

ECO-BALANCE DE CARBONO PARA LA GENERACIÓN DE ENERGÍA
ELÉCTRICA EMPLEANDO BIO-OIL PROVENIENTE DE RESIDUOS
FORESTALES.

DAVID ALEJANDRO LÓPEZ RODRÍGUEZ

UNIVERSIDAD PONTIFICIA BOLIVARIANA
ESCUELA DE INGENIERÍAS
FACULTAD DE INGENIERÍA QUÍMICA
INGENIERÍA QUÍMICA
MEDELLÍN
2013

ECO-BALANCE DE CARBONO PARA LA GENERACIÓN DE ENERGÍA
ELÉCTRICA EMPLEANDO BIO-OIL PROVENIENTE DE RESIDUOS
FORESTALES.

DAVID ALEJANDRO LÓPEZ RODRÍGUEZ

Trabajo de grado para optar por el grado de Ingeniero Químico

Asesor

ERIKA ARENAS CASTIBLANCO

Ph.D. Ingeniera Química

UNIVERSIDAD PONTIFICIA BOLIVARIANA

ESCUELA DE INGENIERÍAS

FACULTAD DE INGENIERÍA QUÍMICA

INGENIERÍA QUÍMICA

MEDELLÍN

2013

NOTA DE ACEPTACIÓN

Firma

Nombre

Presidente de jurado

Medellín, Noviembre 11 de 2013.

AGRADECIMIENTO

Les agradezco principalmente a mis padres quienes me brindaron el apoyo incondicional durante los momentos más difíciles a lo largo de toda mi vida académica. También quiero agradecerles a todos los profesores que tuve durante mi paso por la universidad, especialmente a Erika Arenas Castiblanco quien durante más de dos años tuvo la dedicación y la paciencia para corregirme y brindarme las herramientas necesarias para cumplir con un adecuado desarrollo profesional.

CONTENIDO

INTRODUCCIÓN	1
CAPITULO 1	3
MARCO TEORICO	3
1.1. ANALISIS DE CICLO DE VIDA	3
1.2. BALANCES DE MATERIA Y ENERGIA E INVENTARIOS	6
1.3. FACTORES DE EMISION Y CAPTACION	8
1.3.1. Factores de emisión	8
1.3.1. Factores de captación	8
1.4. ECO-BALANCES.....	9
1.5. PIRÓLISIS	10
CAPITULO 2.....	12
METODOLOGIA	12
2.1. META DEL ANÁLISIS.....	12
2.2. LIMITES DEL SISTEMA Y UNIDAD FUNCIONAL	12
2.3. BALANCES DE MATERIA Y ENERGIA	15
2.4. FACTORES DE EMISIÓN Y CAPTACIÓN.....	16
2.5. ECO-BALANCES.....	16
2.6. COMPARACIÓN FINAL.....	17
CAPITULO 3.....	18
RESULTADOS Y ANALISIS DE RESULTADOS	18
3.1. CULTIVOS.....	18
3.1.1. Emisión	18
3.1.2 Captación	20
3.2. TRANSPORTE	21
3.3. ASERRÍO.....	22

3.4.	PLANTA DE PRODUCCIÓN DEL BIO-OIL	23
3.4.1.	Secado	24
3.4.2.	Separación de Nitrógeno	25
3.4.3.	Pirólisis	26
3.4.4.	Enfriamiento y condensación del bio-oil	26
3.4.5.	Separación de la mezcla agua-bio-oil.....	27
3.4.6.	Refinamiento y cracking	27
3.5.	PRODUCCION DE ENERGÍA	29
3.6.	ECO-BALANCE	30
3.7.	PRODUCCION DE 1 MJ DE ENERGIA ELECTRICA.....	33
	CONCLUSIONES	37
	BIBLIOGRAFIA.....	39
	ANEXOS	45
	ANEXO 1. SECUENCIAS DE CÁLCULO	45
	ANEXO 2. GUÍA PARA UTILIZAR LA HOJA DE CÁLCULO	49

LISTA DE FIGURAS

- Figura 1. Fases de un Análisis de Ciclo de Vida.
- Figura 2. Límites del análisis.
- Figura 3. Entradas y salidas del cultivo.
- Figura 4. Entradas y salidas del proceso de transporte.
- Figura 5. Entradas y salidas del aserrío.
- Figura 6. Entradas y salidas de la planta de producción.
- Figura 7. Entradas y salidas del motor de combustión interna.
- Figura 8. Diagrama de proceso de bio-oil.
- Figura 9. Motor de combustión interna.

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Eco-balance del cultivo.

Tabla 2. Eco-balance para el transporte.

Tabla 3. Eco-balance para el aserrío.

Tabla 4. Eco-balance para la planta de producción de bio-oil.

Tabla 5. Eco-balance para la producción de energía eléctrica.

Tabla 6. Eco-balance Total.

Tabla 7. Ton de CO₂ producidas en la planta de producción.

Tabla 8. Eco-Balance total para 1 MW.

RESUMEN

La demanda energética a nivel mundial ha venido aumentando de forma considerable en los últimos años, llegando a tal punto que en Colombia se tiene una capacidad de producción de 13531MW de energía eléctrica. Solamente el 67.4% corresponde a fuentes renovables de energía.

Los biocombustibles han representado una solución de energía renovable, puesto que la mayoría de ellos parten de materia prima como biomasa, de la cual después de aplicarle cambios físico-químicos, se puede obtener un combustible con propiedades similares a los combustibles fósiles.

En este trabajo se presenta el Eco-balance de carbono para la producción de energía eléctrica a partir de bio-oil obtenido de la pirólisis de aserrín de *pinus patula*. Un Eco-balance de carbono se fundamenta en dos puntos principalmente: en la captura de dióxido de carbono por parte de la biomasa durante la producción de la misma, y en la emisión de dióxido de carbono durante todo el proceso de producción. La diferencia de estos dos valores se conoce como un eco-balance de carbono.

El sistema utilizado para el análisis va desde el cultivo de *pinus patula* hasta la producción de energía eléctrica, teniendo como procesos intermedios la producción de aserrín, producción y refinamiento del bio-oil y transporte. La unidad funcional del análisis fue 1MJ de energía eléctrica, los factores de emisión se calcularon con base en reacciones químicas o se tomaron de la EPA (*Environmental Protection Agency*) y los factores de captación de CO₂ se tomaron de trabajos previos realizados en la región. Este trabajo encontró que el sistema analizado es un sumidero de dióxido de carbono, ya que el valor del eco-balance fue de 1.501 TonCO₂.

PALABRAS CLAVES: Eco-balance, unidad funcional, *pinus pátula*, bio-oil, dióxido de carbono.

INTRODUCCIÓN

Durante las últimas décadas ha sido de preocupación mundial la utilización de combustibles no renovables para la producción de energía eléctrica, por su alto aporte al calentamiento global. Para el 2030, según cifras del departamento de energía de los Estados Unidos, la demanda de energía eléctrica crecerá hasta un 26% de la demanda que se tenía en 2007, esto es un incremento del 1% anual (Energy Information Department, 2007). Alrededor del 70% de la energía a nivel mundial se produce por combustibles fósiles y solamente un 8% se produce por recursos renovables (Fan, Alward, Klinger, Sadehvandi, & Shonnard, 2011). En Colombia, para junio de 2013 se contaba con una capacidad de producción de 5326,86 GWh, de los cuales el 63.3% corresponde a generación hidráulica, el 5 % corresponde a generación de plantas térmicas combinadas y el 31.7% restante corresponde a generación con fuentes no renovables (UPME, 2013).

El uso de fuentes no renovables para la producción de energía eléctrica, trae como principal consecuencia la generación de dióxido de carbono, según el Banco Mundial, en el 2008 se produjeron 32'500.000 toneladas de CO₂, lo que equivale a 4.8 toneladas de CO₂ por cada habitante (Bancomundial, 2012). El CO₂ es uno de los principales causantes del efecto invernadero, lo cual repercute directamente en el calentamiento global. El mes de agosto de 2012 fue catalogado por la Organización de Meteorología Mundial como el segundo mes más cálido desde 1880 (EiColombiano, 2012). Por otro lado, el decrecimiento de la densidad glacial ha sido más acelerada de lo esperado, causando así que el nivel de los mares haya crecido hasta en 17 cm durante el siglo pasado (Green Facts, 2007). Según las proyecciones hechas por expertos, se calcula que si el nivel de derretimiento de los polos llegara a derretir solamente el 10% de Groenlandia, el nivel de los océanos subiría hasta 70 cm, lo cual reduciría las costas en más de 50 cm (Climatico, 2007).

En Colombia, a diferencia de otros países, se ha encontrado que debido a la vegetación prolongada y a los recursos hídricos que se tiene, aun no se ha llegado a los niveles de contaminación anteriormente mencionados; por el contrario se ha encontrado que la tierra ha sido capaz de aumentar su

captación de CO₂ hasta en un 50% más de lo que se tenía previamente (EIColombiano, 2012).

Por lo anterior es necesario fuentes de energías renovables, tales como la biomasa, a partir de esta se pueden obtener combustibles utilizando métodos tales como: la pirólisis, la gasificación, la combustión directa entre otros. Estos métodos básicamente parten de una materia prima que se somete a cambios físicos y químicos para producir combustible. Estos pueden ser utilizados para la producción de energía eléctrica mediante motor de combustión interna u otros mecanismos.

Por ello, surge la necesidad de cuantificar las reducciones de dióxido de carbono del combustible utilizado, comparado con los combustibles tradicionalmente utilizados. Durante el crecimiento de la biomasa se produce una captación de CO₂, por medio del proceso de fotosíntesis y posteriormente cuando se utiliza como fuente de energía renovable se da una liberación de CO₂. La diferencia entre los dos valores, sumado con las emisiones asociadas al proceso de producción de combustible, se conoce como análisis de ciclo de vida (Fan, Alward, Klinger, Sadehvandi, & Shonnard, 2011).

En este trabajo se presenta el Eco-balance de carbono para la producción de bio-oil mediante pirólisis de aserrín y su posterior uso en la generación de energía. Primariamente se hará un análisis de los límites del sistema de estudio, para así posteriormente definir una unidad funcional; la cual servirá para tener la base de cálculo para los balances de materia y energía en cada uno de los procesos tenidos en cuenta en la delimitación del sistema. Finalmente se realizara los eco-balances necesarios para determinar si se da una mayor captación de gases de efecto invernadero.

CAPITULO 1

MARCO TEÓRICO

1.1. ANÁLISIS DE CICLO DE VIDA

Se define análisis de ciclo de vida como una recopilación y evaluación de las entradas, salidas y los impactos ambientales potenciales de un sistema producto durante todo su ciclo de vida (ISO, 14040, 2003). El ciclo de vida de un producto se define también como el seguimiento que se le hace desde “la cuna hasta la tumba”. Es decir, un seguimiento desde que se adquiere la materia prima hasta que se entrega el producto final, teniendo en cuenta los límites del sistema, los cuales pueden incluir la generación de residuos durante la producción del producto final. Un análisis de ciclo de vida da información de los potenciales impactos ambientales que tiene dicho producto durante toda su producción, teniendo en cuenta todas las materias primas y recursos que se necesitan para producirlo. Dichos impactos ambientales se evalúan en tres escenarios diferentes: emisiones a la atmosfera, emisiones al agua y emisiones a la tierra. Dentro de las emisiones al agua se cuantifica los contaminantes que se desechan en el proceso, por ejemplo agua acida, agua caliente o fría, agua contaminada con nitratos, sulfatos u otro tipo de sustancia que impacte negativamente el ecosistema. En las emisiones al suelo se tiene en cuenta todos los desechos que no son reutilizables o que simplemente son llevadas a un depósito para su degradación. Finalmente se tiene en cuenta las emisiones al aire, dentro de las cuales se analizan factores como: material particulado, amonio, dióxido de carbono, monóxido de carbono, sulfatos, óxidos de nitrógeno y metano (Naranjo, 2013). Uno de los más importantes factores que analiza un Análisis de Ciclo de Vida es la generación de dióxido de carbono, por ser uno de los precursores del efecto invernadero, por ello durante este análisis solo consideraremos el dióxido de carbono. Es importante conocer este tipo de información, puesto que de acuerdo a los impactos encontrados en los

diferentes límites se pueden tomar decisiones de proceso que pueden ayudar a mejorar las condiciones ambientales que anteriormente se tenían (Finnveden, y otros, 2009).

Un análisis de ciclo de vida correctamente desarrollado puede ayudar a la reducción de los puntos críticos de proceso a nivel ambiental, es decir como anteriormente se mencionó, puede ayudar a tomar decisiones y a plantearse nuevas formas de proceso para reducir los altos índices de generación que se están presentando en algún punto de la línea de producción. A pesar que la metodología para el desarrollo de un análisis de ciclo de vida está en sus inicios, las entidades gubernamentales la han reconocido como una de las herramientas que pueden ayudar a las empresas en la reducción de los costos ambientales (ISO, 14040, 2003).

Un análisis de ciclo de vida bajo la normativa ISO debe cumplir con las siguientes fases: definición de la meta y el alcance, análisis de inventario, evaluación del impacto e interpretación. Cabe resaltar, que las cuatro fases del análisis están conectadas de forma tal que se pueda hacer un proceso iterativo, el cual permite devolverse a la fase inicial si los análisis e interpretaciones que se encontraron no cumplen con la meta planteada inicialmente. Para una mayor comprensión de la conexión de las cuatro fases, la Figura 1 describe de forma satisfactoria la relación entre ellas (ISO, 14040, 2003).

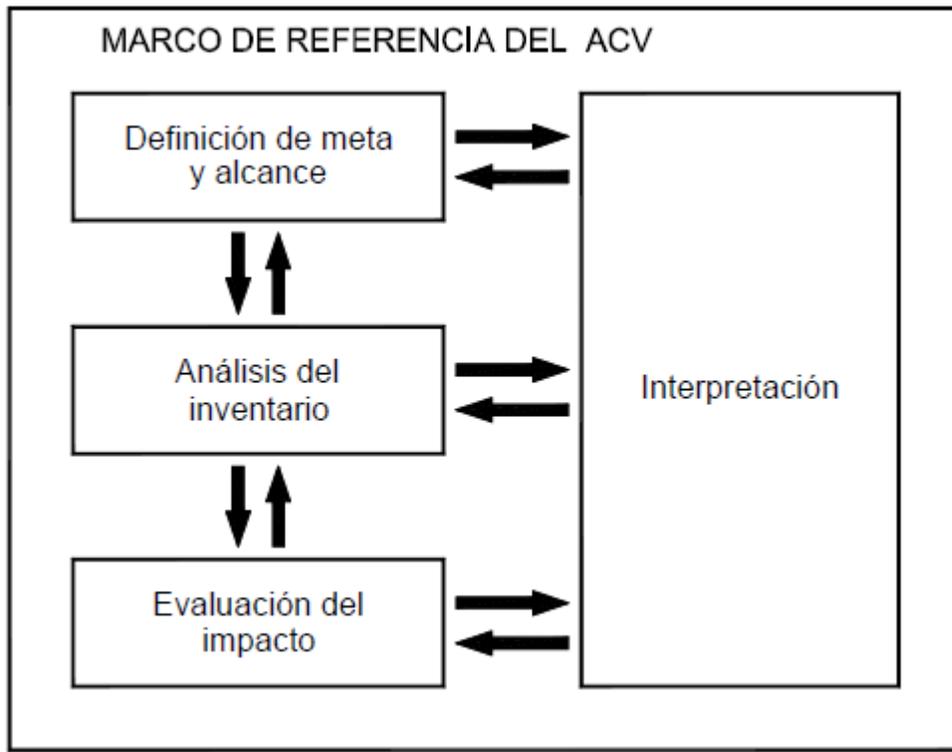


Figura 1. Fases de un Análisis de Ciclo de Vida.

Los alcances del análisis o los límites del sistema deben ser definidos de modo que permitan asegurar de forma clara y concisa que se va a lograr la meta inicialmente propuesta. Debido a que como anteriormente se mostró que el Análisis de Ciclo de Vida es un proceso iterativo, los límites del sistema pueden estar sujetos a cambios durante todo el desarrollo del mismo. Sin embargo, las condiciones iniciales de la calidad de los datos, la aplicabilidad del sistema producto, las limitaciones y suposiciones iniciales deben permanecer durante todo el análisis aunque se cambien los límites. Por otro lado los límites del análisis también deben garantizar la producción o el consumo, según sea el caso, de la unidad funcional con la cual se van a llevar a cabo los cálculos posteriores (ISO, 14040, 2003).

Debido a que los límites del sistema deben cubrir en su totalidad el ciclo de vida del sistema producto, se pueden hacer análisis de ciclo de vida parciales. Éstos están enfocados a zonas previamente divididas con el fin de analizar la información parcial que se tiene. Sin embargo, finalmente todo debe conllevar a un análisis de ciclo de vida completo que incluya todos los

procesos relacionados durante el ciclo de vida del sistema producto. Por otro lado, en muchos casos se hacen limitaciones de tiempo y espacio. Esto es importante cuando se está analizando material biodegradable, pero no siempre es necesario especificar el tiempo. Pero el espacio se debe limitar puesto que el análisis de ciclo de vida por lo general se lleva a cabo para un sistema producto local y se puede incurrir en errores si se extrapola para cualquier locación (Finnveden, y otros, 2009).

Los límites de un sistema pueden ser de tres tipos diferentes:

- Entre el proceso y el ambiente.
- Entre lo significativo e insignificante de un proceso.
- Entre el proceso a nivel tecnológico y otro que sirva de referencia.

De los anteriores el más utilizado es el primero, entre el proceso y el ambiente, el cual puede sufrir modificaciones de acuerdo al sistema producto y a la meta con la cual se esté trabajando. Por ejemplo, cuando se está trabajando con las emisiones o captaciones de un campo abierto, se hace necesario hacer una delimitación de espacio y tiempo, puesto que en muchos casos se pueden tener emisiones durante 100 o más años (Finnveden, y otros, 2009).

1.2. BALANCES DE MATERIA Y ENERGÍA E INVENTARIOS

Los balances de materia y energía se definen como la distribución de flujos de materia y energía durante un proceso. Dicho proceso puede o no tener reacción química. Los balances de materia y energía parten del principio de la conservación de la masa y la energía respectivamente.

El principio fundamental para el desarrollo de los balances de materia sin reacción química se puede resumir en el siguiente enunciado “los flujos de un mismo componente que salen de un proceso son exactamente los mismos que entran, si no se presenta acumulación”. Cuando se tiene reacción química el balance de materia puede ser descrito por el mismo enunciado, teniendo en cuenta la reacción química, “los flujos de un mismo

componente que salen del proceso son los mismos que entran más la generación. Y en una reacción química ordinaria, el consumo de materia en los reactivos es la misma generación en los productos, por lo tanto la masa es constante” (Reklaitis, 1986).

Para el caso de los balances de materia se parte del principio de la conservación de la energía, el cual dice que “la energía no se crea ni se destruye, solo se transforma” (Reklaitis, 1986).

Para la mayoría de los procesos se pueden llevar a cabo los balances de materia y energía en simultáneo, es decir acoplados. Sin embargo, dependiendo de los límites del análisis esto puede ser conveniente o simplemente puede ser información adicional que no interfiere con la interpretación final del análisis de ciclo de vida (Finnveden, y otros, 2009).

La realización de los balances de materia y energía son necesarios con el fin de determinar los flujos de entradas y salidas de cada una de las etapas del ciclo de vida del sistema producto. Estos flujos de entrada y salida se conocen como los inventarios, los cuales no solo dependen de los resultados de los balances, sino también se pueden encontrar datos útiles realizando una búsqueda bibliográfica de fuentes confiables (Finnveden, y otros, 2009).

Los datos que se recolecten ya sea mediante la realización de balances o por medio de la búsqueda bibliográfica, deben tener una calidad con el fin que cada uno de estos datos lleve a la realización de la meta y a obtener un análisis de la calidad requerida. La calidad de los datos debe cumplir entre otras con precisión y exactitud, integridad y representatividad, coherencia, incertidumbre baja, cobertura temporal y geográfica del sistema producto (ISO, 14040, 2003).

1.3. FACTORES DE EMISIÓN Y CAPTACIÓN

1.3.1. Factores de emisión

Los factores de emisión relacionan la producción de gases de efecto invernadero por unidad de trabajo utilizada en cada factor. Esta unidad de trabajo utilizada puede ser por ejemplo: distancia recorrida, peso de material utilizado, energía generada, etc. Estos factores son determinados como un promedio de valores durante un tiempo, de modo tal que sea representativo y se pueda extrapolar a cualquier proceso. Desde la primera publicación en el año 1972, anualmente se vienen dando unas actualizaciones con el fin de mejorar y de arrojar valores más reales en los cálculos (EPA, 2011).

Los factores reportados por la agencia de protección ambiental (EPA *Environmental Protection Agency*) corresponden a las mediciones realizadas en el territorio norteamericano. Debido a que en Colombia el tema de factores de emisión de gases de efecto invernadero aun es un tema en desarrollo, se va a trabajar con los datos reportados por dicha agencia. Sin embargo, en el caso que se puedan calcular manualmente, como una combustión, se hará con el rigor necesario para así acercarse a la realidad. Adicionalmente se tomarán los factores reportados por la UPME para energía eléctrica tomada de una red interconectada (UPME, Siame, 2013).

1.3.1. Factores de captación

Los factores de captación hacen referencia a la cantidad de gases de efecto invernadero que es capaz de captar un árbol durante su periodo de crecimiento. Para el desarrollo de una planta es necesario llevar a cabo el proceso fotosintético, en el cual la planta necesita de fuentes de carbono para así poder incrementar su tamaño y producir los frutos propios de la misma. Las plantas almacenan carbono y emiten oxígeno a la atmosfera, lo

cual es necesario para la respiración del resto de los seres vivos (Lopera Arango & Gutierrez Velez, 2000).

La mayoría de los factores de captación de dióxido de carbono, están dados en términos de toneladas de CO₂ por hectárea por año. Por lo cual, se hace necesario, determinar cuál es el tiempo promedio que se demora una especie de árbol determinada en llegar a la altura máxima o determinar el periodo de tiempo de captación hasta que se produce la recolección de la materia prima.

Cabe resaltar que, la captación de gases de efecto invernadero solo se produce en las fases iniciales del ciclo de vida. Es decir, la captación de estos gases, se da cuando se está produciendo la materia prima para el sistema producto que se está analizando, inmediatamente después que se obtiene la materia prima, puede no haber captación. Además, se debe tener en cuenta que muchos sistemas productos no tienen un periodo de cultivo de materia prima, por lo cual no siempre se produce una captación de gases de efecto invernadero (Fischersworing Hömberg & Robkamp Ripken, 2005).

1.4. ECO-BALANCES

El término eco-balance se define como un balance aplicado a procesos involucrados con el medio ambiente. Este término se utiliza en los análisis de ciclo de vida para dar una introducción a lo que finalmente se conoce como el análisis de inventario, el cual es simplemente la recopilación y cálculo de cada uno de los flujos que se obtuvieron durante todo el análisis de ciclo de vida (ISO, 14040, 2003).

Los flujos de entradas y salidas durante todo el ciclo de vida del sistema producto, deben cumplir con algunas especificaciones, para la correcta aplicación del análisis de inventario. Por ejemplo, los flujos energéticos deben ser especificados de modo tal que se conozca con certeza los combustibles a utilizar, o la fuente de energía que se requiere; estos procesos denominados servicios industriales, deben ser calculados con las respectivas eficiencias de los equipos en cuestión (ISO, 14040, 2003).

1.5. PIRÓLISIS

La pirólisis es una descomposición térmica en ausencia de oxígeno, mediante la cual una materia prima orgánica es transformada. Los procesos de pirólisis son caracterizados por sus valores moderados de temperatura, por su sistema de refrigeración casi instantáneo y por la ausencia total de oxígeno, puesto que si esta condición no se tiene se podría llegar a confundir el proceso con una combustión incompleta o una gasificación (Bridgwater, 2012).

Durante los últimos años, el proceso de pirólisis se convirtió en una alternativa energética debido a que como materia prima se utilizan recursos renovables. Por ejemplo: madera, basura, biomasa, llantas usadas, residuos de construcción, residuos agroforestales y todo aquello que pueda ser considerado como fuente renovable (Fan, Alward, Klinger, Sadehvandi, & Shonnard, 2011).

El proceso de pirólisis consiste en hacer pasar la materia prima por un recipiente a altas temperaturas y completamente sellado con el fin de prevenir el ingreso de oxígeno. En este punto, la materia prima es calentada hasta una temperatura alrededor de 500°C; donde la materia prima se transforma en gas, que posteriormente es condensado rápidamente para la obtención del combustible líquido (Bridgwater, 2012).

Debido a su versatilidad en materias primas, las plantas de pirólisis a nivel mundial han venido aumentando paulatinamente. Logrando que por ejemplo en la India hayan empresas especializadas en la instalación de este tipo de plantas, con capacidades de producción que van desde 5 toneladas hasta 12 toneladas. Logrando la instalación exitosa en diferentes ciudades como: Hisar, Becchiwara, Karnal, Mumbai, Ajmer. Entre otras (DivyaInternational, 2012).

Por otro lado, en Estados Unidos se han diseñado varias plantas con diferentes características. Una de ellas tiene como variable que es una planta móvil donde el valor agregado es la reducción de los costos de transporte de

la biomasa. Logrando las mismas eficiencias que se pueden lograr en una planta ubicada en alguna parte. En contraste, los costos de capital y de mantenimiento se incrementan, haciendo que esta planta no sea tan apetecida por los inversionistas. Además, para la operación de esta planta se necesita de grandes áreas para permitir el estacionamiento de los camiones con los equipos de pirolisis (Badger & Fransham, 2006).

CAPITULO 2

METODOLOGÍA

A continuación se muestra la metodología para el desarrollo de un Eco-balance de carbono para la producción de energía eléctrica a partir de bio-oil proveniente de residuos forestales, dicho residuo forestal corresponde al aserrín que se genera luego de transformar la madera en estibas, tablas, muebles, entre otros.

2.1. META DEL ANÁLISIS

La meta del estudio de Eco-balance de carbono es la evaluación del impacto ambiental del dióxido de carbono del bio-oil en su ciclo de vida desde la siembra de los cultivos que dan origen a los residuos que se plantea utilizar (aserrín) hasta la producción de energía eléctrica mediante uso de motor de combustión interna.

2.2. LÍMITES DEL SISTEMA Y UNIDAD FUNCIONAL

Los límites del proceso se contemplan desde la siembra de los arboles hasta la producción de 1MJ de energía eléctrica. Para ello se debe tener en cuenta unos procesos intermedios dentro de los cuales se involucran factores críticos como el transporte y la producción del combustible. Para una mayor comprensión de los alcances del análisis en la Figura 2 se puede ver el sistema en general que va a ser objeto del análisis; y en las Figuras 3, 4, 5, 6

y 7 se puede ver con mayor detalle las entradas y salidas de cada uno de los procesos involucrados en el análisis. Dentro de los límites del sistema no están contempladas las emisiones asociadas con el uso de fertilizante en el cultivo, tampoco se tiene en cuenta el transporte ni los consumos energéticos dentro del mismo. Este análisis está enfocado a las emisiones de dióxido de carbono y no tiene en cuenta las emisiones de otros gases de efecto invernadero como: NO_x , compuestos sulfonados, monóxido de carbono y metano.

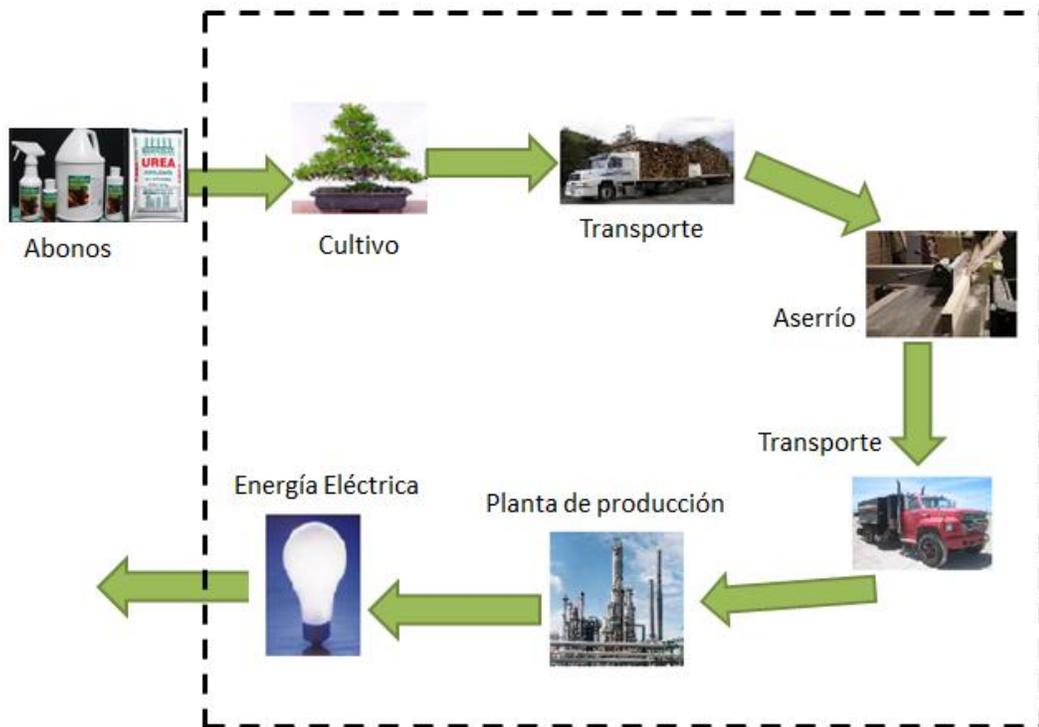


Figura 2. Límites del análisis.

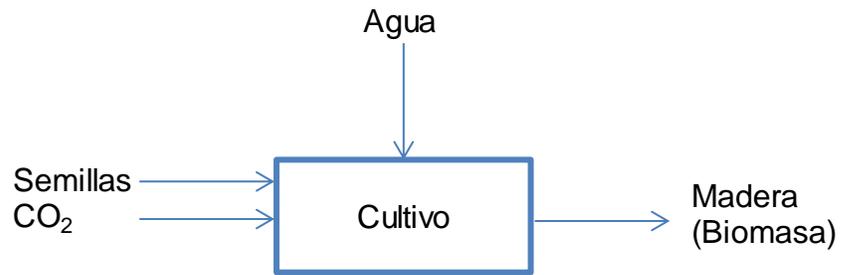


Figura 3. Entradas y salidas del cultivo.

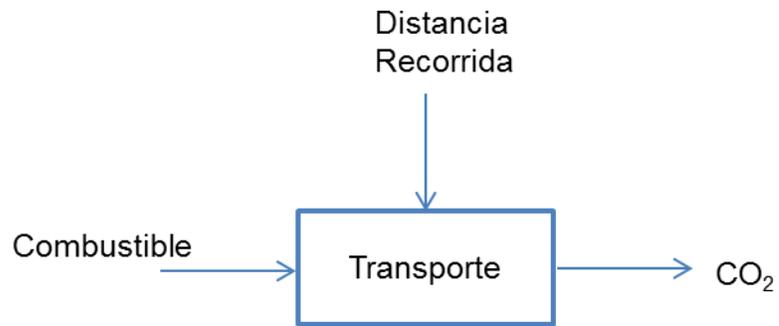


Figura 4. Entradas y salidas del proceso de transporte.

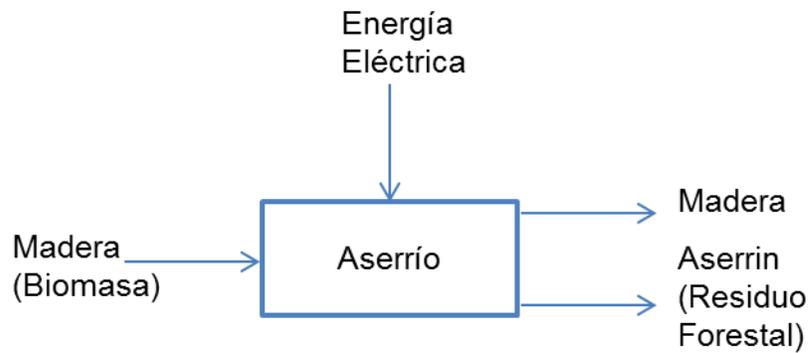


Figura 5. Entradas y salidas del aserrío.

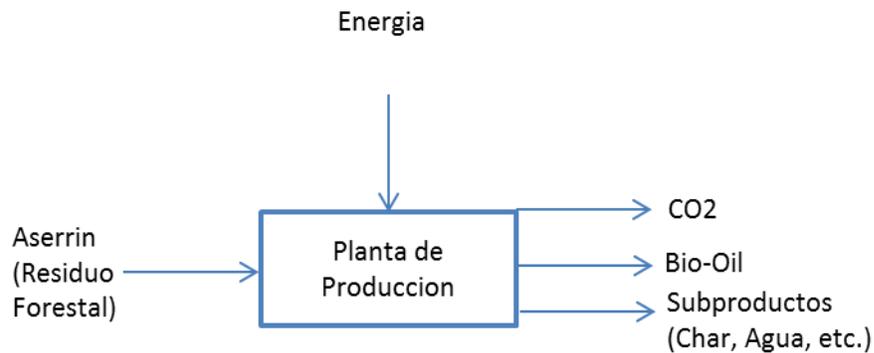


Figura 6. Entradas y salidas de la planta de producción.



Figura 7. Entradas y salidas del motor de combustión interna.

Inicialmente como unidad funcional se define la producción de una tonelada de bio-oil para establecer las emisiones asociadas a la producción de éste. Luego se cambia la unidad funcional a 1MJ de energía eléctrica producido por un motor de combustión interna. Se decide cambiar de unidad funcional para poder así realizar una comparación posterior entre la producción in situ o en una ciudad de consumo.

2.3. BALANCES DE MATERIA Y ENERGÍA

De acuerdo con los límites del sistema se deben plantear los balances de materia y energía para cada uno de los procesos involucrados. El balance de materia se basa en el principio de conservación de la materia el cual dice que “en un sistema abierto en estado estable, se conserva que la masa que entra es igual a la masa que sale, así como el número de moléculas” (Reklaitis,

1986). En el caso que se tenga involucrado el balance de energía, se utilizara la primera ley de la termodinámica, la cual dice que “la cantidad de energía que entra a un sistema es igual a la energía que sale más la acumulación”. Para la producción de bio-oil se deben plantear los balances de acuerdo con la primera ley de la termodinámica y el principio de conservación de la masa. Para ello se aplicaran los principios de conservación de energía y masa, para cada uno de los procesos anteriormente descritos (Reklaitis, 1986).

2.4. FACTORES DE EMISIÓN Y CAPTACIÓN

Para los factores de emisión, se utilizaran los datos reportados por la agencia para la protección del medio ambiente (EPA por sus siglas en ingles). Además, se hará una verificación de acuerdo a las relaciones estequiometrias de cada uno de los factores que lo permitan (EPA, 2011). Adicionalmente, se tomarán los factores reportados por la UPME para energía eléctrica tomada de la red interconectada (UPME, Siame, 2013).

Para la captación de carbono se utilizarán los datos de Gabriel Lopera y Víctor Gutiérrez. Estos autores reportan para promedio de crecimiento de 25 años un factor de captación de dióxido de carbono para un cultivo de árboles de especie *pinus patula* (Lopera & Gutiérrez, 2000).

2.5. ECO-BALANCES

Los eco-balances según la ISO son el resultado de la resta entre la captación y la emisión de CO₂. Para ello simplemente se utiliza la magnitud de los valores encontrados luego de planteado los balances que previamente se describieron (ISO, 14040, 2003).

2.6. COMPARACIÓN FINAL

Finalmente, la comparación entre lugares, se debe hacer con el valor final que se encontró en los eco-balances, es por ello que, para hacer la comparación entre la ubicación de la planta de producción, se necesita conocer con exactitud la diferencia entre las distancias, y los procesos intermedios entre un lugar y otro. Las dos posibles ubicaciones de la planta son: exactamente al lado del aserrío principal y una ciudad de consumo que será Medellín, la diferencia de distancia entre los dos es de 110 km.

CAPITULO 3

RESULTADOS Y ANÁLISIS DE RESULTADOS

A continuación se muestran los resultados obtenidos para el presente estudio. Los resultados que se presentan son numéricos, cuya secuencia de cálculo se presenta para una mayor comprensión en el Anexo 1.

3.1. CULTIVOS

3.1.1. Emisión

Durante el proceso de crecimiento de la madera se presentan dos fenómenos a nivel ambiental. Por un lado, está la generación de dióxido de carbono por la utilización de energía para los diferentes procesos de riego y abono que se deben hacer durante el proceso de crecimiento de la planta. Por otro lado, está la captación de dióxido de carbono por el cual, la planta capta el carbono necesario para todo su proceso de crecimiento.

Los valores de captación de dióxido de carbono se pueden encontrar como un valor neto que resulta de la diferencia entre la captación de dióxido de carbono y las emisiones del mismo durante un periodo de tiempo determinado. Sin embargo, también se pueden encontrar datos de los valores de emisión y de captación por separado. Para el presente análisis se trabajó con este último.

Debido a que aproximadamente el 49.73% de las especies cultivadas en Antioquia corresponde a *pinus patula* (DANE, 2006), es conveniente trabajar

con los valores encontrados para el mismo. Para el cual se encontró que el factor de emisión de dióxido de carbono corresponde a 0.77 Ton CO₂/ha/año (Martín, F.M. et al., 2001). Para la especie seleccionada, se sabe que un árbol tarda alrededor de 8 años en alcanzar su valor máximo de captación de dióxido de carbono. Sin embargo, solamente durante los primeros 5 años, se hace un proceso de abono constante; para efectos de cálculo de emisiones solamente se tiene un periodo efectivo de 5 años. También cabe anotar que las plantaciones que fueron consideradas durante el análisis, son plantaciones que han sido dedicadas al cultivo forestal por más de 25 años en la zona norte del departamento de Antioquia, por ello no tenemos en cuenta las generaciones relacionadas a los cambios de utilización del suelo.

Para determinar el número de hectáreas necesarias, basta con resolver el balance de materia para el aserrío. Es decir, se necesita saber cuánto es el aserrín necesario para la producción del Bio-oil y de la cantidad de aserrín que resulta por cierta cantidad de madera, según las encuestas realizadas previamente por el Instituto de Energía y Termodinámica durante el desarrollo de una investigación para la producción de bio-oil a partir de residuos agroforestales, se encontró que por cada 100 kg de madera que ingresan al aserrío, 13.356 kg salen en forma de aserrín, 5.118 kg salen en forma de rechazo de la materia prima y el resto sale como madera efectiva. Para producir 1 tonelada de bio-oil se necesitan 6923.077 kg de aserrín con un porcentaje de humedad aproximado del 35%, con una eficiencia teórica del 20% en el pirolizador. Para la producción de 6923.077 kg de aserrín se necesitan 92352.115 kg de madera que sale del cultivo, esto teniendo en cuenta lo que previamente se describió en cuanto a los porcentajes de aserrín y de desecho que se generan en los aserríos. Finalmente para lograr calcular las hectáreas necesarias, se tiene en cuenta la productividad del *pinus patula*, cuyo valor es de 11000 kg/ha (Gerding & Schlatter, 1995) y el con el valor de madera necesaria se calculó que la cantidad de hectáreas necesarias para la producción de la madera es de 8.4.

Finalmente, se pudo determinar que para un periodo de 5 años, con las condiciones de crecimiento normales de abono para un árbol el Antioquia, se tiene que se producen 3.85 Toneladas de CO₂/ha. Con esta base de cálculo se pudo determinar que se necesitan 21,886.8 m³ de agua para las 8.4 hectáreas durante los 25 años de consumo (Hober & Trecaman, 2004).

3.1.2 Captación

El proceso de captación de dióxido de carbono se presenta cuando las plantas hacen su proceso de fotosíntesis, para la cual necesitan nutrientes que permitan su desarrollo. Las plantas necesitan del carbono para poder desarrollar los tallos y las hojas, por lo cual del dióxido de carbono lo único que utilizan es el carbono y expulsan el oxígeno, por ello las plantas son limpiadoras naturales del aire.

Para el caso específico del *pinus patula* se sabe que el proceso de crecimiento está alrededor de 25 años. Sin embargo, como ya se dijo anteriormente solo se debe hacer un abono constante por 5 años. Durante los 25 años, los arboles de esta especie captan dióxido de carbono de forma tal que logran desarrollar tallos de un diámetro de 50 cm y una altura de hasta 35 m (Gillespie, 2000).

Debido a lo anterior, se sabe que las plantaciones de *pinus patula* son grandes captadores de dióxido de carbono. En el año 2000 se realizó un estudio en la Universidad Nacional de Colombia, donde se encontró que una plantación de *pinus patula* es capaz de captar 36.41 Ton CO₂/ha/año (Lopera & Gutiérrez, 2000). Tomando en cuenta el periodo de captación anteriormente descrito, 25 años, se puede llegar a que cada hectárea es capaz de captar 910.25 Toneladas de CO₂.

Para una mayor comprensión en la Tabla 1. se muestra el inventario de entradas y salidas para esta etapa del proceso.

Entradas		Unidades
Agua	21,887	m ³
CO ₂	7,642	Ton CO ₂
Salidas		Unidades
CO ₂	32	Ton CO ₂
Madera	92	Ton

Tabla 1. Eco-balance del cultivo.

3.2. TRANSPORTE

El transporte se refiere a cada una de las distancias entre un lugar a otro que se debe utilizar algún medio de transporte, ya sea para transportar la materia prima o para transportar el bio-oil. En el proceso de producción de energía eléctrica a partir de bio-oil, es uno de los más importantes, puesto que por lo general los diferentes procesos no se llevan a cabo en un mismo lugar, y cada distancia adicional representa una generación de dióxido de carbono.

Durante el Ciclo de Vida que actualmente es objeto de análisis, se tienen contempladas las siguientes distancias:

- Transporte desde los cultivos hasta el aserrío. Esta distancia fue estimada como un promedio de las distancias entre los aserríos y los cultivos en las diferentes zonas de Antioquia, llegando al resultado de 70 Km.
- Adicionalmente, para el análisis del caso donde el bio-oil sea utilizado en una ciudad de consumo como Medellín, se debe adicionar una distancia de transporte desde el aserrío hasta la planta de producción. La cual se estimó en 110 km, tomando como promedio la distancia de los principales aserríos de Antioquia y la ciudad de Medellín.

Los factores de emisión de dióxido de carbono que se tomaron en cuenta para este punto fueron los entregados por el *World Resources Institute*, según el cual cada camión con una capacidad entre 10 y 70 Toneladas genera $2.04 \cdot 10^{-4}$ Ton CO₂/km/Tonelada transportada (GHC, 2007).

Finalmente, basta con hacer la multiplicación del factor anteriormente mencionado, por cada una de las distancias contempladas, y teniendo en cuenta que se transportan 6 toneladas. Se puede ver que para una distancia de 70 km se tiene una generación de 0.1 Toneladas de CO₂. Mientras que, para una distancia de 180 km se tiene una generación de 0.25 Toneladas de CO₂. Mostrando que la diferencia entre las dos distancias es de 0.15 Ton CO₂.

Para una mayor comprensión en la Tabla 2. se muestra el inventario de entradas y salidas para esta etapa del proceso.

Entradas		Unidades
Distancia 1	70	Km
Distancia 2	180	Km
Peso Transportado	6	Ton
Salidas		Unidades
CO ₂ Distancia 1	0.10	Ton CO ₂
CO ₂ Distancia 2	0.25	Ton CO ₂

Tabla 2. Eco-balance para el transporte.

3.3. ASERRÍO

Durante el proceso de la transformación de la madera, hay un proceso intermedio donde se produce la materia prima para la pirólisis. Este paso es la producción de aserrín. Sin embargo, este es un producto secundario derivado del proceso que se produce cuando se corta los troncos de madera en trozos deseados; estos productos deseados por lo general son tablas de tamaño estándar para la producción de muebles, estibas y demás.

El aserrío funciona básicamente con energía eléctrica, la cual puede ser generada por diferentes medios, por ejemplo: combustibles fósiles, biocombustibles, medios eólicos, medios hídricos, entre otros. Debido a que se desconoce la ubicación de la planta y la obtención de energía eléctrica, se decidió tomar como fuente de generación un combustible que genere dióxido de carbono. Por lo cual se determinó que la energía que se consume durante el proceso en el aserrío es de 1.327 KWh/m³ (FEDEMADERAS, 2012), lo que equivale a 1.315 Ton CO₂/KWh (EPA, 2011). Con un valor de la

densidad del pino de 6000 kg/m³ (FEDEMADERAS, 2012), el factor de emisión de CO₂ por uso de energía eléctrica es 3.199 ton CO₂/ha.

Ahora bien, para la determinación de la cantidad de hectáreas se tomaron en cuenta las encuestas realizadas a diferentes aserraderos en la zona de Antioquia. Donde los datos encontrados fueron que se produce un porcentaje de rechazo de 5.118% y un porcentaje de aserrín de 13.356%. Con los datos anteriores se puede encontrar que para producir 6923.077 kg de aserrín, se necesitan ingresar 54487.75 kg de madera. Tomando en cuenta que el porcentaje de desechos en el cultivo es de 59%, se puede calcular que la cantidad de masa que se debe obtener en el cultivo es de 92352.12 kg de madera. Finalmente, teniendo en cuenta que en un cultivo de *pinus patula* se tiene una productividad de 11000 kg/ha (Gerding & Schlatter, 1995) se determinó que se necesitan 8.4 hectáreas para la producción de madera determinada. Estos cálculos están basados en la producción de una tonelada de bio-oil, como previamente se describió.

Para una mayor comprensión en la Tabla 3. se muestra el inventario de entradas y salidas para esta etapa del proceso.

Entradas		Unidades
Madera	54.49	Ton
Energía Eléctrica	115	kWh
Salidas		Unidades
CO ₂	26.86	Ton CO ₂
Madera	47.57	Ton
Aserrín	6.92	Ton

Tabla 3. Eco-balance para el aserrío.

3.4. PLANTA DE PRODUCCIÓN DEL BIO-OIL

Después de haber cultivado, transportado y producido la madera y el aserrín, este está listo para ser procesado y convertido en bio-oil. Para ello se diseñó un proceso incluyendo el tratamiento previo de secado que debe tener el

aserrín para reducir su humedad. Para una mayor comprensión se puede ver en la Figura 8.

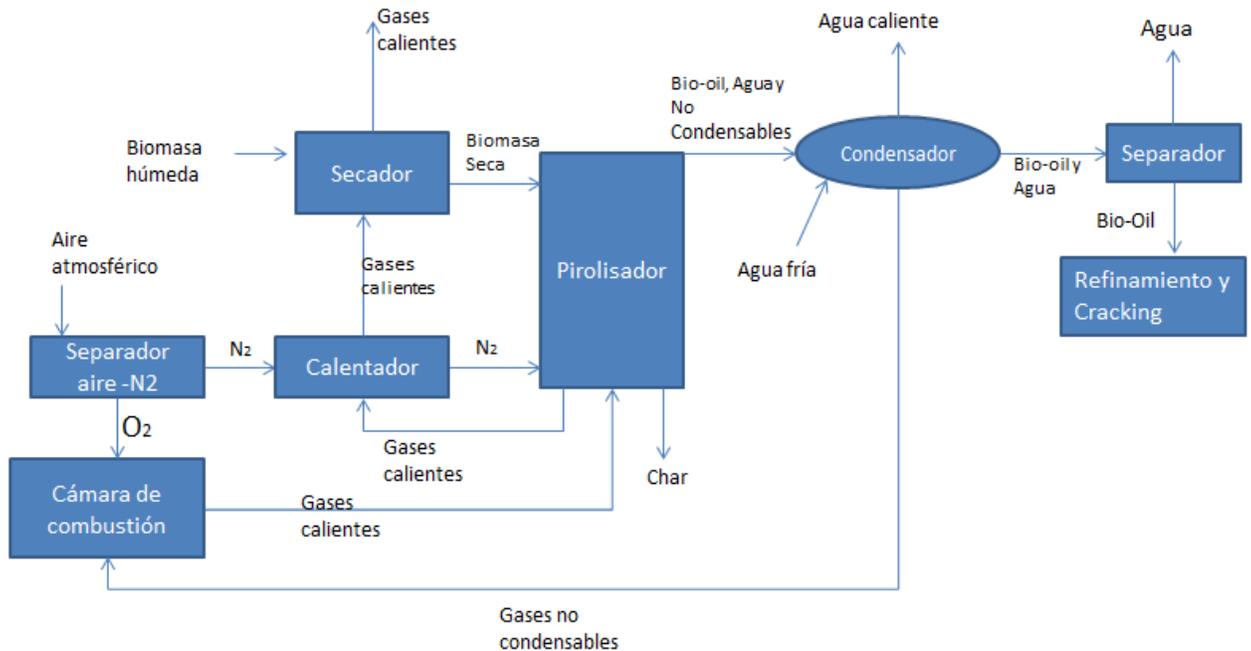


Figura 8. Diagrama de proceso de bio-oil.

Cada una de las operaciones unitarias que se presentan en la Figura 8. representa un proceso, por lo que cada uno de ellos tiene unas entradas y salidas y un consumo energético asociado. Por lo tanto a continuación se hará una descripción de cada uno de ellos y de los parámetros que se tuvieron en cuenta para el desarrollo de los balances de materia y energía.

3.4.1. Secado

Por lo general, el aserrín lleva consigo una humedad de aproximadamente el 35% (FEDEMADERAS, 2012). Para el proceso de pirólisis se debe secar hasta aproximadamente el 10%. Para ello se propone utilizar un secador de aire caliente, el cual puede ser precalentado por medio de una corriente de

gases calientes que salen del proceso de pirólisis logrando así reducir el consumo de energía externa al proceso de hasta un 85%.

La eficiencia típica de este tipo de secadores es del 35% (Valverde & Sarria Lopez, 2006), logrando tener como entradas: aserrín húmedo, aire caliente, energía proveniente de gases calientes y como fuente de energía externa se eligió gas natural, cuyo poder calorífico es 39900 kJ/kg (ECOPETROL, 2012). Como salidas del proceso se tienen: aserrín seco, aire húmedo, gases calientes junto con gases de combustión del gas natural.

3.4.2. Separación de Nitrógeno

Como anteriormente se mencionó el proceso de pirólisis presenta varias clases y variaciones con el fin de mejorar parámetros que lleven a una mejor eficiencia final. Para el presente análisis se escogió la pirólisis de lecho fluidizado.

Por lo anterior, se debe tener un gas que fluidice el aserrín con el fin de formar un lecho en el pirolizador. Este gas puede ser nitrógeno puro, puesto que las condiciones de pirólisis indican que el proceso debe llevarse en ausencia total de oxígeno.

El nitrógeno, es uno de los compuestos más abundantes en la tierra y puede ser encontrado en el aire que consumimos a diario. El aire tiene una composición aproximada de 79% Nitrógeno y 21% oxígeno (McMurry, 2008). Por este hecho, se puede obtener nitrógeno del aire, como un subproducto de la obtención del oxígeno como producto principal. A nivel industrial, se suele llevar a cabo este tipo de separación con una serie de destiladores a altas presiones, para lograr la condensación de los gases que en muchos casos se consideran incondensables.

Las entradas del proceso son básicamente las siguientes: aire atmosférico y energía. Como salidas del proceso se tienen: oxígeno y nitrógeno. El consumo energético de la planta de producción suele expresarse en términos

del oxígeno producido, ya que este es el producto principal, por lo cual se encontró que se necesitan 31.9 kJ/kg N₂ (Fogash , 2007).

3.4.3. Pirólisis

Como previamente se definió el proceso de pirólisis es una descomposición térmica en ausencia de oxígeno, mediante la cual una materia prima orgánica es transformada (Bridgwater, 2012). Por lo cual, las entradas de este proceso corresponden a: aserrín seco, energía en forma de gases calientes y nitrógeno. Como salidas del proceso se tiene: bio-oil, gases calientes y agua, char (cenizas) y gases calientes. Las pérdidas energéticas durante en proceso de pirólisis se estimaron en un 15% aproximadamente. Esta aproximación se hizo utilizando una serie de mediciones que se le hicieron al reactor, dentro de las cuales se incluyeron perfiles de temperatura en las proximidades del reactor, temperatura de la superficie del reactor y se tomó como temperatura promedio del ambiente en 20°C.

3.4.4. Enfriamiento y condensación del bio-oil

La salida del pirolizador que contiene el producto de interés, sale en fase gaseosa. Por lo tanto, se debe hacer un proceso de enfriamiento y posterior condensación para obtener el bio-oil y para obtener gases incondensables que pueden aportar energía para alguno de los procesos que la requieran.

La temperatura de condensación del bio-oil está en aproximadamente 70 °C, para lograr dicha temperatura se necesitan altos flujos de agua o fluidos criogénicos. Para el presente análisis, se propuso utilizar altos flujos de agua para garantizar las condiciones de condensación. Se determinó que el flujo de agua era de 34.36 kg/s fijando las condiciones de entrada del agua a una

temperatura de 35 °C y cuya temperatura de salida se fijó en 46 °C. La forma como se obtuvieron estos valores se presenta en el Anexo 1.

3.4.5. Separación de la mezcla agua-bio-oil

Después de la condensación del producto de interés, debe hacerse una separación entre las dos fases presentes, fase orgánica y fase acuosa. Para ello, se decidió hacer uso de la decantación como método de separación. Sin embargo y como es de conocimiento este tipo de procesos pueden ser bastante lentos. Para reducir el tiempo de separación, se puede hacer uso de una bomba para crear vacío y favorecer la separación. La eficiencia de la bomba es de 65% y cuyo consumo energético es de 4 kJ por cada kg de mezcla que se procese (Streeter , 2000). Las entradas de este proceso consisten en una mezcla de agua y bio-oil. Y las salidas corresponden a corrientes separadas de agua y bio-oil.

3.4.6. Refinamiento y cracking

Después de tener el bio-oil en su punto más seco, por medio del procedimiento descrito anteriormente, se puede llevar directamente al motor de combustión interna para hacer la generación de energía eléctrica. Sin embargo, las propiedades fisicoquímicas del bio-oil hacen que el funcionamiento del motor no se encuentre en su punto óptimo; además que la abrasión y la corrosión causaran que el motor sufra daños irreversibles dificultando su operación (Qiang, Wen-Zhi, & Xi-Feng, 2009).

Para evitar este tipo de problemas, se puede encontrar una variedad de operaciones unitarias que cambian las propiedades fisicoquímicas de la mezcla lo cual ayuda a mejorar el proceso de combustión. Estas operaciones

son básicamente destilaciones y un cracking que se le hace al bio-oil para convertirlo en 43 % de gasolina y 57% de diésel, lo cual es favorable para los motores de combustión interna que originalmente están diseñados para este tipo de combustibles (Iribarren, Peters, & Dufour, 2012).

Cada una de las operaciones unitarias durante el proceso de generación de energía eléctrica a partir de bio-oil, involucra un consumo de energía adicional, por lo cual se da una generación de gases de efecto invernadero, los consumos que se reportan para las operaciones de destilación y cracking son 47.10 y 53.82 KWh por cada tonelada de bio-oil tratada (Iribarren, Peters, & Dufour, 2012). Como anteriormente se dijo, se supone que estos consumos energéticos van a ser aportados por medio de energía eléctrica, por lo cual el factor de generación de dióxido de carbono sería de 132.71 Ton de CO₂. Además de la energía eléctrica, durante el proceso se genera dióxido de carbono el cual equivale a 1165.68 kg CO₂ /Tonelada de bio-oil tratada (Iribarren, Peters, & Dufour, 2012). Finalmente la suma de los dos nos da un total de 133.88 Ton de CO₂ / Tonelada de bio-oil tratada.

Para el análisis, se tomó como volumen de control todos los equipos tal como se presentó en la Figura 8. de modo que se pudiera cuantificar de una forma global las entradas y salidas para esta etapa de proceso. Estas se presentan en la Tabla 4. Para el cálculo de las emisiones de dióxido de carbono asociadas a la utilización de energía eléctrica de la red se tomó la referencia publicada por XM (filial de ISA) cuyo valor es de 0.124 gCO₂/kWh (Experts, 2008).

Entradas		Unidades
Aserrín	6.92	Ton
Energía Eléctrica	500	kWh
Aire Atmosférico	5,623	Ton
Gas Natural	53	kg
Salidas		Unidades
CO ₂	134.33	Ton CO ₂
Bio-oil (43% Gasolina, 57% Diesel)	1	Ton
Char (residuos sólidos)	1.5	Ton
Agua Acida	0.29	m ³

Tabla 4. Eco-balance para la planta de producción de bio-oil.

3.5. PRODUCCION DE ENERGÍA

La producción de energía eléctrica por medio de combustibles líquidos se puede llevar a cabo en un motor de combustión interna, cuyo funcionamiento está basado en el ciclo Diésel. Este ciclo se lleva a cabo en un pistón el cual tiene acoplado un eje que se mueve conforme el motor hace la combustión, el eje esta acoplado con una serie de imanes logrando así crear un campo magnético lo cual se transforma en energía eléctrica (Moran & Shapiro , 2006). En la Figura 9. se puede ver un esquema para ayudar a entender el funcionamiento de este tipo de motores. La eficiencia de este tipo de plantas de producción está alrededor del 20% cuando se utilizan combustibles fósiles. Cabe resaltar que la eficiencia presentada se da para combustibles fósiles de todo tipo y para productos provenientes del bio-oil, como son la gasolina y el diésel presentado en este trabajo, si se utiliza diésel o gasolina convencional la eficiencia de puede aumentar hasta un 45% (Fan, Alward, Klinger, Sadehvandi, & Shonnard, 2011).

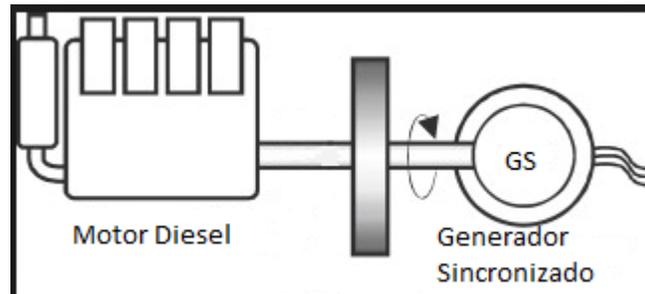
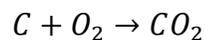


Figura 9. Motor de combustión interna.

Para definir la generación de dióxido de carbono, se puede hacer directamente mirando la estequiometria de una reacción de combustión la cual se presenta a continuación.



Finalmente teniendo en cuenta la relación estequiométrica, la cual es: por cada mol de carbono se produce una mol de dióxido de carbono, y con los respectivos pesos moleculares se puede encontrar que se producen 5700.27 Kg CO₂ / Tonelada de bio-oil que se utilice. Utilizando como base de cálculo 1 Tonelada de bio-oil, se puede encontrar que se producen 5700.27 kg CO₂. Para una mayor claridad, en el Anexo 1. se presenta la secuencia de cálculo para llegar a obtener el factor que previamente se describió.

Para una mayor comprensión, en la Tabla 5. se muestra el inventario en entradas y salidas suponiendo que se va a utilizar 1 tonelada de bio-oil para producir energía eléctrica.

Entradas		Unidades
Bio-oil	1	Ton
Salidas		Unidades
CO ₂	5.70	Ton CO ₂
Energía Eléctrica	2,826	kWh

Tabla 5. Eco-balance para la producción de energía eléctrica.

3.6. ECO-BALANCE

Según la definición un eco-balance de carbono es la diferencia entre el total de las emisiones de dióxido de carbono que se generan durante el ciclo de vida de un producto, y la totalidad de la captación de dióxido de carbono. También se incluyen todas las emisiones al aire y al agua que están involucrados en el sistema analizado. La diferencia anteriormente mencionada puede ser positiva o negativa a lo cual se le conoce como que el proceso es un sumidero de dióxido de carbono o es un generador del mismo. En la Tabla 6. se puede observar el eco-balance para cada uno de los casos, cuando el transporte es de 70 km y cuando es de 180 km, respectivamente. Estos valores son la suma de los totales de cada una de las etapas que previamente se describieron. Para el caso de la captación, es el total de la captación de dióxido de carbono que se da en el cultivo donde se produce la materia prima.

Entradas		Unidades
CO ₂	7,642	Ton CO ₂
Agua	21,887	m ³
Distancia Recorrida 1	70	km
Distancia Recorrida 2	180	km
Energía Eléctrica	615	kWh
Peso Transportado	6	Ton
Gas Natural	53	kg
Aire Atmosférico	5,623	kg
Salidas		
CO ₂ Para 70 km	199.31	Ton CO ₂
CO ₂ Para 180 km	199.46	Ton CO ₂
Char (residuos sólidos)	1.5	Ton
Agua Acida	0.29	m ³
Energía Eléctrica	2,826	kWh
Diferencia CO₂		
Para 70 km	7,442.83	Ton CO ₂
Para 180 km	7,442.68	Ton CO ₂

Tabla 6. Eco-balance Total.

A simple vista se puede concluir que el transporte no es un factor que genera diferencias representativas durante el ciclo de vida actual, es decir, a las distancias analizadas podemos ver que la diferencia entre las dos es de 0.15 Toneladas de CO₂ que se están dejando de emitir al ambiente. Este tipo de análisis puede hacerse siempre y cuando se tenga una captación favorable como la que actualmente tenemos, puesto que en un análisis de ciclo de vida, donde los valores de la captación no tengan un amplio margen, este par de toneladas de CO₂ puede representar un valor positivo o negativo según sea el caso. También podemos ver que se generan 0.3 m³ de agua cuyo pH esta alrededor de 5, lo cual necesita un tratamiento para poder ser vertido al el fluente de la ciudad donde esté ubicada la planta, además se generan 1.5 toneladas de char, un residuo sólido producto de la pirolisis. Este residuo puede ser utilizado en diferentes aplicaciones, por ejemplo como carbón activado o como preparador inicial de algún terreno para cultivo. La cantidad de agua acida y de residuos sólidos, no representan un riesgo ambiental, debido a la cantidad de bio-oil que se está produciendo, esto si se compara

con la cantidad de dióxido de carbono que se genera y que va directamente a la atmósfera.

Por otro lado, también se puede observar que para ambos casos el sistema se obtuvo un valor positivo, por lo tanto se puede indicar que el sistema capta más dióxido de carbono del que se genera durante su ciclo de vida. Esto es lo deseable, debido a que se va a generar energía eléctrica con una fuente de energía renovable como una propuesta para detener las emisiones de dióxido de carbono y detener los problemas ambientales que se han desencadenado durante las últimas décadas.

Dentro de un análisis de ciclo de vida, también se incluye un análisis proceso a proceso, donde se muestra cual es el mayor generador de dióxido de carbono, esto con el fin de buscarle soluciones ambientales y tratar de reducirlas al máximo (Finnveden, y otros, 2009). En la Tabla 7. se muestran los valores totales por proceso para facilitar su análisis. Además, en la Tabla 3. se presentan los valores de cada uno de los procesos que están presentes en la planta de producción de bio-oil.

Planta de producción	
Gas natural	0.03
Producción de Nitrógeno	0.11
Pirolisis	0.30
Separador	$6.2 \cdot 10^{-5}$
Refinamiento y cracking	657.50
Total	657.95

Tabla 7. Ton de CO₂ producidas en la planta de producción.

Inicialmente podemos observar que para ambos casos, 70 km y 180 km, el proceso durante el ciclo de vida que más genera dióxido de carbono es en la planta de producción del bio-oil. Esto puede deberse a la gran demanda energética que se tiene en procesos como la separación del nitrógeno del aire, el proceso de pirolisis y el proceso de refinamiento y cracking; el cual involucra una serie de procesos de separación cuyas demandas energéticas hacen que las emisiones sean las más altas durante todo el proceso analizado. Esto para cada uno de los dos casos representa el 93% de las generaciones totales. Cabe resaltar que durante el diseño de este proceso se

trató de optimizar los consumos energéticos y se hizo una recirculación de corrientes calientes que redujeron los consumos de energía, tales recirculaciones se muestran en la Figura 8. En la cual se puede observar que los gases calientes que salen del proceso de pirolisis, que tienen una temperatura de salida de 773 K, llevan consigo una energía que puede ser aprovechada. Por ello se llevan a un sistema de intercambio de calor con el fin de precalentar el nitrógeno hasta una temperatura de 373 K; después de este proceso los gases tienen una temperatura de 736 K, por lo cual se pueden llevar hacia otro sistema de secado con el fin de secar la biomasa cuya humedad inicial es de 35% y se lleva hasta una humedad del 10% donde se alcanza a suplir el 85% de la energía necesaria para llevar a cabo este proceso. Finalmente los gases que salieron del proceso de pirolisis tienen una temperatura de 473 K. Los cuales representan una parte de las emisiones por parte de la planta de producción que previamente se describió. Además, se utilizó el gas natural como el combustible para suplir la demanda energética del mismo. Para reducir la generación de dióxido de carbono en este proceso, se podría utilizar fuentes de energía renovables que tengan una generación más baja que la que actualmente se tiene utilizando el gas natural; esta energía podría provenir de fuentes hídricas o fuentes eólicas.

Por otro lado se puede ver que, el 99% de las emisiones que se presentan en la planta de producción de bio-oil corresponden al tratamiento que debe hacerse para acondicionar el bio-oil para un proceso de combustión, con las condiciones adecuadas como previamente se describió. Se podrían buscar otro tipo de procesos cuyas emisiones fueran menores, sin embargo se ha comprobado que en la mayoría de los procesos de refinamiento y cracking es donde más se utiliza energía para garantizar el adecuado funcionamiento de los equipos de separación.

3.7. PRODUCCIÓN DE 1 MJ DE ENERGÍA ELÉCTRICA

Para el análisis en la producción de energía eléctrica, se debe hacer el cambio de la base de cálculo, puesto que los datos anteriores se trabajaron en base a 1 tonelada de bio-oil con el fin de tener órdenes de magnitud que

facilitaran su análisis. Sin embargo, el objetivo principal es producir 1 MJ de energía eléctrica en 1 segundo, lo cual equivale a tener 1MW. Para ello se hizo una división de cada uno de los eco-balances con la base de cálculo actual, 1 tonelada de bio-oil, encontrándose para el caso 1 (70 km) y para el caso 2 (180 km) los valores encontrados fueron de 6.7796 Ton CO₂/kg bio-oil y 6.7794 Ton CO₂/ kg de bio-oil respectivamente. Para mayor claridad en el Anexo 1, se muestra como se obtuvieron dichos valores.

La base de cálculo escogida se ajusta a las capacidades de producción de energía eléctrica por medio de este tipo de procesos. Las capacidades de producción de energía eléctrica de un motor de combustión interna están entre 1 y 230 MW. Sin embargo, para producir 230 MW de energía eléctrica se necesitan dos motores de gran capacidad y hacer una fusión entre el ciclo Diésel y la producción de energía por medio de vapor. Por lo cual, lo normal es encontrar plantas de producción de energía eléctrica entre 1 y 30 MW. Este tipo de plantas se utiliza básicamente para situaciones de emergencia o en lugares donde no es posible producir energía eléctrica de otro modo. Se considera que una planta pequeña tiene una capacidad de producción entre 1 y 6 MW lo cual concuerda con la base de cálculo utilizada, la cual está en los límites considerados para una planta de producción pequeña (Gutierrez Chamorro, 2010).

Entradas		Unidades
CO ₂	2	Ton CO ₂
Agua	5	m ³
Distancia Recorrida 1	70	km
Distancia Recorrida 2	180	km
Energía Eléctrica	1.36E-01	kWh
Peso Transportado	1.33E-03	Ton
Gas Natural	1.18E-02	kg
Aire Atmosférico	1.244	kg
Salidas		
Al aire		Unidades
CO ₂ para 70 km	1.89E-01	Ton CO ₂
CO ₂ para 180 km	1.90E-01	Ton CO ₂
Al Suelo		
Char (residuos sólidos)	3.32E-04	Ton
Al agua		
Agua Acida	2.88E-01	m ³
General		
Energía Eléctrica	1	kWh
Diferencia CO₂		
Para 70 km	1.50060	Ton CO ₂
Para 180 km	1.50057	Ton CO ₂

Tabla 8. Eco-Balance total para 1 MW.

Adicionalmente, se encontró que para producir 1MW de energía eléctrica se necesitan de 0.22 kg bio-oil/s utilizando un poder calorífico de 22608.72 kJ/kg (Raveendran & Anuradda, 1996) y una eficiencia típica del proceso del 20% (Fan, Alward, Klinger, Sadehvandi, & Shonnard, 2011). Para una mayor claridad en el Anexo 1 se muestra la secuencia de cálculo utilizada.

Finalmente haciendo la multiplicación respectiva de cada uno de los eco-balances podemos encontrar que para el caso 1 (70 km) se tiene una captación de dióxido de carbono de 1.5 Toneladas de CO₂ y para el caso 2 (180 km) se tiene una captación de dióxido de carbono de 1.5 Toneladas de CO₂. En la Tabla 8. se puede ver el eco-balance completo para cada uno de

los casos anteriores. No se aprecia una variación entre los dos casos puesto que la distancia no es el factor más representativo en la generación de dióxido de carbono. Si se compara con un combustible líquido, por ejemplo Diésel colombiano, para producir la misma cantidad de energía eléctrica energía, se estarían produciendo $7.392 \cdot 10^{-5}$ kg CO₂ (UPME, Siame, 2013). Sin embargo, no habría una captación de CO₂ lo cual favorece completamente la utilización de bio-oil como combustible alternativo. Por otro lado, el consumo de energía eléctrica en Colombia per cápita es de 6851 kWh (Experts, 2008) . Por lo cual si se utilizase este combustible estaríamos reduciendo la cantidad de dióxido de carbono en el ambiente hasta en 1.6 TonCO₂. Por ejemplo en un análisis de ciclo de vida de similares características a las de este trabajo realizado en Estados Unidos, se encontró que se presentan reducciones de hasta un 90% cuando se compara el carbón con el bio-oil para la producción de energía eléctrica el cual presenta emisiones de hasta $5.5 \cdot 10^{-4}$ TonCO₂ (Fan, Alward, Klinger, Sadehvandi, & Shonnard, 2011).

CONCLUSIONES

- Se mostró una metodología aplicable al sistema analizado, teniendo en cuenta todas las consideraciones anteriormente mencionadas. Esta metodología no tuvo en cuenta las restricciones propias cuando se está utilizando un software especializado por lo cual no podemos decir que lo reemplaza en su totalidad pero si sirve para hacer un estimativo inicial. La herramienta desarrollada, descrita en el Anexo 2. permite realizar los cálculos para un Eco-balance de carbono bajo las limitaciones descritas previamente en el capítulo 2.
- Tanto para el caso de 70 km como para el de 180 km de distancia desde el aserrío hasta la planta de producción de bio-oil se obtuvo el Eco-balance de carbono con un valor positivo, lo cual indica que el sistema analizado es un sumidero de dióxido de carbono, ya que la cantidad de CO₂ que se capta es mayor que la cantidad que se emite. En el mejor de los casos el Eco-balance de carbono dio 1.645 Ton CO₂/ MW de energía eléctrica producida.
- La distancia recorrida durante todo el proceso de producción no es un valor diferenciador para el presente análisis, ya que se disponen de suficientes toneladas de dióxido de carbono en el proceso de captación para soportar la diferencia de 0.15 Ton CO₂ entre los dos valores de distancias planteados. Si se mira desde el punto de vista económico este sería un factor diferenciador a tener en cuenta debido a que la diferencia de transporte es de 110 km, pero desde el punto de vista ambiental no resultó relevante entre los dos casos analizados.
- De la generación total de CO₂ en el proceso de producción de energía eléctrica, la etapa que más genera dióxido de carbono es la producción del bio-oil con un porcentaje del 93% para ambos casos. A su vez en dicho proceso la operación unitaria que más dióxido de carbono genera es el refinamiento y cracking con un valor del 99%.

- La alternativa de utilizar como cultivo el *pinus patula* para la producción de energía eléctrica presenta una ventaja representativa ya que ofrece un periodo de crecimiento de aproximadamente 25 años, lo cual le permite desarrollar un tronco de más de 25 m de altura y un diámetro de hasta 50 cm, logrando captar hasta 2 toneladas de CO₂ utilizando como base de cálculo 1 MW de energía eléctrica.
- Como continuación en esta línea de trabajo, se podrían encontrar los valores regionales para el transporte, zonas no interconectadas y combustibles no regionales, ya que en el presente análisis se trabajó con lo reportado por la EPA. Adicional se podría crear una base de datos donde se incluyan todos los valores posibles tanto de emisión como de captación que se hallan encontrado a nivel regional, tales como captación de carbono de varias especies como *eucaliptus*, *pinus patula*, *roble*, *nogal*, emisión de dióxido de carbono para una zona no interconectada, recopilación de varios combustibles para suplir la demanda energética de la planta de producción. También se pueden generar trabajos posteriores como la continuación de los Eco-balances enfocados a diferentes indicadores ambientales, por ejemplo compuestos sulfonados, óxidos de nitrógeno, metano, monóxido de carbono, disposición final de residuos sólidos, tratamiento de aguas, entre otros, como también se puede quitar la restricción del cultivo e incluir los abonos, los consumos energéticos y los transportes que no se tuvieron en cuenta en el presente análisis. Por último se podría proponer la terminación del análisis hasta llegar a un Análisis de Ciclo de Vida.

BIBLIOGRAFIA

Bridgwater, A. (2012). Review of fast pyrolysis of biomass and product upgrading. *BIOMASS AND ENERGY*, 68-94.

ANACAFE. (1998). *ANACAFE*. Recuperado el 11 de 10 de 2011, de <http://www.anacafe.org>

Badger, P. C., & Fransham, P. (2006). Use of mobile fast pyrolysis plants to densify biomass and reduce biomass handling costs—A preliminary assessment. *BIOMASS & BIOENERGY*, 321-325.

Bancomundial. (2012). *Banco Mundial*. Recuperado el 13 de 08 de 2012, de <http://datos.bancomundial.org/indicador/EN.ATM.CO2E.PC/countries/1W?display=graph>

CENICAFE. (s.f.). <http://www.cenicafe.org>. Recuperado el 23 de 05 de 2012, de <http://www.cenicafe.org/es/documents/LibroSistemasProduccionCapitulo2.pdf>

Climatico, C. (12 de 03 de 2007). *Blog Cambio Climatico*. Recuperado el 13 de 08 de 2012, de <http://elcambioclimatico.blogdiario.com/>

DANE. (2006). *SÍNTESIS CENSO DE PLANTACIONES FORESTALES DEL DEPARTAMENTO DE ANTIOQUIA*. Medellín .

DivyaInternational. (2012). *Divyaint*. Recuperado el 28 de 02 de 2013, de <http://divyaint.com/divya-/Parts-List-Of-Ton-Pyrolysis-Plant.aspx>

ECOPETROL. (2012). *ECOPETROL*. Recuperado el 16 de 04 de 2011, de <http://www.ecopetrol.com.co/contenido.aspx?catID=210&conID=36624>

EIColombiano. (18 de 09 de 2012). Agosto fue el segundo mes más caliente en la tierra desde 1880. *El Colombiano*, pág. Web.

EIColombiano. (1 de 08 de 2012). Bosques y océanos absorben el doble de dióxido de carbono que hace 50 años. *El Colombiano*, pág. Web.

Energy Information Department. (2007). *department of energy*. Recuperado el 2009, de <http://www.eia.doe.gov/oiaf/aeo>.

EPA. (28 de 12 de 2011). *EPA*. Recuperado el 22 de 05 de 2012, de <http://www.epa.gov/ttn/chief/ap42/index.html>

Experts, X. (2008). *XM*. Recuperado el 09 de 09 de 2013, de <https://www.xm.com.co/Pages/Home.aspx>

Fan, J., Alward, M., Klinger, J., Sadehvandi, A., & Shonnard, D. (2011). Life cycle assessment of electricity generation using fast pyrolysis bio-oil. *Renewable Energy*, 632-641.

FEDEMADERAS. (2012). *FEDEMADERAS*. Recuperado el 20 de 08 de 2011, de <http://fedemaderas.org.co/>

Finnveden, G., Hauschild, M. Z., Ekvall, T., Guinée, J., Heijungs, R., Hellweg, S., y otros. (2009). Recent developments in Life Cycle Assessment. *Journal of Environmental Management*, 1-21.

Finnveden, G., Hauschild, M. Z., Ekvall, T., Guinée, J., Heijungs, R., Hellweg, S., y otros. (2009). Recent developments in Life Cycle Assessment. *Journal of Environmental Management*, 1-21.

Fischersworring Hömberg, B., & Robkamp Ripken, R. (2005). *Guía para la caficultura ecológica*. Medellín: GTZ.

Fogash, K. (2007). International Oxy-Combustion Research Network. *Oxygen Production Technologies*. Pennsylvania .

Gerding, V., & Schlatter, J. (1995). Variables y factores del sitio de importancia para la producción de pinus patula. *Bosques*, 39-57.

GHC. (2007). World Resources Institute. *Tools for transport*.

Gillespie, A. J. (2000). *Pinus patula Schiede & Deppe*. México.

Green Facts. (2007). *Greenfacts*. Recuperado el 13 de 08 de 2012, de <http://www.greenfacts.org/es/cambio-climatico-ie4/climate-change-ar4-foldout-es.pdf>

Gutierrez Chamorro, J. (2010). Generación eléctrica en plantas Diesel. *Anales de Mecánica y Electricidad*, 59-62.

Hober , A. J., & Trecaman, R. V. (2004). Eficiencia del uso del agua en plantaciones de *Pinus radiata* en Chile. *Boque (valdivia)* , 33-43.

Hyun ju Park, Y.-K. P. (2008). Influence of reaction conditions and the char separation system on the production of bio-oil from radiata pine. *Fuel Process Technology*, 797-802.

Iribarren, D., Peters, J. F., & Dufour, J. (2012). Life cycle assessment of transportation fuels from biomass pyrolysis. *FUEL*, 812-821.

ISO. (2003). 14040. *Norma Tecnica Colombiana*.

ISO. (2005; 2006). Normas. En ISO, *Normas ISO* (págs. 14040-14044). ISO.

Jiqing Fan a, T. N. (2011). Life cycle assessment of electricity generation using fast pyrolysis bio-oil. *Renewable Energy*, 632-641.

Lopera Arango, G. J., & Gutierrez Velez, V. H. (2000). *Viabilidad tecnica y economica de la utilizacion de plantaciones de pinus patula como sumideros de CO2*. Medellin: Universidad Nacional de Colombia.

Lopera, G., & Gutiérrez, V. (2000). *Viabilidad tecnica y economica de la utilizacion de plantaciones de pinus patula como sumideros de CO2*. Medellín: Universidad Nacional de Colombia.

McMurry, J. (2008). *Quimica Organica* . Mexico D.F: CENGAGE Learning.

Moran , M., & Shapiro , H. (2006). *Fundamentals of Engineering Thermodynamics*. Ohio: Wiley.

Naranjo, C. A. (2013). *Analisis de Ciclo de Vida*. Recuperado el 11 de 09 de 2013, de Como las empresas pueden usarlo: <http://gaiasa.com/wp-content/descargas/An%20E11isis%20de%20Ciclo%20de%20Vida-Andi.pdf>

PROCAFE. (2006). *PROCAFE*. Recuperado el 23 de 09 de 2011, de <http://www.procafe.com.sv>

Qiang, L., Wen-Zhi, L., & Xi-Feng, Z. (2009). Overview of fuel properties of biomass fast pyrolysis oils. *ENERGY conversion and Management*, 1376-1383.

Raveendran , K., & Anuradda, G. (1996). Heating value of biomass and biomass pyrolysis products. *EL SEVIER*, 1715.1720.

Reklaitis, G. (1986). *Balances de Materia y Energia*. Ciudad de Mexico: NUEVA EDITORIAL INTERAMERICANA.

Reyes, E. M. (2004). *Análisis Legislativo*. Santa fe de Bogota : Congreso de la Republica de Colombia.

Smith, Van Ness, & Abbott. (1997). *Introducción a la Termodinámica en la Ingeniería Química*. Mexico D.F: Mc Graw-Hill.

Streeter , V. (2000). *Mecanica de Fluidos* . Mexico D.F: McGraw-Hill.

UPME. (10 de 2013). *Proyecto Demanda Energetica*. Bogota: Congreso de la Republica de Colombia.

UPME. (09 de 09 de 2013). *Siame*. Recuperado el 09 de 09 de 2013, de <http://www.siame.gov.co/>

Valverde, A., & Sarria Lopez, B. (2006). MEJORAMIENTO DEL PROCESO DE SECADO DE CEREALES EN UNA EMPRESA PRODUCTORA DE ALIMENTO PARA AVES DE CORRAL. *Scientia et Technica*, 121-125.

ANEXOS

ANEXO 1. SECUENCIAS DE CÁLCULO.

1. CULTIVOS

1.1. Emisión

$$0.77 \frac{\text{Ton } CO_2}{\text{ha} * \text{año}} * 5 \text{ años} = 3.85 \frac{\text{Ton } CO_2}{\text{ha}}$$

La secuencia de cálculo para la cantidad de hectáreas necesarias sería descrito en un proceso posterior. El valor que se encontró es de 8.4 hectáreas. Haciendo la multiplicación respectiva se obtiene el siguiente resultado.

$$3.85 \frac{\text{Ton } CO_2}{\text{ha}} * 8.4 \text{ ha} = 32.32 \text{ Ton } CO_2$$

1.2. Captación

$$36.41 \frac{\text{Ton } CO_2}{\text{ha} * \text{año}} * 25 \text{ años} = 910.25 \frac{\text{Ton } CO_2}{\text{ha}}$$

La cantidad de hectáreas necesarias son las mismas que se utilizaron para la emisión, 8.4 hectáreas, por ello haciendo la multiplicación respectiva se encuentra lo siguiente.

$$910.25 \frac{\text{Ton } CO_2}{\text{ha}} * 8.4 \text{ ha} = 7642.14 \text{ Ton } CO_2$$

2. TRANSPORTE

$$2.04 * 10^{-4} \frac{\text{Ton } CO_2}{\text{Km} * \text{Ton de madera}} * 70 \text{ Km} * 54.49 \text{ Ton de madera} \\ = 0.78 \text{ Ton } CO_2$$

$$2.04 * 10^{-4} \frac{\text{Ton } CO_2}{\text{Km Ton de madera}} * 180 \text{ Km} * 54.49 \text{ Ton de madera} \\ = 2 \text{ Ton } CO_2$$

3. ASERRÍO

$$1.315 \frac{\text{Ton } CO_2}{\text{kWh}} * 1.327 \frac{\text{kWh}}{1 \text{ m}^3} * \frac{1 \text{ m}^3}{6000 \text{ kg}} * 11000 \frac{\text{kg}}{\text{ha}} = 3.199 \frac{\text{Ton } CO_2}{\text{ha}}$$

Para el cálculo de las hectáreas necesarias se parte de la cantidad de aserrín que se necesita para producir 1 Tonelada de bio-oil.

$$6923 \text{ Kg Aserrin} * \frac{1 \text{ kg Mad Tratada}}{0.13356 \text{ kg Aserrin}} * (1 + 0.5118 \text{ rechazado}) \frac{\text{kg Mad.no tratada}}{\text{kg mad tratada}} = \\ 54487.75 \text{ kg mad no tratada}$$

Ahora ya se sabe cuanto madera se necesita, con el % de rechazo que se hace en los cultivos que equivale al 59% y con la productividad de una hectárea de *pinus patula* se puede obtener la cantidad de hectáreas necesarias para producir una tonelada de bio-oil.

$$54487.75 \text{ kg mad.no tratada} * \frac{1 \text{ kg mad}}{0.59 \text{ kg mad.no tratada}} = 92352.12 \text{ kg mad}$$

$$92352.12 \text{ kg mad} * \frac{1 \text{ ha}}{11000 \text{ kg mad}} = 8.4 \text{ ha}$$

Finalmente, multiplicando el factor por la cantidad de hectáreas necesarias se obtiene lo siguiente.

$$3.199 \frac{\text{Ton } CO_2}{ha} * 8.4 ha = 26.86 \text{ Ton } CO_2$$

4. ENFRIAMIENTO Y CONDENSACIÓN DEL BIO-OIL

Previamente por medio de simulaciones termodinámicas se determinó que el calor necesario para enfriar el bio-oil hasta garantizar su condensación es de $1.56 \cdot 10^3$ kJ/s. Partiendo de este valor y de la ecuación para la transferencia de calor se puede encontrar la cantidad de agua necesaria para garantizar la condensación, además se fijaron la temperatura de entrada y salida del agua en 35 y 46 °C respectivamente.

$$\dot{Q} = \dot{m} * C_p * \Delta T$$

Despejando m

$$\dot{m} = \frac{\dot{Q}}{C_p * \Delta T} = \frac{1.58 \cdot 10^3 \frac{kJ}{s}}{4.18 \frac{kJ}{kg K} * (46 - 35) K} = 34.36 \frac{kg}{s}$$

5. REFINAMIENTO Y CRACKING

La producción de dióxido de carbono por parte de la energía eléctrica utilizada se puede calcular de la siguiente forma, utilizando como base de cálculo 1 tonelada de bio-oil.

$$100.92 \text{ KWh} * \frac{1.315 \text{ Ton } CO_2}{\text{KWh}} = 132.71 \text{ Ton } CO_2$$

Además de la energía eléctrica, el proceso como tal genera dióxido de carbono el cual está dado por el siguiente factor

$$\frac{1165.68 \text{ kg de } CO_2}{1 \text{ Tonelada de bio - oil}}$$

Finalmente la suma de los dos factores nos da un total de

$$133.88 \frac{\text{Ton } CO_2}{\text{Ton Bio - oil}}$$

6. PRODUCCIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA

Suponiendo una base de cálculo de 1 tonelada de bio-oil. Y teniendo una eficiencia del 45% se tiene lo siguiente

$$45\% = \frac{\text{Masa Teorica}}{\text{Masa Real}} = \frac{1000 \text{ kg bio - oil}}{\text{Masa Real}}$$

Despejando tenemos que Masa Real es 2222.22 kg

$$\begin{aligned} 2222.22 \text{ Ton bio - oil} * \frac{700 \text{ kg C}}{1 \text{ Ton bio - oil}} * \frac{1 \text{ kmol C}}{12.01 \text{ kg C}} * \frac{1 \text{ kmol } CO_2}{1 \text{ kmol C}} * \frac{44.01 \text{ kg } CO_2}{1 \text{ kmol } CO_2} \\ = 5700.27 \text{ kg } CO_2 \end{aligned}$$

Lo anterior también se puede escribir como 5700.27 kgCO₂ por cada tonelada de bio-oil utilizada.

7. PRODUCCION DE 1 MJ DE ENERGIA ELECTRICA

$$1 \text{ MJ} * \frac{1000 \text{ kJ}}{1 \text{ MJ}} * \frac{1 \text{ kg bio-oil}}{22608.72 \text{ kJ}} = 0.044 \text{ kg bio - oil}$$

Ahora bien se sabe que la eficiencia del proceso es del 20%, para tener la masa real que se debe utilizar se parte de la definición de la eficiencia.

$$20\% = \frac{\text{Masa Teorica}}{\text{Masa Real}} = \frac{0.044 \text{ kg bio - oil}}{\text{Masa Real}}$$

Despejando obtenemos que la masa real es de 0.22 kg de bio-oil.

ANEXO 2. GUÍA PARA UTILIZAR LA HOJA DE CÁLCULO.

La hoja de cálculo está diseñada de modo tal que a partir de los datos suministrados en la primera hoja, se calculan cada uno de los parámetros necesarios que dependen de estos. Los datos que inicialmente se deben incluir son:

- Peso de bio-oil deseado:

Se refiere a la base de cálculo que se desea utilizar.

- Eficiencia másica del reactor:

Se refiere a la eficiencia teórica que tiene el reactor (pirolizador) para producir el bio-oil. Se expresa en porcentaje.

- % de condensables y cenizas:

Estos porcentajes deben ser suministrados a partir de datos experimentales o simplemente una estimación teórica.

- Gravedad específica o densidad del bio-oil:

Si se tienen datos experimentales se utiliza el valor encontrado de la densidad, sino se cuenta con ellos se puede utilizar datos teóricos o datos encontrados por otros estudios.

- T entrada y T salida:

Se refiere a las temperaturas de entrada y salida después del reactor (pirolizador) estos datos pueden ser experimentales si se tienen o pueden ser teóricos.

- T salida del intercambiador de calor:

Esto debe suministrarse para cerrar los grados de libertad en el intercambiador de calor, se puede especificar esta temperatura o se puede especificar la cantidad de agua a utilizar y esta temperatura estaría calculada posteriormente.

- Flujo de nitrógeno:

Por lo general se encuentran los datos experimentales de cuánto debe ser el flujo del gas de arrastre para que el sistema se comporte de la mejor forma.

- Flujo de arena:

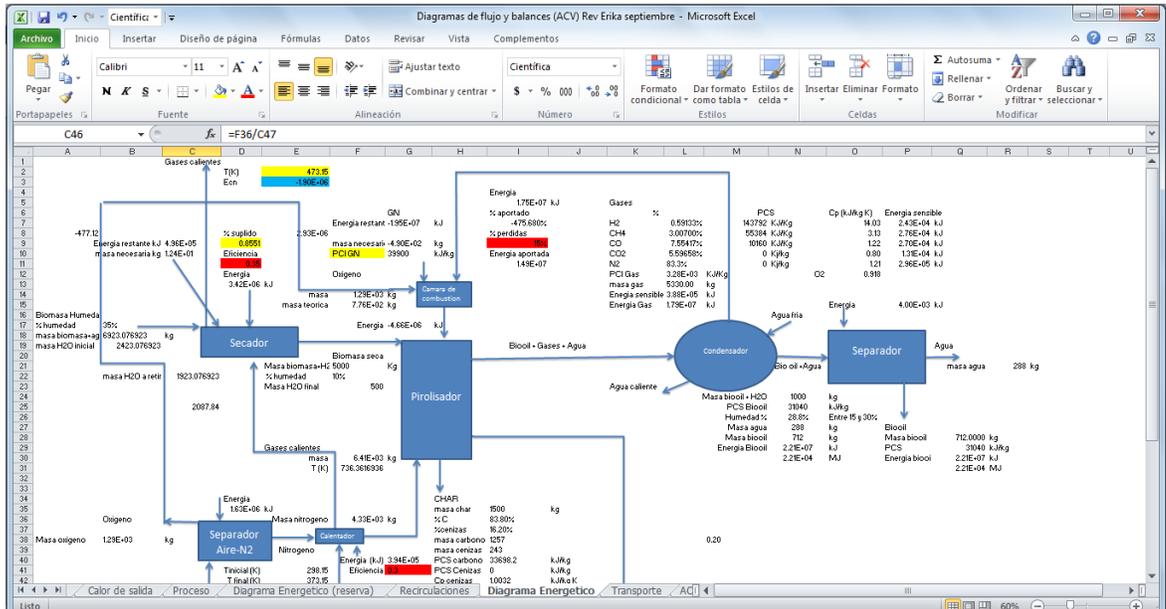
Para ayudar a la fluidización en el pirolizador, se debe adicionar cierta cantidad de arena previamente secada. Este dato por lo general se encuentra de forma experimental.

La hoja de cálculo que aparecerá inicialmente con todos los campos anteriores se presenta a continuación para una mayor comprensión de la persona que vaya a utilizar esta herramienta.

Parametros a determinar	
Unidad funcional	
Producir bio oil (m ³)	0.819672131
Peso del bio oil deseado (kg)	1000
Eficiencia masica del reactor	0.2
%no condensables	0.2
%cenizas	0.3
Gravedad especifica	1.22
Densidad Agua (kg/m ³)	1000
Densidad bio oil (kg/m ³)	1220
T entrada (K)	298.15
T salida (K)	773.15
T salida IC (K)	353.15
T referencia (K)	298.15
Flujo de Nitrogeno (kg)	4.33E+03
Flujo de Arena (kg)	2.00E+00
Flujo de agua para enfriar (kg)	1

Después de suministrar todas estos datos, solo debe resolverse las ecuaciones que se presentan en la hoja llamada diagrama energético, las cuales resuelven la cantidad de gas natural que debe utilizarse como complemento energético, ya que este puede variar de acuerdo a los datos ingresados anteriormente. Esta hoja contiene todos los balances de materia

y energía para producir la base de cálculo que se halla especificado previamente, la hoja de cálculo que aparecerá es la siguiente.



Esta herramienta también cuenta con una hoja de cálculo llamada balances de materia y energía reactor, en ella se especifican las demandas energéticas y de materia prima que deben cumplirse en el pirólizador para poder tener las especificaciones dichas previamente en la hoja de datos de entrada. Esta hoja se presenta a continuación para una mayor comprensión.

Diagramas de flujo y balances (ACV) Rev Erika septiembre - Microsoft Excel

Archivo Inicio Insertar Diseño de página Fórmulas Datos Revisar Vista Complementos

Calibri 11 Fuente Ajustar texto General Formato condicional Dar formato como tabla Estilos de Estilos Insertar Eliminar Formato Autosuma Rellenar Ordenar Buscar y filtrar Modificar

O53

49	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P
50			Cantidad	5000												
51			Cantidad total Materia Prima (kg/s)	5000												
52			Producto final (kg/s)	1000	0.2											
53			Sustancia	Mer calorífico (kJ/kg)	Cp (kJ/kg K)	Alphas de entrada (L/s)	Alphas de salida (L/s)									
54			Aserrín	20000	1.257908	20000	20836.5083									
55			Cisoco	16700	1.297308	16700	17316.5083									
56			Elio oil	39040	2.5	39040	22227.5									
57			Arena	0	0.759452	0	377.8957									
58			Char	37934.5	0.878273461	37934.5	37456.67389									
59			H ₂	0	FUNCION	0	697.4409193									
60			CO ₂	0	FUNCION	0	497.470229									
61			CO	2414.626397	FUNCION	2414.626397	2326.310204									
62			H ₂	33887.59921	FUNCION	33887.59921	40789.12381									
63			O ₂	0	FUNCION	0	467.9309479									
64			CH ₄	13284.22739	FUNCION	13284.22739	14707.29121									
65																
66			Constantes para calculo de Cp (kJ/(molK))													
67			Sustancia	A	B	C	D	Salida								
68			N ₂	3.12E-01	-1.38E-02	2.68E-05	-1.17E-08	3.33E-01								
69			CO ₂	1.98E-01	7.34E-02	-8.93E-05	1.72E-08	3.98E-01								
70			CO	3.09E-01	-1.58E-02	2.79E-05	-1.57E-08	3.94E-01								
71			H ₂	2.76E-01	9.27E-03	-1.98E-05	7.69E-09	2.78E-01								
72			O ₂	2.81E-01	-3.68E-06	1.79E-05	-1.07E-08	3.24E-01								
73			CH ₄	19.25	5.23E-02	1.02E-05	-1.15E-08	4.52E-01								
74																
75																
76			Balance de energía													
77			Entradas	Distribucion de energía			Salidas	Distribucion de energía								
78			Aserrín	1.00E+08	100.00%		Elio oil	3.22E+07	31.80%							
79			Cisoco	0	0.00%		Arena	0.00E+00	0.00%							
80			H ₂	0	0.00%		Char	8.62E+07	83.93%							
81			Arena	0	0.00%		No condensables	6.19E+06	6.43%							
82			Calor necesario	1.00E+08	0.00%		Calor que sale	7.40E+05	0.71698%							
83			Total	1.00E+08			Total	8.62E+07								
84			Balance	4.68E+06												
85																
86																
87																
88																

Diagrama de flujo de un reactor que muestra la entrada de Cisoco o aserrín y la salida de Arena, Bio-oil y No condensables cenizas.

Aserrinos y trilladoras Balance de masas Balance masa y energía Reactor Calor de salida Proceso Diagrama Eri

Finalmente el resto de las hojas son restringidas a cambios con el fin de proteger los cálculos que previamente se han realizado. Cabe resaltar que para utilizar dicha herramienta debe tenerse en cuenta todas las limitaciones y restricciones que se presentan durante el desarrollo de este trabajo, es decir, durante el cultivo no se tienen en cuenta el aporte por cambios de usos del suelo, ni por los abonos, ni los transportes internos. Durante el transporte se trabajan bajo datos encontrados internacionalmente ya que no se encontraron a nivel regional. El aserrío está ubicado en un lugar que le permite tomar energía eléctrica de la red interconectada. La planta de producción está diseñada y dimensionada teóricamente para 1 Ton Bio-oil. Finalmente la energía eléctrica se produce en un motor de combustión interna junto con un generador sincronizado. Estas limitaciones y restricciones pueden verse con mayor claridad en el Capítulo 2, donde se especifican los límites del sistema y las restricciones de cálculo que se tendrán en cuenta durante todo el desarrollo del estudio.