

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE BAJA CALIFORNIA
INSTITUTO DE INGENIERÍA
MAESTRÍA Y DOCTORADO EN CIENCIAS E INGENIERÍA



“Obtención de gas de síntesis a partir de la gasificación del eucalipto y simulación del proceso en ASPEN PLUS®”

**TESIS QUE PARA OBTENER EL GRADO DE
MAESTRO EN CIENCIAS
PRESENTA**

HERNÁN DE JESÚS BUENDÍA VERGARA

**DIRECTORA
DRA. GISELA MONTERO ALPÍREZ**

Mexicali, B. C.

Enero de 2018

ÍNDICE

LISTA DE FIGURAS	v
LISTA DE TABLAS.....	vii
RESUMEN	viii
DEDICATORIA.....	xii
AGRADECIMIENTOS	xiii
INTRODUCCIÓN	1
Justificación.....	8
Hipótesis.....	9
Objetivos	10
Objetivo general	10
Objetivos específicos	10
CAPÍTULO I. GASIFICACIÓN DE LA BIOMASA	11
1.1 Procesos termoquímicos	11
1.1.1 Pirólisis	11
1.1.2 Combustión	12
1.1.3 Gasificación.....	12
1.2 Tipos de gasificador	15
1.2.1 Gasificador <i>updraft</i>	15
1.2.2 Gasificador <i>downdraft</i>	16
1.2.3 Gasificador de <i>lecho fluidizado</i>	17
1.3 Descripción del equipo experimental.....	18
CAPÍTULO II. METODOLOGÍA.....	20
2.1 Caracterización fisicoquímica de las podas de eucalipto	20
2.1.1 Preparación de la muestra	20
2.1.2 Determinación del poder calorífico	21

2.1.2.1 Poder calorífico superior.....	21
2.1.2.2 Poder calorífico inferior.....	21
2.1.3 Análisis próximo	22
2.1.3.1 Humedad.....	22
2.1.3.2 Materia volátil	22
2.1.3.3 Cenizas	23
2.1.3.4 Carbono fijo	23
2.1.4 Análisis de composición química.....	23
2.1.4.1 Extracción en solvente orgánico.....	24
2.1.4.2 Extracción en agua caliente	25
2.1.4.3 Determinación de lignina	27
2.1.4.4 Determinación de holocelulosa	28
2.1.4.5 Determinación de celulosa	29
2.1.4.6 Determinación de hemicelulosa	31
2.2 Gasificación de biomasa	31
2.2.1 Preparación de la biomasa.....	31
2.2.3 Toma de muestra del gas de síntesis.....	32
2.2.4 Caracterización del gas de síntesis.....	33
CAPÍTULO III. SIMULACIÓN DE UN GASIFICADOR DE BIOMASA	
DOWNDRAFT USANDO ASPEN PLUS®.....	35
3.1 Generalidades	35
3.2 Simulación del proceso	35
3.3 Elementos no convencionales.....	36
3.4 Reacciones químicas	36
3.5 Diagrama de flujo	37
3.5.1 Reactor Ryield.....	37
3.5.2 Separador.....	38

3.5.3 Reactor RGibbs	39
3.5.4 Reactor REquil	40
3.5.5 Reactor RStoic	40
3.5.6 Cyclone	41
3.6 Condiciones de operación	42
3.6.1 Cálculo del aire estequiométrico en la gasificación de la biomasa	42
3.7 Análisis de sensibilidad	44
CAPÍTULO IV. ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS.....	45
4.1 Poder calorífico	45
4.2 Resultados de la caracterización fisicoquímica	45
4.2.1 Análisis próximo	45
4.2.2 Análisis de composición química.....	46
4.2.3 Análisis último	49
4.3 Resultados de la gasificación del eucalipto	49
4.4 Resultados de simulación en ASPEN PLUS®	53
4.4.1 Análisis de sensibilidad	54
CONCLUSIONES.....	57
REFERENCIAS.....	59
OTROS PRODUCTOS ACADÉMICOS.....	63
ANEXOS	65

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Ciclo del Carbono.....	2
Figura 2. Estructura de la celulosa.....	4
Figura 3. Xilano.....	4
Figura 4. Principales monosacáridos en la hemicelulosa.....	5
Figura 5. Monómeros de la lignina.....	5
Figura 6. Estructura de la lignina en maderas blandas.....	6
Figura 7. Estructura de la lignina en maderas duras.....	7
Figura 8. Esquema de un gasificador <i>updraft</i>	15
Figura 9. Esquema de un gasificador <i>downdraft</i>	17
Figura 10. Power Pallet PP20.....	18
Figura 11. Molino para la preparación de las muestras.....	20
Figura 12. Tamizado del eucalipto, tamiz N° 35.....	20
Figura 13. Bomba Calorimétrica IKA C2000.....	21
Figura 14. Extracción Soxhlet con acetona.....	25
Figura 15. Extracción con agua caliente.....	26
Figura 16. Filtrado al vacío con un embudo Büchner.....	26
Figura 17. Determinación de lignina.....	28
Figura 18. Determinación de holocelulosa.....	29
Figura 19. Determinación de celulosa.....	30
Figura 20. Recolección de eucalipto.....	31
Figura 21. Diagrama de preparación de la biomasa.....	32
Figura 22. Adaptador para la toma de muestras.....	33
Figura 23. Jeringa para CG.....	33
Figura 24. CG Clarus 400.....	34
Figura 25. Reactor RYield.....	38
Figura 26. Separador.....	38
Figura 27. Reactor RGibbs.....	39
Figura 28. Reactor REquil.....	40
Figura 29. Reactor RStoic.....	41
Figura 30. Cyclone.....	42
Figura 31. Diagrama del gasificador <i>downdraft</i>	43

Figura 32. Humedad.	Figura 33. Materia volátil.	Figura 34. Cenizas...	46
Figura 35. Extractos acuosos.....			47
Figura 36. Lignina insoluble en ácido.....			47
Figura 37. Residuo de lignina.....			48
Figura 38. Residuo de holocelulosa.....			48
Figura 39. Cromatograma del gas de síntesis a los 40 min.....			52
Figura 40. Cromatograma del gas de síntesis a los 60 min.....			53
Figura 41. Variación de la fracción molar de los principales compuestos del gas de síntesis.....			55
Figura 42. Variación de la fracción molar de contaminantes en el gas de síntesis.....			56

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Especificaciones técnicas del gasificador Power Pallet PP20.....	19
Tabla 2. Análisis próximo y último del eucalipto	36
Tabla 3. Reacciones homogéneas.....	37
Tabla 4. Reacciones heterogéneas.....	37
Tabla 5. Condiciones de operación.....	42
Tabla 6. Poder calorífico del eucalipto.....	45
Tabla 7. Análisis próximo de las podas de eucalipto.....	45
Tabla 8. Análisis de la composición química.....	49
Tabla 9. Análisis último del eucalipto.....	49
Tabla 10. Composición del gas de síntesis.....	51
Tabla 11. Condiciones de operación del GEK PP20 POWER PALLET	51
Tabla 12. GEK PP20 POWER PALLET vs ASPEN PLUS®.....	53

RESUMEN

Mexicali es un extenso valle y es una de las regiones agrícolas con gran importancia en México, debido a la gran actividad agrícola y variedad de cultivos. Además, existe una gran abundancia de eucalipto (*Eucalyptus camaldulensis*), que se caracteriza por ser un árbol de rápido crecimiento cuyas podas pueden ser utilizadas para la gasificación.

Los residuos generados por el eucalipto representan una fuente de energía química que puede ser transformada en energía eléctrica a través de la gasificación. El objetivo del presente proyecto es establecer las mejores condiciones de operación del gasificador GEK PP20 Power Pallet, para operar con podas de eucalipto, buscando la mejor eficiencia y el mejor rendimiento.

Para tal fin es necesario evaluar de antemano las propiedades fisicoquímicas de esta biomasa. Los análisis para obtener dicha información, se realizaron de acuerdo con las normas ASTM y las TAPPI. Se determinó el poder calorífico superior e inferior, análisis próximo, análisis último y el análisis de la composición química.

Experimentalmente el poder calorífico superior obtenido fue de 17.331 MJ/kg y el inferior de 16.188 MJ/kg. Mediante el análisis próximo se determinó que el eucalipto posee 6.08% de humedad, 72.53% de materia volátil, 5.13% de cenizas y 22.34% de carbono fijo. Con respecto a la composición química se obtuvieron 3.18% de extraíbles en cetona, 12.68% de extraíbles en agua caliente, 25.56% de lignina y 64.09% de holocelulosa.

Con el análisis último se determinó que el eucalipto está compuesto por 44.05% de carbono, 5.24% de hidrógeno, 38.85% de oxígeno y 0.61% de nitrógeno. El gas de síntesis obtenido experimentalmente tiene un poder calorífico de 0.47 MJ/Nm³ con una composición porcentual de 0.11% de hidrógeno, 12.85% de monóxido de carbono y 0.6% de metano, que son los gases que le aportan valor energético al gas de síntesis.

Mediante la simulación con ASPEN PLUS® se calculó un poder calorífico superior de 0.77 MJ/Nm³. Este valor tiene una diferencia de 0.3 MJ/Nm³ con respecto al gas obtenido experimentalmente. La diferencia principal se debe a que se producen 0.23% de hidrógeno adicional en los resultados de la simulación.

ABSTRACT

Mexicali is an extensive Valley and it is one of the most important agricultural regions in Mexico, due to the great agricultural activity and variety of crops. In addition, there is a great abundance of eucalyptus (*Eucalyptus camaldulensis*), characterized by fast growth and its branches can be used for gasification.

The residues generated by eucalyptus represent one source of chemical energy that can be transformed into electric energy through the gasification process. The aim of this research project was to establish the best operating conditions of the gasifier GEK PP20 Power Pallet for processing eucalyptus branches, with the purpose of finding the best efficiency and performance.

Therefore, it was necessary to evaluate beforehand the physicochemical properties of the eucalyptus biomass. The analysis for obtain this information was done according to international standards such as ASTM and TAPPI. The high and low heating value, proximate analysis, ultimate analysis and the chemical composition analysis were determined.

The experimental results indicate that the higher heating value was 17.331 MJ/kg and the lower heating value was 16.188 MJ/kg. It was evaluated that eucalyptus contains 6.08% moisture, 72.53% volatile matter, 5.13% ash and 22.34% fixed carbon. The chemical composition highlighted 3.18% extractive ketone, 12.68% extractive hot water, 25.56% lignin and 64.09% holocellulose.

The ultimate analysis showed that eucalyptus has 44.05% carbon, 5.24% hydrogen, 38.85% oxygen and 0.61% nitrogen. The experimental synthesis gas obtained has a higher heating value of 0.47 MJ/Nm³ with percentage composition of 0.11% hydrogen, 12.85% carbon monoxide, and 0.6% methane, which are the gases that give the energy content of the synthesis gas.

A higher heating value of 0.77 MJ/Nm³ by simulation through ASPEN PLUS[®] was obtained. This value has a difference of 0.3 MJ/Nm³ with respect to the gas

obtained experimentally. The principal difference is due to production of 0.23% more hydrogen in the simulation.

DEDICATORIA

Este trabajo está dedicado con todo mi cariño a mis padres, María Vergara y Hernan Buendía, quienes me han llevado y guiado a lo largo de los años a cumplir cada uno de mis sueños. Les estaré eternamente agradecido por su invaluable apoyo incondicional.

A mis hermanos Oswaldo, Dayana, Yineth y Fabiola por estar a mi lado en todos los momentos difíciles y darme su apoyo en los momentos que más lo necesitaba. Los quiero mucho y llevaré en mi memoria todos esos recuerdos invaluable.

A mis amigos Ricardo Torres y Mary Triny Beleño que a lo largo de estos 10 años me han mostrado lo que verdaderamente es una amistad.

AGRADECIMIENTOS

Primeramente quiero darle gracias a Dios, todo poderoso por acompañarme en todos los pasos y decisiones que me han llevado hasta este momento de mi vida.

Quiero agradecer al personal académico y administrativos de CONACYT, al Instituto de Ingeniería de la Universidad Autónoma del Estado de Baja California y la Universidad de Cartagena, por su apoyo durante la realización del presente trabajo de investigación.

Quiero expresar mi agradecimiento a mi directora de tesis, la Dra. Gisela Montero Alpírez, por su apoyo incondicional, sus consejos y dirección que me han guiado sabiamente a alcanzar el objetivo.

A todos mis familiares y amigos colombianos que ocupan un lugar en mi corazón y desde la distancia me comparten su cariño, comprensión y ánimos para motivarme a seguir adelante.

A todos mis amigos mexicanos. Gracias por hacerme un lugar en sus vidas, apoyarme incondicionalmente y permitirme en estos dos años una gran experiencia de vida.

INTRODUCCIÓN

A lo largo de los siglos el ser humano ha recurrido cada vez más a la búsqueda de fuentes de energía, para una gran variedad de aplicaciones. Las cuales permiten mejorar su condición de vida mediante la utilización de los combustibles fósiles. Por medio de estos se obtiene energía capaz de realizar un trabajo, a través de la reacción de combustión en la cual se genera productos gaseosos y compuestos que progresivamente van deteriorando el medio ambiente. Lo que provoca el aumento de la temperatura del planeta debido a las emisiones de gases de invernadero.

El Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC) ha reportado que las continuas emisiones de los combustibles fósiles, han dado lugar al aumento de la temperatura desde 1.4 hasta 5.8°C en el período 1990 al 2010 [1]. Por lo tanto, se busca implementar nuevas formas de obtener energía, que minimicen el impacto al medio ambiente. Tales como la energía generada por la biomasa. La biomasa es cualquier materia orgánica que se deriva de las plantas (fitomasa), o de los animales (zoomasa). Como ejemplo tenemos la madera de los árboles, los residuos generados de la actividad agrícola y los desechos de origen animal [2].

La biomasa es una fuente de energía renovable con propiedades específicas y en comparación con la energía solar y eólica, la biomasa almacena energía en sí misma. Además es un combustible versátil que puede ser utilizado para la producción de combustibles, biogás y la generación de electricidad. La energía contenida en la biomasa proviene del sol, a través de la fotosíntesis. Cuando la biomasa es utilizada en el proceso de la combustión, el carbono reacciona con el oxígeno del aire para formar dióxido de carbono que se libera en la atmósfera.

Si se consigue una combustión completa, la mayor parte del dióxido de carbono producido en la combustión es equivalente al absorbido por el árbol durante su crecimiento, como se observa en la Figura 1 [2]. Por el contrario, al quemar combustibles fósiles, estos contribuyen a una adición neta de CO₂ en la

atmósfera liberando enormes cantidades de este gas en un tiempo muy corto de unos 200 años [3-7].

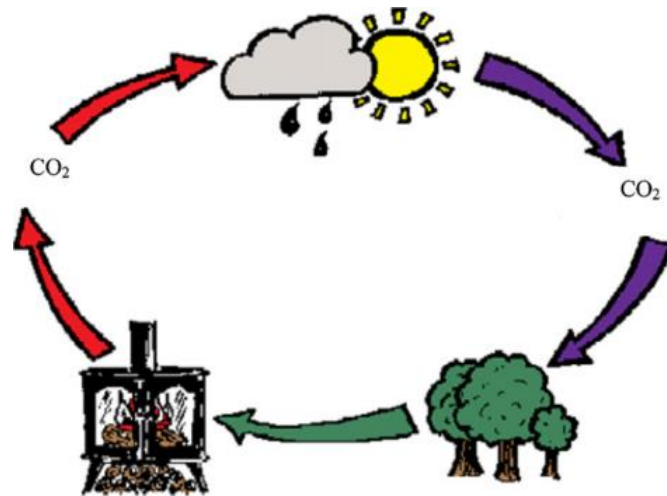


Figura 1. Ciclo del Carbono.

Composición y caracterización de la biomasa lignocelulósica

La identificación y caracterización de la composición físicoquímica de biomasa es el paso inicial y más importante durante la investigación y aplicación como combustible. Para tal fin, se hace uso del poder calorífico, análisis próximo, análisis último y la composición química.

Análisis próximo

El análisis inmediato o próximo proporciona el contenido de humedad, materia volátil, cenizas y carbono fijo, expresados en porcentaje en peso. La principal importancia de este análisis radica, en que permite identificar la fracción de la biomasa en la que se encuentra almacenada su energía química (compuestos volátiles y carbono fijo) y la fracción inerte (humedad y cenizas).

En la biomasa se distinguen dos tipos de humedad, la humedad libre y la humedad en equilibrio. La humedad libre es el agua presente en la biomasa y que se desprende fácilmente por secado cuando está expuesta al medioambiente hasta alcanzar la humedad en equilibrio con las condiciones dadas de humedad y temperatura.

La materia volátil es la porción del combustible que se libera en forma de gases y vapores (hidrocarburos) al descomponerse térmicamente la materia que compone la biomasa. Las cenizas son los residuos inorgánicos que quedan después de la combustión del carbono fijo y varían en su composición dependiendo de la fuente de la biomasa.

El carbono fijo es una medida es una medida del material combustible que queda tras la volatilización de los compuestos ligeros. La relación entre el porcentaje de materia volátil y el porcentaje de carbono fijo en la biomasa indica la facilidad con la cual se produce su ignición. Cuanto mayor es el índice más reactiva es la materia y menor es el tiempo de residencia necesario hasta la combustión completa [8].

Análisis último

El análisis último o elemental, permite establecer el porcentaje en peso de los principales elementos con mayor presencia en la estructura molecular de la materia orgánica, como son el carbono (C), hidrógeno (H), nitrógeno (N), oxígeno (O) y azufre (S) [8].

Análisis de la composición química

La biomasa lignocelulósica está compuesta por celulosa (25-50% P/P), hemicelulosa (15-40% P/P), lignina (10-40 % P/P), sustancias extraíbles (0-15% P/P), y generalmente una pequeña fracción de elementos inorgánicos [9].

La celulosa es un polisacárido constituido por la combinación lineal de D-glucosa conectadas entre sí por enlaces β (1-4) glucosídico, tal como se muestra en la Figura 2 [10]. Este polímero tiene un alto grado de polimerización (DP, número de unidades), que pueden ser mayor de 10,000. La celulosa posee una alta tendencia a formar enlaces intra e intermoleculares con el hidrógeno, dichas moléculas ordenadas en forma lineal dentro de las microfibras crea una estructura altamente cristalina [10-12].

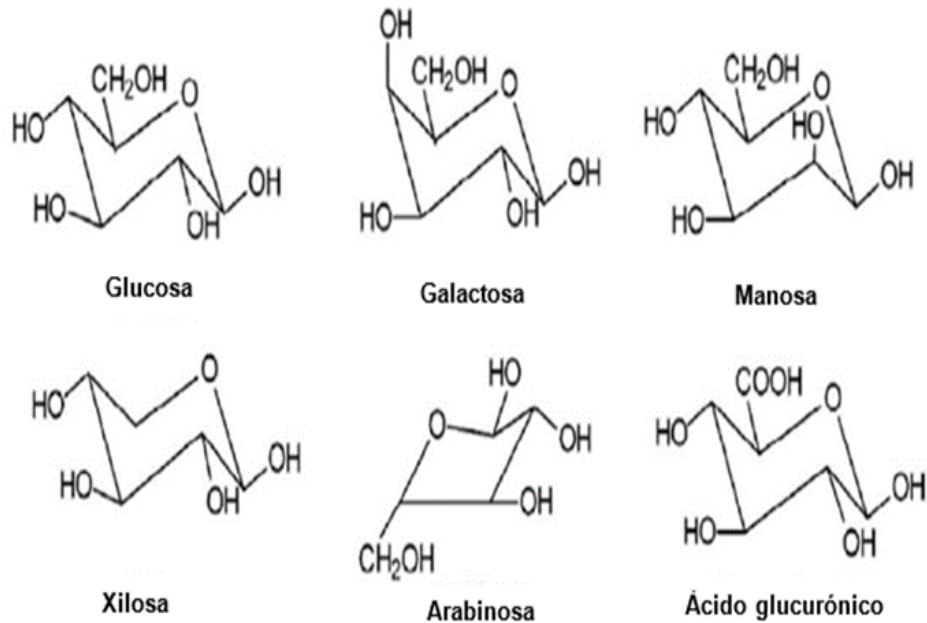


Figura 4. Principales monosacáridos en la hemicelulosa.

La fracción total de los polisacáridos (holocelulosa) se compone principalmente de celulosa y hemicelulosa. Otros polisacáridos presentes en la biomasa lignocelulósica son las pectinas. La pectina es un polímero de unidades de ácido galacturónico (hexosa) con unidades dispersas de ramonosa, galactosa y rabinosa [10, 15].

La lignina está formada por compuestos fenólicos de alto peso molecular, entre cruzado aleatoriamente. Los principales componentes de la lignina son los alcoholes P-cumarílico, coniferílico y alcohol sinapílico (véase la Figura 5 [16]).

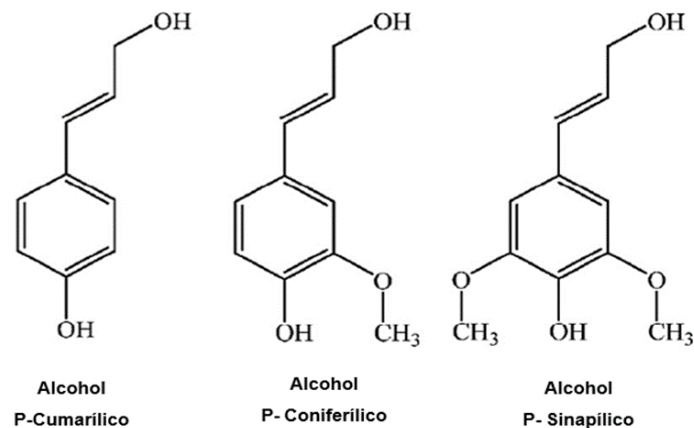


Figura 5. Monómeros de la lignina.

En maderas blandas la lignina se compone principalmente de unidades de alcohol coniferílico (con un grupo metoxi) con bajas cantidades de alcohol P-cumarílico, como se observa en la Figura 6 [16].

La lignina en maderas duras contiene además, unidades de alcohol sinapílico con dos grupos metoxi, (ver Figura 7 [17]). La lignina es más abundante y posee un mayor grado de polimerización en maderas blandas que en las duras [11, 16, 17].

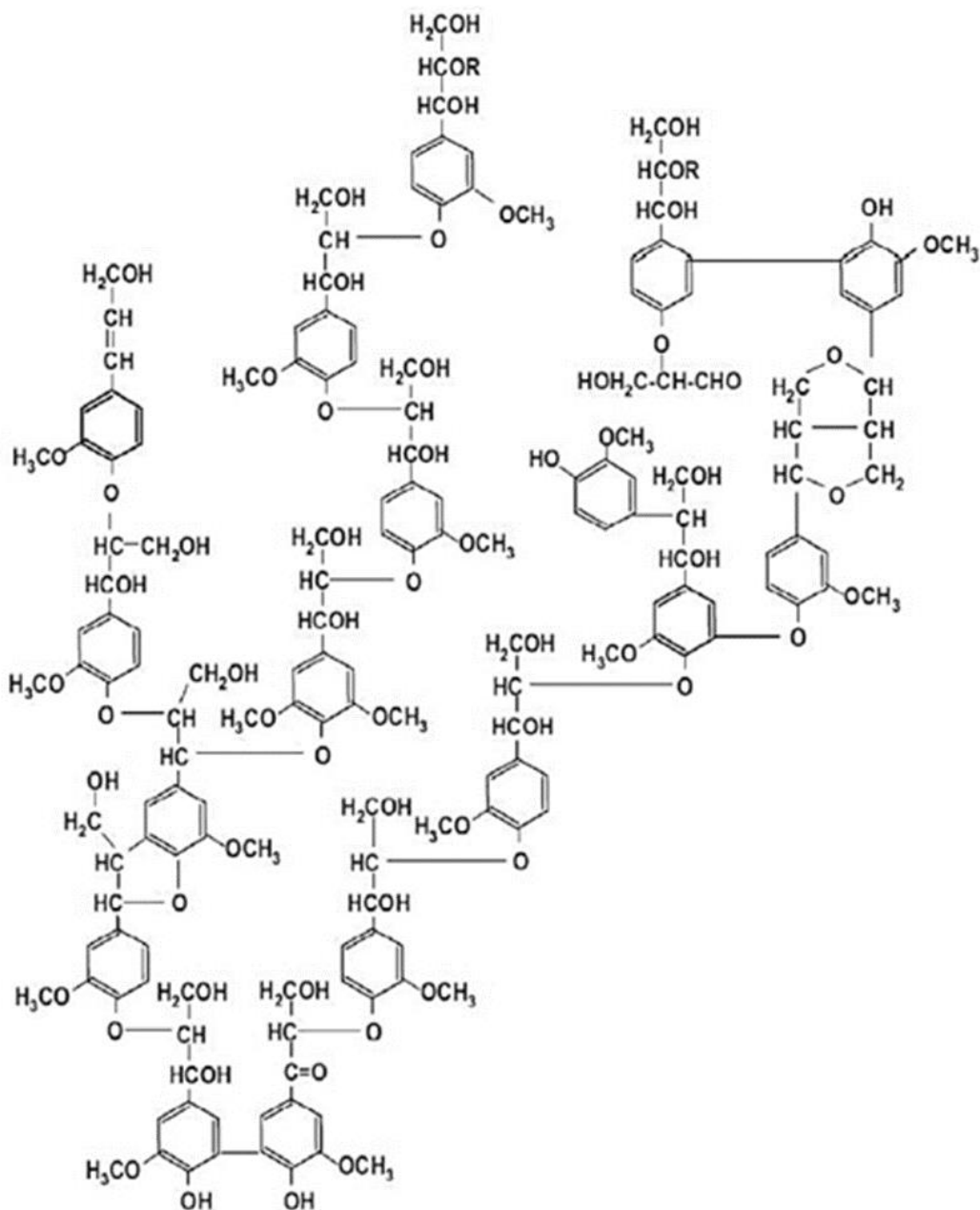


Figura 6. Estructura de la lignina en maderas blandas.

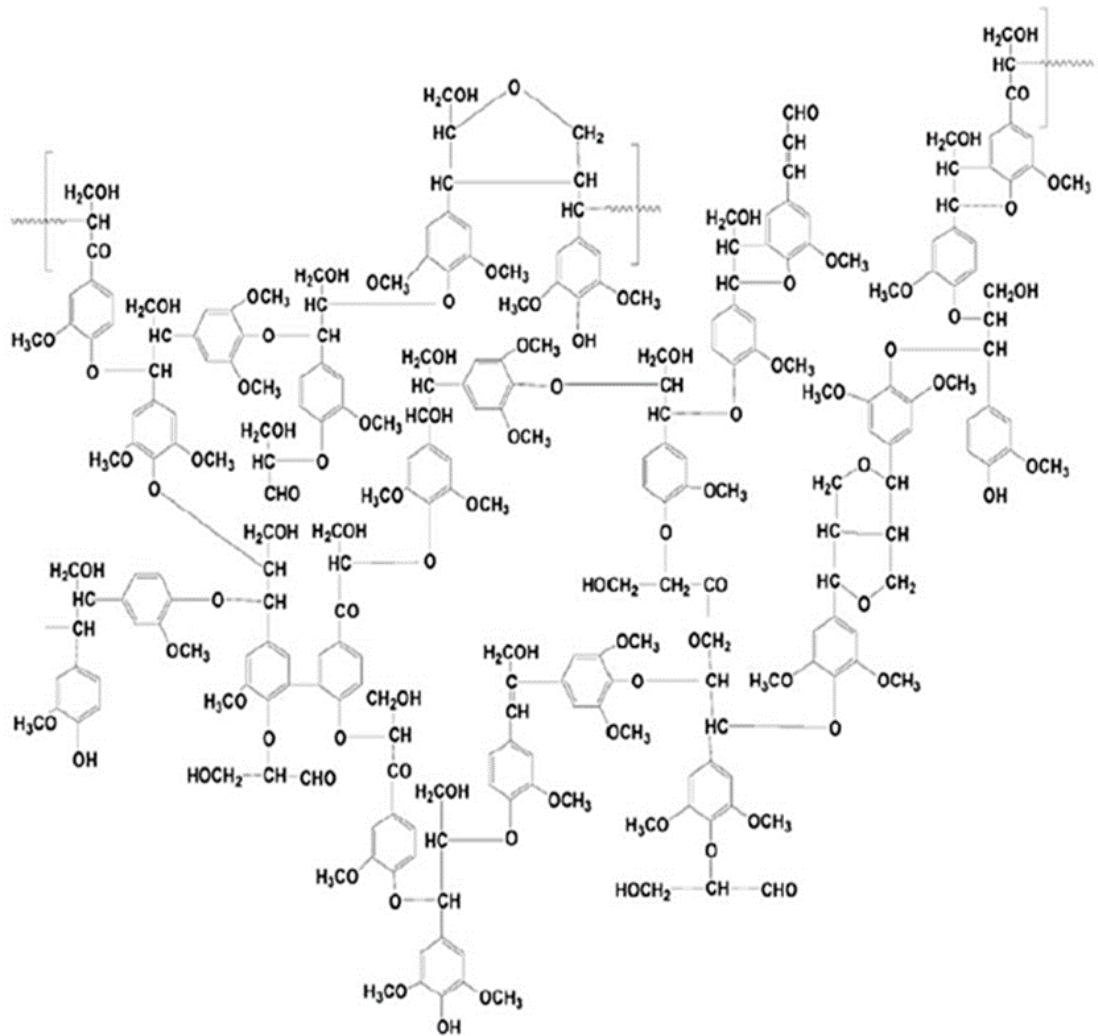


Figura 7. Estructura de la lignina en maderas duras.

Los extractivos son sustancias que pueden ser separadas por sucesivos tratamientos de la biomasa con solventes y que pueden ser recuperados por evaporación del solvente. Estos contribuyen a propiedades características tales como el color, olor, sabor y la resistencia a la descomposición de la madera. Los extractivos están clasificados acordes a sus constituyentes lipofílicos e hidrofílicos [18, 19].

Los extractos de los compuestos lipofílicos, usualmente son llamados resinas, estos son solubles en líquidos de baja polaridad tales como el hexano y son principalmente lípidos con un bajo contenido de oxígeno. Estos pueden ser compuestos no cíclicos tales como las grasas, ácidos grasos, ceras o compuestos cíclicos tales como los terpenoides (incluyendo las resinas acidas)

y esteroides. Los extractos de los compuestos hidrofílicos son principalmente compuestos fenólicos, tales como lignanos, pero también pueden ser azúcares. Generalmente, hay que más extractos en la madera blanda que en la madera dura.

Los elementos inorgánicos presentes en la biomasa, están usualmente en bajas concentraciones comparado a los elementos orgánicos. En orden decreciente en abundancia en masa, los principales elementos encontrados son comúnmente C, O, H, N, Ca, K, Si, Mg, Al, S, Fe, P, Cl, Na, Mn y Ti [20].

Mexicali es la ciudad capital del Estado de Baja California, colinda al norte con Estados Unidos de América; al este con Estado de Sonora y el Golfo de California; al sur con el municipio de Ensenada; al oeste con los municipios de Ensenada y Tecate [21]. Mexicali es un extenso valle y es una de las regiones agrícolas con gran importancia en México, debido a la gran actividad agrícola como es el cultivo de trigo, algodón. Además, existe una gran abundancia de eucalipto (*Eucalyptus camaldulensis*), que se caracteriza por ser un árbol de rápido crecimiento cuyas podas pueden ser utilizadas para la gasificación.

En general, la gasificación es un proceso termoquímico que transforma la biomasa en un gas combustible o gas de síntesis el cual posee un poder calorífico menor a 6 MJ/m^3 cuando se utiliza aire como agente gasificante y de $10 - 12 \text{ MJ/m}^3$ cuando se utiliza oxígeno. Dependiendo de la materia prima, la temperatura, presión y otras variables, que pueden ser controladas y optimizadas para cada tipo de biomasa. Se puede generar gas de síntesis con bajos niveles de contaminantes, convirtiéndose en una fuente renovable de energía.

Justificación

Las energías renovables son de gran importancia en la actualidad, debido al alto consumo de las fuentes fósiles como el carbón, el petróleo, que ha aumentado año tras año, hasta llegar a 18,290 Mtoe, entre 1973 al 2011, como lo indican los datos de la Agencia Internacional de Energía (IEA) [17]. Dadas estas circunstancias el potencial de la biomasa para ayudar a satisfacer la demanda

mundial de energía ha sido ampliamente reconocido, con el fin de reducir la adquisición energía importada y la conservación del suministro limitado de los recursos de los cuales dispone cada país.

En promedio, en los países industrializados la biomasa contribuye entre 9-14% a los suministros totales de energía. Por otra parte, en los países en desarrollo solamente abarca de un quinto a un tercio [22]. De acuerdo con las proyecciones del consejo mundial de la energía, si se establecen políticas adecuadas para el año 2025, el 30% de la utilización directa de combustible de un 60% de los suministros mundiales de electricidad, se abastecerán por fuentes de energía renovables [18].

La biomasa ha sido utilizada en procesos termoquímicos y bioquímicos en los países en desarrollo como fuente de energía alterna, debido a que sus economías se basan en gran medida en la agricultura y la silvicultura, ya que se generan residuos orgánicos inherentes a dicha actividad [19].

En el Valle de Mexicali entre los años 2006 al 2016 se registró un promedio anual de 79 hectáreas sembradas de eucalipto [23]. El eucalipto genera residuos leñosos que pueden ser gasificados para la obtención de energía eléctrica. El Instituto de Ingeniería de la UABC, posee el gasificador GEK PP20 Power Pallet, que está diseñado principalmente para gasificar este tipo de residuos y genera aproximadamente 1 kW de energía eléctrica por cada 1.2 kg de materia prima.

Hipótesis

- ♣ Se obtendrá un gas de síntesis utilizando las podas de eucalipto en las condiciones de operación preestablecidas por el fabricante del GEK PP20 Power Pallet.
- ♣ Se simulará un gasificador *downdraft* en ASPEN PLUS® usando las condiciones de operación experimentales.
- ♣ Los resultados obtenidos por la simulación para los gases que aportan poder calorífico superior al gas de síntesis no tendrán una diferencia importante respecto a los datos experimentales.

Objetivos

Objetivo general

Establecer las mejores condiciones de operación del gasificador GEK PP20 Power Pallet, para operar con podas de eucalipto, buscando la máxima eficiencia en la gasificación y el mejor rendimiento en la generación de electricidad permitida por las limitaciones del diseño y especificaciones del sistema.

Objetivos específicos

- ♣ Determinar las propiedades fisicoquímicas de las podas de eucalipto.
- ♣ Caracterizar la composición química del gas de síntesis.
- ♣ Simular el proceso de gasificación en Aspen Plus®.

CAPÍTULO I

GASIFICACIÓN DE LA BIOMASA

1.1 Procesos termoquímicos

La conversión de los biocombustibles sólidos en energía térmica se realiza principalmente por procesos termoquímicos. Se define termoquímica como la disciplina que dentro de la fisicoquímica estudia los cambios de calor en procesos de cambio químico. Dentro del campo de la energía de biocombustibles, suele hacerse referencia a aquellos procesos que involucran las transformaciones de materia y las conversiones entre materia y energía, que van a permitir obtener un aprovechamiento energético del combustible. Los procesos termoquímicos se dividen principalmente en pirólisis, combustión y gasificación [8].

1.1.1 Pirólisis

La pirólisis es el proceso termoquímico básico para convertir la biomasa en un combustible útil. La biomasa se calienta en ausencia de oxígeno o se quema parcialmente en una atmósfera inerte, para producir una mezcla de gases ricos en hidrocarburos, un líquido aceitoso y un residuo sólido rico en carbono. Un rápido calentamiento y un enfriamiento rápido producen líquidos de pirólisis intermedia, que se condensan antes de que otras reacciones descompongan las especies de alto peso molecular contenidas en el gas.

En función del modo en que se realice la pirólisis y del tipo en concreto de biocombustible, las fracciones de los productos obtenidos son diferentes. Las principales variables a considerar son: velocidad de calentamiento, tiempo de residencia, temperatura y presión. En particular, la velocidad de calentamiento tiene una influencia tal que según el valor que tenga se puede clasificar la pirólisis en dos tipos, la pirólisis lenta con baja velocidad de calentamiento y la pirólisis rápida con una alta velocidad de calentamiento [2, 8].

1.1.2 Combustión

La combustión es el proceso termoquímico más conocido. Se entiende por combustión la reacción química por la cual un material, el combustible, a partir de una temperatura determinada, se combina con el oxígeno, el comburente, para dar lugar a dos tipos de productos: los gaseosos, denominados humos o gases de combustión, y los sólidos, las cenizas, que están formadas por componentes no combustibles y por aquellos del combustible que no hubiesen sido totalmente quemados en el proceso, los inquemados.

Según la composición elemental del combustible se demanda una cantidad de oxígeno para completar la combustión. Esta cantidad exacta de oxígeno estequiométrico necesario para la combustión, se puede hallar a partir de las reacciones de oxidación de los elementos que componen la biomasa: C, O, N, H, S [8].

1.1.3 Gasificación

La gasificación es la conversión termoquímica de la biomasa en combustibles gaseosos por medio de la oxidación parcial de la biomasa a altas temperaturas. Ésta se puede utilizar para producir un gas con un poder calorífico menor a 6 MJ/m³ cuando se utiliza aire como agente gasificante y de 10-12 MJ/m³ si se utiliza oxígeno.

Los posibles productos de reacción pueden incluir una mezcla gaseosa compleja, un residuo sólido o incluso una fase líquida. En algunos casos estas reacciones son exotérmicas, siendo posible capturar esta energía como un producto valioso. En la gasificación tienen lugar reacciones que permiten obtener un gas de síntesis a partir de un combustible sólido, a través de un conjunto de reacciones químicas y transformaciones físicas [24].

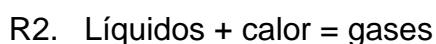
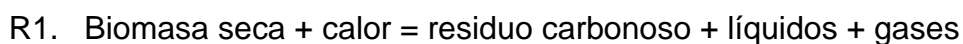
En detalle, los procesos que ocurren durante la gasificación de los combustibles sólidos son:

- ♣ Secado: este proceso se lleva a cabo a temperaturas aproximadamente de 380 K (107°C). Consiste principalmente en la extracción del agua en forma de vapor de la superficie y de los poros interiores del combustible sólido.

Algunos de los componentes orgánicos e inorgánicos más volátiles del combustible también pueden evaporarse.

- ♣ Pirólisis: debido al aumento de la temperatura, se promueve una transformación de la estructura química del combustible sólido, originando nuevas especies químicas. En este proceso se originan tres productos principales, concretamente gases ligeros, alquitrán (*tar*) y carbón (*char*). Los principales componentes de la mezcla gaseosa son H₂, CO, CO₂, H₂O, CH₄ y otros hidrocarburos. Otros compuestos como NH₃, H₂S o fenoles también se pueden formar. Los *tar* incluye también fracciones de compuestos orgánicos gaseosos más pesados que se liberan durante la pirólisis que pueden ser arrastrados como gotas de líquido. Los *char* se componen principalmente de carbono y la materia mineral presente en el combustible sólido.
- ♣ Combustión: este proceso incluye las principales reacciones heterogéneas entre el combustible sólido (*char*) y las especies químicas presentes en la atmósfera circundante. Estas especies gaseosas incluyen los compuestos liberados durante el secado y pirólisis, pero generalmente se suministran externamente para el proceso. Los procesos de combustión exigen el uso de oxígeno puro o aire atmosférico, mientras que otros procesos incluyen el uso de vapor de agua, hidrógeno u otros gases.
- ♣ Reducción: En esta zona el dióxido de carbono y el vapor de agua producido durante la combustión reaccionan con el carbón caliente. Debido a la alta reactividad del carbono a temperaturas por encima de 600°C, el dióxido de carbono y vapor de agua se reducen, formando hidrógeno, dióxido de carbono y pequeñas cantidades de metano.

Desde el punto de vista termoquímico, las principales reacciones que tienen lugar en un gasificador pueden resumirse en la siguiente secuencia:



R5. $\text{CO} + 0.5 \text{O}_2 \Rightarrow \text{CO}_2$	$\text{H}_{25^\circ\text{C}} = -67.6 \text{ Kcal/mol}$
R6. $\text{H}_2 + 0.5 \text{O}_2 \Rightarrow \text{H}_2\text{O}$	$\text{H}_{25^\circ\text{C}} = -57.8 \text{ Kcal/mol}$
R7. $\text{CH}_4 + 2 \text{O}_2 \Rightarrow \text{CO}_2 + 2\text{H}_2\text{O}$	$\text{H}_{25^\circ\text{C}} = -191.8 \text{ Kcal/mol}$
R8. $\text{C}_2\text{H}_4 + 3 \text{O}_2 \Rightarrow 2\text{CO}_2 + 2\text{H}_2\text{O}$	$\text{H}_{25^\circ\text{C}} = -317.2 \text{ Kcal/mol}$
R9. $\text{C} + \text{H}_2\text{O} \Rightarrow \text{CO} + \text{H}_2$	$\text{H}_{25^\circ\text{C}} = 31.5 \text{ Kcal/mol}$
R10. $\text{C} + 2\text{H}_2\text{O} \Rightarrow \text{CO}_2 + 2 \text{H}_2$	$\text{H}_{25^\circ\text{C}} = 21.7 \text{ Kcal/mol}$
R11. $\text{C} + 2 \text{H}_2 \Rightarrow \text{CH}_4$	$\text{H}_{25^\circ\text{C}} = -18 \text{ Kcal/mol}$
R12. $\text{C} + \text{CO}_2 \Rightarrow 2\text{CO}$	$\text{H}_{25^\circ\text{C}} = 41.4 \text{ Kcal/mol}$
R13. $\text{C}_n\text{H}_{2n} + \text{H}_2 \Rightarrow \text{C}_n\text{H}_{2n+2}$	
R14. $\text{C}_n\text{H}_m + n \text{H}_2\text{O} \Rightarrow n \text{CO} + (n + m/2) \text{H}_2$	
R15. $\text{CH}_4 + \text{H}_2\text{O} \Rightarrow \text{CO} + 3 \text{H}_2$	$\text{H}_{25^\circ\text{C}} = 48.5 \text{ Kcal/mol}$
R16. $\text{CH}_4 + 2 \text{H}_2\text{O} \Rightarrow \text{CO}_2 + 4 \text{H}_2$	$\text{H}_{25^\circ\text{C}} = 39.6 \text{ Kcal/mol}$
R17. $\text{CO} + \text{H}_2\text{O} \rightleftharpoons \text{CO}_2 + \text{H}_2$	$\text{H}_{25^\circ\text{C}} = -9.8 \text{ Kcal/mol}$

Las reacciones (R1) y (R2) corresponden a la descomposición térmica o pirólisis. Mediante calor, la biomasa seca se descompone en una mezcla de sólido + líquido (vapor) + gas. Al sólido originado en esta etapa se suele denominar *char* y a los líquidos, debido a la presencia mayoritaria de alquitranes y vapores condensables, se le suelen denominar *tars*.

Las reacciones (R3) al (R8) tienen lugar en presencia de oxígeno, cuando el agente gasificante es gas o aire. Mediante estas reacciones, dado su carácter exotérmico, se genera el calor necesario para calentar los materiales reaccionantes y producir las reacciones de gasificación propiamente dichas.

Las reacciones (R9) a (R14) son en general endotérmicas ya que suponen la fase de reducción (también denominada como gasificación, pues implica la conversión del sólido remanente de etapas anteriores en gas combustible). Puede observarse que mayoritariamente estas reacciones son endotérmicas, lo que justifica el aporte energético al proceso que se realiza mediante la combustión de una parte de la biomasa procesada. Estas reacciones endotérmicas o algunas otras, como las (R15) y (R16), pueden tener lugar en muy pequeña extensión o solo ocurrir en determinadas condiciones [8].

1.2 Tipos de gasificador

Los gasificadores se clasifican principalmente en base al modo en que tiene contacto el sólido con el gas y el medio de gasificación. Existen tres tipos de gasificadores habitualmente usados en la actualidad: *updraft*, *downdraft* y *lecho fluidizado*. Un tipo de gasificador no necesariamente es adecuado para todos los usos.

Hay un rango apropiado y aplicación para cada uno. Por ejemplo, el *updraft* y *downdraft* es utilizado en unidades pequeñas de 10 kWth-10 MWth; los de tipo *lecho fluidizado* es más apropiado para unidades intermedias de 5 kWth-100 MWth.

1.2.1 Gasificador *updraft*

Un gasificador de corriente ascendente es uno de los más antiguos y más simples de todos los diseños. Aquí el agente gasificante (aire, oxígeno o vapor) se desplaza hacia arriba mientras el combustible se mueve hacia abajo, y por lo tanto el gas y los sólidos están en el modo a contracorriente. El gas sale por la parte superior como se muestra en la Figura 8 [25]. El agente gasificante entra al lecho a través de una rejilla o un distribuidor, donde se encuentra con el lecho caliente de cenizas [25].

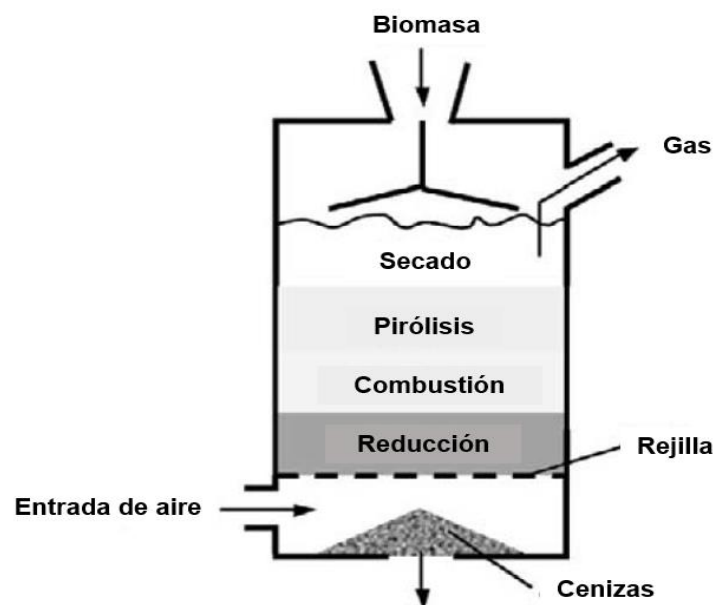


Figura 8. Esquema de un gasificador *updraft*.

1.2.2 Gasificador *downdraft*

Un gasificador de corriente descendente es un reactor co-corriente donde el aire entra en el gasificador a cierta altura por debajo de la parte superior. El gas producto fluye hacia abajo (con el nombre de corriente descendente) y sale a través de un lecho de cenizas calientes Figura 9 [25].

Dado que pasa por la zona de alta temperatura donde se encuentran las cenizas calientes, los alquitranes en el gas producido encuentran las condiciones favorables para su craqueo. Por esta razón, un gasificador de corriente descendente, de todos los tipos, tiene la tasa de producción de alquitranes más bajas.

El aire que ingresa a través de una o varias boquillas, situado alrededor de la periferia del gasificador, fluye hacia abajo y se encuentra con las partículas de carbón paralizadas, hasta llegar a la zona de combustión de aproximadamente 1200 a 1400°C. Entonces en gas desciende a través del lecho de partículas de carbón hasta llegar a la zona de gasificación.

Los gasificadores de corriente descendente funcionan bien con motores de combustión interna ya que el contenido de alquitranes se encuentra en un rango de 0.015-3 g/nm³. Un gasificador descendente requiere un tiempo más corto (20-30 min) para encender y llevar la planta a la temperatura de trabajo en comparación con el tiempo requerido por un gasificador ascendente [25].

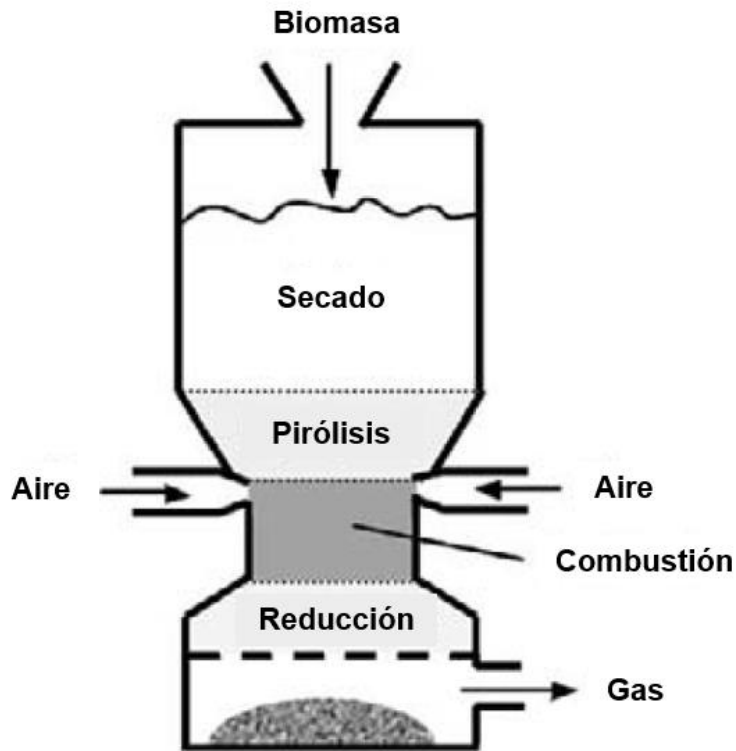


Figura 9. Esquema de un gasificador *downdraft*.

1.2.3 Gasificador de *lecho fluidizado*

Los gasificadores de lecho fluidizado se distinguen por su excelente mezcla y uniformidad de temperatura. Un lecho fluidizado está hecho de sólidos granulares, llamados materiales de lecho, que se mantienen en una condición semi-suspendida (estado fluidizado) por el paso del medio de gasificación a través de ellos a las velocidades apropiadas.

El excelente mezclado gas-sólido y la gran inercia térmica del lecho hacen que este tipo de gasificador sea relativamente insensible a la calidad del combustible. Además, la uniformidad de la temperatura reduce grandemente el riesgo de la aglomeración del combustible.

El diseño de lecho fluidizado ha demostrado ser particularmente ventajoso para la gasificación de la biomasa. Su producción de alquitrán se encuentra entre la de la corriente ascendente ($\sim 50 \text{ g/nm}^3$) y gasificadores de corriente descendente ($\sim 1 \text{ g/nm}^3$), con un valor promedio de alrededor de 10 g/nm^3 . Hay dos tipos de lechos fluidizado los burbujeantes y circulantes [25].

1.3 Descripción del equipo experimental

El Power Pallet PP20, es un gasificador creado por la empresa ALL POWER LABS, debido a su diseño y proceso de gasificación es de tipo downdraft. El sistema Power Pallet está compuesto por el gasificador serie GEK TOTTI integrado con un sistema de automatización y un motor acoplado a un generador.

El propósito del gasificador es refinar materias primas como la biomasa para producir un combustible gaseoso compatible con los motores de combustión interna. El gas producido se compone aproximadamente de 20% de H_2 y 20% de CO, ambos gases son quemados en el motor de combustión interna para la generación de electricidad. La Figura 10 ilustra el equipo gasificador y la Tabla 1 las principales características de diseño [26].



Figura 10. Power Pallet PP20.

Tabla 1. Especificaciones técnicas del gasificador Power Pallet PP20.

Especificaciones técnicas	
Potencia continua	15 kW @ 50 Hz/18 kW @60 Hz
Consumo de biomasa	1.2 kg/kWh, 2.5lbs/kWh
Máxima operación continua	>12h
Tiempo de encendido	10-20 min
Especificaciones de biomasa	
Tamaño	12-40mm/0.5-1.5"
Contenido de humedad	10-30% en base seca
Biomasa	Cáscara de nuez Piezas de madera blandas Piezas de maderas duras Cáscara de coco Cáscara de almendra de palma

CAPÍTULO II METODOLOGÍA

2.1 Caracterización fisicoquímica de las podas de eucalipto

2.1.1 Preparación de la muestra

Se recolectó 1 kg de podas de eucalipto de la UABC campus central Mexicali. Las muestras fueron molidas, como se aprecia en la Figura 11. Luego, se tamizaron en un tamiz N° 35 (Figura 12). Todas las muestras usadas en los análisis a continuación se prepararon según las especificaciones previamente descritas.



Figura 11. Molino para la preparación de las muestras.



Figura 12. Tamizado del eucalipto, tamiz N° 35.

2.1.2 Determinación del poder calorífico

Para determinar el poder calorífico de las muestras de eucalipto, se prepararon según el procedimiento antes descrito.

2.1.2.1 Poder calorífico superior

El PCS se determinó por duplicado, se pesó alrededor de 1 g de muestra. El experimento se llevó a cabo en una bomba calorimétrica marca IKA C2000, mostrada en la Figura 13. La prueba se basó en la metodología propuesta en la ASTM 711. Se empleó el método isoperibólico y la cubeta de agua del calorímetro se trabajó a 25°C [27].

2.1.2.2 Poder calorífico inferior

El PCI se calculó mediante la Ecuación 1, que relaciona el contenido de hidrógeno en el material vegetal con su PCS y PCI.

$$PCI = PCS - (9 \times 24.43 \times H) \quad (\text{Ecuación 1})$$

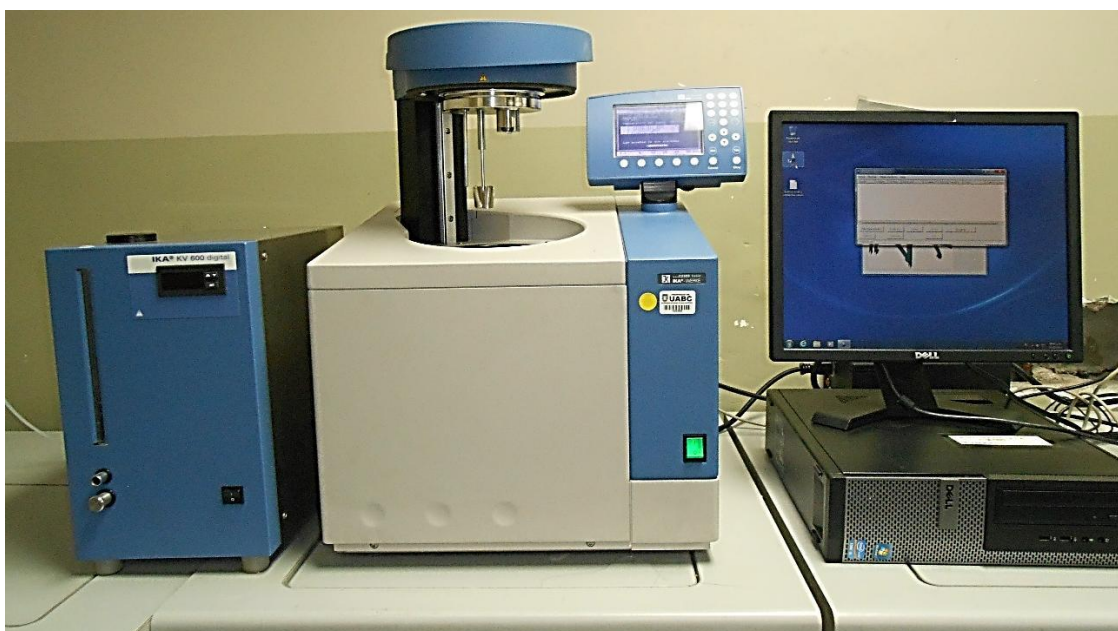


Figura 13. Bomba Calorimétrica IKA C2000.

2.1.3 Análisis próximo

2.1.3.1 Humedad

Se tomaron tres crisoles y se colocaron en la mufla por 30 min a 105°C para secarlos. A continuación, se introdujo 1 gramo de muestra y se colocó en la mufla por 6 horas a 105°C hasta peso constante. El porcentaje de humedad se determinó según la norma ASTM E 871 [28], calculando la pérdida de peso en la muestra.

$$\%H = [(A - B)/A] \times 100 \quad (\text{Ecuación 2})$$

Donde:

%H = porcentaje de humedad.

A = masa de la muestra usada, (g).

B = masa de la muestra después del calentamiento, (g).

2.1.3.2 Materia volátil

Una vez determinada la humedad de las muestras, dichos crisoles se taparon y se introdujeron en una mufla a 950°C por 7 minutos en ausencia de aire. Transcurrido el tiempo se sacaron y se dejaron enfriar 5 minutos, para luego colocarlos en un desecador hasta alcanzar la temperatura ambiente. El porcentaje de materia volátil se determinó según la norma ASTM E872 [29], por la pérdida de peso en la muestra.

$$\%C = [(A - B)/A] \times 100 \quad (\text{Ecuación 3})$$

Donde:

%C = porcentaje de peso perdido.

A = masa de la muestra seca, (g).

B = masa de la muestra después del calentamiento, (g).

Finalmente, el porcentaje de materia volátil

$$\%MV = \%C - \%H \quad (\text{Ecuación 4})$$

Donde:

%C = porcentaje de peso perdido.

%H = porcentaje de humedad.

2.1.3.3 Cenizas

En contenido de cenizas se determinó en las muestras libres de humedad y material volátil. Las muestras contenidas en los crisoles, se colocaron dentro de una mufla a 580°C durante 4 horas. Trascurrido este tiempo, se retiraron los crisoles de la mufla y se dejaron enfriar 5 minutos, antes de transferirlos al desecador. Posteriormente, se determinó la masa de las cenizas. El porcentaje de cenizas se determinó siguiendo el procedimiento de la norma ASTM E830 [30].

$$\%CE = [A/C] \times 100 \quad (\text{Ecuación 5})$$

Donde:

%CE = porcentaje de cenizas.

A = masa del residuo después del calentamiento, (g).

C = masa de muestra usada, (g).

2.1.3.4 Carbono fijo

El contenido de carbono fijo expresado en base seca, se calculó restando el contenido de materia volátil y ceniza del peso inicial de la muestra.

$$\%CF = 100 - [\%MV + \%CE] \quad (\text{Ecuación 6})$$

Donde

%CF = porcentaje de carbono fijo.

%MV = porcentaje de materia volátil.

%CE = porcentaje de cenizas.

2.1.4 Análisis de composición química

Las muestras empleadas para la determinación de la composición química de las podas de eucalipto, se prepararon según el procedimiento establecido anteriormente, además las muestras utilizadas se utilizaron en base seca (libres de humedad). Todos los análisis que se describen a continuación se realizaron por duplicado.

2.1.4.1 Extracción en solvente orgánico

En el experimento se emplearon dos dedales de celulosa (secos, libres de extractos y previamente pesados). En cada uno se agregaron 5 g de muestra de podas de eucalipto. En la parte superior de los dedales se colocaron círculos de papel filtro para evitar pérdida de muestra durante la extracción. A continuación, cada dedal fue introducido en un equipo de extracción Soxhlet, como se observa en la Figura 14. La extracción se realizó con 200 mL de acetona durante 8 horas, manteniendo el solvente en ebullición constante, de tal manera que se generaban más de 5 sifones por hora.

Al finalizar la extracción, se retiraron los dedales de celulosa y se colocaron en la mufla a 105°C durante 3 horas, con el fin de eliminar completamente los restos de cetona en la muestras. Trascurrido este periodo los dedales se retiraron de la mufla, se dejaron reposar cinco minutos y se llevaron al desecador hasta alcanzar temperatura ambiente. Posteriormente se pesaron y se determinó el porcentaje de material extraíble en solvente orgánico según la Ecuación 7, establecida en la metodología de la norma TAPPI T264 [31].

$$\%Ex1 = [(A - B)/A] \times 100 \quad (\text{Ecuación 7})$$

Donde:

%Ex1 = material extraíble en cetona.

A = masa seca de la muestra, (g).

B = masa de la muestra después de la extracción, (g).



Figura 14. Extracción Soxhlet con acetona.

2.1.4.2 Extracción en agua caliente

Para la extracción en agua caliente, se realizó el montaje mostrado en la Figura 15. En un matraz Erlenmeyer de 500 mL se agregaron 4 g de muestra extraída en cetona y se le añadieron 200 mL de agua destilada caliente. El matraz se conectó a un condensador de reflujo y se colocó en un baño de maría durante 3 horas.

Durante este tiempo se aseguró que el que el nivel de agua del baño se mantuviese por encima del nivel de la muestra en el matraz. Posteriormente, el contenido del matraz se filtró al vacío con un embudo Büchner y papel filtro N° 3 previamente seco y pesado, como se muestra en la Figura 16. La muestra se lavó con 200 mL de agua caliente y se dejó secar a 105°C durante 4 h hasta alcanzar peso constante.

El contenido de material extraíble en agua caliente, se determinó según la Ecuación 8, establecida en la metodología de la norma TAPPI 207 [32].

$$\% Ex2 = [(A - B)/A] \times 100 \quad (\text{Ecuación 8})$$

Donde:

%Ex2 = material extraíble en agua caliente.

A = masa seca de la muestra, (g).

B = masa de la muestra después de la extracción, (g).



Figura 15. Extracción con agua caliente.



Figura 16. Filtrado al vacío con un embudo Büchner.

2.1.4.3 Determinación de lignina

En un vaso de precipitado de 50 mL se pesó 1 g de muestra seca libre de extraíbles totales (extraíbles en cetona y en agua caliente). Al vaso se le agregaron 15 mL de una solución de H₂SO₄ al 72% a 13°C de temperatura y se agitó vigorosamente durante 1 minuto. Luego, se dejó reposar durante 2 h, con agitación frecuente, a una temperatura de 19°C.

La mezcla resultante se trasvasó a un matraz Erlenmeyer de 1L y se diluyó la concentración del ácido a 3% mediante la adición de 360 mL de agua destilada. El matraz se llevó a ebullición durante 4 h con un condensador de reflujo, como se presenta en la Figura 17.

Trascurrido el periodo indicado, la mezcla contenida en el Erlenmeyer se dejó enfriar hasta que el material insoluble decanto. Luego, se filtró al vacío usando un papel filtro N° 3, el cual fue secado previamente a 105°C. El precipitado se lavó con 700 mL de agua caliente hasta quedar libre de ácido. El papel filtro y su contenido se secaron en un horno durante 4 h a 105°C.

Posteriormente, se retiró el papel filtro del horno y se dejó enfriar dentro de un desecador. Tras alcanzar peso constante, se determinó el contenido de lignina usando la Ecuación 9 según la norma ASTM D 1106 [33].

$$\% \text{ Lignina} = \left[\frac{A-B}{C} \right] \times 100 \quad (\text{Ecuación 9})$$

Donde:

A = peso del residuo secado al horno y el papel filtro, (g).

B = peso del papel filtro secado al horno, (g).

C = peso de la muestra libre de extractos secada al horno, (g).

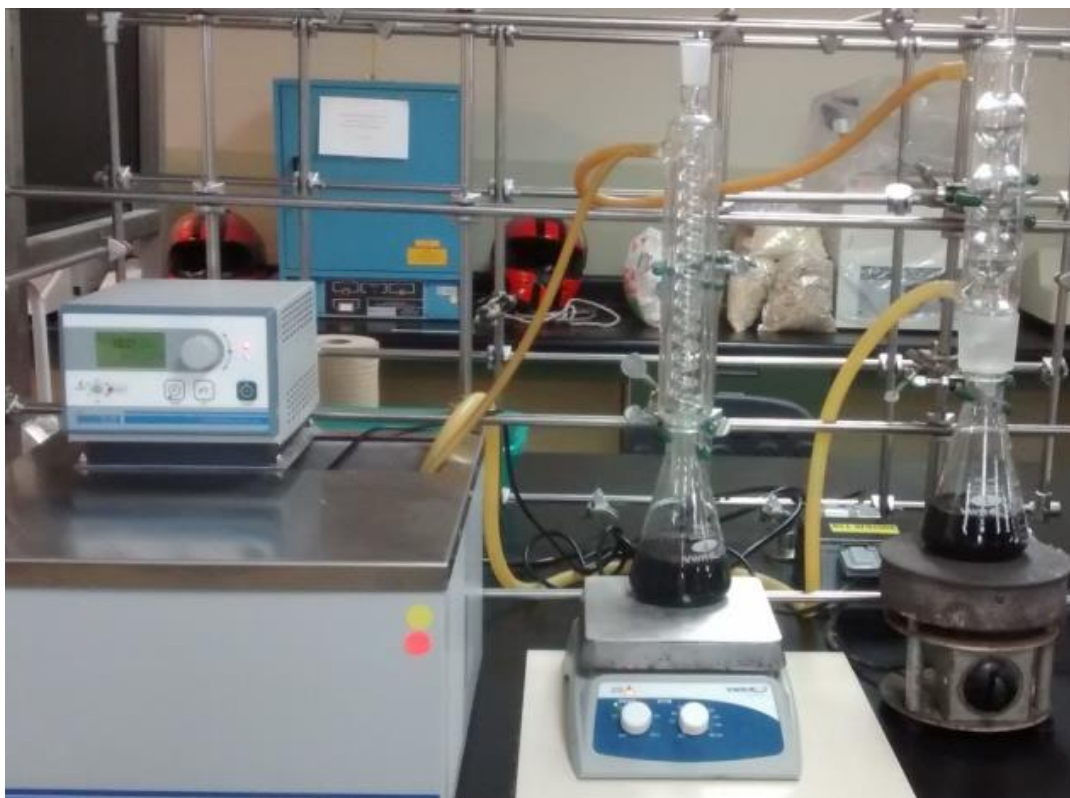


Figura 17. Determinación de lignina.

2.1.4.4 Determinación de holocelulosa

El experimento se realizó por duplicado y se basó en la norma ASTM D1104 [34]. Para ello se realizó el montaje de la Figura 18. Se agregaron 2 g de muestra libre de extraíbles totales (extraíbles en cetona y en agua caliente) en un matraz de 250 mL, se adicionaron 150 mL de agua destilada, 0.2 mL de ácido acético a 15°C y 1 g de clorito sódico.

Posteriormente, el matraz se colocó en un baño de agua a 75°C durante 5 h y se añadieron 0.22 mL de ácido acético a 15°C, 1 g de clorito sódico cada hora a partir del momento en que se colocó en el baño de agua, con agitación constante. Transcurridas las 5 h, se sacó el matraz del baño de agua caliente y se colocó en un baño de agua fría hasta que la temperatura del recipiente alcanzó 10°C.

Finalmente, se filtró el contenido del matraz con un papel filtro N° 2 previamente seco y de peso conocido. El residuo se lavó con 600 mL de agua fría hasta quedar libre de clorito. Se observó un cambio de color en el residuo, el cual paso de color amarillo a blanco. A continuación, el papel filtro se secó en horno a

105°C y se enfrió en un desecador. Tras alcanzar peso constante se determinó el porcentaje de holocelulosa.

$$\% \text{ Holocelulosa} = [(A - B)/C] \times 100 \quad (\text{Ecuación 10})$$

Donde:

A = peso del residuo secado al horno y el papel filtro, (g).

B = peso del papel filtro secado al horno, (g).

C = peso de la muestra libre de extractos secada al horno, (g).



Figura 18. Determinación de holocelulosa.

2.1.4.5 Determinación de celulosa

Se agregaron 3 g de muestra de holocelulosa secada al horno un matraz Erlenmeyer de 250 mL. El matraz se colocó en un baño de agua que se mantuvo a 20°C (ver Figura 19). Luego, se adicionaron 50 mL de NaOH 17.5% y se mezcló

vigorosamente durante un minuto. La muestra se dejó reaccionar con la solución de hidróxido durante 29 minutos. A continuación, se añadieron 50 mL de agua destilada agitando durante un minuto, y se dejó reaccionar durante cinco minutos.

El contenido del matraz se filtró al vacío con un papel filtro N° 2 previamente seco y de peso conocido. El residuo resultante se lavó cuatro veces; primero con 50 mL de una solución al 8.3% de NaOH. Segundo con 60 mL de agua. Tercero, con 40 mL de ácido acético al 10%. Cuarto, con 200 mL de agua caliente.

Posterior a los lavados, el papel filtro junto con el residuo, fueron secados en un horno a 105°C durante 4 h. Después, se retiró el papel filtro del horno y se llevó a un desecador, donde alcanzó temperatura ambiente y se pesó. El porcentaje de celulosa se calculó de acuerdo con la Ecuación 11 de la norma ASTM D1103 [35].

$$\% \text{ Celulosa} = [(A - B)/C] \times 100 \quad (\text{Ecuación 11})$$

Donde:

A = peso del residuo secado al horno y el papel filtro, (g).

B = peso del papel filtro secado al horno, (g).

C = peso de la muestra de holocelulosa secada al horno, (g).



Figura 19. Determinación de celulosa.

2.1.4.6 Determinación de hemicelulosa

La hemicelulosa se determinó restando el porcentaje de celulosa al porcentaje de holocelulosa.

$$\text{Hemicelulosa} = \% \text{ Holocelulosa} - \% \text{ Celulosa} \quad (\text{Ecuación 12})$$

2.2 Gasificación de biomasa

2.2.1 Preparación de la biomasa

Las podas de eucalipto se obtuvieron de los jardines del campus central UABC Mexicali, como se observa en la Figura 20.



Figura 20. Recolección de eucalipto.

Las podas de eucalipto, se cortaron en la picadora Mpower. Después, el eucalipto se hizo pasar por un tamiz cuadrado de 1.5 cm x 1.5 cm con el fin de separar las piezas con un tamaño menor a este y obtener una biomasa en un rango de 1.5 a 4 cm. (ver Figura 21).

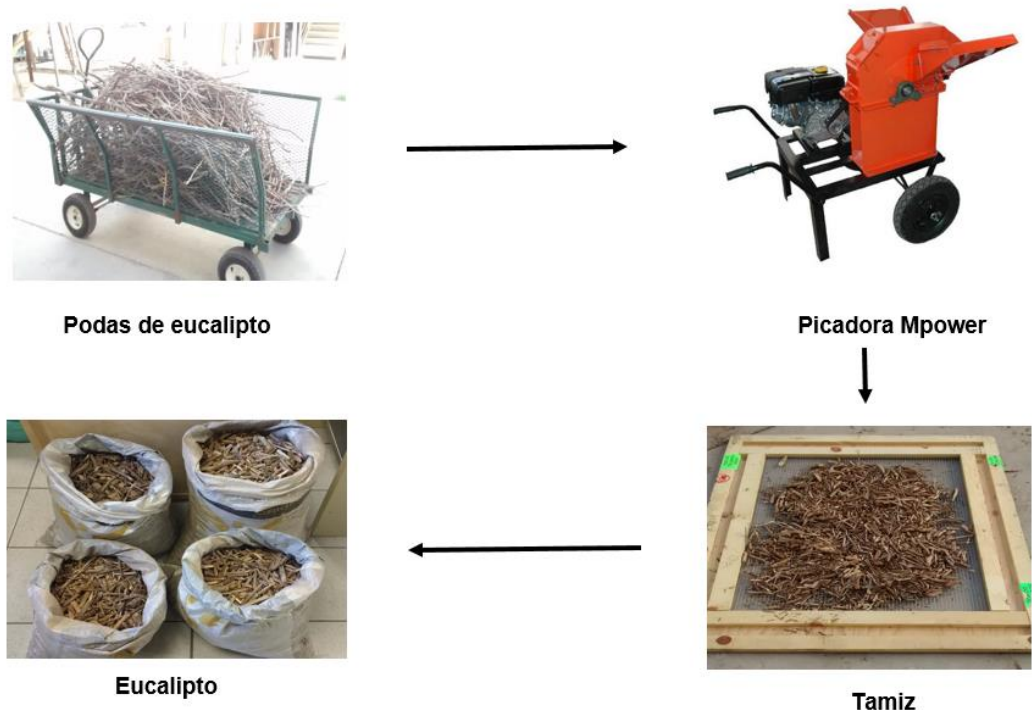


Figura 21. Diagrama de preparación de la biomasa.

2.2.3 Toma de muestra del gas de síntesis

Debido a que el gasificador Power Pallet PP20 no cuenta con un sistema para la toma de muestras, se instalaron varios accesorios de acero inoxidable y un Merlin Microseal Adapter como se muestra en la Figura 22. En la parte superior del filtro del equipo se extrajo la muestra, utilizando una jeringa de 5 mL como se muestra en la Figura 23.

Las muestras se tomaron a los 40 y 60 minutos de haber puesto en marcha el gasificador. La jeringa posee un *Sample-Lok* que actúa como válvula y retiene la muestra de gas dentro de sí.



Figura 22. Adaptador para la toma de muestras.



Figura 23. Jeringa para CG.

2.2.4 Caracterización del gas de síntesis

En el gas de síntesis se cuantifico el porcentaje de hidrógeno, oxígeno, nitrógeno, metano, monóxido de carbono y dióxido de carbono. Los compuestos

mencionados anteriormente son los más abundantes y nos permiten calcular el poder calorífico superior.

Para cuantificar el gas de síntesis se usó un gas estándar de referencia SIGMA-ALDRICH. El gas de referencia es una mezcla de gases al 1% que nos permitió conocer la respuesta del detector a una concentración conocida de analito y así posteriormente calcular la concentración de los componentes del gas de síntesis obtenido experimentalmente.

Se utilizó el Cromatógrafo de gases Clarus 400 Perkin Elmer (ver Figura 24), equipado con un detector de conductividad térmica (TCD). El gas de arrastre utilizado fue helio de ultra alta pureza y el flujo se determinó con un flujómetro electrónico de PerkinElmer. Las condiciones de operación del Cromatógrafo utilizadas en la cuantificación del gas de síntesis son las siguientes:

Columna: 60/80 Carboxen-1000, 15' x 1/8" acero inoxidable (2.1mm ID).

Rampla de calentamiento: 35°C (5 min) to 225°C at 20°C/min.

Gas de arrastre: Helio, 30mL/min.

Gas estándar: SIGMA-ALDRICH gas mix (Cat. ID 501662).



Figura 24. CG Clarus 400.

CAPÍTULO III

SIMULACIÓN DE UN GASIFICADOR DE BIOMASA DOWNDRAFT USANDO ASPEN PLUS®

3.1 Generalidades

ASPEN, de las siglas en inglés Advanced System for Process Engineering, es un software que permite la simulación de procesos químicos, a través de un diagrama de flujo. En éste, se pueden estimar propiedades de los compuestos, obtener especificaciones de diseño, análisis y síntesis de procesos químicos, entre otras múltiples opciones.

3.2 Simulación del proceso

El modelado de procesos es una herramienta poderosa, que permite la representación matemática de los procesos, y comprende el estudio de características y estructuras. Para la simulación en ASPEN PLUS®, se utilizaron distintos bloques que al ser combinados representan el proceso dentro de un gasificador downdraft. El modelo termodinámico que se usó para determinar las propiedades termodinámicas de los compuestos en la simulación, es la ecuación de estado de *Peng-Robinson* [36].

Éste método es recomendado para procesos donde intervienen gases, refinería y aplicaciones petroquímicas. También incluye aplicaciones de plantas de gas, torres de destilación de crudo y plantas de producción de etileno. El método de propiedades de *Peng-Robinson*, es aplicable a moléculas no polares o mezclas de baja polaridad. Como ejemplo, tenemos los hidrocarburos y gases ligeros, tales como el dióxido de carbono, hidrógeno y sulfuro de hidrógeno [37].

La simulación aquí presentada, ésta enmarcada en los siguientes supuestos:

- ♣ El proceso es isotérmico en estado estacionario.
- ♣ La devolatilización de la biomasa tiene lugar instantáneamente, generando como productos H₂, CO, CO₂, CH₄ y H₂O.
- ♣ Hay uniformidad en el tamaño de las partículas.
- ♣ Todos los gases están uniformemente distribuidos dentro del reactor.

- ♣ El azufre en la biomasa reacciona solamente para formar H₂S.
- ♣ Solamente se forma amoníaco durante la gasificación, sin óxidos de nitrógeno.
- ♣ El *char* contiene solamente carbón y cenizas.

3.3 Elementos no convencionales

En ASPEN PLUS® no existe un compuesto que se asemeje a la biomasa y a las cenizas, por lo tanto, la biomasa, se definió como un compuesto orgánico no convencional. La estimación de las propiedades físicas y químicas de la biomasa fueron calculadas por el simulador al ingresar la información de su análisis próximo y último, como se describe en la Tabla 2.

Tabla 2. Análisis próximo y último del eucalipto.

Norma	Características	Unidad	Eucalipto
ASTM E711-87	PCS	MJ/kg	17.331
ASTM E711-87	PCI	MJ/kg	16.187
ASTM E871-82	Humedad	%	6.08
ASTM E872-82	Material Volátil	%	72.53
Por diferencia	Carbono fijo	%	22.34
ASTM E830-87	Ceniza	%	5.13
ASTM E777-08	C	%	44.05
ASTM E777-08	H	%	5.24
Por diferencia	O	%	38.85
ASTM E778-08	N	%	0.61
ASTM E775-87	S	%	-----

3.4 Reacciones químicas

Las reacciones químicas consideradas en esta simulación se presentan en dos grupos. Las reacciones homogéneas entre los gases y las reacciones heterogéneas entre el sólido *char* y los gases, como se exhiben en las Tabla 3 y Tabla 4.

Tabla 3. Reacciones homogéneas.

Reacción	Referencia	Reacción N°
$\text{CO} + \text{H}_2\text{O} \rightleftharpoons \text{CO}_2 + \text{H}_2$	[38]	R17
$\text{CO} + 0.5 \text{O}_2 \Rightarrow \text{CO}_2$	[38]	R15
$\text{H}_2 + 0.5 \text{O}_2 \Rightarrow \text{H}_2\text{O}$	[38]	R6
$\text{CH}_4 + \text{H}_2\text{O} \Rightarrow \text{CO} + 3 \text{H}_2$	[38]	R15
$\text{CH}_4 + 1.5 \text{H}_2\text{O} \Rightarrow \text{CO} + 2 \text{H}_2\text{O}$	[38]	R16
$\text{N}_2 + 3 \text{H}_2 \Rightarrow 2 \text{NH}_3$	[39]	R18

Tabla 4. Reacciones heterogéneas.

Reacción	Referencia	Reacción N°
$\text{H}_2 + \text{S} \Rightarrow \text{H}_2\text{S}$	[39]	R19
$\text{C} + \text{H}_2\text{O} \Rightarrow \text{CO} + \text{H}_2$	[40]	R9
$\text{C} + 2\text{H}_2\text{O} \Rightarrow \text{CO}_2 + 2 \text{H}_2$	[40]	R10
$\text{C} + 2 \text{H}_2 \Rightarrow \text{CH}_4$	[40]	R11
$\text{C} + \text{CO}_2 \Rightarrow 2\text{CO}$	[40]	R12

3.5 Diagrama de flujo

3.5.1 Reactor Ryield

La descomposición de la biomasa o pirólisis ocurre en el reactor RYIELD, cuyos productos se determinaron basados en el análisis próximo y último de la biomasa utilizada [41]. En este bloque se obtienen como productos hidrógeno, oxígeno, nitrógeno, agua, azufre y cenizas.

Éste reactor normaliza los rendimientos con el fin de mantener el balance de masa y tiene la capacidad de modelar hasta tres fases. Se usa este modelo de reactor cuando:

- ♣ La estequiometría de reacción es desconocida o carece de importancia.
- ♣ La cinética de reacción es desconocida o no es importante.
- ♣ Se conoce la distribución de los productos.

Como se observa en la Figura 25, para utilizar este reactor se debe tener una corriente de material de entrada, una corriente de salida con los productos y dependiendo del caso, una corriente para decantación de agua.

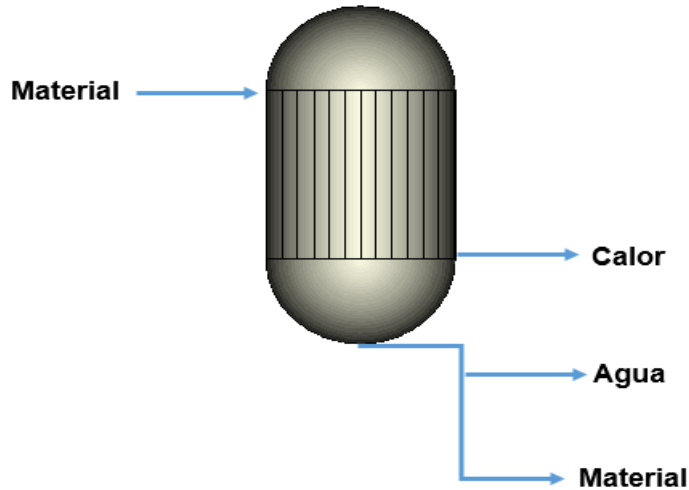


Figura 25. Reactor RYield.

3.5.2 Separador

La corriente que sale del reactor RYIELD, está constituida por una mezcla de gases, *char* y cenizas, por lo tanto, para facilitar la simulación se utilizó un separador, en el cual se especifica la separación parcial o total de los componentes.

En el separador se pueden combinar varios flujos y separarlos de acuerdo con el flujo o a la fracción molar de cada componente. Este bloque requiere una o más corrientes de entrada, dos corrientes de salida y una salida de calor que es opcional (ver Figura 26).

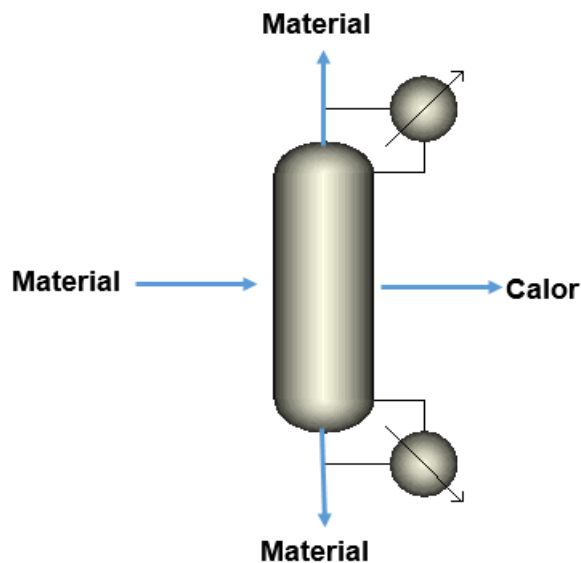


Figura 26. Separador.

3.5.3 Reactor RGibbs

La gasificación se simuló en dos bloques, el reactor RGibbs y el reactor REquil. En el reactor RGibbs ingresa un flujo de aire, permitiendo la combustión de los volátiles y *tar* generados durante la pirólisis, así como las reacciones entre *char* y el oxígeno. También, se produce amoníaco y sulfuro de hidrógeno.

El reactor de RGibbs utiliza la minimización de la energía libre de Gibbs con una separación de fases para calcular el equilibrio. Este reactor no requiere que se especifique la estequiometría de reacción. Para modelar con dicho reactor se deben tener en cuenta las siguientes condiciones:

- ♣ El equilibrio químico es monofásico es decir un sistema con una sola fase (vapor o líquido).
- ♣ Una fase en equilibrio, como por ejemplo, una fase de vapor opcional y cualquier número de fases líquidas que no reaccionen entre sí.
- ♣ Fase simultánea y equilibrio químico. RGibbs puede calcular el equilibrio químico entre cualquier número de componentes sólidos convencionales y una fase de un fluido. También permite especificar condiciones para un sistema que no alcanza un equilibrio completo.

Este reactor requiere al menos una corriente de entrada y una de salida, como se ilustra en la Figura 27. Si se especifican tantas corrientes de salida como números de fases presentes en el sistema, RGibbs asignará a cada fase una corriente de salida.

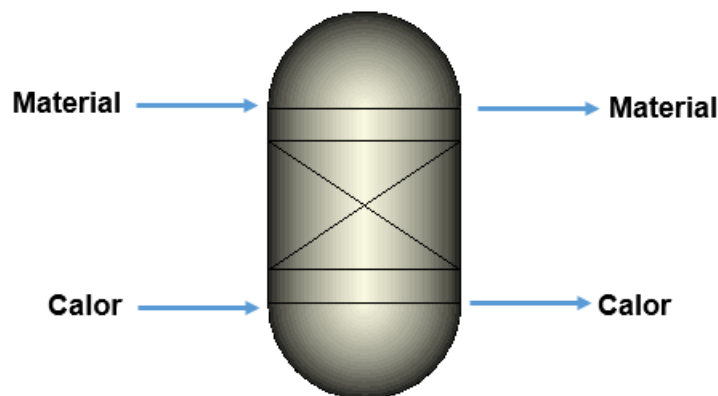


Figura 27. Reactor RGibbs.

3.5.4 Reactor REquil

Una vez formados los productos en el reactor RGibbs, se producen una serie de reacciones en fase gaseosa las cuales tienen lugar en el reactor de equivalencia. Dichas reacciones, llegan a un equilibrio químico, el cual es calculado por el simulador, teniendo en cuenta la temperatura en dicho reactor (ver Figura 28).

Se utiliza este reactor cuando:

- ♣ La estequiometría de la reacción es conocida.
- ♣ Algunas o todas las reacciones alcanzan el equilibrio químico.

El REquil puede modelar una o dos fases, calculando simultáneamente la fase y el equilibrio químico. También permite especificar equilibrios restringidos para reacciones que no alcanzan un equilibrio. Para conectar este bloque se requiere una corriente de entrada y una o dos corrientes de salida según el caso (una salida en fase de vapor y una salida de fase líquida).

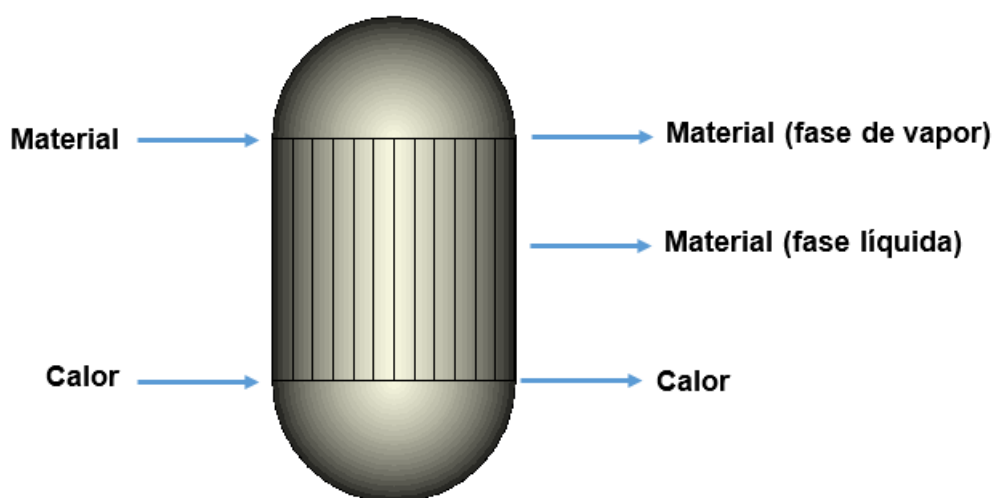


Figura 28. Reactor REquil.

3.5.5 Reactor RStoic

El carbón remanente de las etapas anteriores ingresa al reactor RStoic (Figura 29), donde tiene lugar el proceso de reducción. Las reacciones heterogéneas R6 a R10 que tienen lugar en este reactor se enlistan en la Tabla 4.

El reactor RStoic se usa cuando:

- ♣ La cinética de reacción es desconocida o no es importante.

- ♣ La estequiometría y el porcentaje de conversión para cada reacción se conoce.

Este reactor puede modelar reacciones que ocurren simultáneamente o en secuencia. Además, puede ser selectivo en los productos y calcular el calor de reacción. Este bloque requiere una o más corriente de entrada y una corriente de salida.

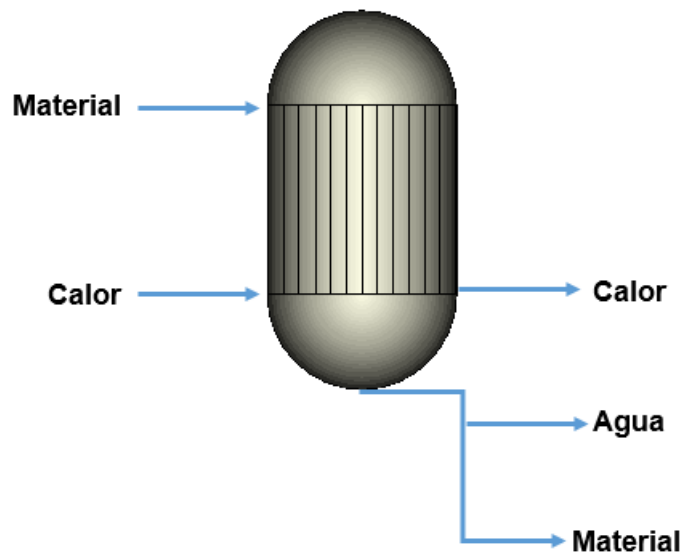


Figura 29. Reactor RStoic.

3.5.6 Cyclone

Finalmente los productos generados del proceso ingresan al cyclone como se aprecia en la Figura 30, donde la fase gaseosa se separa completamente de la fase sólida. El cyclone separa una corriente de gas de entrada que contiene sólidos, en dos corrientes de salida. Para lograr tal separación, las partículas sólidas son llevadas a través de una espiral y son eliminadas al chocar debido a la fuerza centrífuga en el vórtice de gas.

Para utilizar este bloque se requiere una corriente de entrada con al menos una subcorriente de sólidos y dos corrientes de salida, en la cual está la corriente que contiene la fase gaseosa solamente y los residuos sólidos.

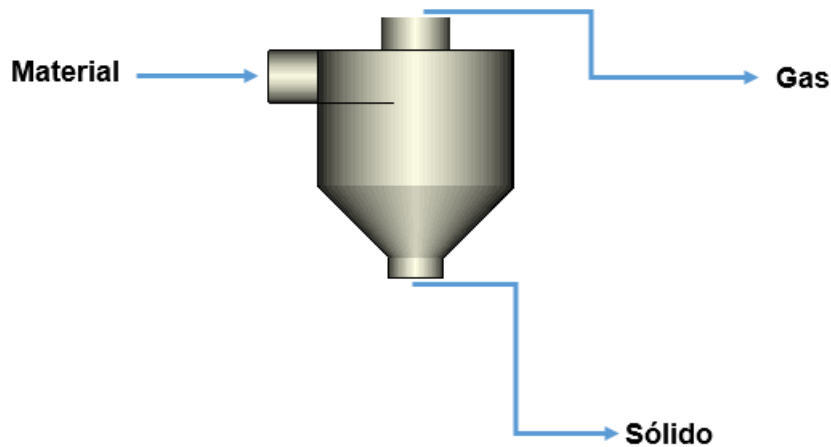


Figura 30. Cyclone.

3.6 Condiciones de operación

Las condiciones de operación utilizadas en la simulación se encuentran en la Tabla 5. La Figura 31 constituye el diagrama de flujo de la simulación en Aspen Plus® [37].

Tabla 5. Condiciones de operación.

Reactor	Presión (atm)	Temperatura (°C)
RYield	0.015	300
RGibbs	0.015	680
REquil	0.015	680
RStoic	0.039	552

3.6.1 Cálculo del aire estequiométrico en la gasificación de la biomasa

Para el cálculo del aire estequiométrico es necesario conocer la composición química del combustible. Dicha información se obtiene a partir del análisis próximo y último.

El aire estequiométrico para la combustión de la biomasa, se divide en aire primario y aire secundario. El aire primario es el necesario para la combustión de los compuestos sólidos del combustible, mientras que el aire secundario es el que interviene en la combustión de los compuestos volátiles. Para dicho cálculo se utilizaron las siguientes ecuaciones [42].

$$\text{Aire primario} = \lambda_p * x * \frac{8}{3} * \frac{100}{23.3} \text{ kg} \quad (\text{Ecuación 13})$$

$$\text{Aire secundario} = \lambda_s * \frac{100}{23.3} * \left(\frac{8}{3} * (p - x) + 8 * (q - r) \right) \text{ kg} \quad (\text{Ecuación 14})$$

Donde:

λ_p = Exceso de aire primario.

λ_s = Exceso de aire secundario.

p = Carbono kg/kg de biomasa.

x = Carbono fijo kg/kg de biomasa.

q = Hidrógeno kg/kg de biomasa.

r = Oxígeno kg/kg de biomasa.

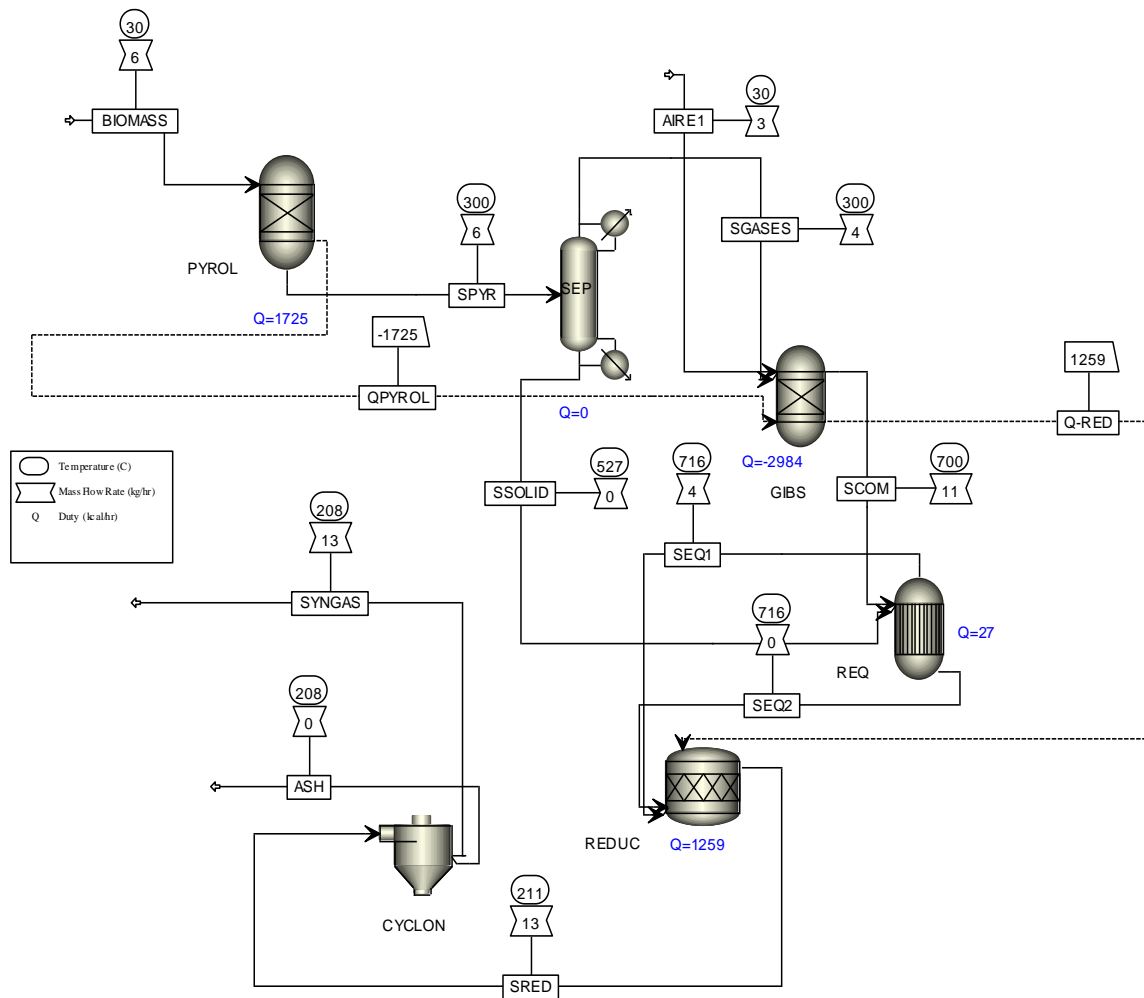


Figura 31. Diagrama del gasificador *downdraft*.

3.7 Análisis de sensibilidad

El análisis de sensibilidad es una herramienta para determinar cómo reacciona un proceso a los cambios de las variables de operación y diseño. En el análisis de sensibilidad no se pueden seleccionar variables que se calculan durante la simulación, sino aquéllas que son ingresadas por el usuario.

Se puede utilizar este análisis para modificar una o más variables en el proceso y estudiar el efecto de la variación sobre una variable de respuesta. También permite verificar si la solución a una especificación de diseño se encuentra dentro del rango de la variable manipulada, o para llevar a cabo la optimización de procesos simples.

La temperatura es una variable fundamental en el proceso de la gasificación ya que las reacciones químicas que se llevan a cabo dentro del gasificador se ven afectadas por las condiciones del proceso para convertir los reactivos en productos.

Las reacciones en el gasificador se dividieron en dos grupos. Las reacciones homogéneas y las reacciones heterogéneas. Entre este tipo de reacciones, las homogéneas se ven fuertemente afectadas por la temperatura, debido a los reactivos y los productos se encuentran en fase gaseosa.

En contraste, las reacciones heterogéneas son afectadas en menor proporción ya que se llevan a cabo entre el estado sólido y gaseoso. Por consiguiente, se modificó la temperatura en el bloque REquil en un rango de 600 a 900°C.

En este reactor se desarrollan reacciones en fase gaseosa y las condiciones de equilibrio se ven afectadas la temperatura. Dicha variación nos permite obtener diferentes fracciones molares de los compuestos químicos del gas de síntesis que es la variable de respuesta.

CAPÍTULO IV

ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS

4.1 Poder calorífico

El poder calorífico superior e inferior de las podas de eucalipto, se resumen en la Tabla 6. El poder calorífico inferior se calculó con la ecuación 1, utilizando el contenido de hidrógeno determinado en el análisis último.

Tabla 6. Poder calorífico del eucalipto.

Muestra	Peso	PCS (MJ/kg)	PCI (MJ/kg)
1	0.3915	17.331	16.188
2	0.3688	17.332	16.189
3	0.3845	17.330	16.187
Promedio		17.331	16.188
SD		0.001	0.001

4.2 Resultados de la caracterización fisicoquímica

4.2.1 Análisis próximo

Los resultados de las podas de eucalipto mostrados en la Tabla 7, indican un 6.08% de humedad; 72.53% de materia volátil; 5.13% de cenizas y 22.34% de carbono fijo.

Tabla 7. Análisis próximo de las podas de eucalipto.

	Muestra			Promedio	SD
	1	2	3		
Humedad	6.0865	6.0210	6.1343	6.08	0.0464
Materia volátil	72.5600	72.5105	72.5151	72.53	0.0223
Cenizas	5.1176	5.1396	5.1360	5.13	0.0096
Carbono fijo	22.3224	22.3500	22.3489	22.34	0.0127

En las Figura 32, 33 y 34 se observan las muestras después de cada determinación.



Figura 32. Humedad.

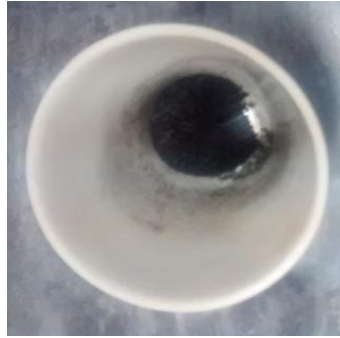


Figura 33. Materia volátil.



Figura 34. Cenizas.

El análisis próximo es importante para la evaluación de calidad de la biomasa como materia prima para biocombustible ya que el contenido de cenizas afecta directamente la energía de conversión del proceso por la disminución de su eficacia debido la fusión de las cenizas ("escoria", fusión de la sílice, potasio, calcio) y los volátiles que indican el grado de combustión. El contenido en volátiles es inversamente proporcional al contenido en carbono fijo, y un biocombustible rico en carbono fijo (bajo contenido en sustancias volátiles) se quema lentamente [43].

4.2.2 Análisis de composición química

Se obtuvo 3.18% de extraíbles en cetona y 12.68% de extraíbles en agua caliente. Los resultados revelan que las podas de eucalipto poseen un gran contenido de sustancias solubles en medio acuoso, lo cual se ve reflejado en el color oscuro de dicho extracto en la Figura 35. Un mayor contenido de extractos, principalmente de compuestos solubles en etanol, contribuye al aumento del valor del poder calorífico [44].



Figura 35. Extractos acuosos.

Se obtuvo 25.56% de lignina. En las Figura 36 y Figura 37, se observa la lignina insoluble en medio ácido y filtrada en un embudo Büchner. Al igual que las sustancias extraíbles, la lignina favorece al aumento del poder calorífico de la biomasa.



Figura 36. Lignina insoluble en ácido.



Figura 37. Residuo de lignina.

En la Figura 38 se exhibe la holocelulosa que está formada por la celulosa y la hemicelulosa, con un contenido de 64.09%.



Figura 38. Residuo de holocelulosa.

De celulosa se obtuvo 47.41% y de hemicelulosa 16.68%. La celulosa y la hemicelulosa contribuyen al rendimiento en la producción del biocombustible, mientras que el contenido de lignina proporciona mayores rendimientos de residuo carbonoso [45]. La información anterior se encuentra resumida en la Tabla 8.

Tabla 8. Análisis de la composición química.

Componente	Muestra		Promedio	SD
	1	2		
Extraíbles en cetona	3.2374	3.1305	3.18	0.0534
Extraíbles en agua	12.4708	12.7828	12.63	0.1560
Lignina	25.6170	25.5074	25.56	0.0775
Holocelulosa	64.0709	64.1050	64.09	0.0241
Celulosa	47.3595	47.4655	47.41	0.0750
Hemicelulosa	16.7114	16.6395	16.68	0.0508

4.2.3 Análisis último

Los resultados obtenidos para el análisis último se encuentran en la Tabla 9. En el análisis último se determina el contenido de carbón, hidrógeno y oxígeno, que son los principales componentes de los combustibles sólidos. El carbón y el oxígeno reaccionan durante la combustión generando CO₂ y agua, a través de una reacción exotérmica. El carbono y el hidrógeno son los elementos presentes en la biomasa que contribuyen positivamente al poder calorífico superior.

Durante la combustión el nitrógeno es prácticamente convertido en gas nitrógeno y en óxido de nitrógeno. Los óxidos de nitrógeno tienen un impacto sobre el medio ambiente cuando se quema la biomasa. Sin embargo, los gasificadores actuales generan en sus gases de síntesis una concentración muy baja de óxidos de nitrógeno [46].

Tabla 9. Análisis último del eucalipto.

Biomasa	%C	%H	%O	%N
Eucalipto	44.05	5.24	38.85	0.61

4.3 Resultados de la gasificación del eucalipto

La composición del gas producido depende principalmente de la temperatura dentro del reactor y del volumen de aire por kilogramos de biomasa utilizado. Adicionalmente la concentración de CO, H₂ y CH₄ están determinadas por la cinética química de las reacciones que ocurren en el proceso de gasificación y

el tipo de agente oxidante, que a su vez tiene un efecto considerable en el valor del poder calorífico superior del gas de síntesis.

El aire es un agente oxidante que posee una alta concentración de nitrógeno, lo cual resulta en un gas de bajo poder calorífico, usualmente no excede los $6\text{MJ}/\text{Nm}^3$. Una típica composición de gas de síntesis producto de la gasificación de la biomasa en un reactor *downdraft* cuando usa como agente oxidante el aire es la siguiente: 15 – 20% de H_2 , 15 – 20% de CO , 0.5 – 2% de CH_4 , 10 – 15% de CO_2 y la parte restante está compuesta de N_2 , O_2 y C_xH_y [47].

En la Figura 39 se presenta el cromatograma del gas de síntesis a los 40 min. En éste se observa la aparición de 5 picos que corresponden al porcentaje de oxígeno, nitrógeno, monóxido de carbono, metano y dióxido de carbono. El pico de oxígeno a los 3.47 min genera una respuesta en el detector de 14 mV para una concentración de 11.6%. El monóxido de carbono también tiene una concentración similar al oxígeno, equivalente al 11.83%. Sin embargo, la respuesta del detector a esta concentración es 9.5 mV.

Lo anterior se debe a la diferencia en la conductividad térmica de estos gases. En contraste observamos que la respuesta del detector para el monóxido y dióxido de carbono guarda una proporción similar, esto se debe a que la conductividad térmica de estos dos compuestos es similar.

La composición del gas de síntesis en porcentaje para los 40 y 60 minutos se detalla en la

Tabla 10. Las condiciones de operación del gasificador como son la temperatura de combustión (TC), temperatura de reducción (TR), presión en la zona de combustión (PC) y la presión en la zona de reducción (PR) se resumen en la Tabla 11. Dichos valores corresponde a las condiciones experimentales en las que se trabajó el equipo al momento de la toma de muestras.

Tabla 10. Composición del gas de síntesis.

Tiempo de retención (min)	Compuesto	[%] 40 min	[%] 60 min
0.93	H ₂	0.00	0.11
3.47	O ₂	11.66	9.40
3.65	N ₂	69.57	65.19
5.49	CO	11.83	12.85
10.23	CH ₄	0.39	0.60
12.97	CO ₂	6.55	11.86

Tabla 11. Condiciones de operación del GEK PP20 POWER PALLET.

Tiempo (min)	TC (°C)	TR (°C)	PC (atm)	PR (atm)
40	496	447	0.027	0.054
60	680	552	0.015	0.039

El incremento de la temperatura favorece la formación de hidrocarburos y promueve las reacciones que originan productos como el hidrógeno y el metano. En la Figura 40 se observa la formación del hidrógeno con la aparición del pico en un tiempo de retención de 0.91 min. El área de este pico corresponde a un porcentaje de 0.11% de hidrógeno. Este comportamiento se debe al aumento de la temperatura cuando el tiempo de operación cambia de 40 a 60 minutos.

Asimismo, en la Figura 39 y la Figura 40 se pueden apreciar el incremento en el porcentaje de metano en el gas de síntesis de 0.39% a 0.6%, cuando se produjo un cambio en la temperatura de reducción de 105°C. Las reacciones que posiblemente dieron lugar a formación de hidrógeno y metano con el incremento de la temperatura fueron las reacciones R9, R10 y R11.

Los resultados experimentales exhiben un incremento en el porcentaje de CO₂ de 6.55 a 11.86 cuando la temperatura de combustión aumento de 496 a 680°C respectivamente. Estos resultados concuerdan con los resultados experimentales reportados por Gil *et al.*, donde se atribuye el incremento del CO₂ a la reacción R17 cuando esta se ve favorecida por el efecto de la temperatura [48].

Como medida de la energía química contenida en el gas de síntesis, se obtuvo el poder calorífico superior sumando las contribuciones energéticas del hidrógeno, metano y monóxido de carbono. El poder calorífico superior obtenido experimentalmente a los 60 minutos fue de 0.47 MJ/Nm^3 . Dicho valor excede en 0.18 MJ/Nm^3 al poder calorífico superior del gas de síntesis a los 40 minutos de operación del gasificador. Este incremento se debe al mayor tiempo de residencia de la biomasa dentro del reactor, el avance de reacción y al incremento de la temperatura en ese intervalo.

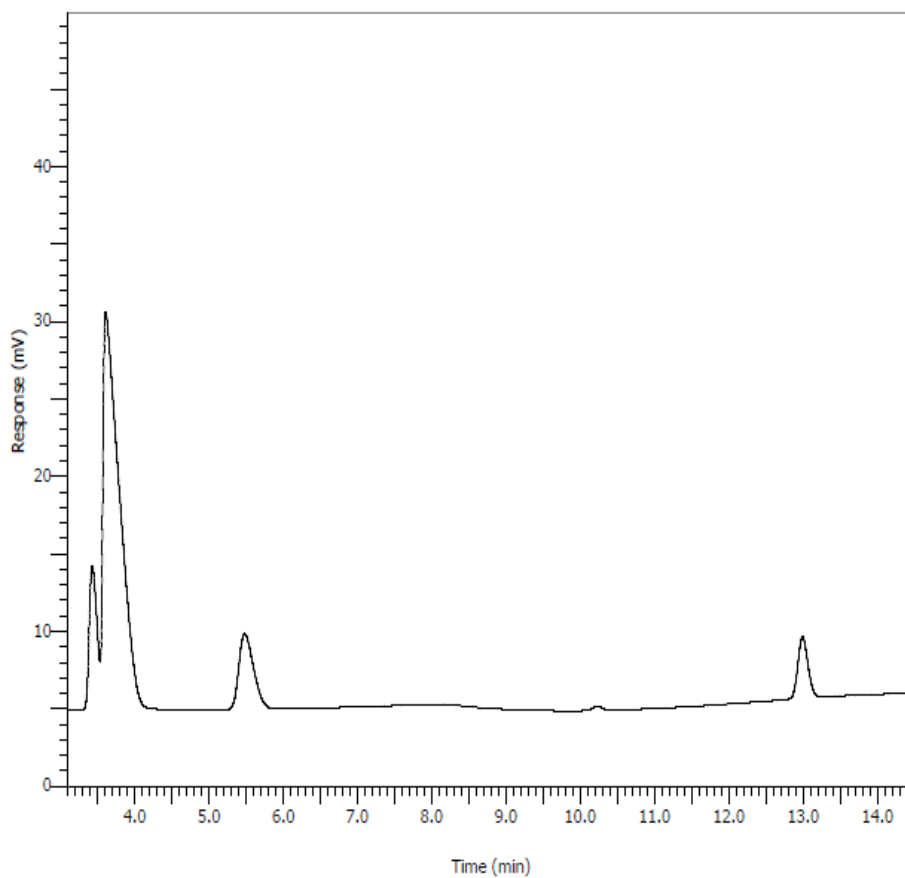


Figura 39. Cromatograma del gas de síntesis a los 40 min.

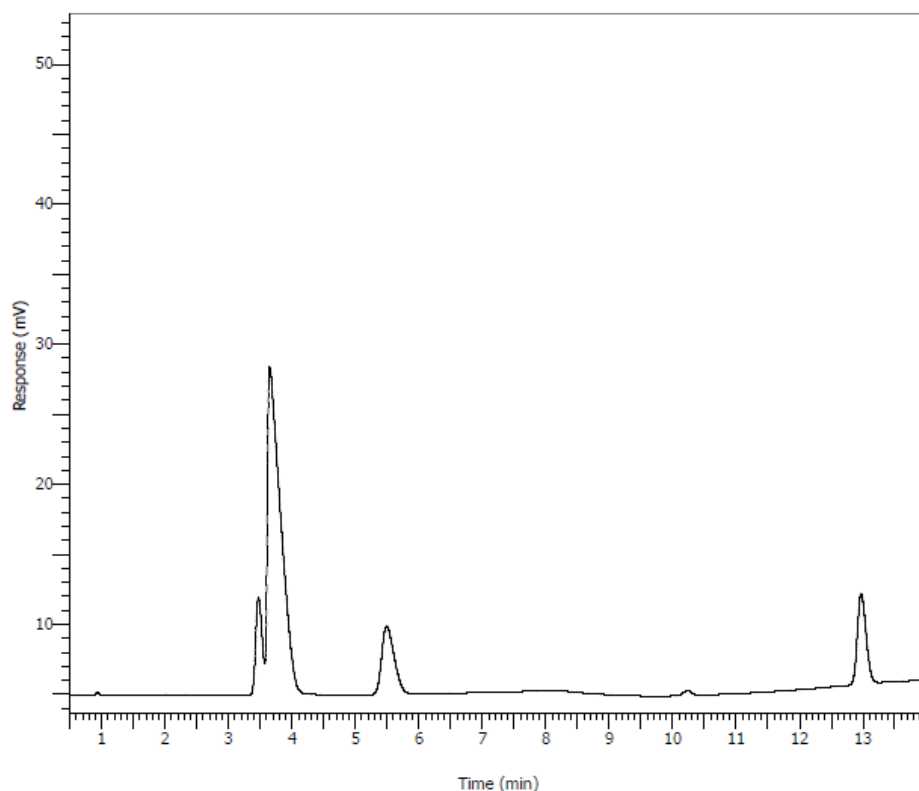


Figura 40. Cromatograma del gas de síntesis a los 60 min.

4.4 Resultados de simulación en ASPEN PLUS®

Se simuló la gasificación de las podas de eucalipto, de acuerdo con las condiciones señaladas en la Tabla 5. La composición del gas de síntesis se presenta en la Tabla 12. En esta tabla también se incluyen los resultados obtenidos de experimentalmente, para efectos de comparación.

Tabla 12. GEK PP20 POWER PALLET vs ASPEN PLUS®.

Compuesto	GEK PP20 POWER PALLET	ASPEN	Diferencia
H ₂	0.110	0.341	0.23
O ₂	9.400	9.092	0.31
N ₂	65.190	66.376	1.19
CO	12.850	12.098	0.75
CH ₄	0.600	0.609	0.01
CO ₂	11.860	0.002	11.86
Poder calorífico superior	0.470	0.770	0.30

El porcentaje de hidrógeno fue mayor en la simulación, con una diferencia de 0.23 % con respecto gas generado por el gasificador. Este incremento se ve reflejado en un cambio en el poder calorífico superior equivalente a 0.274 MJ/Nm³.

De manera similar, encontramos una diferencia 0.75% en el contenido de monóxido de carbono a favor del gas obtenido por el GEK PP20 POWER PALLET. Sin embargo, este porcentaje de monóxido de carbono solo aporta 0.017 MJ/Nm³ al poder calorífico superior del gas experimental.

Se puede observar que existe solamente una diferencia de 0.3 MJ/Nm³ en los valores del poder calorífico superior. Lo anterior se debe a que los valores arrojados por la simulación en ASPEN PLUS® poseen una diferencia mínima y máxima de 0.01 y 0.75% en la composición del gas de síntesis.

4.4.1 Análisis de sensibilidad

En la Figura 41, se ilustra la variación de la fracción molar de los principales compuestos del gas de síntesis en el rango de temperatura de 600 a 900°C.

En este intervalo de temperaturas se observa la disminución en la fracción molar del carbono. Este comportamiento es debido a la conversión del carbono en diferentes productos en la zona de reducción. Las reacciones en la zona de reducción son endotérmicas y por lo tanto se ven favorecidas por el incremento de temperatura en el bloque REquil.

El monóxido de carbono y el metano tienen un decrecimiento similar en sus fracciones molares en ese intervalo de temperatura. Sin embargo, bajo estas mismas condiciones el hidrógeno y el dióxido de carbono reflejan un comportamiento opuesto al antes mencionado. La fracción molar del hidrógeno se incrementa lo que favorece al poder calorífico superior del gas de síntesis. Mientras que el dióxido de carbono no aporta ningún valor energético al gas de síntesis, aunque también aumentó su fracción molar con la temperatura.

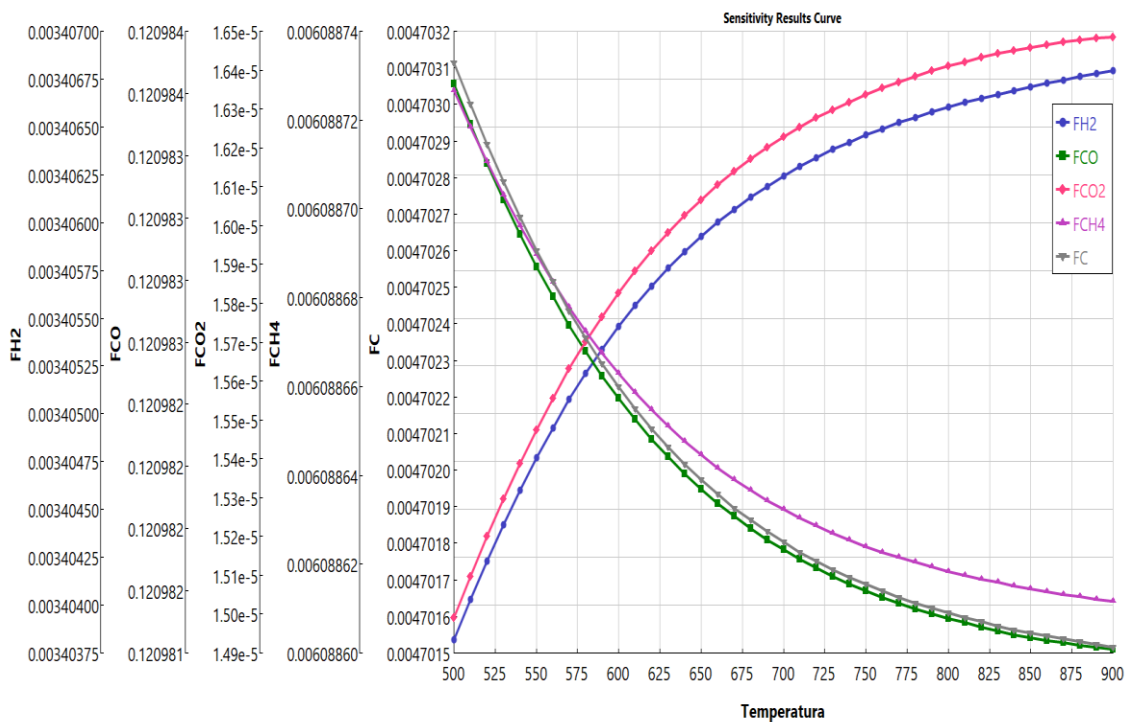


Figura 41. Variación de la fracción molar de los principales compuestos del gas de síntesis.

En la Figura 42 se encuentra graficada la variación de compuestos contaminantes dentro del gas de síntesis como son el amoníaco y el sulfuro de hidrógeno, respecto a la temperatura. En esta gráfica se observa con claridad la disminución de la fracción molar del sulfuro de hidrógeno con el incremento de la temperatura. Asimismo, se observa que no hay formación de amoníaco en ese rango de temperatura, posiblemente se debe a que es necesario una mayor concentración de hidrógeno para que se generen productos de acuerdo con la reacción R18.

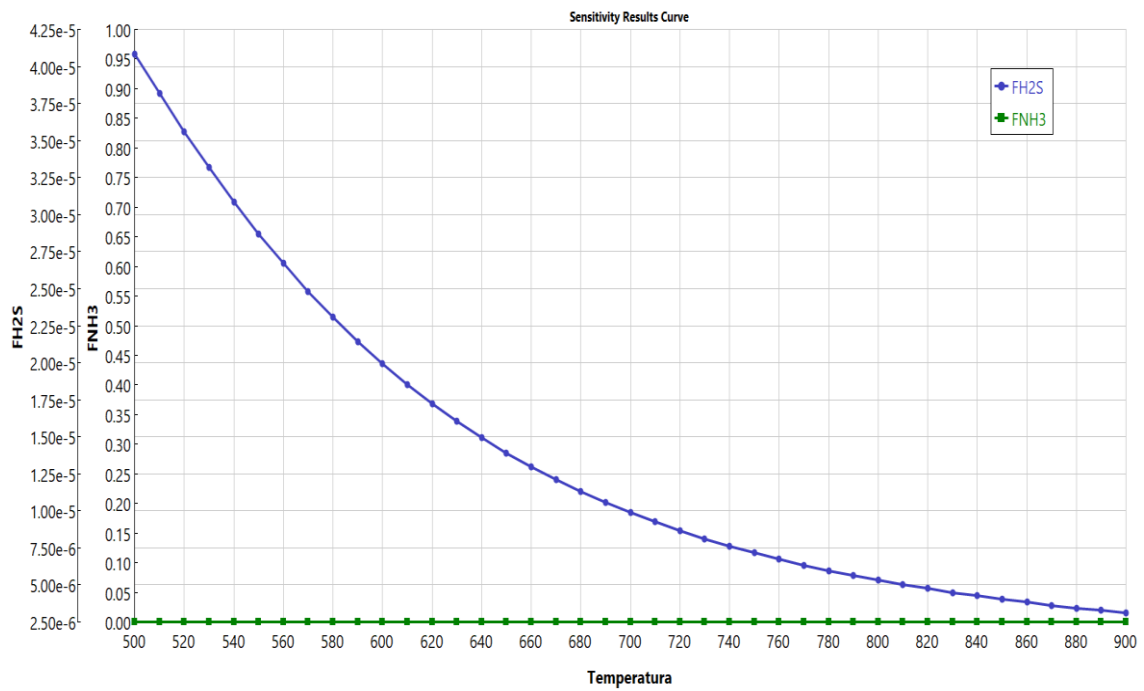


Figura 42. Variación de la fracción molar de contaminantes en el gas de síntesis.

CONCLUSIONES

Los resultados de la caracterización fisicoquímica de las podas de eucalipto indican que posee una humedad óptima para la gasificación, ya que se encuentran por debajo del 10%. Asimismo, posee 22.34% de carbono fijo lo que favorece a que el residuo carbonoso se queme con más lentitud y aumente el tiempo de residencia dentro del gasificador.

Con respecto a su composición química, el 15.86% de sustancias extraíbles y 25.56% en el contenido de lignina hacen del eucalipto un recurso potencial para la gasificación, ya que estos valores aumentan el poder calorífico superior del gas de síntesis. Además, el 64.09% de holocelulosa contribuyen favorablemente al rendimiento en la producción del gas de síntesis.

El análisis último reveló 44.05% de carbono y 5.24% de hidrógeno en la biomasa. Estos dos elementos contribuyen al poder calorífico superior, mientras que el oxígeno genera dióxido de carbono y nitrógeno y el segundo se convierte en su mayor parte en nitrógeno gaseoso y en ciertas condiciones puede reaccionar con el hidrógeno para producir amoníaco.

Se llevó a cabo la gasificación de las podas de eucalipto bajo dos condiciones de operación en el equipo GEK PP20 POWER PALLET. En la primera condición de operación el reactor se encontraba a una temperatura de combustión de 496°C y una temperatura de reducción de 447°C. En la segunda condición de operación se incrementó la temperatura de combustión a 680°C y la temperatura de reducción a 552°C.

Se determinó el poder calorífico superior del gas de síntesis obtenido bajo ambas condiciones de operación. La segunda condición de operación presentó el valor más alto de poder calorífico superior, equivalente a 0.47 MJ/Nm³, mientras la segunda condición fue de 0.29 MJ/Nm³.

El poder calorífico superior del gas de síntesis se determinó mediante la contribución del poder calorífico superior de cada uno de los componentes

presentes en el gas de síntesis. Estos componentes se determinaron por medio de la cromatografía de gases, encontrando que para la condición de operación con mayor poder calorífico superior el gas de síntesis estaba formado por un porcentaje de 0.11% de H₂, 9.40% de O₂, 65.19% de N₂, 12.85% CO, 0.6% de CH₄ y 11.86% de CO₂.

El poder calorífico superior del gas de síntesis obtenido en la simulación usando el software ASPEN PLUS® fue de 0.77 MJ/Nm³. Se realizó un análisis de sensibilidad para observar el comportamiento de los contaminantes en función de la temperatura de combustión. Los contaminantes analizados fueron el sulfuro de hidrógeno y el amoníaco.

Mediante el análisis de sensibilidad se pudo observar el decrecimiento en la concentración del sulfuro de hidrógeno cuando la temperatura se encuentra por encima de los 700°C. A su vez es posible encontrar la temperatura de operación necesaria para incrementar el porcentaje de un determinado compuesto dependiendo del poder calorífico superior que se desea obtener.

Las condiciones de operación a las que se trabajó el programa de ASPEN PLUS® coinciden con las condiciones experimentales en las que se obtuvo el gas de síntesis. Esto nos permite hacer comparaciones entre ambos resultados. El poder calorífico superior del gas de síntesis obtenido a través del programa ASPEN PLUS® es mayor, con una diferencia de 0.3 MJ/Nm³. Esta diferencia se atribuye a un aumento en el contenido de hidrógeno equivalente al 0.274 MJ/Nm³.

REFERENCIAS

1. Mahmoud, A., M. Shuhaimi, and M. Abdel Samed, *A combined process integration and fuel switching strategy for emissions reduction in chemical process plants*. Energy, 2009. **34**(2): p. 190-195.
2. Saidur, R., et al., *A review on biomass as a fuel for boilers*. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2011. **15**(5): p. 2262-2289.
3. Khan, A.A., et al., *Biomass combustion in fluidized bed boilers: Potential problems and remedies*. Fuel Processing Technology, 2009. **90**(1): p. 21-50.
4. Abbasi, T. and S.A. Abbasi, *Biomass energy and the environmental impacts associated with its production and utilization*. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2010. **14**(3): p. 919-937.
5. Tock, J.Y., et al., *Banana biomass as potential renewable energy resource: A Malaysian case study*. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2010. **14**(2): p. 798-805.
6. Sami, M., K. Annamalai, and M. Wooldridge, *Co-firing of coal and biomass fuel blends*. Progress in Energy and Combustion Science, 2001. **27**(2): p. 171-214.
7. Varela, M., Y. Lechón, and R. Sáez, *Environmental and socioeconomic aspects in the strategic analysis of a biomass power plant integration*. Biomass and Bioenergy, 1999. **17**(5): p. 405-413.
8. Nogués, F.S., *Energía de la Biomasa (volumen I)*. 2010: Prensas de la Universidad de Zaragoza.
9. Kan, T., V. Strezov, and T.J. Evans, *Lignocellulosic biomass pyrolysis: A review of product properties and effects of pyrolysis parameters*. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2016. **57**: p. 1126-1140.
10. Laine, C., *Structures of hemicelluloses and pectins in wood and pulp*. 2005: Helsinki University of Technology.
11. Grønli, M.G., *A theoretical and experimental study of the thermal degradation of biomass*. 1996.
12. Shafizadeh, F., *Introduction to pyrolysis of biomass*. Journal of Analytical and Applied Pyrolysis, 1982. **3**(4): p. 283-305.

13. Moreira, L.R.S. and E.X.F. Filho, *An overview of mannan structure and mannan-degrading enzyme systems*. Applied Microbiology and Biotechnology, 2008. **79**(2): p. 165.
14. Branca, C., et al., *Products and Kinetics of Glucomannan Pyrolysis*. Industrial & Engineering Chemistry Research, 2013. **52**(14): p. 5030-5039.
15. Sharma, R.K., et al., *Characterization of chars from biomass-derived materials: pectin chars*. Fuel, 2001. **80**(12): p. 1825-1836.
16. Mohan, D., C.U. Pittman, and P.H. Steele, *Pyrolysis of Wood/Biomass for Bio-oil: A Critical Review*. Energy & Fuels, 2006. **20**(3): p. 848-889.
17. Faravelli, T., et al., *Detailed kinetic modeling of the thermal degradation of lignins*. Biomass and Bioenergy, 2010. **34**(3): p. 290-301.
18. Willför, S., et al., *Lignans and lipophilic extractives in Norway spruce knots and stemwood*. Holzforschung, 2003. **57**(1): p. 27-36.
19. Oasmaa, A., et al., *Fast Pyrolysis of Forestry Residue. 1. Effect of Extractives on Phase Separation of Pyrolysis Liquids*. Energy & Fuels, 2003. **17**(1): p. 1-12.
20. Vassilev, S.V., et al., *An overview of the chemical composition of biomass*. Fuel, 2010. **89**(5): p. 913-933.
21. INEGI. Instituto Nacional de Estadística Geografía. 1995; Marco Geoestadístico]. Available from: http://www.inegi.org.mx/geo/contenidos/geoestadistica/M_Geoestadistico.aspx.
22. Agency, I.E.; Available from: <http://www.iea.org/Sankey/#?c=World&s=Balance>.
23. SEFOA, *Oficina estatal de informacion para el desarrollo rural sustentable de baja california*. 2016.
24. Souza-Santos, M.L., *Solid Fuels Combustion and Gasification: Modeling, Simulation*. 2010: CRC Press.
25. Basu, P., *Biomass Gasification and Pyrolysis : Practical Design and Theory*. 2010, Burlington, MA: Academic Press.
26. ALL POWER LABS. Available from: <http://www.allpowerlabs.com/>.
27. ASTM E711-87, *Standard test method for gross calorific value of refuse derived fuel by the bomb calorimeter*. West Conshohocken, USA: ASTM International, 2004.

28. *ASTM E871-82. Standard test method for moisture analysis of particulate wood fuels.* West Conshohocken, USA: ASTM International, 2006.
29. *ASTM E872-82. Standard test method for volatile matter in the analysis of particulate wood fuels.* West Conshohocken, USA: ASTM International, 2006.
30. *ASTM E830-87. Standard test method for ash in the analysis sample of refuse derived fuel.* West Conshohocken, USA: ASTM International, 2004.
31. *TAPPI 264 cm-07. Preparation of wood for chemical analysis.* 2007.
32. *TAPPI T 207 cm – 99. Water solubility of wood and pulp.* 1999.
33. *ASTM D1106-96. Standard test method for acid-insoluble lignin in wood.* West Conshohocken, USA: ASTM International, 2007.
34. *ASTM D1104-56. Method of Test for Holocellulose in Wood (Withdrawn 1985).* USA: ASTM International, 1978.
35. *ASTM D1103-60. Method of test for alpha-cellulose in wood (withdrawn 1985).* West Conshohocken, USA: ASTM International, 1977.
36. Pérez-Fortes, M., et al., *Enhanced modeling and integrated simulation of gasification and purification gas units targeted to clean power production.* Computer Aided Chemical Engineering, 2008. **25**: p. 793.
37. *Software Aspen plus ®, User Guide. V.8.0.*
38. Damartzis, T., S. Michailos, and A. Zabaniotou, *Energetic assessment of a combined heat and power integrated biomass gasification–internal combustion engine system by using Aspen Plus®.* Fuel processing technology, 2012. **95**: p. 37-44.
39. Bassyouni, M., et al., *Date palm waste gasification in downdraft gasifier and simulation using ASPEN HYSYS.* Energy Conversion and Management, 2014. **88**: p. 693-699.
40. Nemtsov, D. and A. Zabaniotou, *Mathematical modelling and simulation approaches of agricultural residues air gasification in a bubbling fluidized bed reactor.* Chemical Engineering Journal, 2008. **143**(1): p. 10-31.
41. Nikoo, M.B. and N. Mahinpey, *Simulation of biomass gasification in fluidized bed reactor using ASPEN PLUS.* Biomass and Bioenergy, 2008. **32**(12): p. 1245-1254.
42. Quaak, P., H. Knoef, and H.E. Stassen, *Energy from Biomass: A Review of Combustion and Gasification Technologies.* 1999: World Bank.

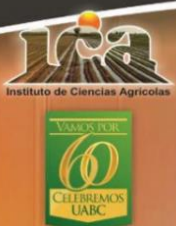



43. Kumar, R., et al., *Study of age and height wise variability on calorific value and other fuel properties of Eucalyptus hybrid, Acacia auriculaeformis and Casuarina equisetifolia*. Biomass and Bioenergy, 2011. **35**(3): p. 1339-1344.
44. Katakai, R. and D. Konwer, *Fuelwood characteristics of some indigenous woody species of north-east India*. Biomass and Bioenergy, 2001. **20**(1): p. 17-23.
45. Akhtar, J. and N. Saidina Amin, *A review on operating parameters for optimum liquid oil yield in biomass pyrolysis*. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2012. **16**(7): p. 5101-5109.
46. García, R., et al., *Characterization of Spanish biomass wastes for energy use*. Bioresource Technology, 2012. **103**(1): p. 249-258.
47. McKendry, P., *Energy production from biomass (part 3): gasification technologies*. Bioresource Technology, 2002. **83**(1): p. 55-63.
48. Galindo, A.L., et al., *Biomass gasification in a downdraft gasifier with a two-stage air supply: Effect of operating conditions on gas quality*. biomass and bioenergy, 2014. **61**: p. 236-244.

OTROS PRODUCTOS ACADÉMICOS

1. Banquez M., Montero G., Coronado M., García C., **Buendía H.**, Moreno A., Cervantes L. Análisis próximo de cáscara de higuera y podas de vid. Memorias del XIX Congreso Internacional en Ciencias Agrícolas.
2. Banquez M., Montero G., Coronado M., García C., **Buendía H.**, Moreno A., Cervantes L. Análisis próximo de cáscara de higuera y podas de vid. Certificado de Registro Público del Derecho de Autor.
3. **Buendía H.**, Montero G., García C., Coronado M., Banquez M., Moreno A., Cervantes L. Caracterización fisicoquímica de las podas de eucalipto. Memorias del XIX Congreso Internacional en Ciencias Agrícolas.
4. **Buendía H.**, Montero G., García C., Coronado M., Banquez M., Moreno A., Cervantes L. Caracterización fisicoquímica de las podas de eucalipto. Certificado de Registro Público del Derecho de Autor.
5. Cervantes L., Coronado M., García C., Montero G., Moreno A., Banquez M., **Buendía H.** Simulación en aspen plus® de un ciclo rankine para la generación de energía eléctrica a partir de paja de trigo. Memorias del XIX Congreso Internacional en Ciencias Agrícolas.
6. Cervantes L., Coronado M., García C., Montero G., Moreno A., Banquez M., **Buendía H.** Simulación en aspen plus® de un ciclo rankine para la generación de energía eléctrica a partir de paja de trigo. Certificado de Registro Público del Derecho de Autor.
7. Moreno A., Coronado M., Montero G., García C., Banquez M., **Buendía H.**, Cervantes L. Análisis próximo y determinación del poder calorífico superior del bagazo cervicero.

8. Moreno A., Coronado M., Montero G., García C., Banquez M., **Buendía H.**, Cervantes L. Análisis próximo y determinación del poder calorífico superior del bagazo cervecero. Certificado de Registro Público del Derecho de Autor.

ANEXOS




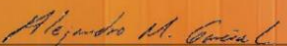
XIX CONGRESO INTERNACIONAL EN CIENCIAS AGRÍCOLAS
PRODUCCIÓN Y PROTECCIÓN EN PLANTAS

Otorgan la presente
CONSTANCIA

A: Hernán de Jesús Buendía Vergara
POR SU PARTICIPACIÓN COMO PONENTE CON EL TEMA "CARACTERIZACIÓN FÍSICOQUÍMICA DE LAS PODAS DE EUCALIPTO".

Mexicali, Baja California, 27 y 28 de octubre de 2016
"Por la realización plena del hombre"


Dr. Roberto Soto Ortiz
Director del Instituto de Ciencias Agrícolas


Dr. Alejandro Manelík García López
Presidente

INSTITUTO DE CIENCIAS AGRÍCOLAS

ANÁLISIS PRÓXIMO DE CÁSCARA DE HIGUERILLA Y PODAS DE VID

Banquez Sanmartín María Francis¹, Montero Alpírez Gisela¹, Coronado Ortega Marcos¹, García González Conrado¹, Buendía Vergara Hernán de Jesús¹, Moreno Camarena Abigail¹, Cervantes Ramos Laura¹

¹Instituto de Ingeniería, Universidad Autónoma de Baja California, Blvd. Benito Juárez y Calle de la Normal S/N, Col. Insurgentes Este, Mexicali, Baja California, CP 21280, México. Email: marbanq12@hotmail.com

Resumen

La identificación y caracterización de la composición química de un combustible sólido determinado es el paso inicial y más importante durante la investigación y aplicación del mismo. En este trabajo se realizó la determinación del análisis próximo de la cáscara de higuera y las podas de vid, residuos agrícolas de Baja California. De modo que se obtuvo el contenido de humedad, material volátil, cenizas y carbono fijo presente en cada residuo. Para la ejecución de cada análisis se siguieron las metodologías descritas en las normas ASTM. Los porcentajes determinados para la cáscara de higuera fueron, humedad 7.74%, material volátil 82.47%, cenizas 19.57% y carbono fijo 17.95% y para las podas de vid fueron, humedad 9.14%, material volátil 73.05%, cenizas 3.70% y carbono fijo 23.25%.

Palabras clave: Análisis próximo, cáscara de higuera, podas de vid.

Abstract

The identification and characterization of the chemical composition of a solid fuel is the initial step and the most important during the research and application. In this work it was carried out the determination of the proximate analysis from castor shell and vine pruning, agricultural residues of Baja California. Therefore, the moisture content, volatile matter, ash and fixed carbon for each residue were determined. All the analysis were performed according to the methodologies described in the corresponding ASTM standards. The results for castor shell highlighted, moisture 7.74%, volatile matter 82.47%, ash 19.57% and fixed carbon 17.95% and for vine pruning were, moisture 9.14%, volatile matter 73.05%, ash 3.70% and 23.25% fixed carbon.

Key words: Proximate analysis, castor shell, vine prunings.

CARACTERIZACIÓN FISCOQUÍMICA DE LAS PODAS DE EUCALIPTO

Buendía Vergara Hernán de Jesús¹, Montero Alpírez Gisela¹, García González Conrado¹, Coronado Ortega Marcos¹, Banquez Sanmartín María Francis¹, Moreno Camarena Abigail¹, Cervantes Ramos Laura Karina¹.

¹Universidad Autónoma de Baja California, Instituto de Ingeniería, Blvd. Benito Juárez y Calle de la Normal S/N, Col. Insurgentes Este, Mexicali, Baja California, CP 21280, México. mahanayin@gmail.com

Resumen

El eucalipto (*Eucalyptus camaldulensis*), es un árbol de rápido crecimiento cuyas podas pueden ser utilizadas para la gasificación. Entre los años 2003 al 2007 se registró en Mexicali un promedio anual de 71.4 hectáreas sembradas. El Instituto de Ingeniería de la UABC, posee un gasificador que se alimenta con residuos agrícolas, como las podas, para producir gas de síntesis y adicionalmente, energía eléctrica como subproducto. La caracterización fisicoquímica del material biomásico a procesar, es de gran importancia debido a que influye directamente sobre la calidad del gas de síntesis. Los resultados del análisis próximo de las podas de eucalipto muestran un 8.08% de humedad, 72.53% de materia volátil, 22.34% de carbono fijo y un 5.13% de cenizas. Además, el análisis de la composición química indica 15.81% de extraíbles totales, 25.58% de lignina y 64.09% de holocelulosa.

Palabras claves: análisis próximo, lignocelulosa, gasificación

Abstract

Eucalyptus (*Eucalyptus camaldulensis*) is a fast-growing tree whose branches can be used for gasification. From 2003 to 2007 an annual average of 71.4 hectares was recorded in Mexicali. The Institute of UABC engineering, has a gasifier that uses agricultural wastes to produce syngas and electricity as a byproduct. The physicochemical characterization of the biomass, is very important because this directly affects the quality of the syngas. The results of the proximate analysis of eucalyptus branches show 8.08% moisture, 72.53% volatile matter, 22.34% fixed carbon and 5.13% ash. Moreover, the chemical composition analysis indicated 15.81% of total extractable, 25.58% 64.09% lignin and holocellulose.

Keywords: proximate analysis, lignocellulose, gasification.

ANÁLISIS PRÓXIMO Y DETERMINACIÓN DEL PODER CALORÍFICO SUPERIOR DEL BAGAZO CERVECERO

Moreno Camarena Abigail¹, Coronado Ortega Marcos A.¹, Montero Alpírez Gisela¹,
García González Conrado¹, Banquez Sanmartín María Francis¹, Buendía Vergara
Hernán de Jesús¹, Cervantes Ramos Laura K.¹

¹Universidad Autónoma de Baja California, Instituto de Ingeniería, Laboratorio de Biocombustibles, Blvd. Benito Juárez s/n, C.P. 21280, Mexicali, Baja California, México. moreno.abigail@uabc.edu.mx

Resumen

La industria cervecera genera como principal subproducto el bagazo cervecero. En Mexicali, Baja California, se generaron más de 54 toneladas de bagazo en 2015 y se estima que la cifra se cuadruplicará en 2017. El bagazo cervecero es un material lignocelulósico disponible durante todo el año y de bajo costo. Este tipo de biomasa puede ser transformada en productos de valor agregado tales como el bioetanol o el biogás, entre otros. Con la finalidad de elegir el tipo de conversión más adecuado, fue necesario evaluar las propiedades fisicoquímicas de la biomasa. Es por ello, que, en el presente trabajo se realizó el análisis próximo y se determinó el poder calorífico superior del bagazo cervecero. Se obtuvieron los siguientes resultados del análisis próximo: 72.32% de humedad, 78.47% de materia volátil, 17.48% de carbono fijo y 4.05% de cenizas. El poder calorífico superior obtenido experimentalmente fue 18.70 MJ/kg. Tal resultado de humedad, sugiere que las técnicas de conversión bioquímicas, como la fermentación y digestión, son adecuadas para transformar el bagazo cervecero en un biocombustible.

Palabras Clave: Biomasa residual, revalorización, biocombustible.

Abstract

Brewer spent grain is the main byproduct of the brewer industry. By 2015 more than 54 tons of brewer spent grain were generated in Mexicali, Baja California and it is estimated that this number will quadruple by 2017. The brewer spent grain is a low-cost lignocellulosic material available throughout the year. This biomass resource can be transformed into value-added products such as bioethanol, biogas, among others. For the selection of the most appropriate type of conversion of biomass it is necessary to evaluate its physicochemical properties. Therefore, the proximate analysis and the higher heating value of the brewer spent grain were determined. The results of the proximate analysis highlighted 72.32% moisture, 78.47% volatile matter, fixed carbon 17.48% and 4.05% ash. The experimental higher heating value of the

CERTIFICADO

Registro Público del Derecho de Autor

Para los efectos de los artículos 13, 162, 163 fracción I, 164 fracción I, 168, 169, 209 fracción III y demás relativos de la Ley Federal del Derecho de Autor, se hace constar que la OBRA cuyas especificaciones aparecen a continuación, ha quedado inscrita en el Registro Público del Derecho de Autor, con los siguientes datos:

AUTORES: BANQUEZ SANMARTIN MARIA FRANCIS
BUENDIA VERGARA HERNAN DE JESUS
CERVANTES RAMOS LAURA KARINA
CORONADO ORTEGA MARCOS ALBERTO
GARCIA GONZALEZ CONRADO
MONTERO ALPIREZ GISELA
MORENO CAMARENA ABIGAIL

TITULO: ANALISIS PROXIMO DE CASCARA DE HIGUERILLA Y PODAS DE VID

RAMA: COMPILACION DE DATOS (BASE DE DATOS)

TITULARES: BANQUEZ SANMARTIN MARIA FRANCIS
BUENDIA VERGARA HERNAN DE JESUS
CERVANTES RAMOS LAURA KARINA
CORONADO ORTEGA MARCOS ALBERTO
GARCIA GONZALEZ CONRADO
MONTERO ALPIREZ GISELA
MORENO CAMARENA ABIGAIL

Con fundamento en lo establecido por el artículo 14 fracciones I, II y III de la Ley Federal del Derecho de Autor, el presente certificado no ampara: las ideas en sí mismas, las fórmulas, soluciones, conceptos, métodos, sistemas, principios, descubrimientos, procesos e invenciones de cualquier tipo; el aprovechamiento industrial o comercial de las ideas contenidas en las obras; los esquemas, planes o reglas para realizar actos mentales, juegos o negocios.

Con fundamento en lo establecido por el artículo 107 de la Ley Federal del Derecho de Autor, las bases de datos o de otros materiales legibles por medio de máquinas o en otra forma, que por razones de selección y disposición de su contenido constituyan creaciones intelectuales, quedarán protegidas como compilaciones. Dicha protección no se extenderá a los datos y materiales en sí mismos.

Con fundamento en el artículo 13 último párrafo de la Ley Federal del Derecho de Autor, las obras que por analogía puedan considerarse obras literarias o artísticas se incluirán en la rama que les sea más afín a su naturaleza.

Con fundamento en el artículo 237 de la Ley Federal del Derecho de Autor, los afectados por los actos y resoluciones emitidos por el Instituto que pongan fin a un procedimiento administrativo, a una instancia o resuelvan un expediente, podrán interponer recurso de revisión en los términos de la Ley Federal del Procedimiento Administrativo.

Con fundamento en el artículo 9 fracción I del Reglamento Interior del Instituto Nacional del Derecho de Autor, corresponde al Director del Registro del Derecho de Autor expedir los certificados de registro de las obras que establece la Ley y su Reglamento, así como determinar la rama en que deberán registrarse las obras que por su analogía puedan considerarse literarias o artísticas.

03-2016-120610525400-01

Página 1 de 2

CULTURA
SECRETARÍA DE CULTURA



[Firma manuscrita]
INSTITUTO NAC. DEL D. A.

CERTIFICADO

Registro Público del Derecho de Autor

Para los efectos de los artículos 13, 162, 163 fracción I, 164 fracción I, 168, 169, 209 fracción III y demás relativos de la Ley Federal del Derecho de Autor, se hace constar que la **OBRA** cuyas especificaciones aparecen a continuación, ha quedado inscrita en el Registro Público del Derecho de Autor, con los siguientes datos:

AUTORES: BANQUEZ SANMARTIN MARIA FRANCIS
BUENDIA VERGARA HERNAN DE JESUS
CERVANTES RAMOS LAURA KARINA
CORONADO ORTEGA MARCOS ALBERTO
GARCIA GONZALEZ CONRADO
MONTERO ALPIREZ GISELA
MORENO CAMARENA ABIGAIL

TITULO: CARACTERIZACION FISICOQUIMICA DE LAS PODAS DE EUCALIPTO

RAMA: COMPILACION DE DATOS (BASE DE DATOS)

TITULARES: BANQUEZ SANMARTIN MARIA FRANCIS
BUENDIA VERGARA HERNAN DE JESUS
CERVANTES RAMOS LAURA KARINA
CORONADO ORTEGA MARCOS ALBERTO
GARCIA GONZALEZ CONRADO
MONTERO ALPIREZ GISELA
MORENO CAMARENA ABIGAIL

Con fundamento en lo establecido por el artículo 14 fracciones I, II y III de la Ley Federal del Derecho de Autor, el presente certificado no ampara las ideas en sí mismas, las fórmulas, soluciones, conceptos, métodos, sistemas, principios, descubrimientos, procesos e invenciones de cualquier tipo; el aprovechamiento industrial o comercial de las ideas contenidas en las obras; los esquemas, planes o reglas para realizar actos mentales, juegos o negocios.

Con fundamento en lo establecido por el artículo 107 de la Ley Federal del Derecho de Autor, las bases de datos o de otros materiales legibles por medio de máquinas o en otra forma, que por razones de selección y disposición de su contenido constituyan creaciones intelectuales, quedarán protegidas como compilaciones. Dicha protección no se extenderá a los datos y materiales en sí mismos.

Con fundamento en el artículo 13 último párrafo de la Ley Federal del Derecho de Autor, las obras que por analogía puedan considerarse obras literarias o artísticas se incluirán en la rama que les sea más afín a su naturaleza.

Con fundamento en el artículo 237 de la Ley Federal del Derecho de Autor, los afectados por los actos y resoluciones emitidos por el Instituto que pongan fin a un procedimiento administrativo, a una instancia o resuelvan un expediente, podrán interponer recurso de revisión en los términos de la Ley Federal del Procedimiento Administrativo.

Con fundamento en el artículo 9 fracción I del Reglamento Interior del Instituto Nacional del Derecho de Autor, corresponde al Director del Registro del Derecho de Autor expedir los certificados de registro de las obras que establece la Ley y su Reglamento, así como determinar la rama en que deberán registrarse las obras que por su analogía puedan considerarse literarias o artísticas.

03-2016-120610513100-01

Página 1 de 2



CERTIFICADO

Registro Público del Derecho de Autor

Para los efectos de los artículos 13, 162, 163 fracción I, 164 fracción I, 168, 169, 209 fracción III y demás relativos de la Ley Federal del Derecho de Autor, se hace constar que la **OBRA** cuyas especificaciones aparecen a continuación, ha quedado inscrita en el Registro Público del Derecho de Autor, con los siguientes datos:

AUTORES: BANQUEZ SANMARTIN MARIA FRANCIS
BUENDIA VERGARA HERNAN DE JESUS
CERVANTES RAMOS LAURA KARINA
CORONADO ORTEGA MARCOS ALBERTO
GARCIA GONZALEZ CONRADO
MONTERO ALPIREZ GISELA
MORENO CAMARENA ABIGAIL

TITULO: SIMULACION EN ASPEN PLUS DE UN CICLO RANKINE PARA LA GENERACION DE ENERGIA ELECTRICA A PARTIR DE PAJA DE TRIGO

RAMA: COMPILACION DE DATOS (BASE DE DATOS)

TITULARES: BANQUEZ SANMARTIN MARIA FRANCIS
BUENDIA VERGARA HERNAN DE JESUS
CERVANTES RAMOS LAURA KARINA
CORONADO ORTEGA MARCOS ALBERTO
GARCIA GONZALEZ CONRADO
MONTERO ALPIREZ GISELA
MORENO CAMARENA ABIGAIL

Con fundamento en lo establecido por el artículo 14 fracciones I, II y III de la Ley Federal del Derecho de Autor, el presente certificado no ampara las ideas en sí mismas, las fórmulas, soluciones, conceptos, métodos, sistemas, principios, descubrimientos, procesos e invenciones de cualquier tipo; el aprovechamiento industrial o comercial de las ideas contenidas en las obras; los esquemas, planes o reglas para realizar actos mentales, juegos o negocios.

Con fundamento en lo establecido por el artículo 107 de la Ley Federal del Derecho de Autor, las bases de datos o de otros materiales legibles por medio de máquinas o en otra forma, que por razones de selección y disposición de su contenido constituyan creaciones intelectuales, quedarán protegidas como compilaciones. Dicha protección no se extenderá a los datos y materiales en sí mismos.

Con fundamento en el artículo 13 último párrafo de la Ley Federal del Derecho de Autor, las obras que por analogía puedan considerarse obras literarias o artísticas se incluirán en la rama que les sea más afín a su naturaleza.

Con fundamento en el artículo 237 de la Ley Federal del Derecho de Autor, los afectados por los actos y resoluciones emitidos por el Instituto que pongan fin a un procedimiento administrativo, a una instancia o resuelvan un expediente, podrán interponer recurso de revisión en los términos de la Ley Federal del Procedimiento Administrativo.

Con fundamento en el artículo 9 fracción I del Reglamento Interior del Instituto Nacional del Derecho de Autor, corresponde al Director del Registro del Derecho de Autor expedir los certificados de registro de las obras que establece la Ley y su Reglamento, así como determinar la rama en que deberán registrarse las obras que por su analogía puedan considerarse literarias o artísticas.

03-2016-120610565300-01

Página 1 de 2

CULTURA
SECRETARÍA DE CULTURA



Escritura Pública

CERTIFICADO

Registro Público del Derecho de Autor

Para los efectos de los artículos 13, 162, 163 fracción I, 164 fracción I, 168, 169, 209 fracción III y demás relativos de la Ley Federal del Derecho de Autor, se hace constar que la **OBRA** cuyas especificaciones aparecen a continuación, ha quedado inscrita en el Registro Público del Derecho de Autor, con los siguientes datos:

AUTORES: BANQUEZ SANMARTIN MARIA FRANCIS
BUENDIA VERGARA HER NAN DE JESUS
CERVANTES RAMOS LAURA KARINA
CORONADO ORTEGA MARCOS ALBERTO
GARCIA GONZALEZ CONRADO
MONTERO ALPIREZ GISELA
MORENO CAMARENA ABIGAIL

TITULO: ANALISIS PROXIMO Y DETERMINACION DEL PODER CALORIFICO SUPERIOR
DEL BAGAZO CERVECERO

RAMA: COMPILACION DE DATOS (BASE DE DATOS)

TITULARES: BANQUEZ SANMARTIN MARIA FRANCIS
BUENDIA VERGARA HER NAN DE JESUS
CERVANTES RAMOS LAURA KARINA
CORONADO ORTEGA MARCOS ALBERTO
GARCIA GONZALEZ CONRADO
MONTERO ALPIREZ GISELA
MORENO CAMARENA ABIGAIL

Con fundamento en lo establecido por el artículo 14 fracciones I, II y III de la Ley Federal del Derecho de Autor, el presente certificado no ampara: las ideas en sí mismas, las fórmulas, soluciones, conceptos, métodos, sistemas, principios, descubrimientos, procesos e invenciones de cualquier tipo; el aprovechamiento industrial o comercial de las ideas contenidas en las obras; los esquemas, planes o reglas para realizar actos mentales, juegos o negocios.

Con fundamento en lo establecido por el artículo 107 de la Ley Federal del Derecho de Autor, las bases de datos o de otros materiales legibles por medio de máquinas o en otra forma, que por razones de selección y disposición de su contenido constituyan creaciones intelectuales, quedarán protegidas como compilaciones. Dicha protección no se extenderá a los datos y materiales en sí mismos.

Con fundamento en el artículo 13 último párrafo de la Ley Federal del Derecho de Autor, las obras que por analogía puedan considerarse obras literarias o artísticas se incluirán en la rama que les sea más afín a su naturaleza.

Con fundamento en el artículo 237 de la Ley Federal del Derecho de Autor, los afectados por los actos y resoluciones emitidos por el Instituto que pongan fin a un procedimiento administrativo, a una instancia o resuelvan un expediente, podrán interponer recurso de revisión en los términos de la Ley Federal del Procedimiento Administrativo.

Con fundamento en el artículo 9 fracción I del Reglamento Interior del Instituto Nacional del Derecho de Autor, corresponde al Director del Registro del Derecho de Autor expedir los certificados de registro de las obras que establece la Ley y su Reglamento, así como determinar la rama en que deberán registrarse las obras que por su analogía puedan considerarse literarias o artísticas.

03-2016-120610553900-01

Página 1 de 2

CULTURA
SECRETARÍA DE CULTURA



[Firma manuscrita]