÓN DE DATOS</b>		
<b>Masa inicial (Kg)</b>	0,400	<b>% Rendimiento</b>
<b>Carbonizado (Kg)</b>	0,293	73,25
<b>Crudo (Kg)</b>	0,024	6
<b>Gas Corregido (Kg)</b>	0,045	11,15
<b>Balance de masa</b>		90,40
<b>Perdidas (Kg)</b>	0,038	9,60

<b>Masa inicial (Kg)</b>	0,400	<b>% Rendimiento</b>
<b>Carbonizado (Kg)</b>	0,24	60
<b>Crudo (Kg)</b>	0,035	8,75
<b>Gas estimado (Kg)</b>	0,125	31,25
<b>Gas medido (Kg)</b>	0,138	34,54
<b>Perdidas (Kg)</b>	-0,013	-3,29
<b>NORMALIZACIÓN DE DATOS</b>		
<b>Masa inicial (Kg)</b>	0,400	<b>% Rendimiento</b>
<b>Carbonizado (Kg)</b>	0,24	60
<b>Crudo (Kg)</b>	0,035	8,75
<b>Gas Corregido (Kg)</b>	0,077	19,16
<b>Balance de masa</b>		87,91
<b>Perdidas (Kg)</b>	0,048	12,09

<b>Masa inicial (Kg)</b>	0,400	<b>% Rendimiento</b>
<b>Carbonizado (Kg)</b>	0,22	55
<b>Crudo (Kg)</b>	0,055	13,75
<b>Gas estimado (Kg)</b>	0,125	31,25
<b>Gas medido (Kg)</b>	0,191	47,85
<b>Perdidas (Kg)</b>	-0,066	-16,60
<b>NORMALIZACIÓN DE DATOS</b>		
<b>Masa inicial (Kg)</b>	0,400	<b>% Rendimiento</b>
<b>Carbonizado (Kg)</b>	0,22	55
<b>Crudo (Kg)</b>	0,055	13,75
<b>Gas Corregido (Kg)</b>	0,106	26,55
<b>Balance de masa</b>		95,30
<b>Perdidas (Kg)</b>	0,019	4,70

550 °C		
Masa inicial (Kg)	0,400	% Rendimiento
Carbonizado (Kg)	0,284	71
Crudo (Kg)	0,028	7
Gas estimado (Kg)	0,088	22
Gas medido (Kg)	0,077	19,25
Perdidas (Kg)	0,011	2,75
NORMALIZACIÓN DE DATOS		
Masa inicial (Kg)	0,400	% Rendimiento
Carbonizado (Kg)	0,284	71
Crudo (Kg)	0,028	7
Gas Corregido (Kg)	0,043	10,68
Balance de masa		88,68
Perdidas (Kg)	0,045	11,32

650 °C		
Masa inicial (Kg)	0,400	% Rendimiento
Carbonizado (Kg)	0,242	60,5
Crudo (Kg)	0,038	9,5
Gas estimado (Kg)	0,12	30
Gas medido (Kg)	0,156	39,07
Perdidas (Kg)	-0,036	-9,07
NORMALIZACIÓN DE DATOS		
Masa inicial (Kg)	0,400	% Rendimiento
Carbonizado (Kg)	0,242	60,5
Crudo (Kg)	0,038	9,5
Gas Corregido (Kg)	0,087	21,68
Balance de masa		91,68
Perdidas (Kg)	0,033	8,32

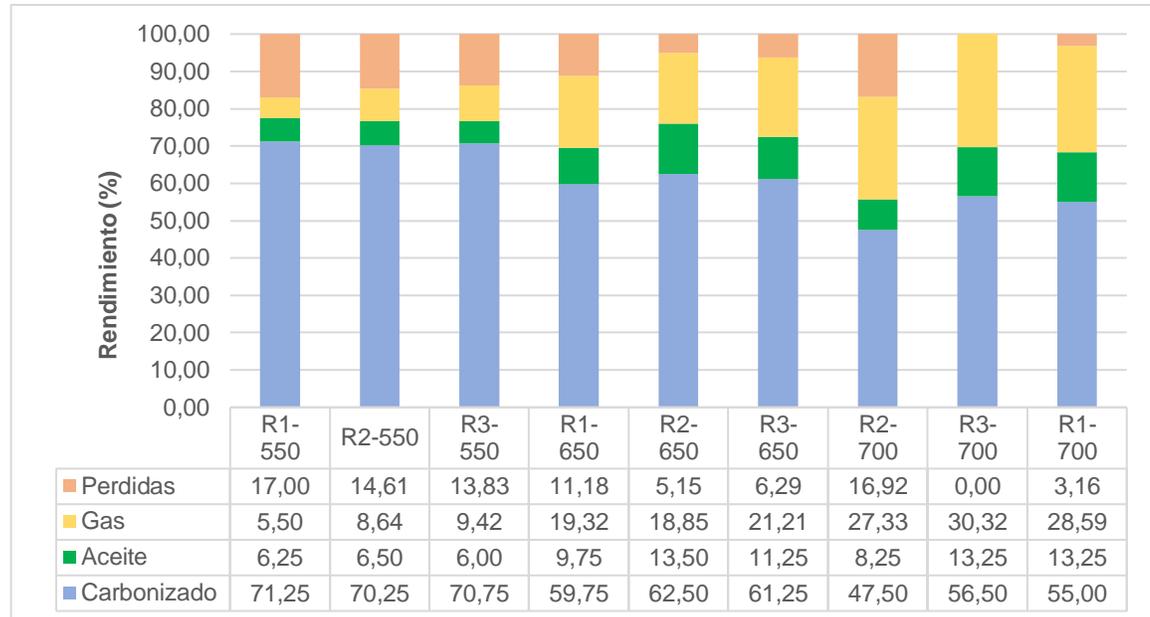
700 °C		
Masa inicial (Kg)	0,400	% Rendimiento
Carbonizado (Kg)	0,218	54,5
Crudo (Kg)	0,055	13,75
Gas estimado (Kg)	0,127	31,75
Gas medido (Kg)	0,207	51,81
Perdidas (Kg)	-0,080	-20,06
NORMALIZACIÓN DE DATOS		
Masa inicial (Kg)	0,400	% Rendimiento
Carbonizado (Kg)	0,218	54,5
Crudo (Kg)	0,055	13,75
Gas Corregido (Kg)	0,115	28,75
Balance de masa		97,00
Perdidas (Kg)	0,012	3,00

550 °C			650 °C			700 °C		
Masa inicial (Kg)	0,400	% Rendimiento	Masa inicial (Kg)	0,400	% Rendimiento	Masa inicial (Kg)	0,400	% Rendimiento
Carbonizado (Kg)	0,285	71,25	Carbonizado (Kg)	0,24	60	Carbonizado (Kg)	0,224	56
Crudo (Kg)	0,024	6	Crudo (Kg)	0,038	9,5	Crudo (Kg)	0,059	14,75
Gas estimado (Kg)	0,091	22,75	Gas estimado (Kg)	0,122	30,5	Gas estimado (Kg)	0,117	29,25
Gas medido (Kg)	0,087	21,80	Gas medido (Kg)	0,159	39,64	Gas medido (Kg)	0,198	49,54
Perdidas (Kg)	0,004	0,95	Perdidas (Kg)	-0,037	-9,14	Perdidas (Kg)	-0,081	-20,29
<b>NORMALIZACIÓN DE DATOS</b>			<b>NORMALIZACIÓN DE DATOS</b>			<b>NORMALIZACIÓN DE DATOS</b>		
Masa inicial (Kg)	0,400	% Rendimiento	Masa inicial (Kg)	0,400	% Rendimiento	Masa inicial (Kg)	0,400	% Rendimiento
Carbonizado (Kg)	0,285	71,25	Carbonizado (Kg)	0,24	60	Carbonizado (Kg)	0,224	56
Crudo (Kg)	0,024	6	Crudo (Kg)	0,038	9,5	Crudo (Kg)	0,059	14,75
Gas Corregido (Kg)	0,048	12,10	Gas Corregido (Kg)	0,088	21,99	Gas Corregido (Kg)	0,110	27,49
Balance de masa		89,35	Balance de masa		91,49	Balance de masa		98,24

<b>Perdidas (Kg)</b>	0,043	10,65		<b>Perdidas (Kg)</b>	0,034	8,51		<b>Perdidas (Kg)</b>	0,007	1,76
----------------------	-------	-------	--	----------------------	-------	------	--	----------------------	-------	------

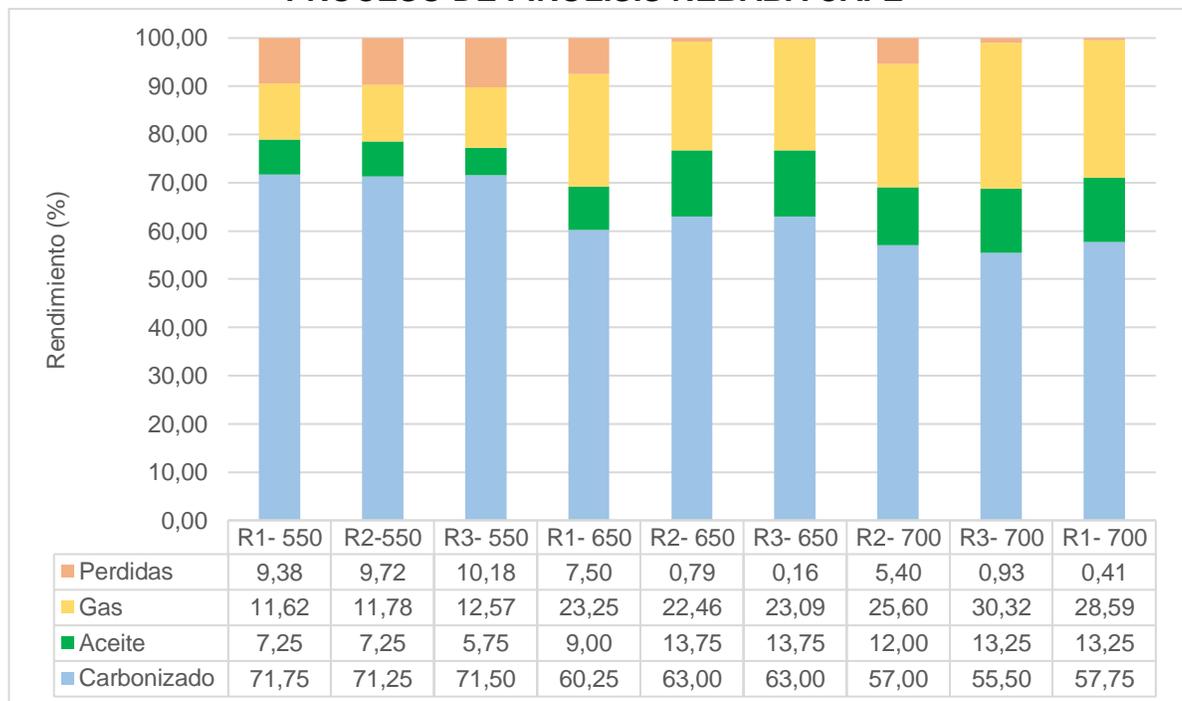
## DISTRIBUCIÓN DE PRODUCTOS DEL PROCESO DE PIRÓLISIS DE REBABA DE CAUCHO

### PROCESO DE PIRÓLISIS REBABA NEGRA



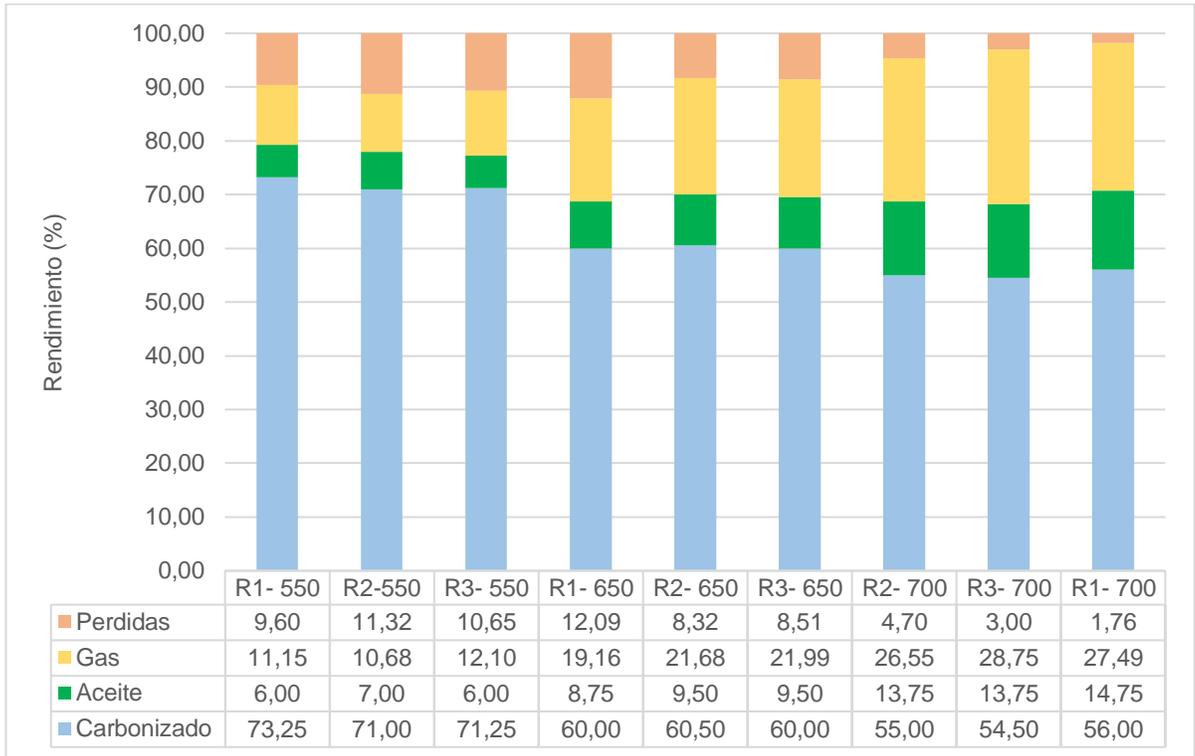
Fuente. elaboración propia.

### PROCESO DE PIRÓLISIS REBABA CAFÉ



Fuente: elaboración propia.

### PROCESO DE PIRÓLISIS REBABA MEZCLA



Fuente: elaboración propia

## ANEXO D. CARACTERIZACIÓN DE LOS PRODUCTOS

### CARBONIZADO O CHAR



Fuente: elaboración propia.

## ANÁLISIS PRÓXIMO

### DETERMINACIÓN DE CONTENIDO DE HUMEDAD

Carbonizado	Temperatura de operación del proceso	$m_1$ (g)	$m_2$ (g)	$m_3$ (g) (1h)	%H
R.Negra	550	33,090	34,090	34,075	1,550
	650	31,192	32,192	32,179	1,270
	700	29,343	30,343	30,332	1,130
R.Café	550	29,580	30,580	30,561	1,880
	650	29,649	30,649	30,627	2,230
	700	29,649	30,649	30,639	1,030
R.Mezcla	550	27,770	28,770	28,754	1,600
	650	28,490	29,490	29,452	3,800
	700	31,200	32,200	32,183	1,700

Donde:

- $m_1$ : es la masa del crisol vacío.
- $m_2$ : es la masa del crisol y 1g de muestra antes de calentar.
- $m_3$ : es la masa del crisol y la muestra, luego de calentar.

Fuente: Elaboración propia

### DETERMINACIÓN DE MATERIAL VOLÁTIL

Rebaba	Temperatura	$m_1$ (g)	$m_2$ (g)	$m_3$ (g)	% $V_d$
Negra	550	31,21	32,21	31,51	69,4504129
	650	28,48	29,48	28,86	61,3038564
	700	20,34	21,34	21,15	17,5161149
Café	550	27,77	28,77	28,11	65,3771347
	650	29,58	30,58	30,1	47,0473824
	700	29,99	30,99	30,76	21,5893932
Mezcla	550	19,66	20,66	19,99	66,3954542
	650	31,68	32,68	32,1	57,2305781
	700	19,83	20,83	20,7	11,4061975

Donde:

- $V_d$ : material volátil en la muestra expresado como porcentaje en masa.
- $m_1$ : es la masa del crisol vacío.
- $m_2$ : es la masa del crisol y 1g de muestra antes de calentar.
- $m_3$ : es la masa del crisol y la muestra, luego de calentar

Fuente: elaboración propia

## DETERMINACIÓN DEL CONTENIDO DE CENIZAS

Rebaba	Temperatura de operación del proceso	$m_1$ (g)	$m_2$ (g)	$m_3$ (g)	$\%A_d$
Negra	550	31,200	32,200	31,450	25,458
	650	27,790	28,790	28,130	34,623
	700	28,490	29,490	28,900	41,751
Café	550	30,000	31,000	30,490	49,898
	650	29,580	30,580	30,030	45,824
	700	19,840	20,840	20,360	52,953
Mezcla	550	19,660	20,660	20,200	54,989
	650	30,240	31,240	30,540	30,550
	700	31,690	32,690	32,280	60,081

Donde:

- $A_d$ : contenido de cenizas en la muestra expresado como porcentaje en masa
- $m_1$ : es la masa del crisol vacío
- $m_2$ : es la masa del crisol y 1g de muestra antes de calentar.
- $m_3$ : es la masa del crisol y la muestra, luego de calentar.

Fuente: Elaboración propia

## DETERMINACIÓN DE LA DENSIDAD A GRANEL



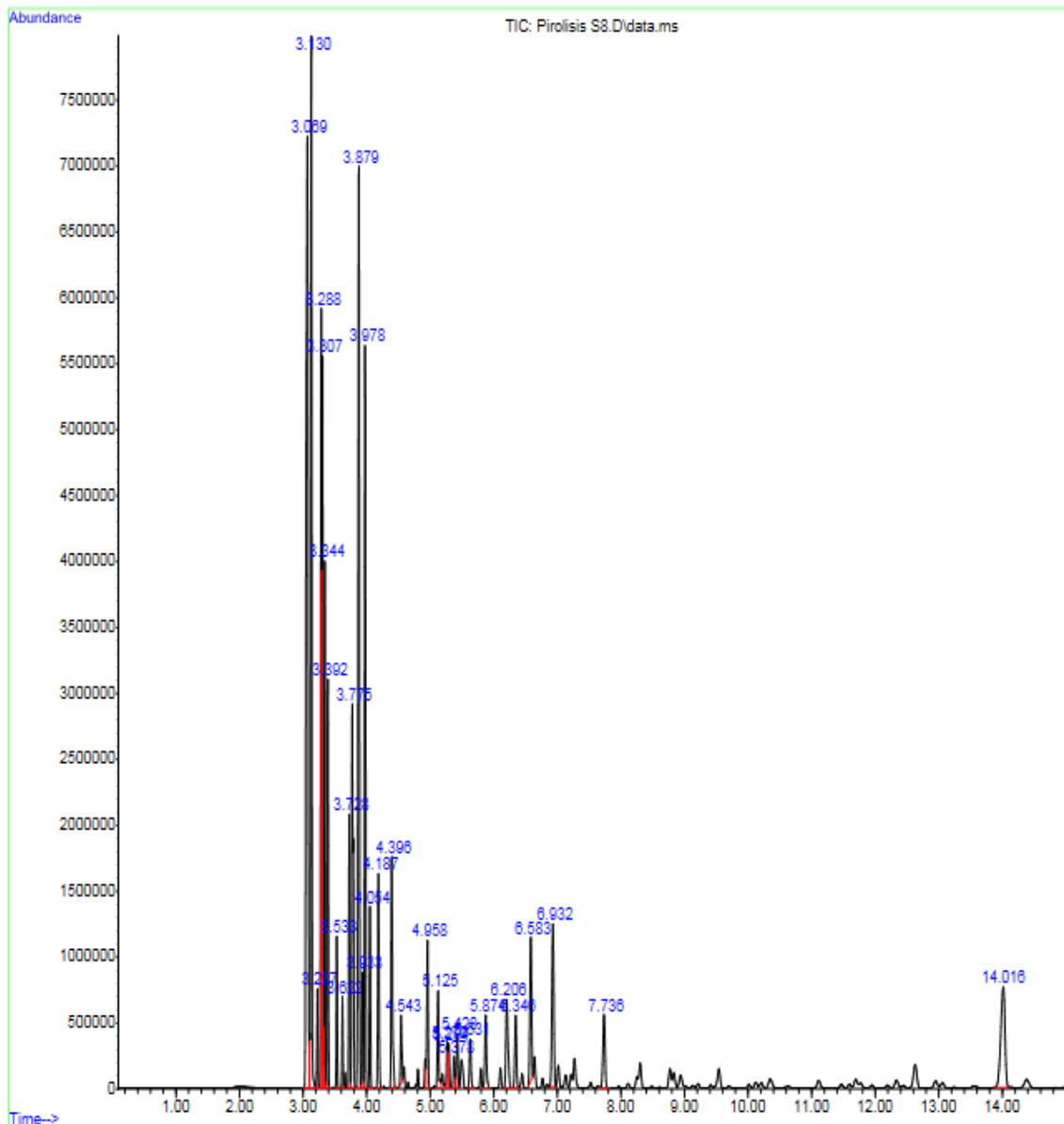
Fuente: elaboración propia

Referencia	Muestra	Masa (g)	$\rho$ (g/mL)	$\rho_{\text{promedio}}$ (g/mL)	
R. Negra	550	1	77,26	0,309	0,33093333
		2	80,56	0,322	
		3	90,38	0,361	
	650	1	83,49	0,333	0,33282667
		2	83,8	0,335	
		3	82,33	0,329	
	700	1	68,58	0,274	0,26438667
		2	64,15	0,256	
		3	65,56	0,262	
R. Café	550	1	83,09	0,332	0,33050667
		2	82,54	0,330	
		3	82,25	0,329	
	650	1	82,65	0,330	0,34592
		2	88,24	0,352	
		3	88,55	0,354	
	700	1	64,41	0,257	0,25833333
		2	65,45	0,261	
		3	63,89	0,255	
R. Mezcla	550	1	88,95	0,355	0,35662667
		2	90	0,360	
		3	88,52	0,354	
	650	1	78,61	0,314	0,31654667
		2	78,67	0,314	
		3	80,13	0,320	
	700	1	69,66	0,278	0,27174667
		2	68,55	0,274	
		3	65,6	0,262	
<b>Volumen probeta (mL)</b>	250		<b><math>\rho_{\text{promedio total}}</math> (g/mL)</b>	0,311980741	

Fuente: Elaboración propia

# CARACTERIZACIÓN DEL GAS

## Resultados análisis cromatografico Cromatofogramas

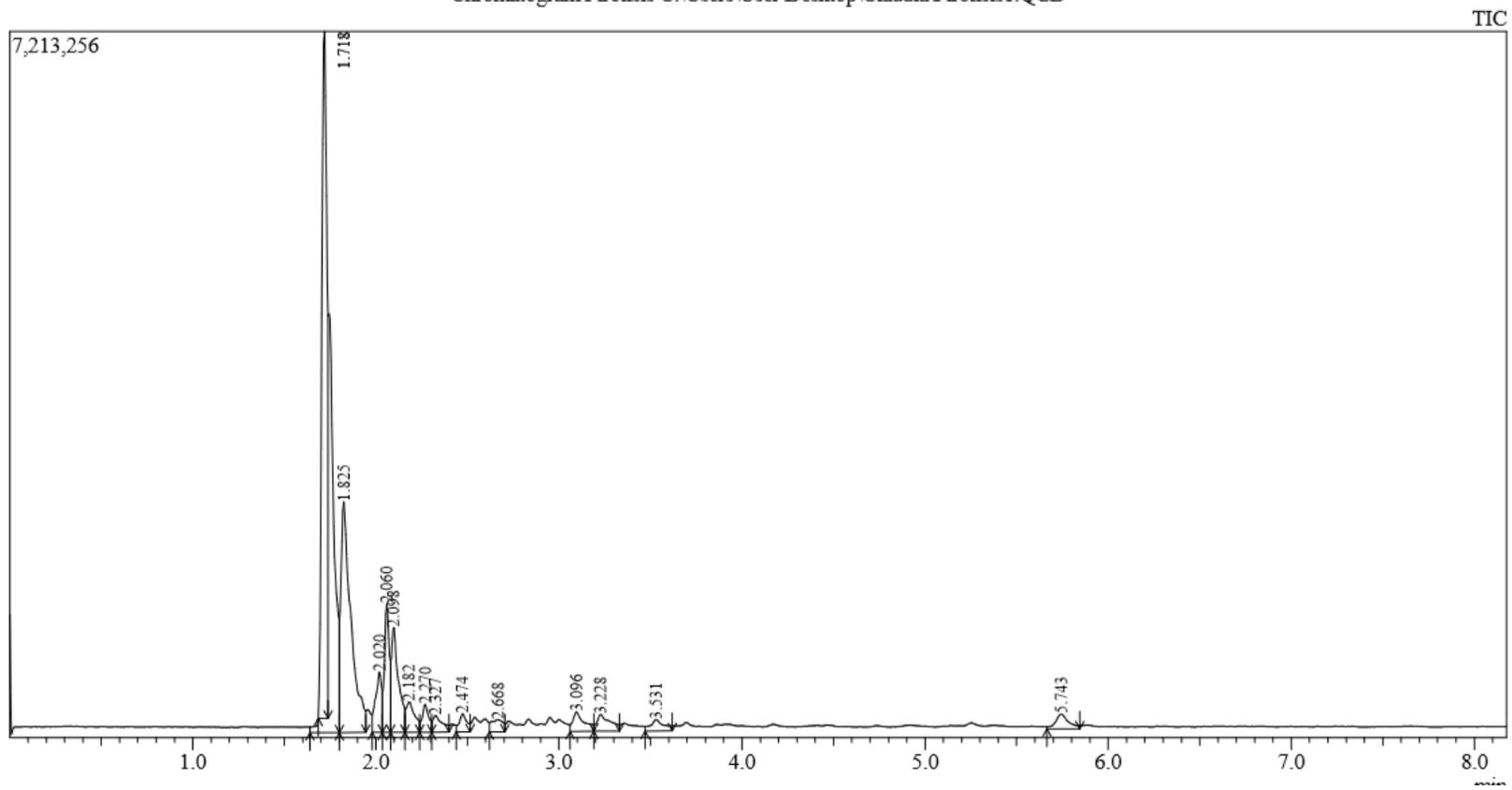


PEAK REEPORT TIC										
Peak #	R.Time	I.Time	F.Time	Area	Area %	Height	Height %	A/H	Mark	Name
1	1.718	1.685	1.740	14312804	23.82	7015986	33.03	2.04	MI	Methane
2	1.718	1.640	1.800	23558495	39.20	7161335	33.72	3.29	V	Carbon Monoxide
3	1.825	1.800	1.945	8977714	14.94	2357603	11.10	3.81	V	Carbon Dioxide
4	2.020	1.980	2.035	1419474	2.36	618206	2.91	2.30	V	2-Butene, 2-methyl
5	2.060	2.035	2.080	2432999	4.05	1311226	6.17	1.86	V	Isoprene
6	2.098	2.080	2.160	2872349	4.78	1070577	5.04	2.68	V	2-Methyl-1-1butene
7	2.182	2.160	2.240	1008278	1.68	307594	1.45	3.28	V	3-Penten-1-yne, E
8	2.270	2.240	2.305	703056	1.17	284318	1.34	2.47	V	Cyclopentene
9	2.327	2.305	2.400	623930	1.04	167787	0.79	3.72	V	Cyclopentene
10	2.474	2.440	2.515	531122	0.88	185310	0.87	2.87	V	1-Hexene
11	2.668	2.620	2.705	546314	0.91	123768	0.58	4.41	V	Cyclopentene, 1- methyl
12	3.096	3.060	3.190	856698	1.43	199100	0.94	4.30	V	Cyclopentene, 1- methyl
13	3.228	3.190	3.330	880729	1.47	170436	0.80	5.17	V	Benzene
14	3.531	3.470	3.620	606957	1.01	114457	0.54	5.30	V	Cyclohexene

15 5.743 5.665 5.845 766774 1.28 151709 0.71 5.0 V Toluene  
5

6009769 100.00 2123941 100.00  
3 2

Chromatogram Pirolisis C:\Users\User\Desktop\Claudia\Pirolisis1.QGD



### CARACTERISTICAS DEL GAS DE PIRÓLISIS DE REBABA DE CAUCHO

Pico	Nombre	% Dentro de la muestra	Fracción (xi)	P. molecular (g/mol)	Densidad por compuesto (g/L)	Densidad parcial (g/L)	Poder calorífico por compuesto (PC) (kJ/g)	PC*xi ( KJ/g)
1	Metano	23,82	0,238	16,044	0,4832	0,1151	50,034	11,918
2	Monóxido de carbono	39,2	0,392	28,011	0,8436	0,3307	10,104	3,9607
3	Dióxido de carbono	14,94	0,149	44,010	1,3254	0,1980	0	0
4	2-buteno, metilo	2,36	0,023	70,132	2,1122	0,0498	44,336	1,0463
5	Isopreno	4,05	0,040	68,120	2,0516	0,0830	43,816	1,7745
6	2-Metil-1-1buteno	4,78	0,047	70,135	2,1123	0,1009		0
7	3-Penten-1-yne, E	1,68	0,016	66,103	1,9908	0,0334	44,262	0,7436
8	Ciclopenteno	1,17	0,011	68,119	2,0515	0,0240	43,178	0,5051
9	Ciclopentano	1,04	0,010	70,135	2,1123	0,0219	43,807	0,4555
10	1-hexeno	0,88	0,008	84,146	2,5342	0,0223	44,456	0,3912
11	Ciclopenteno, 1-metil	0,91	0,009	82,146	2,4740	0,0225	43,064	0,3918
12	Ciclopenteno, 1-metil	1,43	0,014	82,146	2,4740	0,0353	43,064	0,6158
13	Benceno	1,47	0,014	78,110	2,3524	0,0345	40,182	0,5906
14	Ciclohexeno	1,01	0,010	82,143	2,4739	0,0249	43,023	0,4345
15	Tolueno	1,28	0,012	92,140	2,7750	0,0355	40,575	0,5193
		<b>100,0</b>	<b>1,0</b>	<b>Densidad del gas (g/L)</b>	<b>aproximada</b>	<b>1,1324</b>	<b>PC de la mezcla (kJ/g)</b>	<b>23,347</b>
							<b>KJ/kg</b>	<b>23347,599</b>
							<b>MJ/kg</b>	<b>23,3475</b>

Fuente: elaboración propia

## Cromatógrafos utilizados



- Cromatógrafo de gases acoplado a detector de masas Agilent 6850 Series II Network GC System.
- Detector de Masas (cuadrupolo sencillo) Agilent 5975B MSD.
- Columna disponible DB5-ms (60mx0.25mmx0.25 $\mu$ m).
- Modo de Inyección: Manual.
- Split 20:1.
- Volumen de Inyección: 500  $\mu$ L.
- Temperatura del Puerto de Inyección: 300 °C.
- Detector en modo SCAN.
- Rampa de temperatura 50°C.
- Hold time 3 minutos, 10 °C / min hasta 280°C Hold time 1 min.
- Tiempo total de corrida 27 min.



- Cromatógrafo SHIMADZU
- Puesto de inyección: 250
- Interfaz:290
- Fuente de iones: 310°
- Flujo de columna 1mL/min
- Rango de escaneo de masa entre 14 y 300 m/z
- Split de 1:100
- Modo de Inyección: Manual.
- Columna DB5 de 30mx0,25mmx0,25  $\mu$ m
- Volumen de inyección: 100  $\mu$ L
- Hold time 8 minutos, 40°C/min
- Detector en modo SCAN.

Fuente: elaboración propia

## ANEXO E. ESPECIFICACIONES TÉCNICAS DEL PROCESO

### Análisis del gas resultante de la gasificación

Compuesto	Composición (%vol)	Densidades individuales	Fracción másica	Composición (%) peso)	PC (kJ/kg)	PC mezcla kJ/kg
CO	28,2	1,842	0,519	0,687	10104	6951,38
CH <sub>4</sub>	7,5	1,14	0,085	0,113	50034	5665,92
CO <sub>2</sub>	16,3	0,656	0,106	0,141	0	0
H <sub>2</sub>	48	0,0899	0,043	0,057	119742,5	6843,66
TOTAL	100	0,755024	1	N.A	N.A	<b>19460,9</b>
						<b>19,4609</b>
						<b>MJ/mes</b>

Fuente: Elaboración propia en base en BARCO, Jimmy. Gasificación de cuesco de palma para la obtención de gas combustible en un reactor de lecho fijo. Universidad Nacional de Colombia. Facultad de Ingeniería. Departamento de Ingeniería Mecánica y Mecatrónica. Bogotá, Colombia.2015.,p-93

## ANEXO F. COSTOS Y ESPECIFICACIONES TÉCNICAS DE LOS EQUIPOS DE LA PROPUESTA DE VALORIZACIÓN DE LA REBABA DE CAUCHO

### COSTOS POR DISPOSICIÓN DE MATERIA PRIMA



Periodo del reporte

Año Tarifa	Mes Tarifa	Ase
2018	12	2

#### 1. COSTOS DE REFERENCIA

Tipo de costo	Abreviatura	Valor
Costo de barrido y limpieza de vías y áreas públicas (\$/suscriptor)	CBL	\$ 31.834,63
Costo de limpieza urbana por suscriptor	CLUS	\$ 1.156,89
Costo máximo de recolección de transporte por tonelada recogida y transportada (\$/ton)	CRT	\$ 66.278,40
Costo de disposición final (\$/ton)	CDT	\$ 36.487,01
Costo de comercialización por factura cobrada al suscriptor (\$/usuarios)	CCS	\$ 1.894,02
Costo de tratamiento de lixiviados	CTL	\$ 13.671,77
Costo de Aprovechamiento	VBA	\$ 100.624,96

#### 2. TARIFAS APLICADAS EN EL ASE 2 BOGOTÁ PARA PREDIOS OCUPADOS

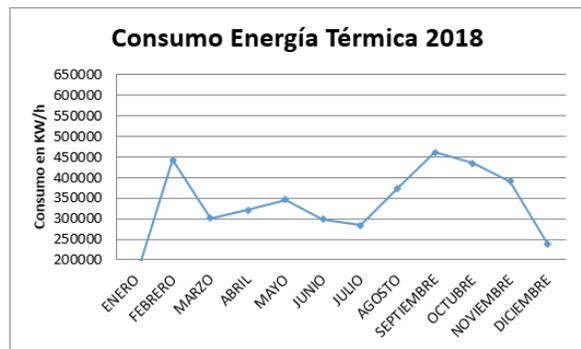
TIPO DE PRODUCTOR	TRNA (Toneladas por suscriptor)	Tarifa barrido y limpieza	Tarifa de limpieza urbana	Tarifa de comercialización	Tarifa de recolección y transporte	Tarifa de disposición final	Tarifa de tratamiento de lixiviados	Tarifa de aprov.	Tarifa antes de sub/con	Factor	Tarifa Final
Residencial estrato 1	0.04770781	3.394,60	1.156,89	1.894,02	3.512,64	1.933,75	724,58	2.595,65	15.212,13	-70%	4.563,64
Residencial estrato 2	0.05193508	3.394,60	1.156,89	1.894,02	3.792,82	2.087,99	782,38	2.595,65	15.704,35	-40%	9.422,61
Residencial estrato 3	0.05435067	3.394,60	1.156,89	1.894,02	3.952,92	2.176,13	815,40	2.595,65	15.985,61	-15%	13.587,77
Residencial estrato 4	0.06038963	3.394,60	1.156,89	1.894,02	4.353,17	2.396,47	897,96	2.595,65	16.688,76	0%	16.688,76
Residencial estrato 5	0.07367535	3.394,60	1.156,89	1.894,02	5.233,73	2.881,23	1.079,60	2.595,65	18.235,72	50%	27.353,58
Residencial estrato 6	0.09058444	3.394,60	1.156,89	1.894,02	6.354,44	3.498,19	1.310,78	2.595,65	20.204,57	60%	32.327,31
Pequeño productor comercial	0.14735070	3.394,60	1.156,89	1.894,02	10.116,81	5.569,42	2.086,88	2.595,65	26.814,27	50%	40.221,41
Pequeño productor industrial	0.14735070	3.394,60	1.156,89	1.894,02	10.116,81	5.569,42	2.086,88	2.595,65	26.814,27	50%	40.221,41
Pequeño productor oficial	0.14735070	3.394,60	1.156,89	1.894,02	10.116,81	5.569,42	2.086,88	2.595,65	26.814,27	0%	26.814,27
Gran productor comercial con aforo O/E	0.25000000	3.394,60	1.156,89	1.894,02	16.920,25	9.314,79	3.490,27	2.595,65	38.766,47	90%	73.656,29
Gran productor industrial con aforo O/E	0.25000000	3.394,60	1.156,89	1.894,02	16.920,25	9.314,79	3.490,27	2.595,65	38.766,47	90%	73.656,29
Gran productor oficial con aforo O/E	0.25000000	3.394,60	1.156,89	1.894,02	16.920,25	9.314,79	3.490,27	2.595,65	38.766,47	0%	38.766,47

Fuente: LIME. Tarifas Diciembre 2018.

Disponible en: <http://lime.net.co/page/comercial/detalle?id=2> [en Línea] [13 de Agosto 2019]

## COSTOS POR CONSUMO DE ENERGÍA TÉRMICA

AÑO 2018	Mes	Consumo KWH	Valor/KWH	TOTAL FACTURA
	ENERO	155486	117,3	37.264.540
	FEBRERO	442638	162,6	90.145.840
	MARZO	300679	172,2	66.124.810
	ABRIL	320652	172,2	70.216.990
	MAYO	346136	167,7	73.606.490
	JUNIO	299047	162,1	59.498.330
	JULIO	284211	164,9	57.597.980
	AGOSTO	373451	158,5	72.241.020
	SEPTIEMBRE	461346	172,0	96.239.400
	OCTUBRE	435134	173,1	91.464.580
	NOVIEMBRE	391109	177,0	94.619.120
	DICIEMBRE	237871	164	84.781.080
	<b>TOTAL</b>	<b>4047760</b>	<b>1963</b>	<b>893.800.180</b>
<b>PROMEDIO</b>	<b>337313</b>	<b>163,60</b>	<b>74.483.348</b>	



Fuente: Croydon Colombia S.A

## COTIZACIÓN EQUIPOS

### Molino de Cuchillas

COTIZACIÓN

### MCV 30/20

**CÓDIGO**  
COT-DL-0010100-M90C6V

**ATENCIÓN**

Tatiana Bolivar  
tatiana\_961006@hotmail.com

57 3203714118

**FECHA**  
14 de Agosto de 2019

**EMPRESA**  
PARTICULAR

En respuesta a su atenta solicitud, nos permitimos cotizar a usted lo siguiente:

NO.	CANT.	UNIDAD	DESCRIPCIÓN	P.U.	IMPORTE
1	1	PZA	Equipo Molino de Cuchillas Modelo 3020 en Acero – A36	4,380	4,380

Precio en Dólares Americanos

## ESPECIFICACIONES TÉCNICAS DE LOS EQUIPOS DE LA PROPUESTA DE VALORIZACIÓN DE LA REBABA DE CAUCHO

MOLINO DE CUCHILLAS																										
Nombre		Descripción																								
Técnico	Trituradora	Son ideales para la trituración de materiales blandos a medio duros, frágiles, fibrosos, resistentes o sensibles a la temperatura; El producto es triturado por fuerzas de corte y de cizallamiento, de acuerdo al tamaño de la cuchilla y cribas determina la finura final, diseñado primero para cortar y luego triturar el producto. Los elemento de rectificado principal es a través de un rotor de usos múltiples montado verticalmente, cada una de las cuales está compuesta por cuchillas sujetas con soporte.																								
Comercial	Molino de cuchillas																									
		<table border="1"> <thead> <tr> <th colspan="2">Características técnicas</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Manejo / uso</td> <td>Reducción de Tamaño, Sizallamiento y Destrucción.</td> </tr> <tr> <td>Areas de aplicación</td> <td>Agricultura, Alimentos, Medicina / Farmacia, Cosmetica, Plasticos, Caucho.</td> </tr> <tr> <td>Tipo de material</td> <td>Blando, Semiduro, Elástico.</td> </tr> <tr> <td>Principio de molienda</td> <td>Corte.</td> </tr> <tr> <td>Granulometría inicial*</td> <td>De acuerdo al producto.</td> </tr> <tr> <td>Granulometría final*</td> <td>Normal (Malla 5).</td> </tr> <tr> <td>Velocidad</td> <td>1750 – 350 RPM.</td> </tr> <tr> <td>Material de las Cuchillas</td> <td>Acero inoxidable.</td> </tr> <tr> <td>Potencia motriz</td> <td>110, 220, 440 V.</td> </tr> <tr> <td>Conexión eléctrica</td> <td>Voltajes diferentes.</td> </tr> <tr> <td>Tipo de protección</td> <td>Cámara de molienda - motor con freno magnético.</td> </tr> </tbody> </table>	Características técnicas		Manejo / uso	Reducción de Tamaño, Sizallamiento y Destrucción.	Areas de aplicación	Agricultura, Alimentos, Medicina / Farmacia, Cosmetica, Plasticos, Caucho.	Tipo de material	Blando, Semiduro, Elástico.	Principio de molienda	Corte.	Granulometría inicial*	De acuerdo al producto.	Granulometría final*	Normal (Malla 5).	Velocidad	1750 – 350 RPM.	Material de las Cuchillas	Acero inoxidable.	Potencia motriz	110, 220, 440 V.	Conexión eléctrica	Voltajes diferentes.	Tipo de protección	Cámara de molienda - motor con freno magnético.
Características técnicas																										
Manejo / uso	Reducción de Tamaño, Sizallamiento y Destrucción.																									
Areas de aplicación	Agricultura, Alimentos, Medicina / Farmacia, Cosmetica, Plasticos, Caucho.																									
Tipo de material	Blando, Semiduro, Elástico.																									
Principio de molienda	Corte.																									
Granulometría inicial*	De acuerdo al producto.																									
Granulometría final*	Normal (Malla 5).																									
Velocidad	1750 – 350 RPM.																									
Material de las Cuchillas	Acero inoxidable.																									
Potencia motriz	110, 220, 440 V.																									
Conexión eléctrica	Voltajes diferentes.																									
Tipo de protección	Cámara de molienda - motor con freno magnético.																									
<b>MOLINO DE CUCHILLAS SERIE MCV</b>																										
Modelo:	MC - 30/20																									
Capacidad:	50 - 100 Kg/Hr																									
Potencia:	1,5 Kw																									
Motor:	Trifásico 3 HP																									
Velocidad:	1700 RPM																									
Sistema de Molienda:	Cuchillas Traslapadas																									
Descripción:	Equipo para líneas continuas en el reproceso de material reciclable																									

REACTOR DE LECHO FIJO	
Nombre	
Técnico	Reactor
Comercial	Reactor de lecho fijo
	
<b>REACTOR DE LECHO FIJO</b>	
Modelo	Sanwei
Peso	400 - 7500 kg
Potencia	0,75 - 45 kw
Presión de trabajo	0,1 - 25 Mpa
Temperatura de diseño	900°C
Descripción:	Reactor de cama fija industrial.
Descripción	
<p>Estos son recipientes verticales en donde se calienta únicamente el fondo del reactor lo que genera un perfil térmico a lo largo de las paredes del reactor, su calentamiento es en la mayoría de los casos indirecto para evitar fluidización en el lecho fijo, aunque en algunos casos emplea una corriente de gas inerte de arrastre que extraiga la fracción volátil generada para evitar fenómenos de reflujo de condensados y reacciones de craqueo secundarias indeseadas .</p>	
Características técnicas	
Áreas de aplicación	Agricultura, Alimentos, Medicina / Farmacia, Cosmética, Plásticos, Caucho
Material	Hastelloy, acero inoxidable, titanio, níquel
Método de calentamiento	Calefacción eléctrica, calefacción electromagnética, calefacción infrarroja lejana, calentamiento de aceite térmico
Método de enfriamiento	Medio tubo externo
Potencia de calefacción	Potencia de calefacción 9 -18 kw
Armario de control	Control PID, control de temperatura automático, precisión de temperatura $\pm 1^{\circ}\text{C}$ , Control de velocidad del convertidor de frecuencia, potencia de calentamiento ajustable, temperatura constante, temperatura y velocidad de rotación del eje pantalla digital
Capacidad	100 - 1000 L