

**DESTILACIÓN SECUNDARIA DE ALQUITRANES GENERADOS
EN LA GASIFICACIÓN DE CUESCO DE PALMA AFRICANA**

Tesis Profesional Presentada Por:

EDER JOSÉ EMERY GENES

**Como requisito parcial para obtener el título en Maestría en Ingeniería –
Ingeniería Química**

Director:

JAVIER FERNANDO DE LA CRUZ MORALES



**UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA
SEDE MEDELLÍN
FACULTAD DE MINAS
DEPARTAMENTO DE PROCESOS Y ENERGÍA
2014**

RESUMEN

Los combustibles provenientes de la biomasa están obteniendo bastante aceptación a expensas del creciente costo de los combustibles fósiles y el aporte de estos a la contaminación ambiental. Es así como en este trabajo de investigación se presentan y analizan los resultados de un proceso dual de gasificación de cuesco de palma africana y de cracking catalítico de los alquitranes generados, a través de un montaje experimental realizado en dos reactores de lecho fijo empacado; el catalizador usado en el proceso de cracking es dolomita. Se investigó el efecto de tres temperaturas en el lecho de gasificación y una temperatura en el lecho catalítico. Las temperaturas de gasificación fueron 750°C, 850°C y 950°C; y la del proceso de cracking catalítico fue de 500°C. El agente gasificante es una mezcla de agua y nitrógeno; 23 cm³/h y 50 cm³/min, respectivamente. Al analizar la influencia de los parámetros del proceso sobre la distribución de los productos generados, se determina que se favorece la producción de gas de síntesis y disminuye la producción de alquitranes y biochar. Además, la contribución del lecho catalítico se nota en el mejoramiento de la relación H₂/CO presente en el gas de síntesis proveniente de la etapa de gasificación, así como la disminución del contenido de alquitranes también presentes en esta corriente.

AGRADECIMIENTOS

Al profesor Javier De La Cruz Morales por su soporte y apoyo moral.

A la profesora Astrid Blandón por permitir el uso de instalaciones y equipos que facilitaron las pruebas experimentales.

A la Ingeniera Martha Salazar del Laboratorio de Carbones de la Universidad Nacional de Colombia, por su apoyo en los análisis de muestras usadas en la investigación.

Al grupo de investigación TAYEA, en especial a los ingenieros Carlos Valdés y Jorge Montoya al poner a mi servicio su gran colaboración.

Al compañero Adrián Gómez del Laboratorio de Caracterización de Materiales.

DEDICACIÓN

A mi hija y esposa
Andrea Emery y Edith Sánchez.

A mis padres
Alba Rosa Genes y José Miguel Emery

CONTENIDO

1. INTRODUCCIÓN.....	1
2. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	5
3. OBJETIVOS.....	7
3.1. Objetivo General.....	7
3.2. Objetivos Específicos	7
4. ESTADO DEL ARTE.....	8
4.1. Gasificación de biomasa.....	8
4.2. Cracking catalítico de alquitranes	11
5. MARCO TEÓRICO	13
5.1. Gasificación de biomasa.....	13
5.1.1. <i>Gasificación en lecho fijo</i>	14
5.1.2. <i>Gasificación de lecho fluidizado</i>	18
5.1.3. <i>Gasificación de flujo de arrastre</i>	21
5.2. Cracking de alquitranes	24
5.2.1. <i>Cracking térmico</i>	24
5.2.2. <i>Cracking catalítico</i>	25
6. EXPERIMENTACIÓN	26
6.1. Preparación de la biomasa	26
6.2. Caracterización de la biomasa.....	26
6.2.1. <i>Análisis granulométrico</i>	26
6.2.2. <i>Densidad aparente</i>	26
6.2.3. <i>Análisis Próximo Completo</i>	27
6.2.4. <i>Análisis elemental</i>	28
6.2.5. <i>Microscopía de luz reflejada y luz fluorescente</i>	28
6.3. Preparación del catalizador	29
6.4. Caracterización del catalizador.....	29
6.4.1. <i>Densidad aparente</i>	29
6.4.2. <i>Análisis DRX</i>	29

6.4.3.	<i>Microscopía de luz reflejada y luz fluorescente</i>	30
6.5.	Gasificación de cuesco de palma africana y cracking catalítico de alquitranes.....	30
6.5.1.	<i>Plan experimental</i>	30
6.5.2.	<i>Montaje experimental</i>	30
6.5.3.	<i>Procedimiento experimental:</i>	33
6.5.4.	<i>Análisis del producto gaseoso</i>	34
6.5.5.	<i>Análisis del producto líquido</i>	34
6.5.6.	<i>Análisis del producto sólido</i>	35
7.	RESULTADOS Y ANÁLISIS DE RESULTADOS.....	36
7.1.	Caracterización de la biomasa.....	36
7.1.1.	<i>Análisis granulométrico</i>	36
7.1.2.	<i>Análisis próximo completo</i>	37
7.1.3.	<i>Análisis elemental</i>	38
7.1.4.	<i>Microscopía de luz reflejada y luz fluorescente</i>	38
7.2.	Caracterización del catalizador.....	42
7.2.1.	<i>Diámetro de partícula</i>	42
7.2.2.	<i>Densidad aparente</i>	42
7.2.3.	<i>Análisis DRX</i>	43
7.2.4.	<i>Microscopía de luz blanca reflejada</i>	43
7.3.	Gasificación de cuesco de palma africana y cracking catalítico de alquitranes.....	45
7.3.1.	<i>Efecto de la temperatura sobre la gasificación de cuesco de palma africana</i>	45
7.3.2.	<i>Efecto de la temperatura sobre la gasificación catalítica de cuesco de palma africana</i>	48
8.	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	54
9.	BIBLIOGRAFÍA.....	56
	ANEXO A. CARACTERIZACIÓN DE CUESCO DE PALMA AFRICANA Y DOLOMITA.....	60

ANEXO B. BALANCES DE MATERIA	63
ANEXO C. CROMATOGRAMAS DE GASES DE SÍNTESIS.....	67
ANEXO D. AJUSTE DE BOMBA PERISTÁLTICA.....	74

INDICE DE TABLAS

Tabla 1. Principales datos de gasificación en corriente ascendente	15
Tabla 2. Principales datos de gasificación en corriente descendente	17
Tabla 3. Principales datos de gasificación en corriente transversal	18
Tabla 4. Principales datos de gasificación en lecho fluidizado burbujeante ..	19
Tabla 5. Principales datos de gasificación en lecho fluidizado circulante	21
Tabla 6. Principales datos de gasificación en flujo de arrastre descendente	22
Tabla 7. Principales datos de gasificación en flujo de arrastre ascendente ..	24
Tabla 8. Análisis granulométrico de cuesco de palma africana	36
Tabla 9. Análisis próximo completo de la muestra de cuesco de palma africana.	37
Tabla 10. Análisis elemental de cuesco de palma africana.....	38
Tabla 11. Composición del gas producido en la gasificación de cuesco de palma africana.	46
Tabla 12. Composición del gas producido en la gasificación catalítica de cuesco de palma africana.	49
Tabla A.5. 1. Condiciones de medición DRX	62
Tabla B.2. Balance de materia del proceso de gasificación a 750°C y cracking catalítico a 500°C.....	64
Tabla B.3. Balance de materia del proceso de gasificación a 850°C y cracking catalítico a 500°C.....	65
Tabla B.4. Balance de materia del proceso de gasificación a 950°C y cracking catalítico a 500°C.....	66
Tabla C.3. 1. Tiempo de retención de especies gaseosas en cromatógrafo Varian 3800.....	73
Tabla C.3. 2. Tiempo de retención de especies gaseosas en cromatógrafo Agilent 3800	73

INDICE DE FIGURAS

Figura 1. Gasificador de corriente ascendente	15
Figura 2. Gasificador de corriente descendente	16
Figura 3. Gasificador de corriente transversal	17
Figura 4. Gasificador de lecho fluidizado burbujeante	19
Figura 5. Gasificador de lecho fluidizado circulante	20
Figura 6. Gasificador de flujo de arrastre – flujo descendente	22
Figura 7. Gasificador de flujo de arrastre – flujo ascendente	23
Figura 8. Montaje de reactores para gasificación y cracking catalítico	32
Figura 9. Tren de muestreo para condensación de humedad y alquitranes. 32	
Figura 10. Temperaturas de gasificación.....	34
Figura 11. Microfotografía de partícula de cuesco de palma africana. Objetivo de 20X. Tiempos de exposición, luz blanca: 1/40 s y luz fluorescente 1 s....	39
Figura 12. Microfotografía de partícula de cuesco de palma africana. Objetivo de 50X. Tiempos de exposición, luz blanca: 1/40 s y luz fluorescente 1 s....	39
Figura 14. Microfotografía de partícula de biochar de cuesco de palma africana formado en gasificación a 750°C. Objetivo de 20X. Tiempos de exposición, luz blanca: 1/40 s y luz fluorescente 1 s.....	41
Figura 15. Microfotografía de partícula de biochar de cuesco de palma africana formado en gasificación a 850°C. Objetivo de 20X. Tiempos de exposición, luz blanca: 1/40 s y luz fluorescente 1 s.....	41
Figura 16. Microfotografía de partícula de biochar de cuesco de palma africana formado en gasificación a 950°C. Objetivo de 20X. Tiempos de exposición, luz blanca: 1/40 s y luz fluorescente 1 s.....	42
Figura 17. Análisis DRX de muestra de dolomita calcinada.....	43
Figura 18. Microfotografía de partícula de dolomita calcinada. Objetivo de 20X. Tiempo de exposición, luz blanca: 1/40 s.	44

Figura 19. Microfotografía de partícula de dolomita calcinada contaminada con alquitranes generados en gasificación de cuesco a 950°C. Objetivo de 20X. Tiempo de exposición, luz blanca: 1/40 s.	44
Figura 20. Composición del gas producido en la gasificación de cuesco de palma africana.	46
Figura 21. Relación H ₂ /CO del gas producido en la gasificación de cuesco de palma africana.	47
Figura 22. Efecto de la temperatura sobre los productos de gasificación.	48
Figura 23. Composición del gas producido en el craqueo de gas producido en la gasificación de cuesco de palma africana.	49
Figura 24. Concentración de H ₂ en los procesos de gasificación y gasificación catalítica.	50
Figura 25. Concentración de CO ₂ en los procesos de gasificación y gasificación catalítica.	51
Figura 26. Concentración de CO en los procesos de gasificación y gasificación catalítica.	51
Figura 27. Concentración de CH ₄ en los procesos de gasificación y gasificación catalítica.	52
Figura 28. Relación H ₂ /CO del gas producido en el craqueo de gas producido en la gasificación de cuesco de palma africana.	52
Figura 29. Efecto de la temperatura sobre la conversión de alquitranes.	53
Figura C.1. 1. Cromatograma de gas de síntesis del proceso de gasificación a 750°C.	67
Figura C.1. 2. Cromatograma de gas de síntesis del proceso de gasificación a 850°C.	68
Figura C.1. 3. Cromatograma de gas de síntesis del proceso de gasificación a 950°C.	69
Figura C.2. 1. Cromatograma de gas de síntesis del proceso de gasificación a 750°C y cracking catalítico a 500°C.	70

Figura C.2. 2. Cromatograma de gas de síntesis del proceso de gasificación a 850°C y cracking catalítico a 500°C.....	71
Figura C.2. 3. Cromatograma de gas de síntesis del proceso de gasificación a 950°C y cracking catalítico a 500°C.....	72

1. INTRODUCCIÓN

1.1. Antecedentes

Los yacimientos de combustibles fósiles tienen un límite y su uso como fuente de energía ha contribuido a la creciente contaminación de la atmósfera y al calentamiento global debido a la alta emisión de gases de efecto invernadero. El uso de tecnologías limpias y renovables como la energía geotérmica, solar, eólica, hidráulica y la obtenida a partir de biomasa son opciones a mediano y largo plazo para implementar el reemplazo de los combustibles fósiles. Por otro lado, la utilización de la energía atómica se ve empañada por el alto costo, la disposición de residuos y los problemas de seguridad en su funcionamiento; esto contribuye aún más al uso de tecnologías renovables.

La investigación y desarrollo, la producción y el uso de biocombustibles han mantenido una constante expansión desde hace 30 años, experimentando un crecimiento acelerado en cuanto a la escala de la industria y al número de países involucrados. En un principio la aplicación de nuevas políticas y leyes que buscaban incentivar el uso de biocarburantes, generó un importante desarrollo de los biocombustibles en países como Brasil, EEUU y la Unión Europea. Sin embargo, factores que van desde el creciente precio del crudo hasta el desarrollo de tecnologías de conversión más eficientes, sumado a vigorosas políticas gubernamentales de apoyo a la agroenergía, han traído como resultado que en otros países desarrollados como Canadá, Japón y Australia así como economías emergentes como India y China se esté desarrollando su implementación. Todo esto ha llevado a la configuración de un nuevo mercado mundial de biocarburantes con fines a la sustitución parcial o total de los combustibles derivados del petróleo.

La biomasa usada como fuente energética proviene de cosechas, residuos agrícolas, de la industria de procesamiento de alimentos y residuos sólidos industriales y municipales. Una estimación de 2007 indica que la biomasa contribuye con un 10% del suministro primario de energía en el mundo [1].

La producción industrial de biocombustibles de primera generación se ha concentrado en el etanol y el biodiesel como sustitutos de la gasolina y el diesel respectivamente. Las materias primas para la producción del etanol son la caña de azúcar, los cereales y la remolacha azucarera, mientras que el biodiesel se produce a partir de aceites vegetales como la canola, la soya y la palma africana, entre otros.

El auge del cultivo de palma africana se ha extendido en gran medida en Asia, África y Latinoamérica en los últimos años, convirtiéndose en un incentivo económico de éstas regiones. El procesamiento del fruto de la palma africana genera aceite comestible, biodiesel y algunas materias primas de la industria química.

El cuesco de la palma africana que es un residuo de la industria de aceite comestible y biodiesel, se puede someter a procesos termoquímicos, entre los cuales se encuentra el de gasificación. Este proceso genera algunos productos indeseables como los alquitranes. El cracking o destilación secundaria es un proceso termoquímico que promete un buen futuro para el tratamiento de estos productos indeseables, convirtiéndolos en combustibles de segunda generación. En este trabajo se pretende llevar a cabo el proceso de destilación secundaria de alquitranes generados en la gasificación de cuesco de palma africana, para ser aprovechados como una fuente de energía secundaria y una solución parcial al problema de la disposición final de estos residuos.

1.2. Producción de biocombustibles de segunda generación

Los biocombustibles de primera generación están basados en el uso de materias primas que también tienen uso alimenticio (caña de azúcar, maíz, soya, palma africana) y en tecnologías de fermentación y transesterificación, que producen bioetanol y biodiesel, respectivamente. Los biocombustibles de segunda generación a diferencia de los de primera generación se originan a partir de diferentes fuentes de biomasa lignocelulósica (residuos agrícolas y forestales primarios y secundarios, hierbas perennes, árboles de crecimiento rápido). La conversión de estos residuos lignocelulósicos a biocombustibles da lugar a la obtención de bioetanol celulósico, biocombustibles sintéticos y bio-oil [8]. En este trabajo de investigación se va a someter el cuesco de palma africana a un proceso de gasificación y posteriormente de cracking catalítico para producir biocombustibles de segunda generación.

1.3. Gasificación de biomasa

La gasificación es un proceso termoquímico en donde un sustrato carbonoso que bajo la presencia de aire, oxígeno y/o vapor y a una temperatura dada reacciona generando un gas combustible formado por diversos compuestos, entre los cuales podemos mencionar gases livianos como CO, CO₂ y H₂, además de hidrocarburos ligeros de cadena corta y alquitranes, estos últimos se convierten en productos indeseables que tienen un efecto negativo en este proceso por su facilidad de condensación produciendo taponamientos. Según el método elegido del proceso de gasificación se obtienen diferentes calidades del gas generado y tipos de alquitranes. Existen cuatro diferentes conceptos de diseños para gasificación, a saber, gasificación en lecho fijo, gasificación en lecho fluidizado, gasificación de flujo de arrastre y gasificación indirecta.

Así, el contenido de alquitranes en el proceso de gasificación en lecho fijo de flujo ascendente es alrededor de 35000 mg/Nm³ de gas de síntesis seco; la gasificación en lecho fijo de flujo descendente genera alrededor de 500 – 1000 mg/Nm³ de gas de síntesis seco y el proceso en lecho fijo de flujo cruzado también genera gran cantidad de alquitranes, aproximadamente 35000 mg/Nm³ de gas de síntesis seco.

Por otro lado la tecnología de gasificación en lecho fluidizado burbujeante aporta aproximadamente 13500 mg de alquitranes/Nm³ de gas de síntesis seco y la concentración de alquitranes en la gasificación en lecho fluidizado circulante es baja.

La gasificación en flujo de arrastre descendente y ascendente producen cantidades muy bajas, casi libre de alquitranes.

La tecnología de gasificación indirecta genera cantidades bajas a medias de alquitranes, alrededor de 1500 - 4500 mg/Nm³ de gas de síntesis seco.

1.4. Cracking catalítico

El cracking catalítico es un proceso de conversión que se implementó en la industria del petróleo, con el fin de aumentar la producción de gasolina y el octanaje de la gasolina. Este proceso se puede utilizar a una gran variedad de materias primas que van desde petróleo hasta gas de petróleo pesado.

Esta técnica de mejoramiento de productos de procesos termoquímicos se ha implementado con éxito en una amplia variedad de procesos con el fin de reducir las concentraciones de productos indeseables. Es así como se ha usado en la gasificación de combustibles fósiles y renovables, como sistema de limpieza y mejoramiento de productos. Los catalizadores usados en esta técnica se pueden usar tanto in situ, como en unidades vinculadas al proceso termoquímico de interés [3].

2. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

El suministro de energía se ha convertido en un problema mundial durante las últimas décadas, lo cual ha incrementado el interés en buscar combustibles alternativos que puedan suplir a combustibles fósiles tales como petróleo y gas natural. Se conoce que las reservas de petróleo y gas natural son finitas y por tal motivo es necesario identificar diferentes fuentes para la producción de combustibles hidrocarburos líquidos con el fin de compensar de cierta forma el agotamiento de los combustibles más comunes.

La biomasa a diferencia de las otras fuentes alternas puede ser convertida en combustible líquido para vehículos, también para la generación de calor, energía eléctrica y productos químicos. Se puede considerar que el uso de biomasa como combustible genera una emisión neta de CO₂ hacia la atmósfera, considerándose un ciclo cerrado de carbono, debido a que la absorción de CO₂ que se da durante el proceso de fotosíntesis es equivalente al emitido durante la combustión de ésta como combustible líquido. De igual forma también se disminuyen las emisiones de SO_x y NO_x debido a las bajas concentraciones de azufre y nitrógeno contenidos en la biomasa [4].

En Colombia es muy elevado el uso de biomasa sólida como combustible en procesos de generación de energía. Es así como en algunos países en vía de desarrollo, los recursos de biomasa se obtienen a partir de la deforestación de bosques nativos y reservas naturales. Una alternativa que mitiga en parte esta práctica está representada por el uso de biomasa residual procedente de la agricultura. En nuestro país los sectores que más contribuyen con la mayor cantidad de biomasa residual son los de cultivo de caña de azúcar y palma africana. En los últimos años en Latinoamérica se ha

logrado avanzar mucho en el uso del bagazo de caña con fines de generación de energía eléctrica y térmica; a diferencia del sector de la industria extractora de aceite de palma que se ha iniciado hace muy poco. En Colombia la mayor cantidad de residuos de la palma africana se utiliza en la generación de energía térmica, como fertilizante y relleno de vías.

En los procesos de corte, cosecha, beneficio y extracción del aceite para posteriormente producir el biodiesel, se generan una serie de residuos sólidos. La mayoría de éstos son materiales vegetales lignocelulósicos tales como raquis, cuesco, nueces entre otros, existe una gran cantidad de residuos vegetales que no tiene uso alguno lo que representa para la cadena un problema desde el punto de vista ambiental, ya que el mayor inconveniente de la agroindustria del aceite de palma se encuentra en la disposición final y uso adecuado del cuesco de palma, entre otros.

3. OBJETIVOS

La realización de este trabajo tiene los siguientes objetivos:

3.1. Objetivo General

Evaluar la factibilidad de usar la destilación secundaria de alquitranes generados en la gasificación del cuesco de palma africana a presión atmosférica, para producir un combustible eficiente.

3.2. Objetivos Específicos

- Caracterizar físico-químicamente el cuesco de palma africana y los gases producidos en la destilación secundaria a presión atmosférica.
- Analizar la influencia de las variables que intervienen en el proceso de destilación secundaria, en la composición del gas producido.
- Evaluar el rendimiento y calidad de los productos de la destilación secundaria de alquitranes presentes en los gases producidos en la gasificación de cuesco de palma africana.

4. ESTADO DEL ARTE

4.1. Gasificación de biomasa

- Lopamudra Devi, Krzysztof J. Ptasinski y Frans J.J.G. Janssen, realizan un análisis de los métodos de eliminación de alquitranes en un proceso de gasificación de biomasa, dividiéndolos en dos tipos: eliminación primaria (dentro del gasificador) y eliminación secundaria (limpieza de gases después del reactor). En la eliminación primaria, proponen la optimización del gasificador para producir un gas de síntesis con baja concentración de alquitranes. Sobre los métodos secundarios de eliminación de alquitranes listan algunos procesos, sin profundizar en ellos; entre los cuales se mencionan el tratamiento térmico y catalítico de la corriente de salida de gases [11].
- Jun Han y Heejoon Kim llevan a cabo una revisión bibliográfica sobre cinco tecnologías de eliminación de alquitranes, las cuales se listan enseguida; medios mecánicos, selección óptima de parámetros de operación, cracking catalítico, cracking térmico y métodos de plasma [12].

Los métodos mecánicos incluyen scrubbers, ciclones, filtros y precipitadores electrostáticos. Sobre los lavaderos de gases con agua se han reportado datos de reducción de alquitranes hasta de 20 – 40 mg/m³ y los niveles de partículas disminuyeron hasta 10 – 20 mg/m³. Los precipitadores electrostáticos pueden alcanzar más del 99% de eficiencia de separación de partículas y 40 – 70% de remoción de alquitranes, tanto en gasificadores ascendentes, descendentes y circulantes. Sin embargo, estos métodos son bastante costosos. Estos sistemas generan una gran

cantidad de agua contaminada, que conduce a un problema de disposición de residuos ambientales.

Entre los resultados obtenidos en la reducción de los niveles de alquitranes cambiando los parámetros de operación del reactor de gasificación, se reportan los siguientes. El aumento de temperatura desde 970°C hasta 1090°C disminuyó la producción de alquitranes en gasificación de biomasa desde 15 a 0.54 g/Nm³. También se menciona en otro estudio que la composición de alquitranes a la temperatura de 700 y 800°C es de 19 y 5 g/Nm³, respectivamente.

El cracking térmico como tecnología de reducción de alquitranes se comporta bien a una temperatura de 1250°C y un tiempo de residencia de 0.5 s, de acuerdo a Brandt [15]. De acuerdo a Beenackers and Manuatis, el contenido deseable de alquitranes en gases para aplicación en motores debe estar por debajo de 50 mg/Nm³.

Con respecto al cracking catalítico se divide en cuatro grupos: dolomita, níquel, metales alcalinos y metales no usuales.

La dolomita es un mineral de calcio y magnesio, que al ser calcinado se convierte en un catalizador de alta eficiencia para remoción de alquitranes producidos en un proceso de gasificación; presentándose dificultad para convertir los alquitranes de alto peso molecular. Tiene el inconveniente que se inactiva con la deposición de carbón.

Los catalizadores basados en níquel se utilizan ampliamente en la industria petroquímica para el craqueo de nafta y metano. Además, estos catalizadores tienen la habilidad de disminuir las emisiones de NOx en los

procesos de gasificación de biomasa. Al igual que la dolomita, presentan inactivación por depósitos de carbón.

Se ha demostrado satisfactoriamente que los carbonatos, óxidos e hidróxidos de metales alcalinos pueden reformar catalíticamente alquitranes durante gasificación. La sinterización es la forma de inactivación que sufre este tipo de catalizador.

- YuHong Qin, HaiFeng Huang, ZhiBin Wu, Jie Feng, Wenying Li y KeChang Xie investigaron la liberación de alquitranes producidos en la gasificación de aserrín en un lecho fluidizado presurizado, a diferentes condiciones de operación. El equipo utilizado por este grupo de investigadores consta de un tubo de acero inoxidable Incoloy – 800 de 34 mm de diámetro interno y 500 mm de longitud, el cual también sirve como material de calentamiento por la incorporación de dos electrodos de cobre. La pared interna del tubo de Incoloy – 800, se revistió con una capa de cuarzo de 26 mm de diámetro interno. En la parte superior del reactor se colocó una malla de alambre para evitar que las partículas salieran del reactor. Los análisis se llevaron a cabo mediante cromatografía de gel permeable (GPC) acoplado con un detector de matriz de fotodiodos (PDA), de los cuales se concluyó que la cantidad relativa de componentes livianos aumentó cuando la temperatura pasó de 700 a 900°C, y el carácter aromático se ve incrementado a diferentes presiones [13].
- Chunshan Li y Kenzi Suzuki tratan diferentes temas referentes a los alquitranes, desde la definición, composición y tipos de alquitranes, además hacen una revisión de los diferentes métodos de análisis y finalmente muestran la cinética y mecanismos de reacción. Definen a los alquitranes como hidrocarburos de alto peso molecular que tienden a condensarse o polimerizarse sobre las paredes de las tuberías, filtros o

intercambiadores de calor existentes en procesos de gasificación y que presentan una marcada dificultad para removerlos ya sea mediante procesos físicos, térmicos o catalíticos. Los alquitranes se forman durante la gasificación mediante la concurrencia de una serie de reacciones complejas bastante dependientes de las condiciones de proceso, convirtiendo alquitranes oxigenados a hidrocarburos ligeros, aromáticos, oxigenados y olefinas, y enseguida hidrocarburos pesados e hidrocarburos aromáticos policíclicos. De acuerdo al peso molecular de los alquitranes algunos autores los han clasificado en cinco grupos. Desde hace algún tiempo varias instituciones han desarrollado métodos de muestreo y análisis de alquitranes, en línea y fuera de línea [14].

4.2. Cracking catalítico de alquitranes

- Binlin Dou, Weiguo Pan, Jianxing Ren, Bingbing Chen, Jungho Hwang, Tae-U Yu evaluaron cinco catalizadores para eliminar alquitranes de corrientes de gases; los catalizadores usados son NiMo, Al₂O₃, CaO, SiO₂ y CuMn. A los cinco catalizadores se les determinó el área superficial donde el NiMo obtuvo el mayor valor. El 1 – metil naftaleno se escogió como la sustancia modelo para determinar la actividad de remoción de los catalizadores estudiados. Los resultados obtenidos ubican al NiMo como el catalizador con mayor actividad de remoción de alquitranes [21].
- Bing-Shun Huang, Hsin-Yi Chen, Jia-Hong Kuo, Chu-Hsuan Chang, Ming-Yen Wey llevaron a cabo un estudio experimental que consistió en acoplar los procesos de gasificación de biomasa en lecho fluidizado y cracking catalítico de alquitranes; además se evaluó un tipo de catalizador. La gasificación de biomasa se realizó a tres temperaturas diferentes, la temperatura del lecho catalítico se mantuvo constante durante el estudio.

Al comparar las temperaturas de gasificación de 660°C y 800°C, se determinó que a 800°C se produce mayor cantidad de hidrocarburos condensables y que la producción de hidrógeno aumenta al pasar los gases de la gasificación por el lecho de catalizador [22].

5. MARCO TEÓRICO

La biomasa es una fuente de energía renovable con incremento potencial en el mercado de la energía mundial [5]. La emisión neta de dióxido de carbono a la atmósfera conduce a un efecto invernadero bajo. Además, su contenido de nitrógeno y azufre son muy bajos. La más importante ventaja de la biomasa es que se puede convertir a combustibles líquidos, sólidos o gaseosos [6], a diferencia de otras fuentes renovables de energía (viento, solar), que solamente generan calor y potencia. La energía de la biomasa se puede obtener por varias tecnologías, tales como la combustión, gasificación y pirólisis [7], [10].

5.1. Gasificación de biomasa

La gasificación es un proceso termoquímico en el que un material carbonaceo, se transforma en un gas combustible de bajo poder calorífico, además de pequeñas cantidades de biochar y cenizas, mediante una serie de reacciones que ocurren a una temperatura determinada en presencia de un agente gasificante (aire, oxígeno y/o vapor de agua). El gas generado es una mezcla de monóxido de carbono, dióxido de carbono, hidrógeno, nitrógeno, metano, hidrocarburos gaseosos y alquitranes. El agente gasificante es de gran importancia en la composición del gas generado: en el caso del aire se genera el llamado gas pobre por su bajo poder calorífico (4-7 MJ/m³), debido al alto contenido de nitrógeno, mientras que en el caso de oxígeno o vapor de agua dan lugar al llamado gas de síntesis que tiene un poder calorífico mayor (10-18 MJ/m³).

Durante el proceso de gasificación de biomasa, las principales reacciones involucran carbono, monóxido de carbono, dióxido de carbono, hidrógeno, agua y metano:



5.1.1. Gasificación en lecho fijo

Es la tecnología de gasificación usada desde hace mucho tiempo. La ventaja de este tipo de gasificación radica en la sencillez y robustez de su diseño. Una de las desventajas presentada por este proceso termoquímico es la limitación de la capacidad, debido a que los espesores de lecho conllevan a dificultades de control y calidad del gas producido, cuando se intenta aumentar la capacidad.

- *Gasificación de corriente ascendente*

La biomasa se alimenta por la parte superior y el medio gasificante por el fondo del reactor. En el fondo del reactor ocurre combustión completa, formándose CO_2 y H_2O a temperaturas alrededor de $1000^\circ C$. Estos gases pasan a la zona de reducción donde se forma CO y H_2O y la temperatura se disminuye a $750^\circ C$. Los gases de la zona de reducción pirolizan la biomasa que desciende lentamente, produciendo grandes cantidades de alquitranes, enseguida los gases calientes secan la biomasa que se alimenta. Ver Figura 1 y Tabla 1.

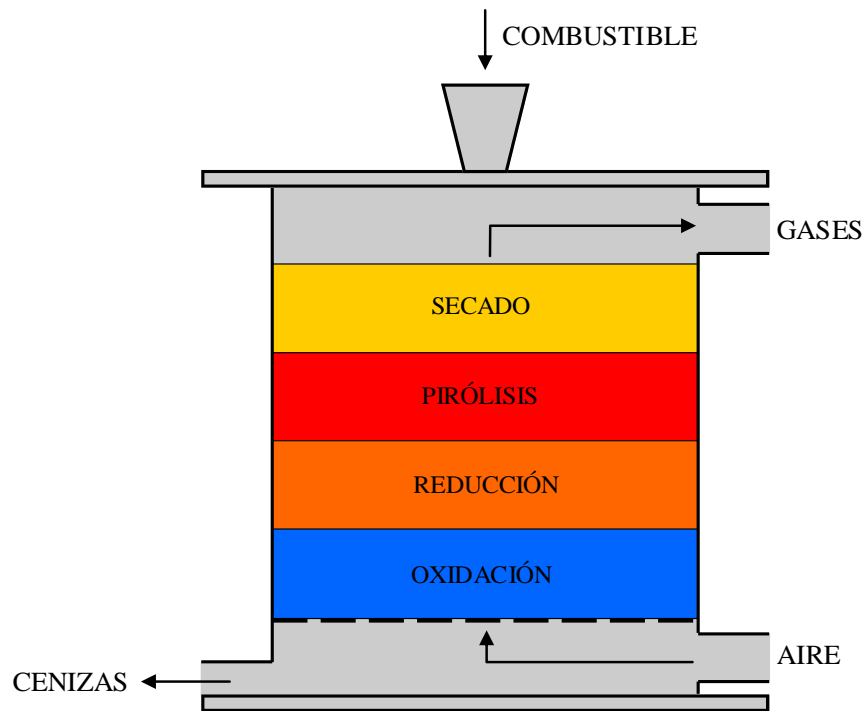


Figura 1. Gasificador de corriente ascendente

Tabla 1. Principales datos de gasificación en corriente ascendente

Agente gasificante	Aire, oxígeno, vapor y mezclas
Contenido de alquitranes en gas de síntesis seco (mg/Nm ³)	Casi saturado - 35000
Presión de operación (bar)	Principalmente atmosférico
Temperatura de operación (°C)	300 – 1000

- *Gasificación de corriente descendente*

La alimentación de la biomasa se realiza por la parte superior del reactor y el medio gasificante se introduce en el lecho que fluye hacia abajo. Este tipo de gasificador tiene zonas de reacción en diferente disposición al gasificador de lecho ascendente. La concentración de alquitranes es baja debido a que los alquitranes producidos en la zona de pirólisis se craquean en la zona de alta temperatura de combustión. Ver Figura 2 y Tabla 2.

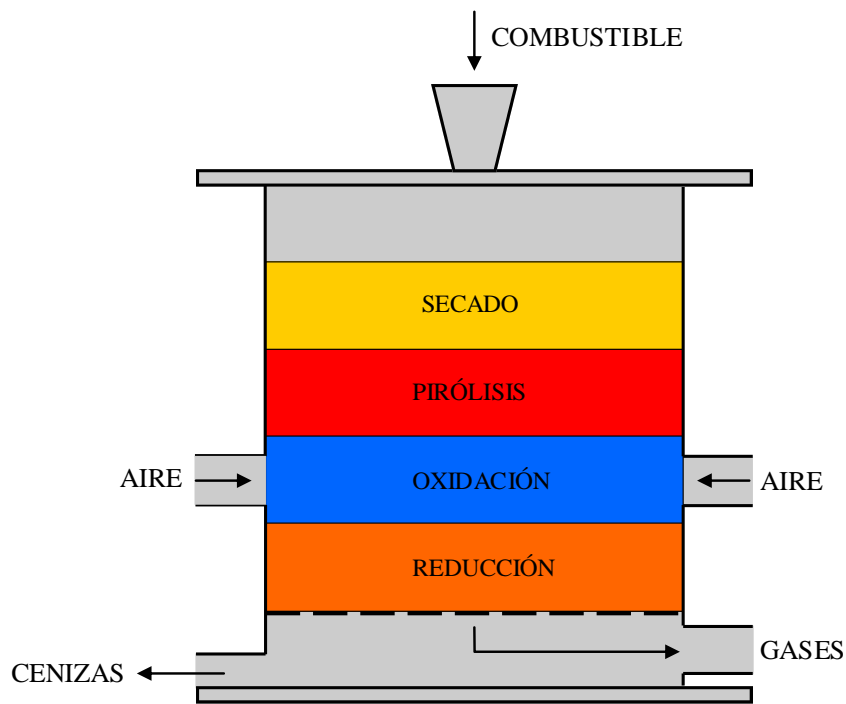


Figura 2. Gasificador de corriente descendente

Tabla 2. Principales datos de gasificación en corriente descendente

Agente gasificante	Aire, algunas veces vapor
Contenido de alquitranes en gas de síntesis seco (mg/Nm ³)	500 – 1000
Presión de operación (bar)	Principalmente atmosférico
Temperatura de operación (°C)	300 – 1000

- *Gasificación de corriente transversal*

La alimentación de la biomasa se lleva a cabo por la parte superior del gasificador y el medio gasificante se realiza por la parte lateral del gasificador y los gases producidos salen por el lado opuesto a la alimentación del medio gasificante. Ver Figura 3 y Tabla 3.

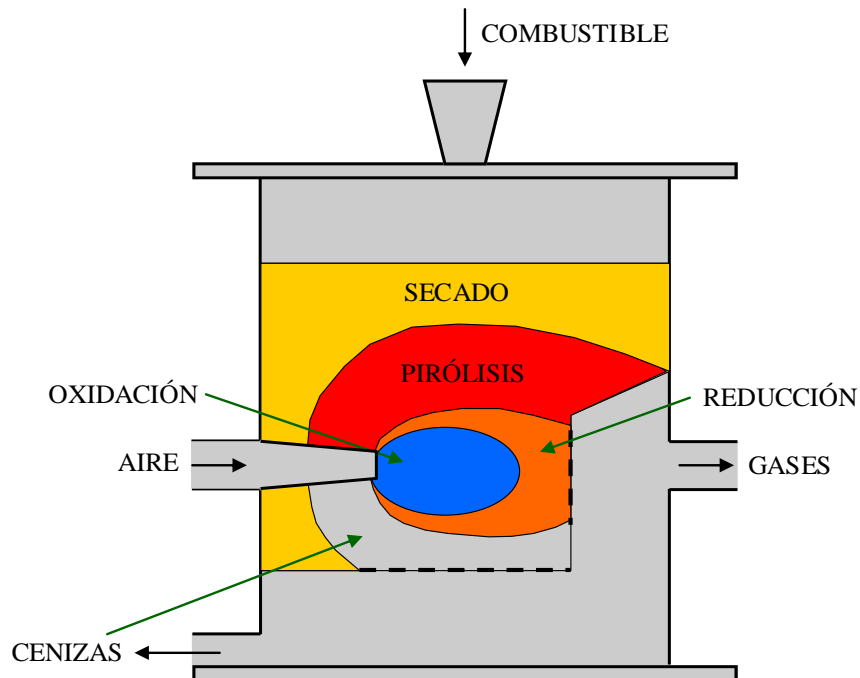


Figura 3. Gasificador de corriente transversal

Tabla 3. Principales datos de gasificación en corriente transversal

Agente gasificante	Aire
Contenido de alquitranes en gas de síntesis seco (mg/Nm ³)	Casi saturado
Presión de operación (bar)	Principalmente atmosférico
Temperatura de operación (°C)	300 – 1000

5.1.2. Gasificación de lecho fluidizado

Este tipo de gasificador se caracteriza porque el medio gasificante se alimenta por el fondo del reactor a través de un lecho de partículas sólidas (arena de cuarzo) a una velocidad tal que mantenga estas partículas en estado de suspensión. El lecho de arena mejora la transferencia de calor entre las partículas de la biomasa, además que favorece el mezclado y las reacciones de gasificación.

- *Gasificación de lecho fluidizado burbujeante*

La biomasa se alimenta mezclado o encima del lecho de arena y el medio gasificante se introduce en el fondo del gasificador, a una velocidad de alrededor de 2 a 3 m/s con el fin que se produzcan burbujas que viajen a través del lecho. El producto gaseoso abandona el gasificador por la parte superior después de pasar por un ciclón para retirar partículas de arena y cenizas volantes. Ver Figura 4 y Tabla 4.

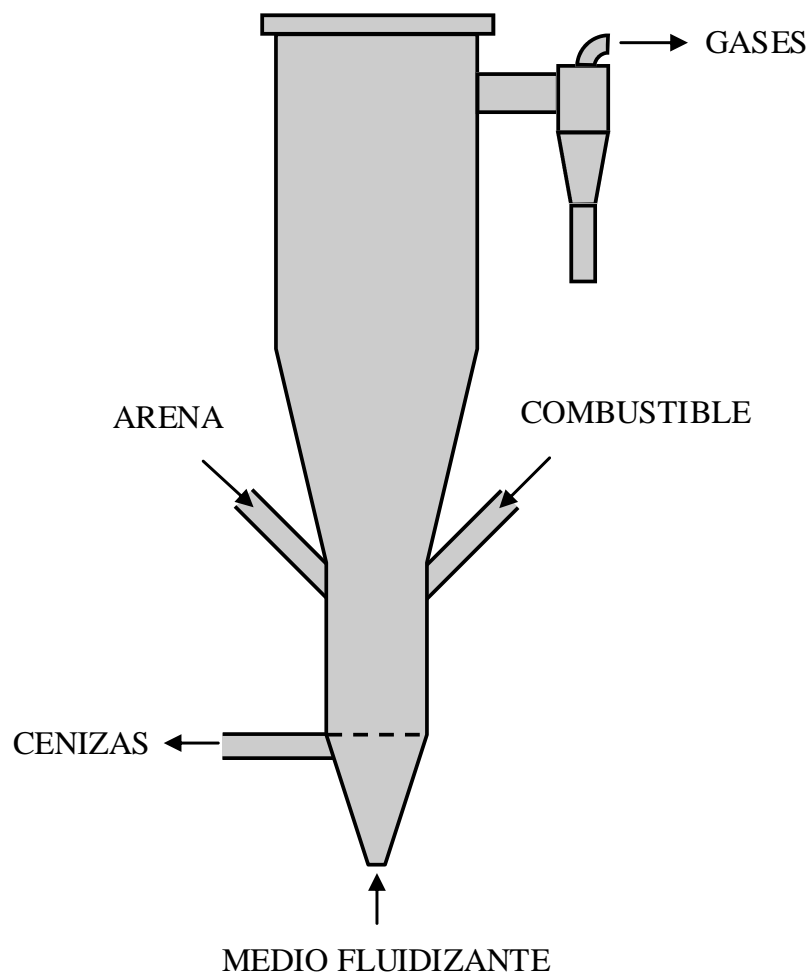


Figura 4. Gasificador de lecho fluidizado burbujeante

Tabla 4. Principales datos de gasificación en lecho fluidizado burbujeante

Agente gasificante	Aire, oxígeno, vapor y mezclas
Contenido de alquitranes en gas de síntesis seco (mg/Nm ³)	13500
Presión de operación (bar)	1 – 35
Temperatura de operación (°C)	650 – 950

- *Gasificación en lecho fluidizado circulante*

La biomasa se alimenta conjuntamente con la arena y el agente gasificante se introduce por el fondo del gasificador. El medio gasificante se alimenta a una velocidad que permita que cierta cantidad del material del lecho sea arrastrado junto con el gas producido. El gas producido abandona el gasificador por la parte alta de un ciclón y el material del lecho es recirculado al mismo, ver Figura 5 y Tabla 5.

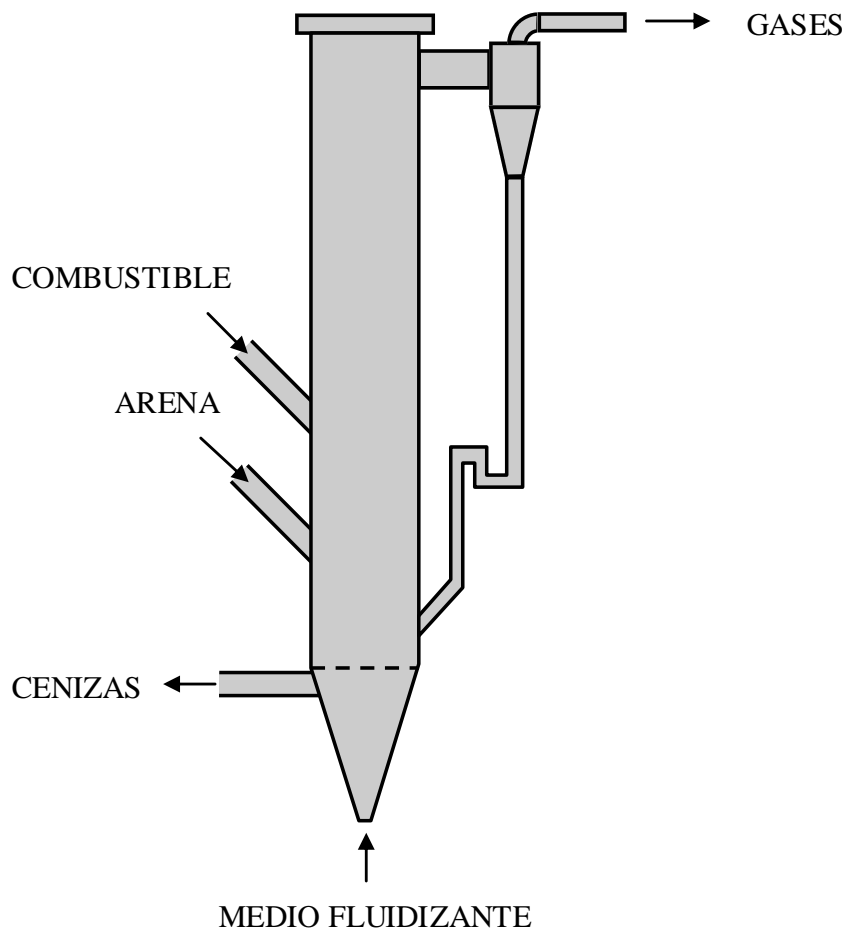


Figura 5. Gasificador de lecho fluidizado circulante

Tabla 5. Principales datos de gasificación en lecho fluidizado circulante

Agente gasificante	Aire, oxígeno, vapor y mezclas
Contenido de alquitranes en gas de síntesis seco (mg/Nm ³)	Bajo
Presión de operación (bar)	1 – 19
Temperatura de operación (°C)	800 – 1000

5.1.3. Gasificación de flujo de arrastre

Este tipo de gasificador utiliza combustible en forma de gas, polvo o suspensión. La biomasa se alimenta mezclada con una corriente oxígeno/vapor de agua y se gasifica a altas temperaturas en quemadores, los cuales se ubican dependiendo el tipo de gasificador de arrastre. Cuando se utiliza biomasa como combustible, se puede alimentar en forma de polvo después de un proceso de molienda; como gas proveniente de un proceso de pirolisis; aceite de pirolisis y como coque, este último se alimenta en forma de suspensión.

– Flujo de arrastre – gasificador de flujo descendente

La biomasa, en forma de gas, polvo o suspensión se transporta neumáticamente por una corriente de oxígeno/vapor de agua y se convierte rápidamente a altas temperaturas en un quemador ubicado en la parte superior del gasificador. Ver Figura 6 y Tabla 6.

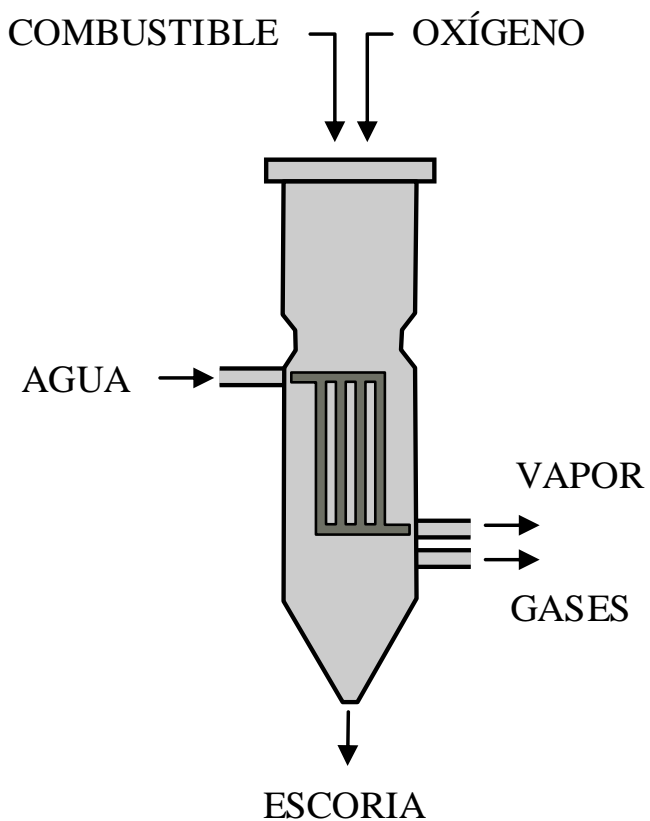


Figura 6. Gasificador de flujo de arrastre – flujo descendente

Tabla 6. Principales datos de gasificación en flujo de arrastre descendente

Agente gasificante	Aire, oxígeno, vapor y mezclas
Contenido de alquitranes en gas de síntesis seco (mg/Nm ³)	Muy bajo, casi libre de alquitranes
Presión de operación (bar)	20 – 50
Temperatura de operación (°C)	> 1200

– *Flujo de arrastre – gasificador de flujo ascendente*

En este tipo de gasificador de biomasa, un gran porcentaje del combustible se alimenta a una primera etapa (inferior), ver Figura 7, y el resto de combustible se alimenta a una segunda etapa (superior), el biochar producido en esta etapa también sirve de alimento de la primera etapa. La primera etapa es un cilindro con dos quemadores opuestos horizontalmente; ver Tabla 7.

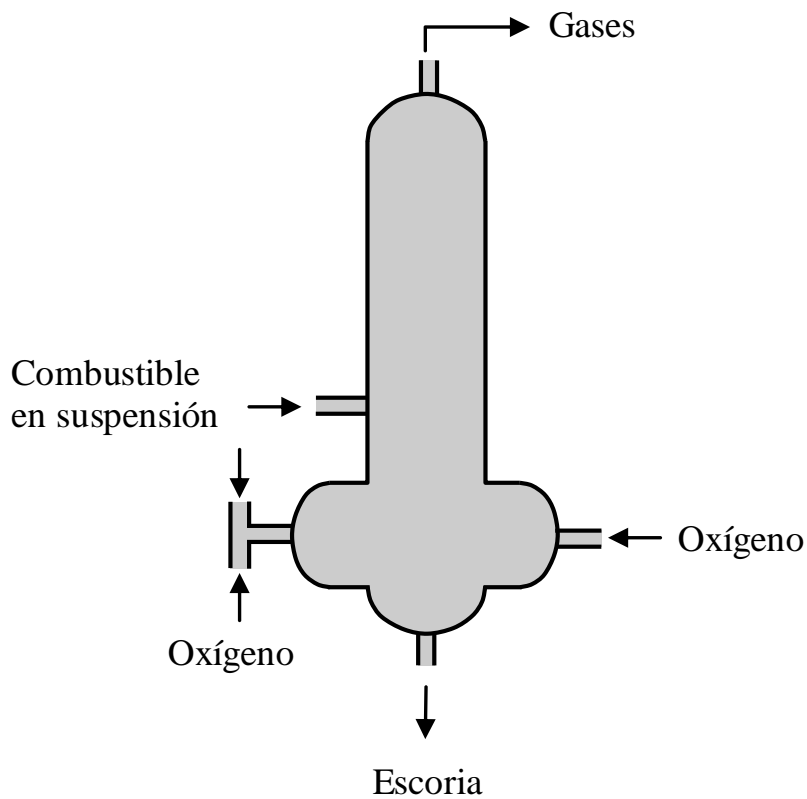


Figura 7. Gasificador de flujo de arrastre – flujo ascendente

Tabla 7. Principales datos de gasificación en flujo de arrastre ascendente

Agente gasificante	Oxígeno
Contenido de alquitranes en gas de síntesis seco (mg/Nm ³)	Bajo
Presión de operación (bar)	27.5
Temperatura de operación (°C)	1050 – 1400

5.2. Cracking de alquitranes

Es un proceso de conversión térmica o catalítica que compromete la reacción química de uno o más alquitranes en fase gaseosa para formar nuevas especies, que permanecen en el gas [23].

5.2.1. Cracking térmico

En este proceso de conversión térmica las reacciones ocurren a una velocidad aceptable como resultado de operar el reactor de craqueo a altas temperaturas. En el craqueo térmico, el gas rico en alquitranes proveniente de un proceso termoquímico se calienta y los compuestos pesados se convierten en gases más livianos, alquitranes refractarios (alquitranes condensables y biochar) y vapor de agua. Puede ser necesario operar a altas temperaturas para lograr altos índices de craqueo de alquitranes. En [12] se sugiere que la temperatura de cracking térmico debe ser de 1250°C y el tiempo de residencia de 0.5 s.

5.2.2. *Cracking catalítico*

La técnica de cracking catalítico de alquitranes consiste en poner en contacto los gases producidos en un proceso termoquímico con un agente catalizador a una temperatura moderada, para romper las moléculas de los alquitranes generados y formar productos de menor peso molecular. El catalizador puede ser usado in situ en el reactor de gasificación o en un reactor corriente abajo [3].

6. EXPERIMENTACIÓN

En esta sección se describen los detalles específicos de los procedimientos experimentales llevados a cabo en este trabajo de investigación.

6.1. Preparación de la biomasa

La biomasa utilizada en la investigación se obtuvo de residuos de cuesco de palma africana generados en plantaciones de la zona de Urabá, departamento de Antioquia. El cuesco como se recibe se muele en un molino de impacto y el producto se clasifica hasta un tamaño adecuado para el proceso de gasificación en lecho fijo empacado; menos de 1,00 mm. La biomasa clasificada se almacenó en bolsas plásticas de color oscuro.

6.2. Caracterización de la biomasa

6.2.1. Análisis granulométrico

Después de someter el cuesco de palma a molienda, se procede a clasificar todo el material por el método de tamizado en seco. Para llevar a cabo esta clasificación se utilizó un tamizador marca Retsch modelo AS 300, equipado con tamices de 305 mm de diámetro.

6.2.2. Densidad aparente

La densidad aparente del cuesco de palma se calculó mediante análisis gravimétrico, usando una probeta de 50 cm³. Se midieron 20 cm³ de cuesco y se pesó la masa, y enseguida se procedió a calcular la densidad aparente.

6.2.3. Análisis Próximo Completo

- *Contenido de humedad residual:* Se lleva a cabo teniendo como base la norma ASTM D3173, usando una estufa de secado. Se pesa 1 g de muestra con tamaño de partícula menor a 1 mm. La muestra se introduce a la estufa durante 1 hora a una temperatura de $107^{\circ}\text{C} \pm 3^{\circ}\text{C}$.
- *Contenido de materia volátil:* Se sigue el procedimiento de la norma ISO 562, usando un horno eléctrico para determinación de materia volátil. Para realizar este análisis se pesa 1 g de muestra de cuesco de tamaño menor de 1 mm. La muestra se introduce en el horno precalentado a $900^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$ durante un tiempo de 7 minutos exactamente.
- *Contenido de cenizas:* Este parámetro se determina mediante la aplicación de la norma ASTM D3174, utilizando una mufla eléctrica. Se pesa 1 g de muestra de cuesco con tamaño menor a 1 mm. La muestra se introduce a la mufla y se calienta gradualmente a una velocidad tal que se alcancen $500^{\circ}\text{C} \pm 10^{\circ}\text{C}$ al final de una hora. Se continúa el calentamiento hasta que la temperatura sube desde $500^{\circ}\text{C} \pm 10^{\circ}\text{C}$ hasta $750^{\circ}\text{C} \pm 15^{\circ}\text{C}$ al final de una hora y se continúa calentando durante dos horas adicionales a $750^{\circ}\text{C} \pm 15^{\circ}\text{C}$.
- *Contenido de carbono fijo:* La determinación de este parámetro se consigue utilizando la norma ASTM D3172. El carbono fijo es el resultado de la suma de humedad, cenizas y materia volátil restado de 100.

- *Contenido de azufre:* El contenido de azufre se determina mediante el procedimiento detallado en la norma ASTM D4239 y el uso de un equipo provisto de un horno tubular de alta temperatura. Se pesan 0,1 g de muestra de cuesco de tamaño menor a 1 mm en un recipiente de combustión. Se introduce en el horno de alta temperatura precalentado a una temperatura de 1350°C y se espera hasta que el equipo determine el contenido de azufre.
- *Poder calorífico superior:* La norma ASTM D5865 es la base para determinar este parámetro, usando un calorímetro automático. Se pesa 1 g de muestra de cuesco de tamaño menor a 1 mm. Se introduce la muestra en el calorímetro y se espera hasta que se muestre el resultado del poder calorífico.

6.2.4. Análisis elemental

El contenido porcentual de carbono, hidrógeno, nitrógeno, azufre y oxígeno se determinó en un analizador CHNS Marca EXETER, Modelo CE440, ubicado en el Laboratorio de Ciencias de la Energía, de la Universidad Nacional de Colombia, Sede Medellín. El contenido de oxígeno de la muestra de cuesco se determinó por diferencia.

6.2.5. Microscopía de luz reflejada y luz fluorescente

Se utilizó un microscopio NIKON ECLIPSE LV100 provisto con luz reflejada blanca y luz fluorescente azul para caracterizar estructuralmente las partículas de biomasa virgen y el biochar generado en el proceso de gasificación.

6.3. Preparación del catalizador

La muestra de dolomita como se recibió fue sometida a un proceso de reducción de tamaño mediante un molino de bolas hasta un tamaño de aproximadamente 0.75 a 1.2 mm. El siguiente proceso fue la calcinación de la dolomita molida para convertir los carburos de calcio y magnesio a sus respectivos óxidos. Esta activación se llevó a cabo en una atmósfera de nitrógeno a 850°C durante 12 horas [9]. Después de la calcinación del catalizador se volvió a someter a un proceso de molienda para obtener un tamaño de partícula final de pasante malla 40 (0.425 mm) y retenido malla 60 (0.250 mm). Las muestras frías se conservaron en frascos de vidrio tapados herméticamente.

6.4. Caracterización del catalizador

6.4.1. Densidad aparente

La densidad aparente de la dolomita calcinada se calculó mediante análisis gravimétrico, usando una probeta de 50 cm³. Se midieron 30 cm³ de catalizador y se pesó la masa, y enseguida se procedió a calcular la densidad aparente.

6.4.2. Análisis DRX

Se llevó a cabo un análisis DRX para detectar estructuras cristalinas presentes en el catalizador como CaO y MgO. El equipo utilizado es un difractómetro multipropósito de rayos X marca PANALYTICAL Modelo X'Pert Pro MPD, la fuente de rayos X es tubo cerámico de rayos X con ánodo de Cu.

6.4.3. Microscopía de luz reflejada y luz fluorescente

Se obtuvieron imágenes de dolomita calcinada utilizando un microscopio marca Nikon. La muestra de dolomita fue montada en resina preacelerada para facilitar el pulido.

6.5. Gasificación de cuesco de palma africana y cracking catalítico de alquitranes

6.5.1. Plan experimental

La gasificación de cuesco de palma africana en lecho fijo y el craqueo de los alquitranes generados, se llevaron a cabo en dos reactores eléctricos de características similares, con sistemas de calentamiento independientes. La temperatura de gasificación de la muestra de biomasa se fijó en 750°C, 850°C y 950°C, y la de craqueo en 500°C; el flujo de agua se fijó en 23 cm³/h y el de gas de arrastre nitrógeno en 50 cm³/min.

Las temperaturas de gasificación se eligieron por el conocimiento existente en que este proceso termoquímico es más eficiente a temperaturas cercanas y mayores a 700°C [2].

6.5.2. Montaje experimental

El proceso de gasificación con vapor y el de cracking catalítico se llevaron a cabo en reactores de lecho empacado horizontal. El reactor de gasificación de cuesco de palma es un tramo de tubería de acero inoxidable 310 con diámetro de ½" nominal Sch 80 y longitud de 50 cm, y el reactor de cracking catalítico de alquitranes es un tramo de tubería de acero inoxidable 310 con diámetro de ½" nominal Sch 80 y longitud de 50 cm. Las líneas de muestreo

de alquitranes y gases se construyeron con tubing de acero inoxidable de 1/4" OD y manguera de látex de 1/4". La alimentación de agua al proceso de gasificación se llevó a cabo utilizando una bomba peristáltica que proporcionó 23 cm³/h, ver curva de ajuste en D.1, ver y la alimentación de gas de arrastre fue de 50 cm³/min desde un cilindro de nitrógeno superseco, Grado 5.0. La temperatura del proceso de gasificación se midió mediante una termocupla tipo K, cuya punta hizo contacto con la muestra de cuesco de palma; y la temperatura del proceso de cracking catalítico también se midió mediante una termocupla tipo K. El calentamiento de los reactores se realizó mediante dos hornos eléctricos de 45 cm de longitud, ver Figura 8.

Las corrientes de productos de ambos procesos se hicieron pasar por un tren de muestreo formado por tres recipientes conectados en serie dentro de un baño de hielo para condensar los alquitranes presentes en estas corrientes. El gas de síntesis producido se almacenó en bolsas tipo TEDLAR para su posterior análisis, ver Figura 9 :

- El primer recipiente se llenó hasta 3/4 del volumen con bolas de cristal.
- El segundo recipiente contiene bolas de cristal hasta la mitad y 40 mL de solvente.
- El tercer recipiente contiene sílica gel hasta la totalidad de su volumen.

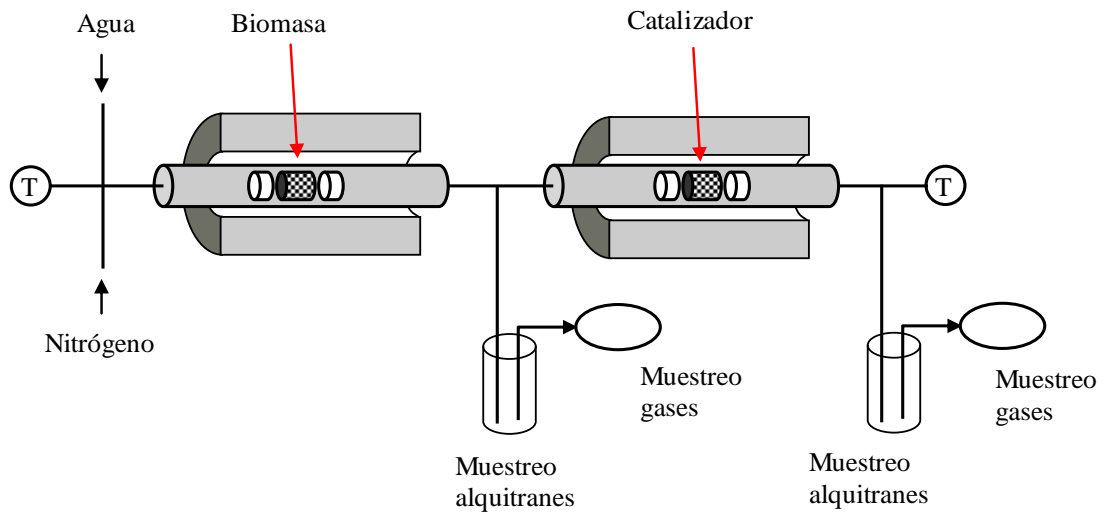


Figura 8. Montaje de reactores para gasificación y cracking catalítico

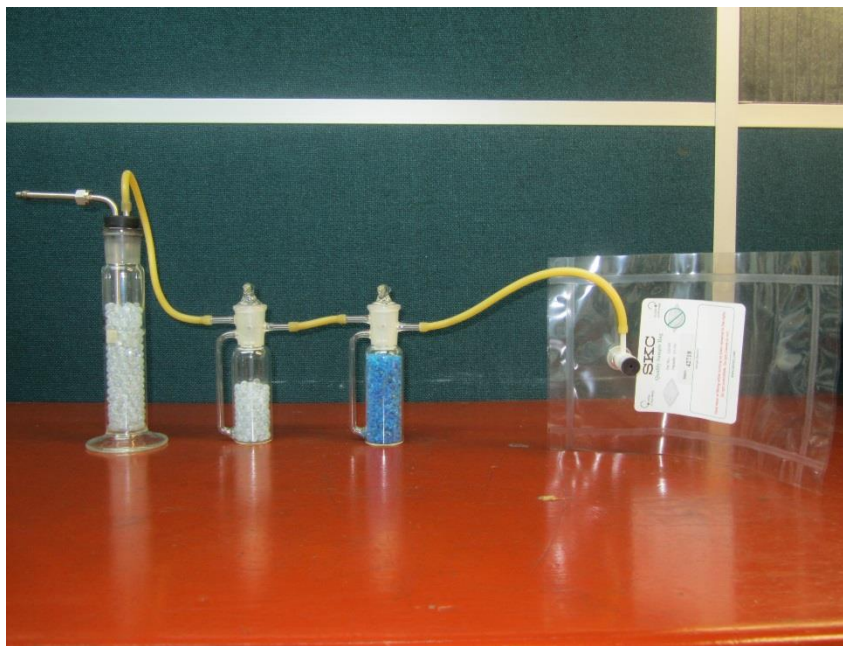


Figura 9. Tren de muestreo para condensación de humedad y alquitranes.

6.5.3. *Procedimiento experimental:*

Se empacaron 4,0 g de cuesco de palma africana dentro del tubo de acero inoxidable del reactor de gasificación con un tapón de lana de cuarzo, tanto corriente abajo como corriente arriba, para mantener la muestra en su lugar. El peso de catalizador a utilizar es de 7,0 g, también se utilizaron dos tapones de lana de cuarzo para mantener la posición de la muestra de dolomita.

La corrida experimental comenzó con el precalentamiento del reactor de cracking catalítico; cuando se alcanzó la temperatura de cracking catalítico (500°C), comenzó el calentamiento del reactor de gasificación hasta la temperatura de gasificación elegida a una velocidad de calentamiento de 20°C/min. Se permitió el flujo de nitrógeno desde el comienzo del experimento. La alimentación de vapor de agua comenzó cuando se alcanzó una temperatura de 200°C en la zona de gasificación, el tiempo de reacción permitido fue el necesario para que la temperatura del horno alcanzara la temperatura de gasificación elegida más 30 minutos, ver Figura 10. El muestreo de gases comenzó cuando se alcanzó la temperatura de gasificación deseada durante 10 minutos consecutivos; el muestreo de alquitranes empezó justo con la alimentación de agua, cuando el reactor de gasificación alcanzó 200°C de temperatura y se mantuvo hasta el final de la prueba.

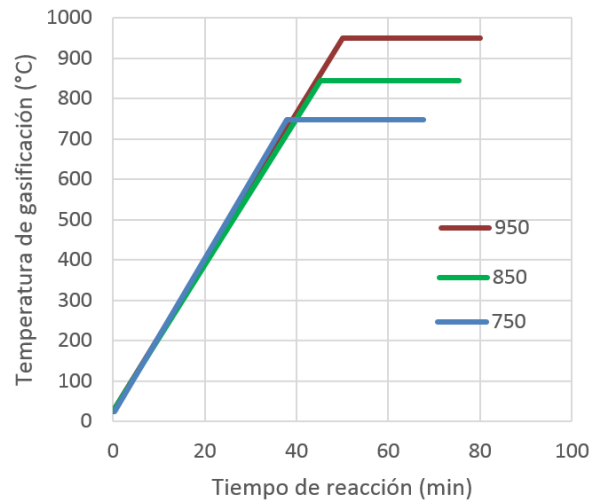


Figura 10. Temperaturas de gasificación.

6.5.4. Análisis del producto gaseoso

La muestra de gas se recolectó en bolsas TEDLAR y se procedió a analizarla en un Micro GC Marca VARIAN 3800 y en un Micro GC Agilent, equipados con detector de conductividad térmica (TCD), los cual se utilizaron para analizar los gases livianos de la gasificación y gasificación catalítica de cuesco de palma africana. El primer punto de muestreo del proceso corresponde a la salida del reactor de gasificación y el segundo se ubica a la salida del reactor de cracking catalítico.

6.5.5. Análisis del producto líquido

Los puntos de muestreo de alquitranes están ubicados tanto a la salida del reactor de gasificación como a la salida del rector de cracking catalítico, justo antes de los puntos de muestreo de gases. Para su recolección se utilizó un sistema de condensación formado por tres impingers, el primero lleno con bolas de cristal para condensar vapor de agua y alquitranes solubles en

agua, el segundo lleno con bolas de cristal más solvente diclorometano y el tercero contiene sílica gel. La fracción de alquitranes pesados y solubles en agua se determina gravimétricamente mediante la evaporación de muestras tomadas del impinger de condensación de agua y alquitranes [14], [17].

6.5.6. Análisis del producto sólido

Un microscopio NIKON ECLIPSE LV100 provisto con luz reflejada blanca y luz fluorescente se utilizó con el fin de evidenciar la presencia de hidrocarburos formados en el proceso termoquímico de gasificación de cuesco de palma africana.

7. RESULTADOS Y ANÁLISIS DE RESULTADOS

A continuación se presentan los resultados obtenidos y se analiza la información experimental. Inicialmente se analizan los resultados de la caracterización de la biomasa y del catalizador y a continuación se analiza el efecto de la temperatura en la gasificación de biomasa.

7.1. Caracterización de la biomasa

7.1.1. Análisis granulométrico

En la Tabla 8 se muestra el resultado del análisis granulométrico del cuesco de palma utilizado en las pruebas del presente trabajo; el tamaño de alrededor de 1 mm favorece el contacto con el agente gasificante por la mayor área superficial ($\bar{d}_p = 0.869$ mm, ver A.3) y no están pequeño para producir una gran caída de presión ($\Delta P \approx 300$ Pa), ver [16].

Tabla 8. Análisis granulométrico de cuesco de palma africana

TAMIZ	ABERTURA (mm)	RETENIDO (g)	% PARCIAL RETENIDO	% RETENIDO
16	1,180	7,2	14,8	14,8
20	0,850	14,0	28,7	43,4
30	0,600	9,0	18,4	61,9
60	0,250	7,1	14,5	76,4
FONDO		11,5	23,6	100,0

7.1.2. Análisis próximo completo

La muestra de cuesco de palma fue sometida a un proceso de molienda, tamizado pasante malla 60 (250 μm) y secado al ambiente; entonces se procedió a su caracterización. Los resultados del análisis próximo completo se presentan en la Tabla 9.

Tabla 9. Análisis próximo completo de la muestra de cuesco de palma africana.

PARÁMETRO	COMPOSICIÓN
Humedad residual, % w/w	9,35
Materia volátil, % w/w	66,88
Cenizas, % w/w	3,38
Carbono fijo, % w/w	20,39
Azufre, % w/w	0,13
Poder calorífico superior, cal/g	4 494

El análisis próximo del cuesco de palma revela un gran contenido de materia volátil, lo cual lo convierte en una materia prima bastante reactiva y adecuada para la producción de combustible gaseoso [20]. La baja concentración de azufre lo convierte en un combustible amigable con el medio ambiente, ya que en los procesos termoquímicos donde se utilice generará menos sulfuro de hidrógeno (H_2S) y óxidos de azufre (SO_x). El bajo poder calorífico comparado, por ejemplo con el lignito que es un carbón de bajo rango (3500 a 4600 cal/g) es el resultado del bajo contenido de carbono fijo. Como vemos en la Tabla 9, un contenido de humedad residual del 9,35 % es ventajoso en reacciones de gasificación tales como la reacción de desplazamiento gas agua y la reacción de reforma de vapor, resultando en altos productos del gas de síntesis.

7.1.3. Análisis elemental

De la muestra de cuesco de palma utilizada para análisis próximo se cuarteó una pequeña cantidad, la cual se molió hasta pasante malla 200 (menor a 61 μm). En la Tabla 10 se muestran los resultados del análisis elemental de la muestra de cuesco de palma africana, donde se puede apreciar las bajas concentraciones de nitrógeno, que demuestran como el cuesco de palma es una fuente de energía amigable con el ambiente.

Tabla 10. Análisis elemental de cuesco de palma africana

Elemento	Composición (% w/w)
C	46,83
H	5,36
N	0,74
S	0,13
O	46,94

7.1.4. Microscopía de luz reflejada y luz fluorescente

La Figura 11 y la Figura 12 muestran fragmentos de cuesco de palma africana, donde se aprecia una abundante estructura porosa. El color amarillo verdoso al usar luz fluorescente azul es característico de material vegetal que no ha sufrido procesos termoquímicos o de carbonificación natural, ver Figura 13.

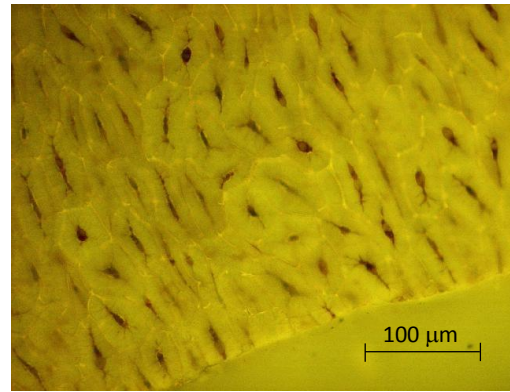
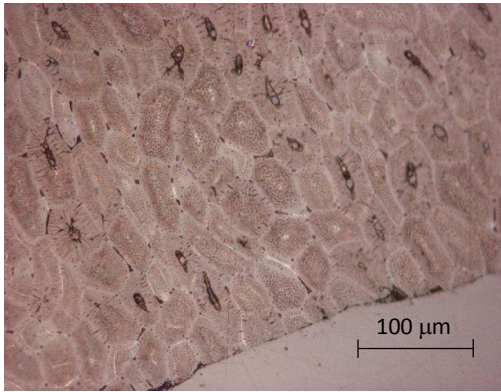


Figura 11. Microfotografía de partícula de cuesco de palma africana. Objetivo de 20X. Tiempos de exposición, luz blanca: 1/40 s y luz fluorescente 1 s.

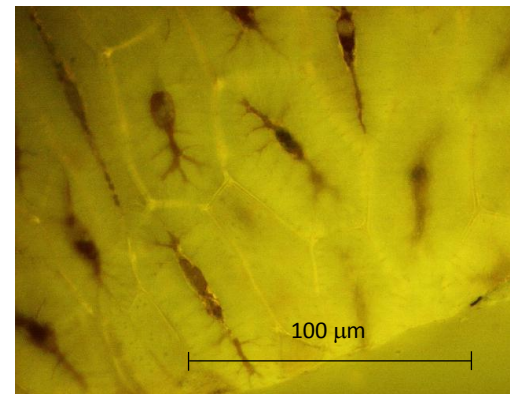
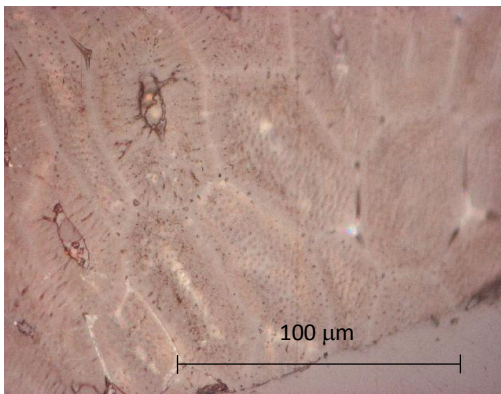


Figura 12. Microfotografía de partícula de cuesco de palma africana. Objetivo de 50X. Tiempos de exposición, luz blanca: 1/40 s y luz fluorescente 1 s.

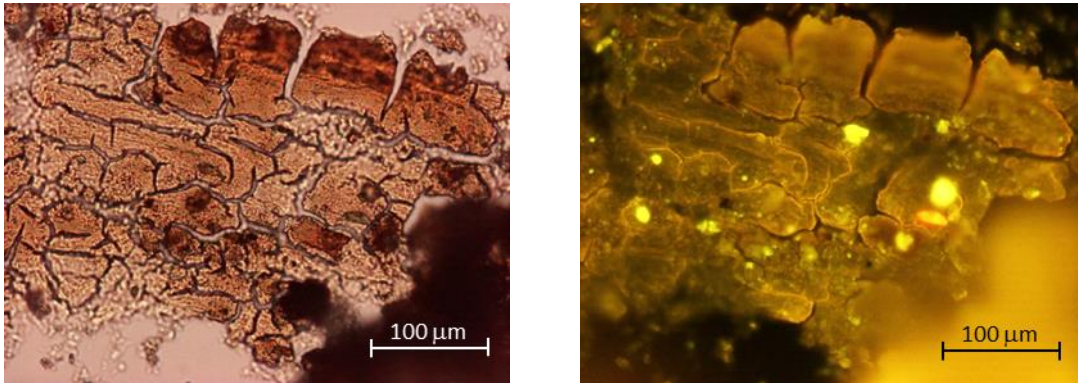


Figura 13. Microfotografía de partícula de turba. Objetivo de 20X. Tiempos de exposición, luz blanca: 1/40 s y luz fluorescente 1 s. Fuente: Laboratorio de Petrografía del Carbón, UNALMED.

La Figura 14, y la Figura 16, muestra el efecto producido por la temperatura de gasificación en la eliminación de materia volátil del cuesco de palma africana; en la Figura 14 se aprecian poros rellenos con material reactivo a la luz fluorescente de color azul (color amarillo) [18], característico de hidrocarburos generados por el calentamiento de la materia volátil, a diferencia de la Figura 16 donde se aprecian poros vacíos sin presencia de material fluorescente debido a la exposición a una mayor temperatura. Las estructuras de color blanco en la Figura 14, Figura 15 y Figura 16 corresponden al biochar formado en el proceso termoquímico al que se expone la biomasa.

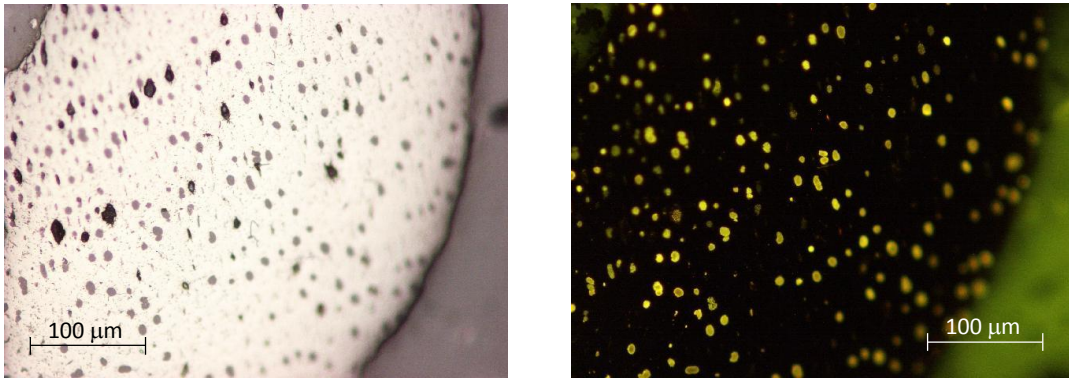


Figura 14. Microfotografía de partícula de biochar de cuesco de palma africana formado en gasificación a 750°C. Objetivo de 20X. Tiempos de exposición, luz blanca: 1/40 s y luz fluorescente 1 s.

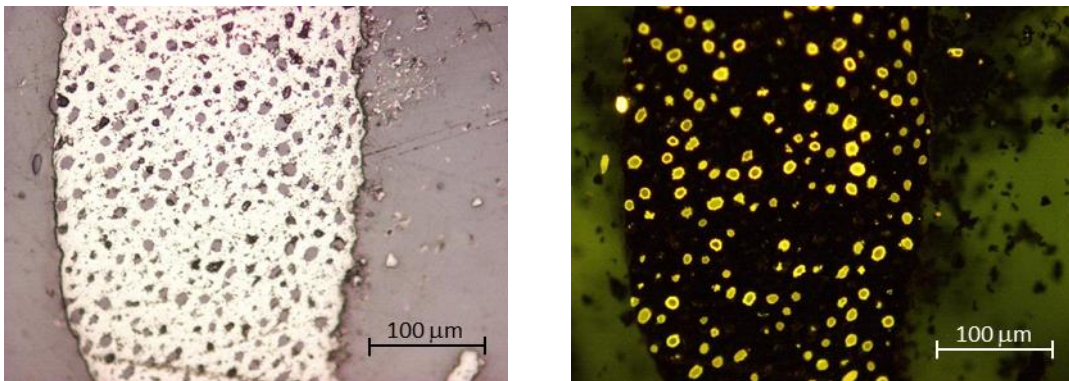


Figura 15. Microfotografía de partícula de biochar de cuesco de palma africana formado en gasificación a 850°C. Objetivo de 20X. Tiempos de exposición, luz blanca: 1/40 s y luz fluorescente 1 s.

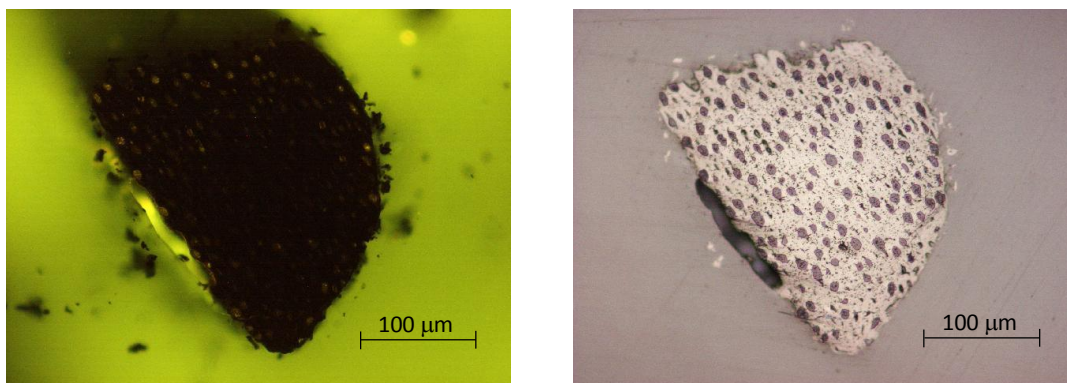


Figura 16. Microfotografía de partícula de biochar de cuesco de palma africana formado en gasificación a 950°C. Objetivo de 20X. Tiempos de exposición, luz blanca: 1/40 s y luz fluorescente 1 s.

7.2. Caracterización del catalizador

7.2.1. Diámetro de partícula

Después de moler y tamizar una muestra de dolomita calcinada, se tomó como muestra de trabajo el intervalo correspondiente a pasante 40 (0.425 mm) y retenido 60 (0.250 mm), lo cual establece un tamaño de partícula promedio (\bar{d}_p) de 0.338 mm, ver A.3.

7.2.2. Densidad aparente

Después de realizar los pasos para el cálculo de la densidad aparente, se determinó que la densidad aparente de la muestra de dolomita calcinada es de 0.733 g/cm³. Este dato fue necesario para determinar la masa de catalizador a empacar, con una relación masa de cuesco a volumen de

dolomita de aproximadamente de 0.4 g de cuesco / cm³ de dolomita; en [19] se utiliza una relación de 0.6 g de biomasa / cm³ de catalizador. En A.5 se detalla el cálculo de la relación.

7.2.3. Análisis DRX

En la Figura 17 se muestra el resultado de análisis DRX para la muestra de dolomita calcinada. En esa figura se aprecian picos que corresponden a la presencia de CaO (lime) 7,1 % y MgO (periklase) 45,5 %, que son los componentes esperados en la muestra de dolomita después de calcinar. La Tabla A.6. 1 muestra las condiciones de operación del equipo DRX para llevar a cabo el análisis.

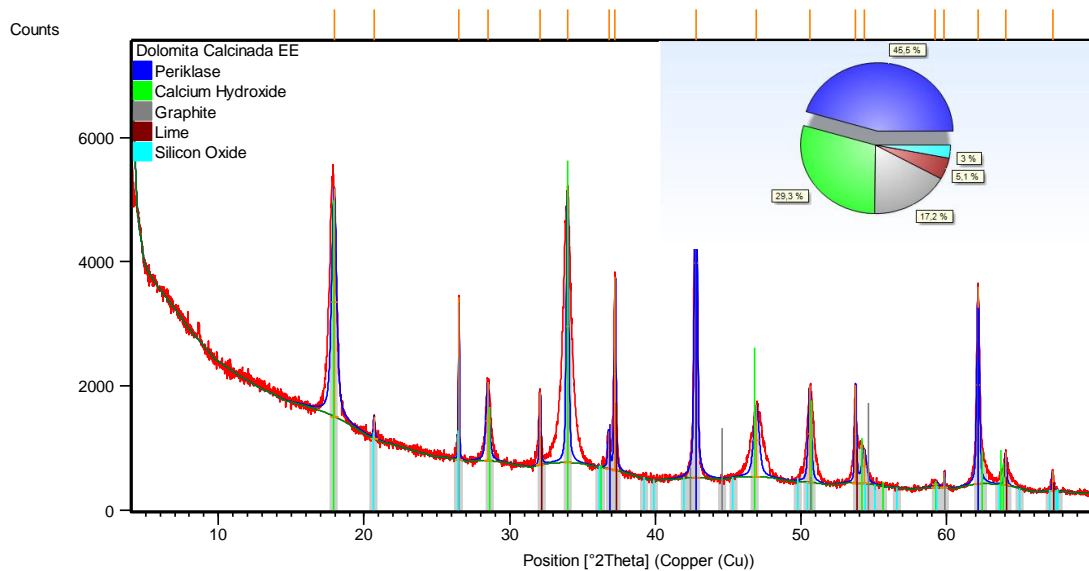


Figura 17. Análisis DRX de muestra de dolomita calcinada

7.2.4. Microscopía de luz blanca reflejada

La Figura 18 muestra varias partículas de dolomita sin usar totalmente limpias. En la Figura 19 se observa un grano de dolomita después de usarse

como catalizador de las reacciones de cracking de alquitranes a una temperatura de 500°C, en la superficie se puede apreciar la presencia de material residual depositado.

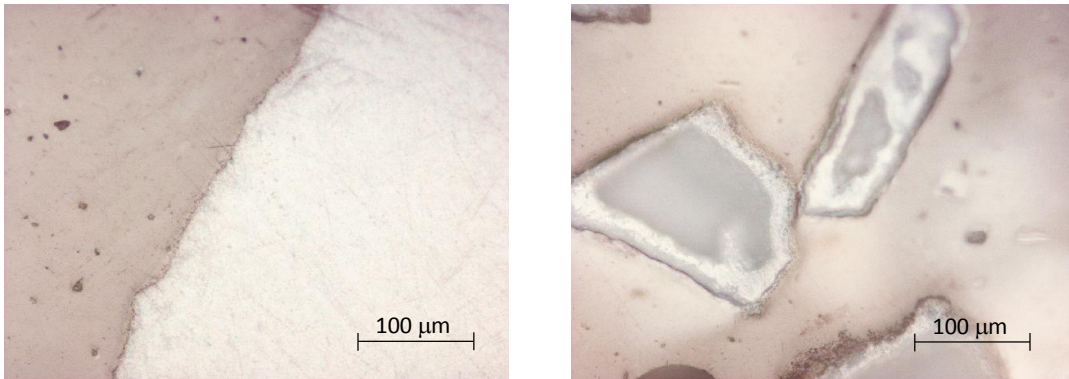


Figura 18. Microfotografía de partícula de dolomita calcinada. Objetivo de 20X. Tiempo de exposición, luz blanca: 1/40 s.

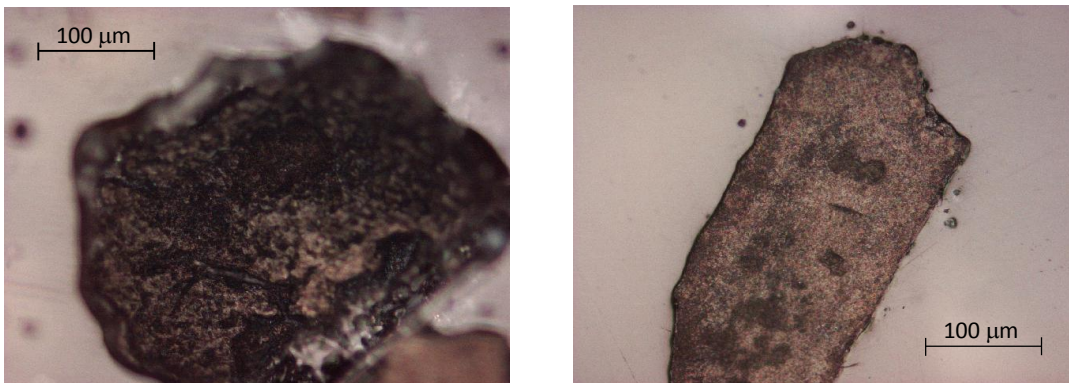


Figura 19. Microfotografía de partícula de dolomita calcinada contaminada con alquitranes generados en gasificación de cuesco a 950°C. Objetivo de 20X. Tiempo de exposición, luz blanca: 1/40 s.

7.3. Gasificación de cuesco de palma africana y cracking catalítico de alquitranes

7.3.1. Efecto de la temperatura sobre la gasificación de cuesco de palma africana

En este trabajo, el proceso de gasificación se llevó a cabo a una velocidad de calentamiento de 20°C/min en el reactor de gasificación para obtener productos gaseosos a temperaturas de 750°C, 850°C y 950°C.

Como se muestra en la Tabla 11 y en la Figura 20, el contenido de H₂ disminuye progresivamente desde 55,63 % a 48,69 % a medida que la temperatura aumenta de 750°C hasta 850°C y disminuye ligeramente hasta 47,09 % en el intervalo de 850°C a 950°C. El contenido de CO₂ aumenta ligeramente en el intervalo de 750°C a 850°C desde 26,43 % a 30,34 % y disminuye a 16,64 % a la temperatura de 950°C. La producción de CO aumenta progresivamente desde 13,87 % a 34,82 % con el aumento de la temperatura. El contenido de CH₄ tiene un comportamiento de disminución a medida que aumenta la temperatura con un leve aumento en la máxima temperatura de experimentación.

La relación H₂/CO disminuye desde 4,01 a 1,35 como se indica en la Figura 21, a pesar del aumento de la temperatura.

Tabla 11. Composición del gas producido en la gasificación de cuesco de palma africana.

Temperatura, °C	Composición molar, %			
	CH ₄	CO ₂	CO	H ₂
750	4,08	26,43	13,87	55,63
850	1,22	30,34	19,76	48,69
950	1,46	16,64	34,82	47,09

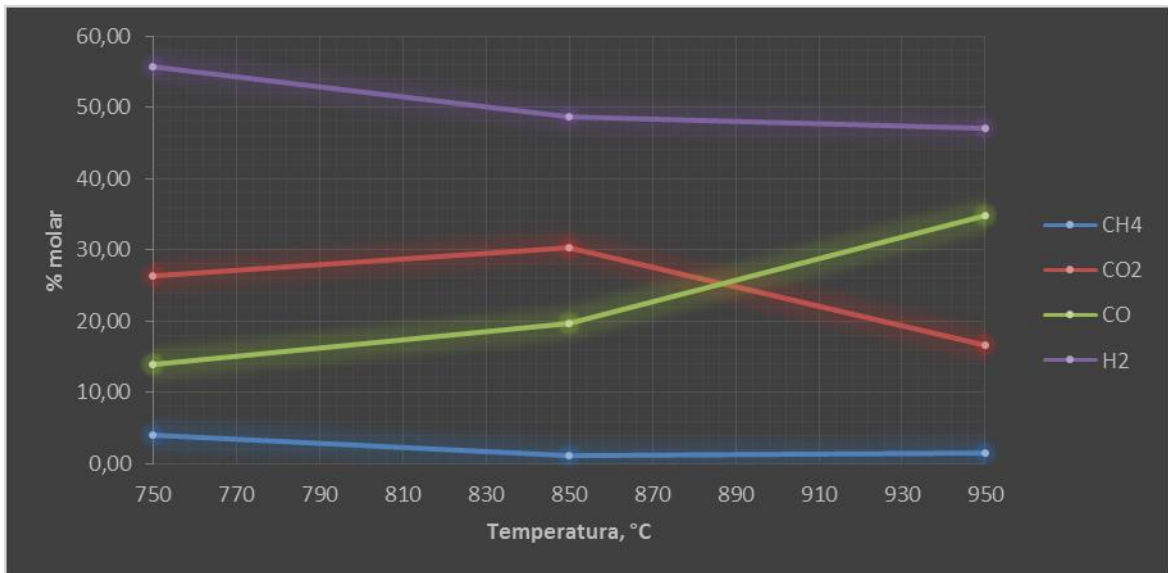


Figura 20. Composición del gas producido en la gasificación de cuesco de palma africana.

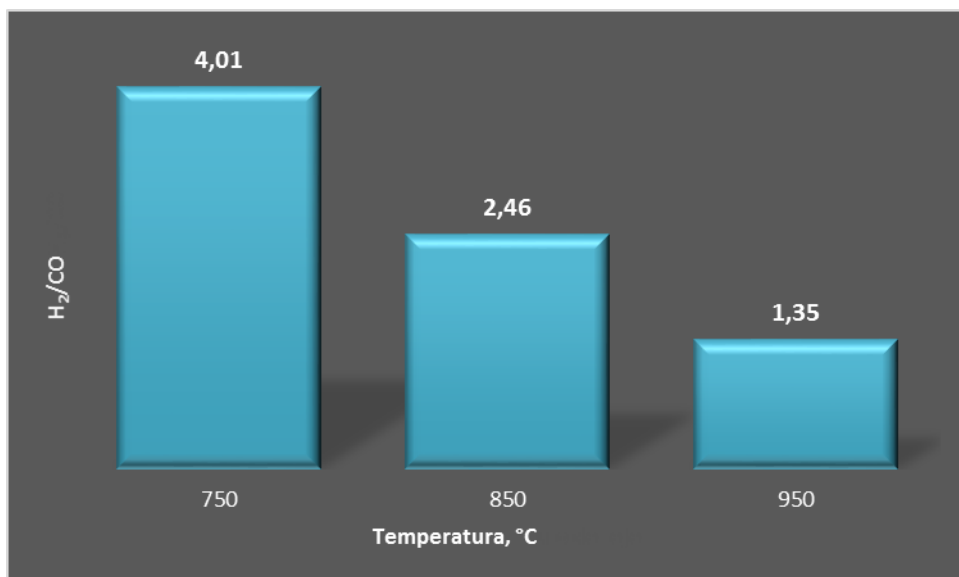


Figura 21. Relación H₂/CO del gas producido en la gasificación de cuesco de palma africana.

En la Figura 22 se aprecia que a baja temperatura, 750°C, el proceso termoquímico de gasificación fue lento, lo cual se refleja en la mayor producción de biochar. A medida que aumenta la temperatura desde 750°C a 950°C se favorece la producción de gas de síntesis al contrario de la producción de alquitranes que tiende a disminuir.

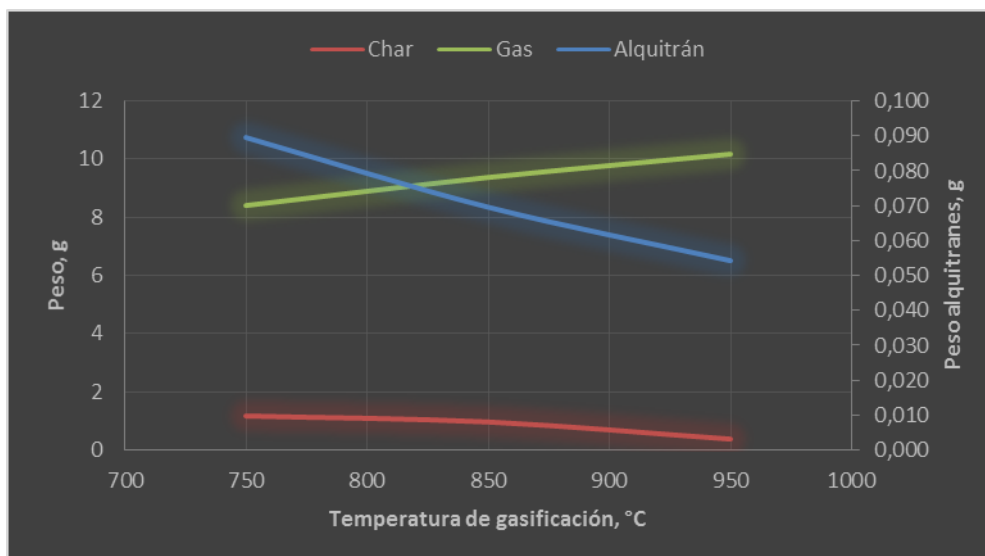


Figura 22. Efecto de la temperatura sobre los productos de gasificación.

7.3.2. Efecto de la temperatura sobre la gasificación catalítica de cuesco de palma africana

En esta parte de la experimentación el proceso de gasificación se llevó a cabo a una velocidad de calentamiento de 20°C/min en el reactor de gasificación hasta temperaturas de 750°C, 850°C y 950°C, manteniendo la temperatura de cracking en 500°C para obtener productos gaseosos.

La dolomita mejora la producción de H₂ comparado con la gasificación no catalítica. La Tabla 12 y la Figura 23 muestran la concentración de H₂ para tres temperaturas diferentes de gasificación y cracking catalítico a 500°C. A una temperatura de 850°C en el proceso de gasificación y 500°C en el proceso de cracking catalítico el incremento en la concentración de H₂ es 48,6 % mayor comparado con la concentración de H₂ en el proceso correspondiente de gasificación no catalítica; la Figura 24 muestra este comportamiento en la producción de hidrógeno.

Tabla 12. Composición del gas producido en la gasificación catalítica de cuesco de palma africana.

Temperatura de gasificación, °C	Temperatura de cracking, °C	Composición molar, %			
		CH ₄	CO ₂	CO	H ₂
750	500	11,69	0,59	14,03	73,69
850	500	9,80	0,64	17,20	72,36
950	500	3,29	0,55	36,66	59,49

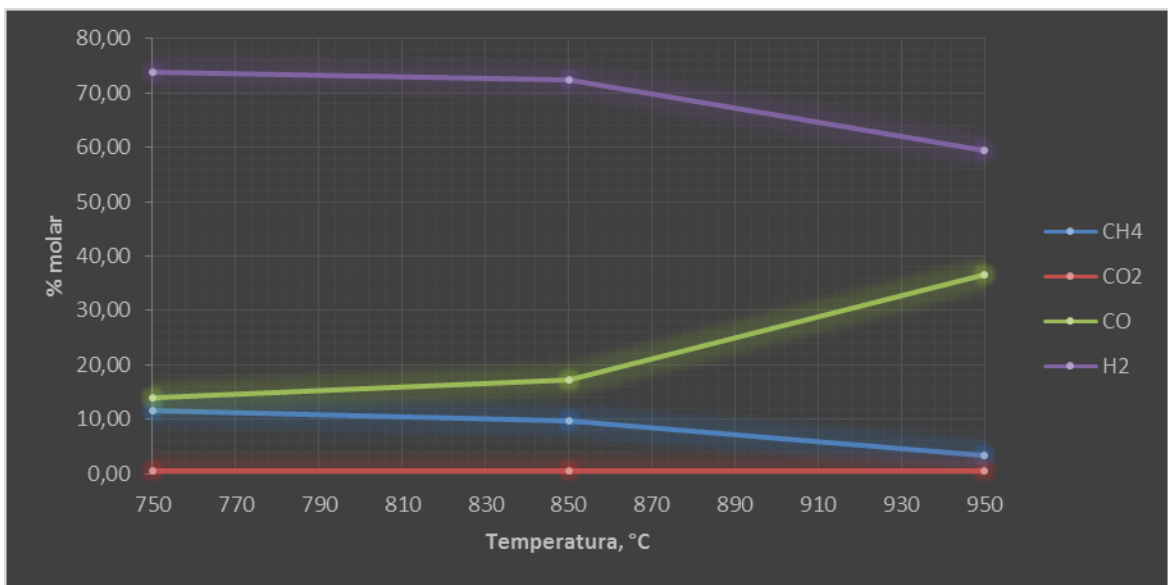


Figura 23. Composición del gas producido en el craqueo de gas producido en la gasificación de cuesco de palma africana.

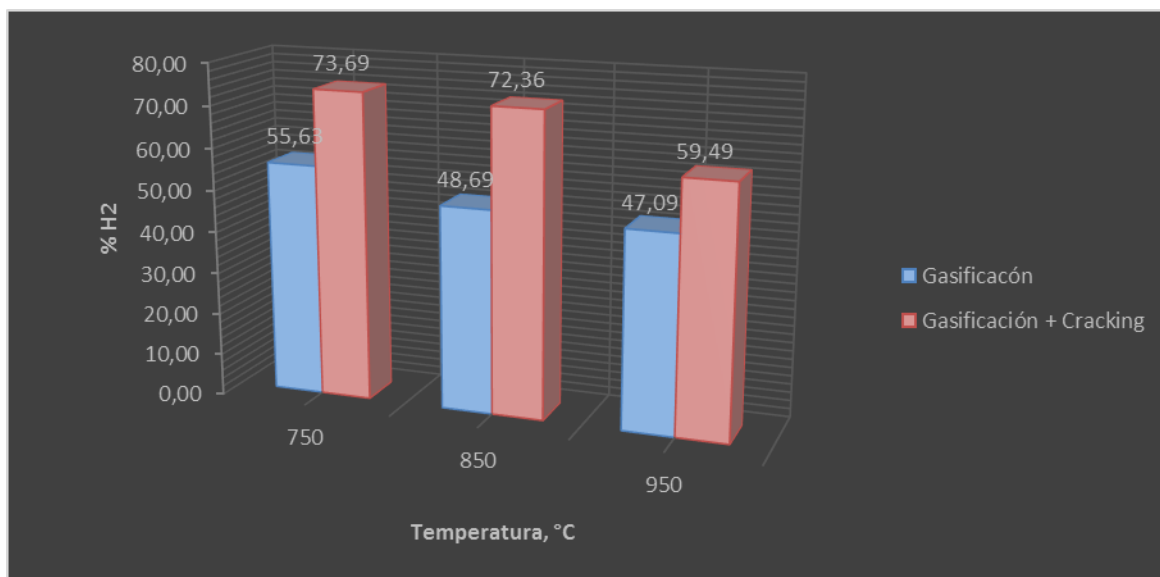


Figura 24. Concentración de H₂ en los procesos de gasificación y gasificación catalítica.

En la Figura 25 se aprecia un efecto drástico en la disminución del contenido de CO₂ con valores de hasta el 97,9 %, a diferencia del contenido de CO que permanece casi invariable en las temperaturas estudiadas, como lo muestra la Figura 26. Este comportamiento en la disminución del contenido de CO₂ fue estudiado en [24], estudio experimental en el cual se demuestra la capacidad de la dolomita calcinada para llevar a cabo este proceso mediante la recarbonatación del CaO.

La Figura 27 también muestra un efecto interesante en el aumento del contenido de CH₄ a expensas del uso del cracking catalítico.

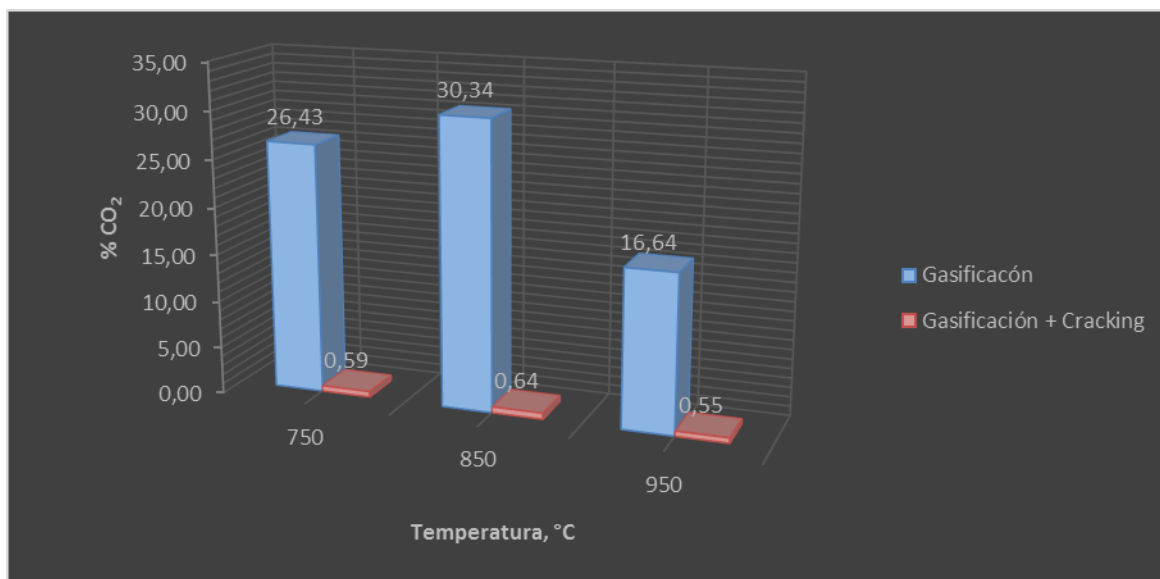


Figura 25. Concentración de CO₂ en los procesos de gasificación y gasificación catalítica.

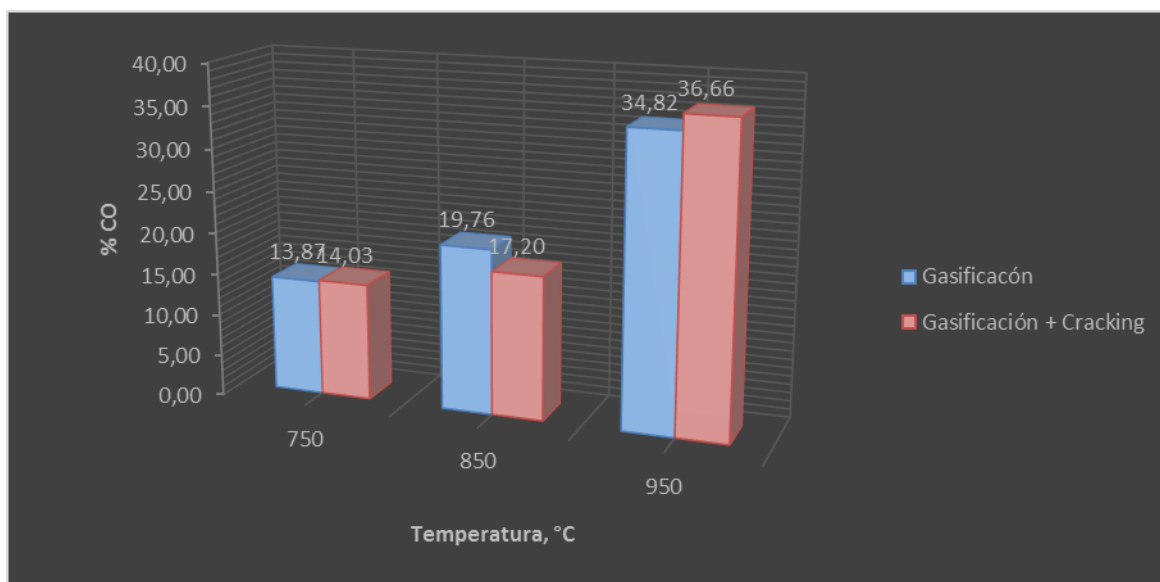


Figura 26. Concentración de CO en los procesos de gasificación y gasificación catalítica.

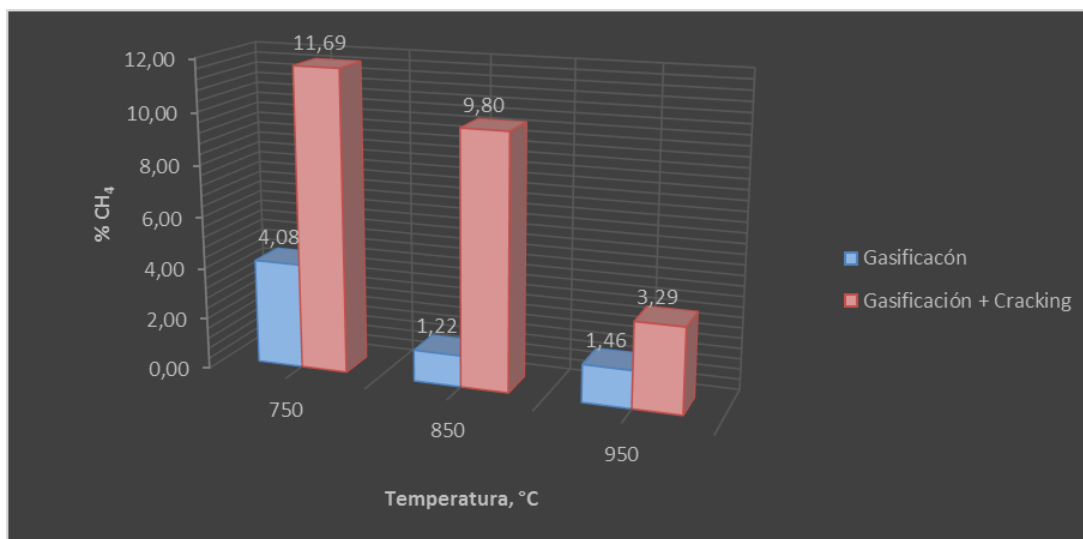


Figura 27. Concentración de CH₄ en los procesos de gasificación y gasificación catalítica.

La relación H₂/CO en el proceso de gasificación catalítica se ubica en valores mayores a tres cuando se experimenta con temperaturas de gasificación de 750°C y 850°C y cracking a 500°C, como lo indica la Figura 28.

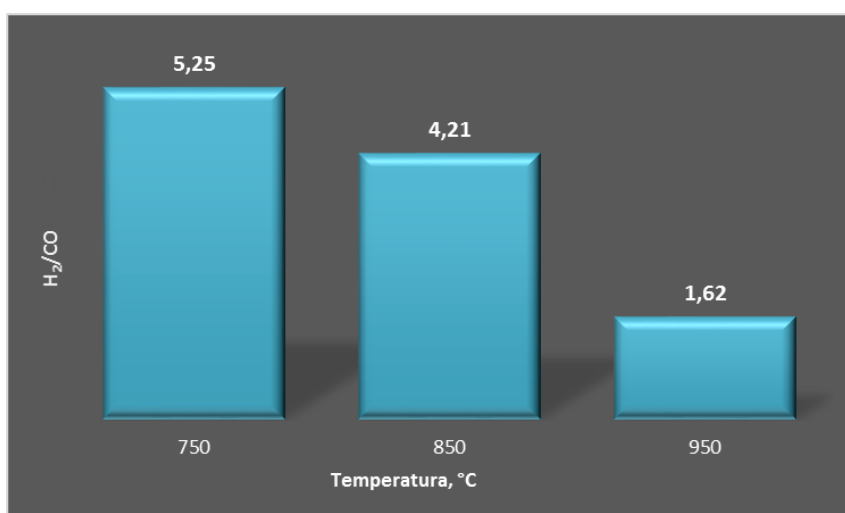


Figura 28. Relación H₂/CO del gas producido en el craqueo de gas producido en la gasificación de cuesco de palma africana.

La disminución de los alquitranes presentes en los productos gaseosos generados en la gasificación de cuesco de palma al pasar por el lecho de dolomita, se ve reflejada por los porcentajes de conversión de alquitranes como se observa en la Figura 29.

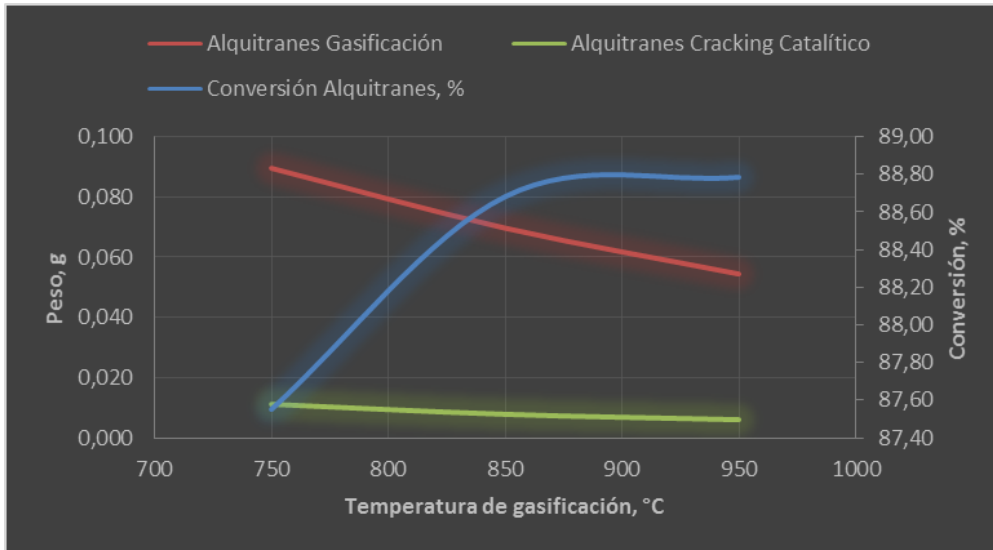


Figura 29. Efecto de la temperatura sobre la conversión de alquitranes.

8. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

8.1. Propiedades de la dolomita como catalizador

La dolomita calcinada está compuesta por óxido de magnesio (MgO) en una gran cantidad, hidróxido de calcio (Ca(OH)₂) en cantidades apreciables y óxido de calcio (CaO) en una menor cantidad.

La disminución del contenido de alquitranes en la composición del gas de síntesis generado en la gasificación de cuesco de palma después de atravesar el lecho de dolomita, confirma sus virtudes como catalizador.

Las diferencias observadas a simple vista y en las imágenes tomadas al microscopio, muestran que la dolomita calcinada es propensa a la inactivación con depósitos de coque en su superficie.

8.2. Gasificación de cuesco de palma africana

En la gasificación de cuesco de palma interactúan la temperatura, flujo de agua y de nitrógeno en la composición final del gas generado. En este trabajo se evidenció que al variar la temperatura de gasificación se obtuvieron relaciones H₂/CO mayores de 3, específicamente a 750°C.

La conversión de cuesco de palma se ve influenciada por la variación de la temperatura de gasificación; a mayor temperatura se beneficia la producción de gas de síntesis y a temperaturas bajas se favorece la producción de biochar y alquitranes.

8.3. Gasificación catalítica de cuesco de palma africana

La utilización de dolomita como catalizador en un lecho empacado después del proceso de gasificación aumenta claramente la concentración de combustibles contenidos en el gas de síntesis (H_2 y CH_4), el CO permanece casi invariable y el CO_2 disminuye fuertemente.

El cracking catalítico mejora la relación H_2/CO del proceso de gasificación hasta valores más altos de los deseados para algunos procesos de manufactura.

La presencia de dolomita como catalizador favorece la disminución de alquitrans generados en el proceso de gasificación y en términos generales también favorece el aumento de gas de síntesis.

8.4. Recomendaciones

La experimentación en lecho fijo empacado limita los resultados, por tanto se recomienda llevar a cabo la experimentación en procesos continuos y en lecho fluidizado o de arrastre.

El aumento en el número de variables de proceso es una opción para lograr la optimización de los procesos de gasificación de cuesco de palma africana y cracking catalítico de alquitrans generados en la gasificación.

El muestreo de gases de tipo puntual puede mejorarse usando un sistema de muestreo continuo en línea con el equipo analizador de gases.

9. BIBLIOGRAFÍA

- [1]. International Energy Agency, IEA. Renewables in Global Energy Supply. 2007.
- [2]. Mustafa Balat, Mehmet Balat, Elif Kirtay, Havva Balat. Main routes for the thermo-conversion of biomass into fuels and chemicals. Part 2: Gasification systems. Energy Conversion and Management. Volume 50. Pages 3158–3168. 2009.
- [3]. T.A. Milne, R.J. Evans. Biomass Gasifier “Tars”: Their Nature, Formation, and Conversion. National Renewable Energy Laboratory. 1998.
- [4]. V. Minkova, M. Rasvigorova, E. Bjornbom, R. Zanzi, T. Budinova, N. Petrov. Effect of water vapour and biomass nature on the yield and quality of the pyrolysis products from biomass. Fuel Processing Technology 70 (2001) 53–61.
- [5]. Ayhan Demirbas. *Biofuels sources, biofuel policy, biofuel economy and global biofuel projections*. Energy Conversion and Management 49 (2008) 2106–2116.
- [6]. L. Fagbemi, L. Khezami, R. Capart. *Pyrolysis products from different biomasses: application to the thermal cracking of tar*. Applied Energy 69 (2001) 293–306.
- [7]. J. Rezaian, N. P. Cheremisinoff. *Gasification Technologies: A Primer for Engineers and Scientists*. Taylor & Francis Group. Boca Ratón. 2005.

- [8]. K.V. Padmaja, N. Atheya, A.K. Bhatnagar, K.K. Singh. *Conversion of Calotropis procera biocrude to liquid fuels using thermal and catalytic cracking*. Fuel 88 (2009) 780–785.
- [9]. Carin Myrén, Christina Hörnell, Emilia Björnbom, Krister Sjöström. *Catalytic tar decomposition of biomass pyrolysis gas with a combination of dolomite and silica*. Biomass and Bioenergy 23 (2002). Página 218.
- [10]. W. Zhang. *Automotive fuels from biomass via gasification*. Fuel Processing Technology (2009) doi:10.1016/j.fuproc.2009.07.010
- [11]. Lopamudra Devi, Krzysztof J. Ptasinski y Frans J.J.G. Janssen. A review of the primary measures for tar elimination in biomass gasification processes. Biomass & Bioenergy. Volumen 24, Número 2, Febrero 2003, Páginas 125-140.
- [12]. Jun Han y Heejoon Kim. The reduction and control technology of tar during biomass gasification/pyrolysis: An overview. Renewable and Sustainable Energy Reviews. Volumen 12. Año 2008. Páginas 397–416.
- [13]. YuHong Qin, HaiFeng Huang, ZhiBin Wu, Jie Feng, Wenying Li y KeChang Xie. Characterization of tar from sawdust gasified in the pressurized fluidized bed. Biomass and Bioenergy. Volumen 31. Año 2007. Páginas 243–249.
- [14]. Chunshan Li y Kenzi Suzuki. Tar property, analysis, reforming mechanism and model for biomass gasification—An overview. Renewable and Sustainable Energy Reviews. Volumen 13. Año 2009. Páginas 594–604.

- [15]. Brandt P, Ulrik Henriksen. Decomposition of tar in gas from updraft gasifier by thermal cracking. In: Proceedings of the first world conference on biomass for energy and industry; 2000.
- [16]. Wen – Ching Yang. Handbook of Fluidization and Fluid – Particle Systems. Siemens Westinghouse Power Corporation. Pittsburg, Pennsylvania, EEUU. 2003.
- [17]. Philipp Hasler, Thomas Nussbaumer. Sampling and analysis of particles and tars from biomass gasifiers. Biomass and Bioenergy. Volumen 18. 2000.
- [18]. Suárez – Ruiz, Isabel, Crelling, John C. Applied Coal Petrology. Academic Press. 2008.
- [19]. Siemens Gusta, Elizabeth. Tar elimination using dolomites during the gasification of pine sawdust. University of Saskatchewan. Saskatoon, Saskatchewan. 2008.
- [20]. M.A.A. Mohammed, A. Salmiaton, W.A.K.G. Wan Azlina, M.S. Mohamad Amran. Gasification of oil palm empty fruit bunches: A characterization and kinetic study. Bioresource Technology. Volumen 110. 2012. Páginas 628–636.
- [21]. Binlin Dou, Jinsheng Gao, Xingzhong Sha, Seung Wook Baek. Catalytic cracking of tar component from high-temperature fuel gas. Applied Thermal Engineering. 2003. Páginas 2229-2239.
- [22]. Bing-Shun Huang, Hsin-Yi Chen, Jia-Hong Kuo, Chu-Hsuan Chang, Ming-Yen Wey. Catalytic upgrading of syngas from fluidized bed air

gasification of sawdust. *Bioresource Technology*. Volumen 110. Abril 2012. Páginas 670–675.

[23]. Kohl, Arthur and Nielsen, Richard. *Gas purification*. Quinta Edición. Gulf Publishing Company. Houston, Texas. 1997.

[24]. Katia Gallucci, Stefano Stendardo, Pier Ugo Foscolo. CO₂ capture by means of dolomite in hydrogen production from syn gas. *International Journal of Hydrogen Energy*. Volumen 33. 2008.

ANEXO A. CARACTERIZACIÓN DE CUESCO DE PALMA AFRICANA Y DOLOMITA

A.1. Análisis próximo completo de cuesco de palma africana

- Humedad residual

$$\text{Humedad residual en muestra, \%} = [(A - B)/C] \times 100$$

A = peso de crisol, tapa y muestra seca, g.

B = peso de crisol vacío y tapa, g.

C = peso de muestra húmeda, g.

- Materia volátil

$$\text{Materia volátil en muestra, \%} = [(A - B)/C] \times 100 - D$$

A = peso de crisol, tapa y muestra calentada, g.

B = peso de crisol vacío y tapa, g.

C = peso de muestra utilizada, g.

D = humedad residual, %.

- Cenizas

$$\text{Ceniza en muestra, \%} = [(A - B)/C] \times 100$$

A = peso de crisol y ceniza, g.

B = peso de crisol vacío, g.

C = peso de muestra utilizada, g.

- Carbono fijo

$$\text{Carbono fijo en muestra, \%} = 100 - A - B - C$$

A = humedad residual, %.

B = materia volátil, %.

C = cenizas, %.

A.2. Densidad aparente de cuesco de palma africana

$$\text{Densidad aparente, } \frac{g}{cm^3} = \frac{\text{masa de cuesco}}{\text{volumen de cuesco}} = \frac{15.52}{20} = 0.776 \frac{g}{cm^3}$$

A.3. Diámetro de partícula promedio

$$\bar{d}_p = \frac{1}{\sum \frac{x_i}{d_{pi}}}$$

donde:

\bar{d}_p : diámetro de partícula promedio

x_i : fracción másica en un intervalo de tamaño

d_{pi} : diámetro de partícula en un intervalo de tamaño

A.4. Densidad aparente de dolomita calcinada

$$\text{Densidad aparente, } \frac{g}{cm^3} = \frac{\text{masa de cuesco}}{\text{volumen de cuesco}} = \frac{22.00}{30} = 0.733 \frac{g}{cm^3}$$

A.5. Relación en volumen cuesco a dolomita

$$\frac{\text{Masa de cuesco}}{\text{Volumen de dolomita}} = \frac{m_c}{m_a/d_a} = \frac{4 \text{ g}}{7 \text{ g} / 0.733 \frac{\text{g}}{\text{cm}^3}} = 0.4$$

A.6. Análisis DRX

Tabla A.6. 1. Condiciones de medición DRX

Scan Axis	Gonio
Start Position [°2Th.]	4,0070
End Position [°2Th.]	69,9950
Step Size [°2Th.]	0,0130
Scan Step Time [s]	59
Measurement Temperature [°C]	25,00
Anode Material	Cu
K-Alpha1 [Å]	1,54060
Generator Settings	40 mA, 45 kV
Goniometer Radius [mm]	240,00

ANEXO B. BALANCES DE MATERIA

B.1. Determinación gravimétrica del contenido de alquitranes

A continuación se presenta el protocolo y datos recolectados para el cálculo del contenido de alquitranes correspondientes a la fracción soluble en agua.

- Pesar el impinger para condensación de agua, seco más bolas de cristal.
- Cronometrar la duración de la prueba.
- Pesar el impinger más bolas de cristal y líquidos condensados.
- Determinar la masa de agua condensada más alquitranes.
- Verter y pesar una alícuota de condensado en una cápsula de Petri.
- Secar en una estufa a 100°C durante una hora y pesar.
- Calcular el contenido de alquitranes.

Tabla B.1.1. Producto líquido del proceso de gasificación

	750°C	850°C	950°C
Impinger	139.3446 g	139.3446 g	139.3446 g
Bolas de cristal	123.2554 g	124.8180 g	123.8771 g
Condensado	8.2036 g	7.1896 g	9.0700 g

B.2. Proceso de gasificación a 750°C y cracking catalítico a 500°C

Tabla B.2.1. Balance de materia del proceso de gasificación a 750°C y cracking catalítico a 500°C.

ALIMENTO	Agua	24.1500 g
	Nitrógeno	3.0235 g
	Biomasa	4.0000 g
PRODUCTO	Biochar	1.1669 g
	Alquitranes 1	0.0897 g
	Alquitranes 2	0.0112 g
	Gases 1 ^a	8.4120 g
	Gases 2 ^a	8.4120 g
	Agua 1	8.1139 g
	Agua 2	4.9678 g

^a Por diferencia de peso con el biochar, alquitranes y agua condensada.

La numeración 1 y 2 corresponden a los puntos de muestreo de gasificación y cracking catalítico, respectivamente.

Nota: El tiempo de la prueba usado para obtener el peso de cada componente es de 68 minutos.

B.3. Proceso de gasificación a 850°C y cracking catalítico a 500°C

Tabla B.3.1. Balance de materia del proceso de gasificación a 850°C y cracking catalítico a 500°C.

ALIMENTO	Agua	29.1333 g
	Nitrógeno	3.6473 g
	Biomasa	4.0000 g
PRODUCTO	Biochar	0.9557 g
	Alquitranes 1	0.0697 g
	Alquitranes 2	0.0079 g
	Gases 1 ^a	9.3853 g
	Gases 2 ^a	9.3853 g
	Agua 1	7.1199 g
	Agua 2	9.8569 g

^a Por diferencia de peso con el biochar, alquitranes y agua condensada.

La numeración 1 y 2 corresponden a los puntos de muestreo de gasificación y cracking catalítico, respectivamente.

Nota: El tiempo de la prueba usado para obtener el peso de cada componente es de 76 minutos.

B.4. Proceso de gasificación a 950°C y cracking catalítico a 500°C

Tabla B.4.1. Balance de materia del proceso de gasificación a 950°C y cracking catalítico a 500°C.

ALIMENTO	Agua	30.6667 g
	Nitrógeno	3.8393 g
	Biomasa	4.0000 g
PRODUCTO	Biochar	0.3559 g
	Alquitranes 1	0.0544 g
	Alquitranes 2	0.0061 g
	Gases 1 ^a	10.1909 g
	Gases 2 ^a	10.1909 g
	Agua 1	9.0156 g
	Agua 2	8.6921 g

^a Por diferencia de peso con el biochar, alquitranes y agua condensada.

La numeración 1 y 2 corresponden a los puntos de muestreo de gasificación y cracking catalítico, respectivamente.

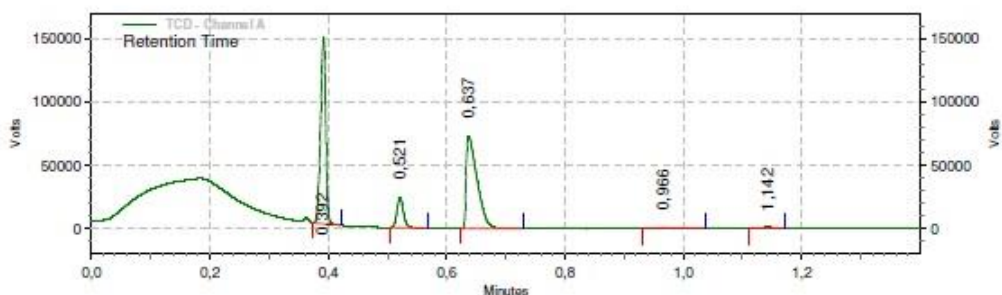
Nota: El tiempo de la prueba usado para obtener el peso de cada componente es de 80 minutos.

ANEXO C. CROMATOGRAMAS DE GASES DE SÍNTESIS

C.1. Gasificación de cuesco de palma africana

Area % Report

Data File: C:\EZChrom Elite Enterprise Projects Default Data Eder\13122013\µGC 3000 Agilent.10006
 13-12-2013 15-15-22.dat
 Method: C:\EZChrom Elite Enterprise Projects Default Method GasifHP.met
 Acquired: 13/12/2013 15:15:47
 Printed: 13/12/2013 16:36:20



TCD - Channel A Results

Retention Time	Area	Area %	Height	Height %
0.392	89805	44.01	146959	59.73
0.521	18190	8.92	23927	9.73
0.637	92547	45.36	72729	29.56
0.966	1559	0.76	1041	0.42
1.142	1936	0.95	1363	0.55

Totals	204037	100.00	246019	100.00
--------	--------	--------	--------	--------

TCD - Channel B Results

Retention Time	Area	Area %	Height	Height %
0.243	60514	100.00	160151	100.00

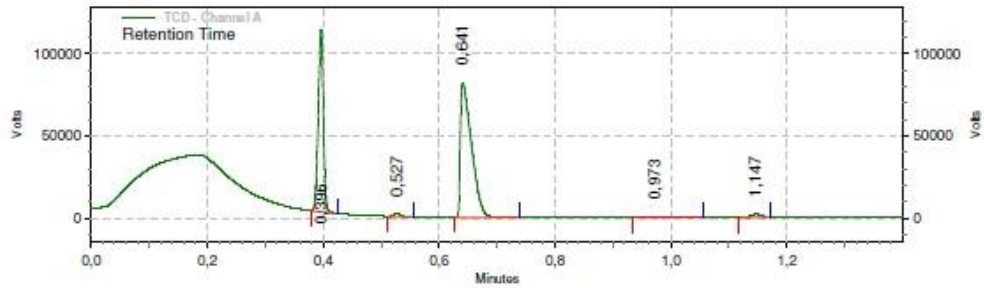
Totals	60514	100.00	160151	100.00
--------	-------	--------	--------	--------

Figura C.1. 1. Cromatograma de gas de síntesis del proceso de gasificación a 750°C.

Nota: Análisis realizado con el Micro GC Agilent 3000.

Area % Report

Data File: C:\EZChrom Elite\Enterprise\Projects\Default\Data\Eder\02122013\µGC 3000 Agilent.10006
 02-12-2013 18-56-26.dat
 Method: C:\EZChrom Elite\Enterprise\Projects\Default\Method\GasifHP.met
 Acquired: 02/12/2013 18:56:46
 Printed: 02/12/2013 20:08:20



**TCD - Channel A
Results**

Retention Time	Area	Area %	Height	Height %
0.396	68317	37.58	110621	56.23
0.527	1322	0.73	1815	0.92
0.641	108930	59.91	81953	41.66
0.973	501	0.28	341	0.17
1.147	2743	1.51	1994	1.01

Totals	181813	100.00	196724	100.00
---------------	--------	--------	--------	--------

**TCD - Channel B
Results**

Retention Time	Area	Area %	Height	Height %
0.243	67396	99.08	172820	99.84
1.133	629	0.92	281	0.16

Totals	68025	100.00	173101	100.00
---------------	-------	--------	--------	--------

Figura C.1. 2. Cromatograma de gas de síntesis del proceso de gasificación a 850°C.

Nota: Análisis realizado con el Micro GC Agilent 3000.

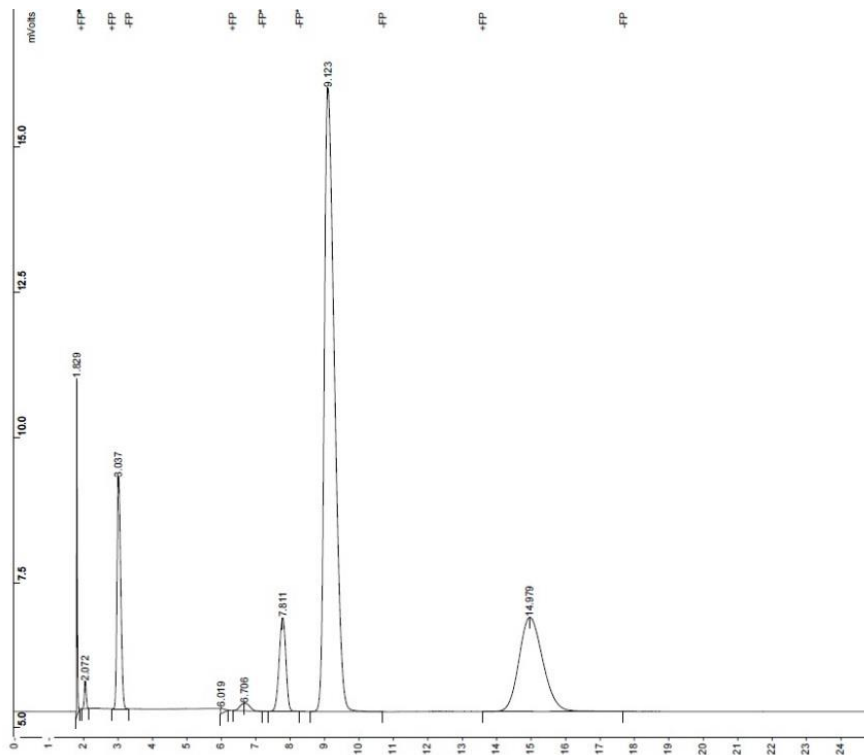


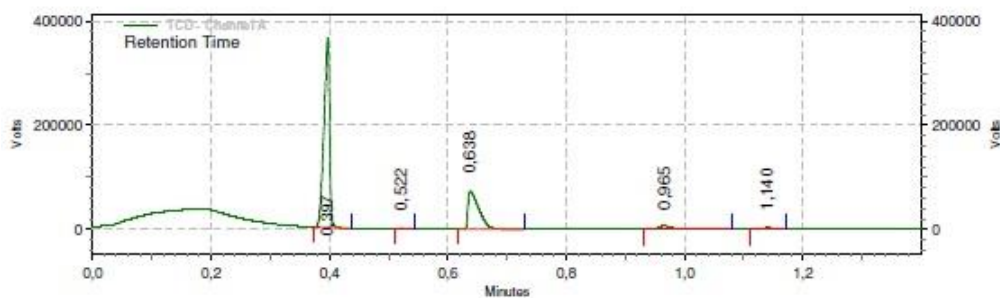
Figura C.1. 3. Cromatograma de gas de síntesis del proceso de gasificación a 950°C.

Nota: Análisis realizado con el GC Varian 3800.

C.2. Gasificación catalítica de cuesco de palma africana

Area % Report

Data File: C:\EZChrom Elite\Enterprise\Projects\Default\Data\Eder\13122013\µGC 3000 Agilent.10006
 13-12-2013 15:47:02.dat
 Method: C:\EZChrom Elite\Enterprise\Projects\Default\Method\GasifHP.met
 Acquired: 13/12/2013 15:47:12
 Printed: 13/12/2013 16:31:51



TCD - Channel A

Results

Retention Time	Area	Area %	Height	Height %
0.397	239409	68.65	363497	81.08
0.522	934	0.27	1293	0.29
0.638	93148	26.71	73232	16.33
0.965	10548	3.02	7012	1.56
1.140	4708	1.35	3289	0.73
Totals	348747	100.00	448323	100.00

TCD - Channel B

Results

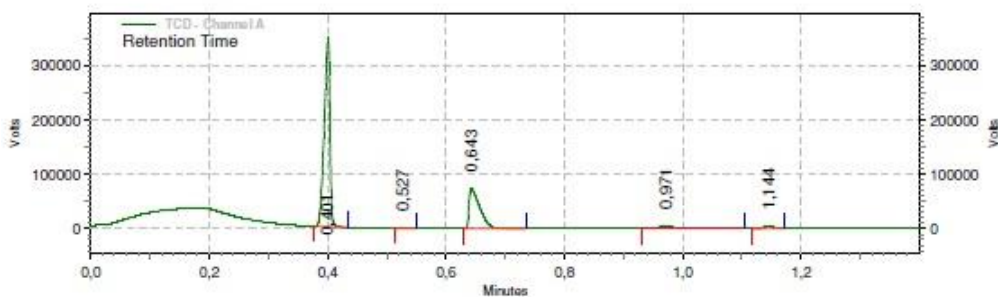
Retention Time	Area	Area %	Height	Height %
0.245	3300	100.00	9138	100.00
Totals	3300	100.00	9138	100.00

Figura C.2. 1. Cromatograma de gas de síntesis del proceso de gasificación a 750°C y cracking catalítico a 500°C.

Nota: Análisis realizado con el Micro GC Agilent 3000.

Area % Report

Data File: C:\EZChrom Elite\Enterprise\Projects\Default\Data\Eder\02122013\µGC 3000 Agilent.10006
 02-12-2013 18:33:16.dat
 Method: C:\EZChrom Elite\Enterprise\Projects\Default\Method\GasifHP.met
 Acquired: 02/12/2013 18:33:42
 Printed: 02/12/2013 20:12:08



TCD - Channel A Results

Retention Time	Area	Area %	Height	Height %
0.401	231618	68.51	348891	80.59
0.527	1111	0.33	1535	0.35
0.643	91294	27.01	72710	16.80
0.971	8506	2.52	5803	1.34
1.144	5526	1.63	3960	0.91

Totals	338055	100.00	432899	100.00
--------	--------	--------	--------	--------

TCD - Channel B Results

Retention Time	Area	Area %	Height	Height %
0.246	3371	100.00	9493	100.00

Totals	3371	100.00	9493	100.00
--------	------	--------	------	--------

Figura C.2. 2. Cromatograma de gas de síntesis del proceso de gasificación a 850°C y cracking catalítico a 500°C.

Nota: Análisis realizado con el Micro GC Agilent 3000.

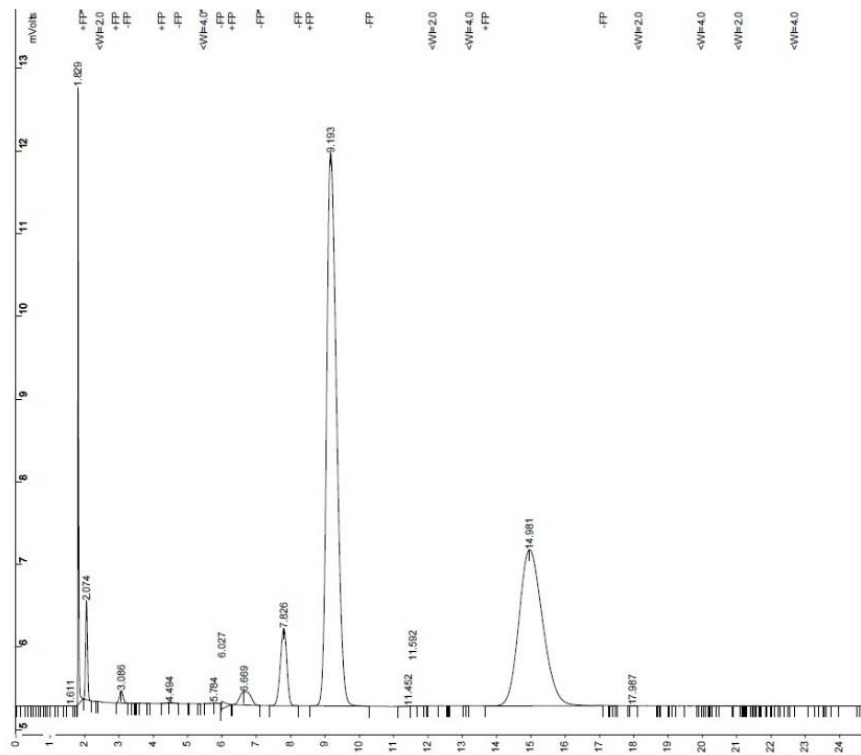


Figura C.2. 3. Cromatograma de gas de síntesis del proceso de gasificación a 950°C y cracking catalítico a 500°C.

Nota: Análisis realizado con el GC Varian 3800.

C.3. Tiempos de retención del cromatógrafo VARIAN 3800

Tabla C.3. 1. Tiempo de retención de especies gaseosas en cromatógrafo Varian 3800

Especie gaseosa	Tiempo de retención, min
Hidrógeno	6.670 – 6.721
Oxígeno	7.802 – 7.806
Nitrógeno	8.980 – 9.130
Metano	2.070 – 2.078
Monóxido de carbono	14.970 – 15.056
Dióxido de carbono	3.030 – 3.065

C.4. Tiempos de retención del cromatógrafo AGILENT 3000

Tabla C.3. 2. Tiempo de retención de especies gaseosas en cromatógrafo Agilent 3800

Especie gaseosa	Tiempo de retención, min
Hidrógeno	0.392
Oxígeno	0.521
Nitrógeno	0.637
Metano	0.966
Monóxido de carbono	1.142
Dióxido de carbono	0.243

ANEXO D. AJUSTE DE BOMBA PERISTÁLTICA

D.1. Ajuste de bomba peristáltica

Tabla D.1. Datos de abertura y flujo volumétrico de bomba peristáltica

ABERTURA	TIEMPO (s)	VOLUMEN (mL)	FLUJO (mL/h)
4	3137	40	46
6	2641	50	68
8	1943	50	93
9	1709	50	105

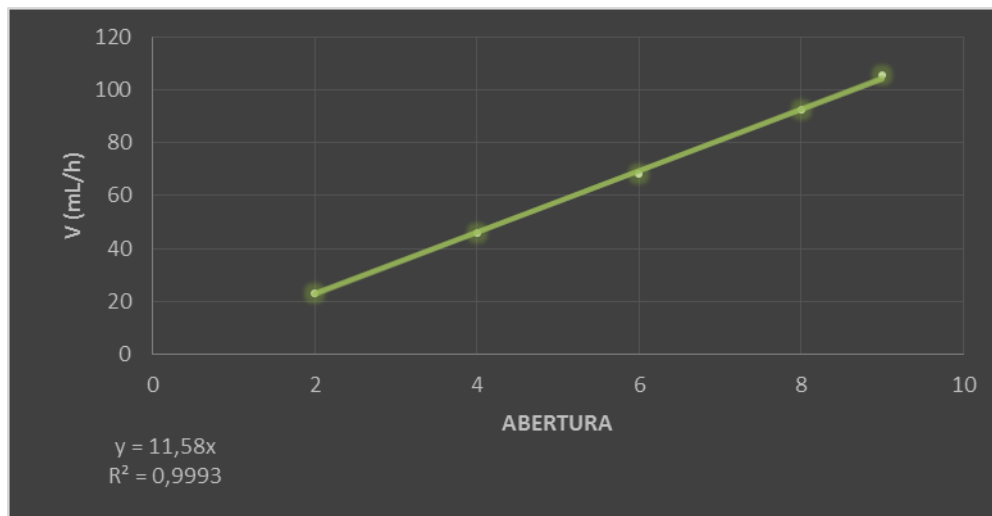


Figura D.1. Curva de ajuste de la bomba peristáltica