

ESTUDIO DE FACTIBILIDAD PARA LA CREACIÓN DE UNA EMPRESA  
PRODUCTORA DE CARBÓN ACTIVADO A PARTIR DE RESIDUOS DE PINO  
PÁTULA

Realizado por:

JUANITA MEJÍA JARAMILLO  
JULIANA RENDON CARDONA

UNIVERSIDAD EAFIT  
DEPARTAMENTO DE INGENIERIA DE PROCESOS  
MEDELLÍN  
2006

ESTUDIO DE FACTIBILIDAD PARA LA CREACIÓN DE UNA EMPRESA  
PRODUCTORA DE CARBÓN ACTIVADO A PARTIR DE RESIDUOS DE PINO  
PÁTULA

Realizado por:

JUANITA MEJÍA JARAMILLO  
JULIANA RENDON CARDONA

Para optar por el título de  
INGENIERO DE PROCESOS

Asesor

CARLOS FERNANDO CADAVID

UNIVERSIDAD EAFIT  
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA DE PROCESOS  
MEDELLÍN  
2006

Nota de aceptación

---

---

---

---

Presidente del jurado

---

Jurado

---

Jurado

Medellín, Octubre 12 de 2006

A nuestra familia y  
profesores  
que hicieron más fácil  
el recorrido por esta etapa  
de nuestras vidas.

## **AGRADECIMIENTOS**

Los autores expresan sus agradecimientos a:

Carlos Cadavid Ingeniero Químico, por despertar en nosotros la inquietud con respecto a la valorización de residuos, por compartir sus conocimientos y por su valiosa orientación.

Juan Daniel Martínez Ingeniero Mecánico, por darnos la posibilidad de trabajar con él y con su gasificador. Gracias a él se cumplió el objetivo de este proyecto.

PREMAC y todos sus empleados, por su colaboración y paciencia en los ensayos experimentales.

Maderas La Finca, por brindarnos su apoyo y conocimiento, por querer hacer parte de este proyecto.

A todas aquellas personas que directa o indirectamente hicieron realidad la culminación de este proyecto.

## TABLA DE CONTENIDO

<b>INTRODUCCIÓN</b> .....	<b>1</b>
<b>OBJETIVOS</b> .....	<b>2</b>
OBJETIVO GENERAL .....	2
OBJETIVOS ESPECIFICOS .....	2
<b>1 ANTECEDENTES</b> .....	<b>4</b>
1.1 PROCESO DE GASIFICACIÓN.....	4
1.1.1 <i>Gasificadores de lecho fluidizado</i> .....	6
1.2 PRODUCCIÓN DE CARBÓN ACTIVADO POR MEDIO DE GASIFICACIÓN .....	6
<b>2 ESTUDIO DE MERCADO</b> .....	<b>9</b>
2.1 RESIDUOS DE PINO PATULA.....	10
2.1.1 <i>AREA DE INFLUENCIA</i> .....	11
2.1.2 <i>COMPORTAMIENTO DE OFERTA Y DEMANDA</i> .....	11
2.1.3 <i>DISPONIBILIDAD DE LOS RESIDUOS MADEREROS</i> .....	12
2.2 CARBÓN ACTIVADO .....	13
2.2.1 <i>AREA DE INFLUENCIA</i> .....	15
2.2.2 <i>COMPORTAMIENTO DE LA OFERTA Y LA DEMANDA</i> .....	21
2.3 GAS DE SINTESIS.....	25
2.3.1 <i>AREA DE INFLUENCIA</i> .....	26
2.3.2 <i>COMPORTAMIENTO OFERTA Y DEMANDA</i> .....	26
2.4 CERTIFICADOS AMBIENTALES.....	27
2.4.1 <i>AREA DE INFLUENCIA</i> .....	29
2.4.2 <i>COMPORTAMIENTO OFERTA Y DEMANDA</i> .....	30
<b>3 TAMAÑO Y LOCALIZACIÓN DE LA PLANTA</b> .....	<b>33</b>
3.1 TAMAÑO DEL PROYECTO.....	33
3.1.1 <i>DISPONIBILIDAD DE MATERIA PRIMA</i> .....	33
3.1.2 <i>MERCADO</i> .....	34
3.2 CAPACIDAD DE LA PLANTA.....	34
3.2.1 <i>CAPACIDAD instalada</i> .....	34
3.2.2 <i>CAPACIDAD utilizada</i> .....	35
3.3 LOCALIZACIÓN .....	36
<b>4 DISEÑO DEL PROCESO</b> .....	<b>39</b>
4.1 MATERIAS PRIMAS.....	39
4.1.1 <i>SÓLIDO CARBONOSO</i> .....	39
4.1.2 <i>AGENTE ACTIVANTE</i> .....	40
4.2 ETAPAS DEL PROCESO.....	41
4.2.1 <i>ADECUACIÓN DE MATERIA PRIMAS</i> .....	41
4.2.2 <i>TRANSFORMACIÓN DE LA MATERIA PRIMA</i> .....	42
4.2.3 <i>APROVECHAMIENTO DEL GAS DE SINTESIS</i> .....	43
4.2.4 <i>PREPARACIÓN Y EMPAQUE DEL PRODUCTO TERMINADO</i> .....	43
4.3 BALANCECES DE MASA Y ENERGIA PARA EL SISTEMA DE GASIFICACIÓN ..	44
4.3.1 <i>BALANCES DE MASA</i> .....	45
4.3.2 <i>BALANCE DE ENERGÍA</i> .....	56
4.3.3 <i>BALANCES DE MATERIA Y ENERGÍA EN LA CALDERA</i> .....	67
4.4 VARIABLES DEL PROCESO .....	69
4.5 PRUEBAS EXPERIMENTALES.....	75
4.5.1 <i>MATERIALES</i> .....	75

4.5.2	<i>EQUIPOS EMPLEADOS y METODOLOGÍA</i> .....	76
4.5.3	<i>Condiciones de operación</i> .....	80
4.5.4	<i>RESULTADOS OBTENIDOS y recomendaciones</i> .....	81
4.6	DIAGRAMAS DEL PROCESO.....	82
4.6.1	<i>DIAGRAMA DE BLOQUES</i> .....	82
4.6.2	<i>DIAGRAMA DE FLUJO</i> .....	82
<b>5</b>	<b>DISEÑO DE LA PLANTA</b> .....	<b>87</b>
5.1	EDIFICIOS E INSTALACIONES .....	87
5.1.1	<i>Cálculo de necesidades de infraestructura</i> .....	87
5.1.2	<i>OBRAS NECESARIAS</i> .....	89
5.2	EQUIPOS.....	90
5.2.1	<i>ADECUACIÓN DE MATERIAS PRIMAS</i> .....	91
5.2.2	<i>Transformación de la materia prima</i> .....	92
5.2.3	<i>APROVECHAMIENTO DEL GAS DE SINTESIS</i> .....	93
5.2.4	<i>PREPARACIÓN DEL PRODUCTO TERMINADO</i> .....	93
<b>6</b>	<b>ESTUDIO ORGANIZACIONAL</b> .....	<b>95</b>
6.1	ORGANIZACIÓN JURÍDICA.....	95
6.2	ESTRUCTURA ORGANIZACIONAL.....	96
6.2.1	<i>MANO DE OBRA DIRECTA</i> .....	97
6.2.2	<i>MANO DE OBRA INDIRECTA</i> .....	98
6.3	MONTO SALARIAL .....	99
6.4	ORGANIGRAMA .....	99
<b>7</b>	<b>ESTUDIO FINANCIERO</b> .....	<b>101</b>
7.1	INVERSIONES FIJAS .....	101
7.2	COSTOS DE PRODUCCIÓN .....	102
7.2.1	<i>COSTOS DIRECTOS</i> .....	102
7.2.2	<i>COSTOS INDIRECTOS</i> .....	104
7.3	PRODUCCIÓN.....	106
7.4	INGRESOS .....	106
7.4.1	<i>DEPRECIACIONES Y AMORTIZACIONES</i> .....	107
7.5	FLUJO DE PRODUCCIÓN .....	107
7.5.1	<i>VENTAS</i> .....	107
7.5.2	<i>INVERSIONES</i> .....	108
7.5.3	<i>COSTO Y CAPITAL DE TRABAJO</i> .....	108
7.5.4	<i>FLUJO DE EFECTIVO</i> .....	109
7.6	MÉTODOS DE VIABILIDAD FINANCIERA .....	109
7.6.1	<i>VALOR PRESENTE NETO (VPN)</i> .....	109
7.6.2	<i>TASA INTERNA DE RETORNO (TIR)</i> .....	110
7.7	ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD .....	112
<b>8</b>	<b>CONCLUSIONES</b> .....	<b>115</b>
	<b>BIBLIOGRAFÍA</b> .....	<b>118</b>
	<b>ANEXOS</b> .....	<b>119</b>

## LISTA DE TABLAS

Tabla 1.1 Condiciones experimentales para los ensayos en el gasificador a escala piloto.....	7
Tabla 1.2 Características de la carbonilla y de los carbones activados con CO <sub>2</sub> y vapor de agua. ....	8
Tabla 2.2.1 Propiedades generales del carbón activado en polvo.....	14
TABLA 2.2.2 Países importadores de carbón activado. ....	17
Tabla 2.3 Distribuidores de carbón activado en Antioquia.....	23
Tabla 4.1 Análisis elemental y propiedades físicas y químicas de la biomasa (residuos de pino pátula) .....	44
Tabla 4.2 Composición estimada y compuestos energéticos del gas producto	45
Tabla 4.3 información adicional del equipo.....	45
Tabla 4.4 Propiedades psicrométricas del aire para la ciudad de Medellín .....	48
Tabla 4.5 Fracciones y pesos moleculares de los componentes del gas producto.....	54
Tabla 4.6 Flujos másico teóricos para el sistema de gasificación.....	55
Tabla 4.7 Flujos másicos calculados para la capacidad de la planta.....	56
Tabla 4.8 Entalpías de formación para los componentes del gas producto. ....	59
Tabla 4.9 Calor específico de cada componente del gas en función de la temperatura .....	62
Tabla 4.10 Entalpías de los componentes del gas energético. ....	62
Tabla 4.11 Entalpías de formación para la combustión de carbono. ....	64
Tabla 4.12 Flujos energéticos del sistema de gasificación .....	66
Tabla 4.13 Entalpía de vaporización del agua a 120 °C y 1,97 atmósferas .....	68
Tabla 4.14 Factores de emisión para combustibles.....	74
Tabla 4.15 Variables y relaciones de operación .....	80
Tabla 4.16 Tabla de Corrientes .....	86
Tabla 5.1 Dimensiones y especificaciones de los espacios de la planta .....	88
Tabla 6.1 Características y obligaciones de la sociedad anónima .....	96



Tabla 6.2 Numero de operarios requeridos por etapa del proceso.....	97
Tabla 6.3 Balance de personal requerido por el proyecto .....	99
Tabla 7.1 Inversiones fijas. ....	101
Tabla 7.2 Activos intangibles. ....	102
Tabla 7.3 Consumo de materia prima por kg. de carbón activado.....	103
Tabla 7.4 Monto salarial de la mano de obra directa por año .....	103
Tabla 7.5 Prestaciones sociales y obligaciones del empleador .....	103
Tabla 7.6 Gastos de materiales indirectos.....	104
Tabla 7.7 Monto salarial de la mano de obra indirecta por año .....	104
Tabla 7.8 Consumo y costos de los servicios .....	105
Tabla 7.9 Costo de los seguros de la planta.....	105
Tabla 7.10 Otros gastos indirectos .....	105
Tabla 7.11 Producción anual de carbón activado .....	106
Tabla 7.12 Ingresos por ventas .....	106
Tabla 7.13 Depreciaciones y Amortizaciones .....	107
Tabla 7.14 Ventas.....	107
Tabla 7.15 Inversiones del proyecto.....	108
Tabla 7.7.166 Inversiones del proyecto .....	108
Tabla 7.17 Flujo de efectivo del proyecto .....	109
Tabla 7.18 Valor Presente Neto.....	110
Tabla 7.19 Valor Presente Neto para diferentes Tasa de Interés .....	111
Tabla 7.20 Flujo de efectivo para el proyecto con ventas de certificados ambientales .....	112
Tabla 7.21 VPN teniendo en cuenta los certificados ambientales .....	113
Tabla 7.22 vpn para diferentes tasas de interés teniendo en cuenta los certificados ambientales .....	113

## LISTA DE GRÁFICAS

Gráfica 2.1 Distribución de los sectores industriales de interés para el proyecto .....	18
Gráfica 2.2 Numero de industrias por áreas metropolitanas, 2003 .....	21
Gráfica 2.3 Gráfico de la concentración de dióxido de carbono en la atmósfera terrestre (azul) y la temperatura media global (rojo), en los últimos 1000 años. ....	29
Gráfica 2.4 Compradores de certificados ambientales .....	30
Gráfica 2.5 Oferta de proyectos para certificados ambientales .....	31
Gráfica 7.1 Valor Presente Neto vs. Tasa de Interés .....	111
Gráfica 7.2 TIR teniendo en cuenta los certificados ambientales .....	114

## LISTA DE FIGURAS

Figura 3.1 Mapa de acceso a la planta .....	37
Figura 3.2 Distribución del lote de maderas la finca .....	38
Figura 4.1 Sistema de gasificación .....	46
Figura 4.2 Flujos energéticos del sistema de gasificación .....	56
Figura 4.3 Sistema generador de vapor. ....	67
Figura 4.4 Zaranda utilizada para la separación del aserrín. ....	77
Figura 4.5 Esquema de gasificador utilizado para las pruebas experimentales	80
Figura 4.6 Diagrama de bloques.....	84
Figura 4.7 Diagrama de flujo.....	85
Figura 5.1 Plano de la planta, distribución y áreas .....	89
Figura 5.2 trituradora de madera .....	91
Figura 5.3 Zaranda de clasificación .....	91
Figura 5.4 Compresor de aire .....	92
Figura 5.5 Gasificador .....	92
Figura 5.6 Caldera .....	93
Figura 5.7 Tamiz clasificador de .....	93
Figura 6.1 Organigrama de la empresa. ....	100



## INTRODUCCIÓN

Uno de los mayores problemas ambientales que enfrenta la humanidad en la actualidad es la recolección, reciclaje y disposición final de los residuos; cualquiera que sea su origen, ya sea la industria química, alimenticia, agroindustria, entre otras. Los residuos madereros son residuos que por su volumen, tamaño y disposición final, actualmente están generando problemas en las zonas donde se encuentra la industria maderera. En Antioquia, por ejemplo, en los municipios del oriente.

Con esta investigación se pretende contribuir a dicho problema, además de darle un valor agregado al residuo y satisfacer la demanda carbón activado en Colombia, producto que tiene innumerables aplicaciones a nivel industrial y que actualmente es importado en su mayoría. (Alrededor del 90%) [1]. Por otra parte, darle un aprovechamiento al gas de síntesis que se genera en el proceso de gasificación de los residuos madereros, lo cual podría convertirse en una ventaja del proyecto, no solo técnica, sino también económica pues al aprovechar el gas dentro del mismo proceso se disminuyen los requerimientos energéticos del equipo y además se evitan emisiones de CO<sub>2</sub> a la atmósfera, lo cual se podría aprovechar como una alternativa para incursionar en la venta de certificados ambientales a países industrializados.

Debido a que los residuos de pino Pátula conservan la mayoría de las propiedades químicas de la madera siendo aptos para producir carbón activado [2], los ensayos para producir carbón activado se hacen a partir de estos residuos, por medio de un proceso de transformación termoquímica en un reactor de lecho fluidizado a escala piloto, donde el principal objetivo es la obtención de cenizas, con características similares a las del carbón activado y evaluar la posibilidad de aprovechar los gases que se generan dentro del proceso, para así generar un beneficio económico y ambiental.

# OBJETIVOS

## **OBJETIVO GENERAL**

Evaluar la factibilidad técnica y económica para la creación de una empresa productora de Carbón Activado a partir de residuos de Pino Pátula, generados en plantaciones forestales o aserríos del oriente antioqueño, empleando un proceso de Gasificación.

## **OBJETIVOS ESPECIFICOS**

- Conocer la gestión y valorización de los residuos pino Pátula generados en el proceso de transformación de la madera, su volumen y su disposición final; por medio de visitas a diferentes aserraderos del oriente antioqueño, para posteriormente evaluar su valorización.
- Evaluar el proceso de obtención de Carbón Activado por medio de gasificación de residuos de Pino Pátula, a partir del diseño del proceso, en el cual se definen los diagramas de flujo y los balances de masa y energía, para comprobar si la gasificación es un método eficiente para la obtención de este producto.
- Implementar Mecanismos de Desarrollo Limpio en el proceso, tales como la Cogeneración de Energía a través del aprovechamiento del gas de síntesis como sustituyente de combustibles fósiles en la planta; por medio de balances de materia y de energía, para una posible disminución en los costos correspondientes a la factibilidad económica.

- Realizar el estudio de factibilidad económica de una planta de producción de Carbón Activado, teniendo en cuenta los mecanismos de Producción Más Limpia, determinando los costos directos e indirectos para el montaje de la misma, y la cantidad de producto obtenido, por medio de balances de materia y de energía, evaluando inversión, VPN y TIR.

# 1 ANTECEDENTES

Antes de realizar cualquier proyecto se debe comenzar por una búsqueda de información y revisión bibliografía acerca de lo que se quiere hacer para tener una idea mas clara del tema. En este capitulo se muestran los aspectos mas importantes de esta revisión. Inicialmente se definirá el proceso de gasificación para después mencionar lo encontrado acerca del proceso de producción de carbón activado a partir de residuos madereros.

## 1.1 PROCESO DE GASIFICACIÓN

La gasificación es la conversión de cualquier combustible sólido en un gas energético, a través de su oxidación parcial a temperaturas elevadas (700 a 800 °C) [3]. El gas combustible, compuesto principalmente por CO, CH<sub>4</sub> y H<sub>2</sub>, es producido a partir de un proceso termoquímico endotérmico, que requiere la presencia de un agente oxidante (aire, oxígeno, vapor de agua, etc) para generar el calor necesario en la zona de reacción a fin de mantener el proceso de conversión [3]. El proceso de gasificación como tal, consta de cuatro etapas:

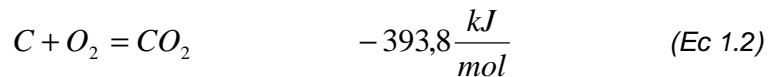
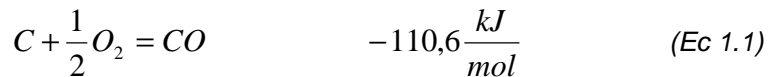
- Secado: liberación de la humedad
- Pirólisis: desprendimiento de volátiles
- Oxidación: combustión
- Reducción: gasificación.

Estas etapas se dan en diferentes zonas, de acuerdo al tipo de gasificador, alimentación de combustible (biomasa) y agente gasificante, en donde se dan las reacciones de gasificación.

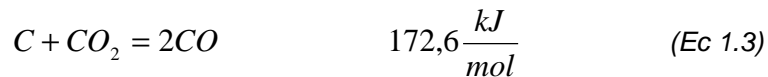


### **Reacciones heterogéneas (gas- sólidos)**

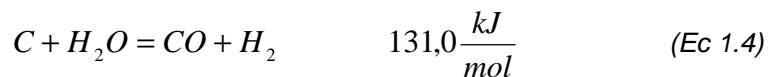
Oxidación de carbono:



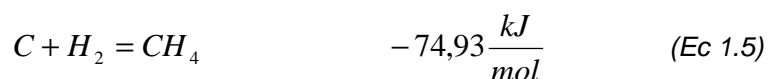
Reacción de Boudouard:



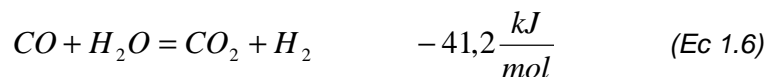
Reacción de vapor de agua (reacción de “shift”):



Formación de Metano:



### **Reacciones Homogéneas (fase gaseosa)**



Las reacciones expresas por las Ecuaciones 1.3, 1.4 y 1.7 son endotérmicas, y son las responsables por la formación de monóxido de carbono (CO). El calor necesario para el desarrollo de estas reacciones es suministrado a partir de las reacciones de oxidación del carbono, establecidas por las Ecuaciones 1.1 y 1.2.

Existen diferentes tipos de gasificadores, que se eligen dependiendo de las condiciones de operación del proceso, para este caso se mencionaran algunas características de los gasificadores de lecho fluidizado.

### **1.1.1 GASIFICADORES DE LECHO FLUIDIZADO**

La fluidización es una operación, en la que un sólido se pone en contacto con un líquido o un gas de tal forma que el conjunto adquiere características similares a las de los fluidos. Un reactor de lecho fluidizado tiene una cámara de reacción que contiene partículas inertes soportadas por una placa distribuidora y mantenidas en suspensión por un fluido que las atraviesa en forma ascendente. En la gasificación de combustibles sólidos solo se utilizan compuestos gaseosos, como medio fluidizante.

## **1.2 *PRODUCCIÓN DE CARBÓN ACTIVADO POR MEDIO DE GASIFICACIÓN***

Después de realizar una revisión bibliográfica, se encontró que se han desarrollado diferentes procesos para la obtención de carbón activado a partir de diferentes precursores, utilizando métodos de activación física con vapor de agua o dióxido de carbono, como agentes activantes, en procesos de gasificación de lecho fijo y lecho fluidizado.

El departamento de Ingeniería Energética y Control Ambiental del Instituto Nacional de Energía y Tecnología Industrial de Lisboa, Portugal, realizó una investigación titulada “Unconverted Chars Obtained During Biomass Gasification on a pilot-scale Gasifier as a Source of Activated Carbon Production.”, la cual fue publicada en la revista “Bioresource Technology”. En esta investigación, se hacen gasificar residuos de pino para producir carbón activado en un gasificador de lecho fluidizado a escala piloto, utilizando vapor como agente activante. La alimentación se hizo con biomasa sola y mezclas de biomasa con carbón y residuos plásticos. En el artículo se reportan los

resultados obtenidos para 4 ensayos, en los que se variaron las condiciones de operación.

En la Tabla 1.1 se presentan las condiciones de operación para este estudio.

**TABLA 1.1** Condiciones experimentales para los ensayos en el gasificador a escala piloto.

<b>Ensayo No</b>	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>4</b>
Temperatura de reacción (°C)	800	800	850	850
Flujo de Biomasa (kg/h)	6,9	6,84	6,1	6,55
Flujo de vapor (kg/h)	1,5	1,6	2	2
Flujo de aire (kg/h)	0	2,0	4,57	4,57
Relación agente activante/ mezcla	0,24	0,23	0,33	0,31
Relación aire/mezcla	0	0,29	0,75	0,70
Tiempo de residencia (alimentación h)	4	1	1	1
Atmósfera durante el enfriamiento	Vapor	Inerte	Inerte	Inerte
Cantidad de residuo (kg)	1,40	0,89	1,15	0,72
Rendimiento del proceso (%)	5,1	13,0	23,6	13,7

Fuente: GARCÍA-GARCÍA, A et al. Unconverted Chars Obtained During Biomass Gasification on a pilot-scale Gasifier as a Source of Activated Carbon Production. *Bioresource Technology*, v 88. 2003. p. 28.

Después de realizar los ensayos, se concluyó que se desarrolla una porosidad razonable para la gasificación de residuos de pino sin mezclarse con alimentación de vapor durante 4 horas, produciendo un carbón activado de buena calidad (volumen de los microporos de 0,263 cm<sup>3</sup>/g). En los otros ensayos se obtuvo chars con un bajo desarrollo de microporosidad, sin embargo estos pueden ser usados como precursores, para una posterior activación química. [4]

Adicionalmente en un estudio realizado por el Programa de Investigación y Desarrollo de Fuentes Alternativas de Materias Primas y Energía (PINMATE), del Departamento de Industrias de la Facultad de Ciencias Exactas y Naturales, de la Universidad de Buenos Aires. Argentina, se estudió la factibilidad de preparar carbones activados a partir de residuos de carbón de leña mediante

activación física, empleando CO<sub>2</sub> y vapor de agua como agentes activantes, en condiciones moderadas de temperatura.

En la Tabla 1.2 se presentan los resultados obtenidos en este estudio para los agentes activantes empleados, en condiciones de operación similares.

**TABLA 1.2** Características de la carbonilla y de los carbones activados con CO<sub>2</sub> y vapor de agua.

<b>Muestra</b>	<b>Sx10<sup>-3</sup> (m<sup>2</sup>/kg)</b>	<b>Vt (m<sup>3</sup>/kg)</b>	<b>Vmi (m<sup>3</sup>/kg)</b>
Carbonilla (sin activar)	1,9	6,9	0,9
Activado con CO <sub>2</sub>	1100	535,5	522,0
Activado con vapor de agua	1103	680,8	551,8

Fuente: SIMÓN, M. et al. Utilización De Residuos De Carbón De Leña Para La Obtención De Carbones Activados De Alta Capacidad Adsorbtiva Empleando Distintos Agentes Activantes. Programa de Investigación y Desarrollo de Fuentes Alternativas de Materias Primas y Energía (PINMATE), Departamento de Industrias, Facultad de Ciencias Exactas y Naturales, Universidad de Buenos Aires. Argentina.

De acuerdo con los resultados se concluyó que tanto con CO<sub>2</sub> como con vapor de agua se alcanzan áreas específicas de alrededor  $1 \times 10^6$  m<sup>2</sup>/kg, sin embargo la activación con vapor de agua conduce a obtener carbones más mesoporosos y con mejor rendimiento [5].

## 2 ESTUDIO DE MERCADO

En este capítulo se realiza el estudio de mercado para cada uno de los productos obtenidos en la transformación de los residuos madereros. En este caso, al aprovechar los residuos de Pino Pátula generados en el proceso de producción de tablillas para techos en el aserrío Maderas la Finca, se pretende realizar una transformación térmica de éstos, mediante un proceso de gasificación, para la obtención de carbón activado y un gas energético que puede ser aprovechado posteriormente. Esto podría generar un beneficio adicional al disminuir emisiones a la atmósfera y por lo tanto la venta de certificados ambientales, por lo tanto éstos últimos también se convierten en un producto del proceso que se debe analizar.

Para cada uno de los productos; carbón activado, gas de síntesis y certificados ambientales, así como también para los residuos de Pino Pátula utilizados como materia prima, se hará un estudio de mercado en el cual se precisan los siguientes aspectos: la definición del producto o materia prima, el área de influencia y el comportamiento de la oferta y la demanda.

La definición del producto da una idea general de lo que se pretende obtener y en el caso de los residuos madereros como materia prima, se da una idea de donde se pretende partir para obtener los productos mencionados.

El área de influencia en el caso de los residuos madereros, además del aserrío Maderas La Finca, considera las zonas aledañas donde se generan estos residuos y el mercado o disposición actual. En el caso de los productos el área de influencia permite tener una visión del posible mercado de estos productos, también partiendo de un análisis con base en datos actuales para productos similares o que pertenezcan al mismo sector.

Por último, realizar un análisis del comportamiento de la oferta y la demanda va a permitir conocer las posibilidades de acceder al mercado, determinando la necesidad y disponibilidad del producto para el sector al cual va dirigido.

A continuación se precisan cada uno de los aspectos mencionados para los productos y materia prima utilizada dentro en el proceso de transformación térmica de los residuos madereros.

## **2.1 RESIDUOS DE PINO PATULA**

Uno de los principales problemas de las industrias es la disposición de los subproductos o residuos de un proceso. Antes de empezar a trabajar con cualquier material proveniente de otro proceso, es de gran importancia realizar una caracterización del mismo, para esto primero se debe clasificar el material de acuerdo a su potencial de aprovechamiento y el grado de transformación que éste requiere para agregarle valor.

El desarrollo de este proyecto se plantea a partir de la información suministrada por una empresa perteneciente al sector de transformación de la madera, Maderas La Finca, ubicada en el municipio de Río negro, Antioquia. En este aserrío se procesa la madera para la obtención tablillas de pino Pátula, para techos y pisos. Las cuales son distribuidas a diferentes almacenes de materiales en todo el país.

Los residuos generados en el proceso de producción de tablillas van desde los orillos o bordes que se le quitan al tronco cuando llega al aserrío, para darle una forma rectangular que facilite su manipulación, hasta la viruta y el aserrín que son generados en las etapas de corte y pulido. Esto sin contar que en algunas ocasiones se generan residuos que han pasado por todo el proceso productivo, es decir tablillas, que no cumplen con algunas de las especificaciones de calidad y deben ser rechazadas.

### **2.1.1 AREA DE INFLUENCIA**

El principal problema que encuentran en esta empresa, es la cantidad de residuos que se generan en la fabricación de las tablillas. Solo el 35% de la madera rolliza es transformado en tablilla de calidad para ser comercializada. El 65% restante son residuos, de los cuales 60% orillos y retales, 25% tablillas que no cumplen con las dimensiones especificadas, 15% aserrín y viruta<sup>1</sup>. Aunque esta cantidad de residuos podría reducirse utilizando tecnologías más modernas en el proceso y por medio de una producción más limpia, por lo tanto si se piensa en un proyecto a largo plazo, para poder asegurar la cantidad de materia prima requerida para el proceso, es necesario conocer la disponibilidad de madera en esta región.

Actualmente, la mayoría de los orillos son vendidos a la empresa Sulfoquímica por un valor de \$32.000 / ton, de los cuales \$20.000 corresponden a gastos de transporte, por lo tanto el margen es de \$12.000/ ton. Los orillos que por su tamaño no son aceptados por esta empresa, se regalan a los campesinos de la zona y los retales se venden a agricultores para fabricar cajas para almacenar verduras. El 5% correspondiente a la viruta y el aserrín se vende para aglomerados y pesebreras.

Por lo tanto el área de influencia o el mercado actual de estos residuos son en su mayoría personas dedicadas a las labores del campo que viven o trabajan cerca de esta empresa.

### **2.1.2 COMPORTAMIENTO DE OFERTA Y DEMANDA**

En la actualidad la cantidad de residuos generados es mayor que los consumidos es decir que la relación oferta / demanda es mayor que 1, pero esto teniendo en cuenta, que el proceso de producción actual en este aserrío podría ser más eficiente implementando una tecnología moderna y una producción más limpia, por lo tanto la cantidad de residuos generados podría

---

<sup>1</sup> Esta información se obtuvo por medio de visitas al aserrío Maderas La Finca

disminuir. Sin embargo por mas eficiente que sea el proceso productivo siempre se va a generar una cantidad considerable de residuos, el problema con estos residuos es que no se tienen un manejo adecuado y no se les esta sacando el mayor provecho, debido a que no tienen valor agregado.

Aunque los residuos madereros pueden venderse fácilmente, sigue siendo el mayor problema para las empresas de este sector, pues la cantidad generada (65% de la madera rolliza), es muy alta y no se obtiene un mayor beneficio económico, por lo tanto estas empresas deben tratar de optimizar sus procesos o buscar alternativas de las cuales puedan sacar un mejor provecho a estos residuos.

Por ser los residuos madereros la principal materia prima, deben tratarse con especial cuidado debido a que su disponibilidad y ubicación condicionan todo el proceso productivo y los costos del proyecto, por eso es fundamental definir los aspectos mencionados anteriormente para los productos además de analizar un aspecto adicional que es la disponibilidad en el área de influencia.

### **2.1.3 DISPONIBILIDAD DE LOS RESIDUOS MADEREROS**

Teniendo en cuenta que para la realización del proyecto se pretenden aprovechar los residuos de pino Pátula generados en el aserrío Maderas La Finca, se debe asegurar una disponibilidad semanal de los mismos suficiente para realizar el proceso de transformación, pero además de esto también se debe hacer un análisis de la disponibilidad de madera en las zonas aledañas, pues en caso de no disponer de los residuos de este aserrío, ya sea por implementación de tecnologías de producción mas limpia o porque la demanda de tablillas disminuya, se deben tener otras alternativas.

En el aserrío Maderas La Finca, semanalmente se procesan un promedio de 30,53 toneladas de madera, de las cuales se generan 19,84 toneladas de residuos madereros que actualmente se venden a precios muy bajos.



## 2.2 CARBÓN ACTIVADO

Se conoce con el término carbón activado a materiales amorfos de origen biológico, con estructura porosa y área superficial internas bien desarrolladas que tienen una gran capacidad de adsorber diferentes sustancias líquidas o gaseosas. Estos materiales se producen a partir de madera, carbón, cáscaras y semillas de frutos, residuos de petróleo, entre otros, mediante un proceso conocido como activación. Los carbones activados pueden ser utilizados en diversas aplicaciones tales como purificación de gases, remoción de sustancias orgánicas y solventes de aguas, recuperación de oro en la industria minera, etc. [2]

Uno de los criterios más utilizados para la selección de un carbón activado para una aplicación específica es la distribución y el tamaño de poros [6], la cual afecta la capacidad de adsorción de las diferentes moléculas de acuerdo con su tamaño y forma.

Los poros de un carbón activado se clasifican según la IUPAC (Internacional Union of Pure and Applied Chemistry) en tres tipos:

*Microporos* con diámetro menor que 2 nm. Aportan una alta área superficial interna.

*Mesoporos*, con diámetro entre 2 nm y 50 nm, se comportan como canales para el transporte del adsorbato hacia los microporos .

*Macroporos*, con diámetro mayor que 50 nm, su principal función es servir como vía para transporte de las moléculas del adsorbato que es la sustancia adsorbida por el carbón activado.

El carbón producido puede ser utilizado como medio filtrante o en columnas de adsorción, empacadas con el material, teniendo en cuenta el uso que se le vaya a dar.

Según los requerimientos del cliente se definen las propiedades del carbón, sin embargo, éste debe cumplir con algunas propiedades, de acuerdo con los estándares internacionales y la norma AWWA B600-90 (American Water Works Association) [7], para que pueda considerarse carbón activado. En la Tabla 2.1 se muestran propiedades generales del carbón activado en polvo.

**TABLA 2.2.1** Propiedades generales del carbón activado en polvo

<b>PARÁMETRO</b>	<b>AWWA B600-90</b>
Índice de yodo	Mayor 500 mgI <sub>2</sub> /gca
Humedad	Menor 8%
Densidad	0,2-0,75

Fuente: Sulfoquímica, 2006

Las propiedades encontradas en la Tabla 1.1 se definen a partir del uso que tendrá el carbón activado, los rangos que aparecen en esta tabla están referenciados al carbón activado utilizado en el tratamiento de agua. Estas propiedades definen el poder absorbente del carbón.

#### *Usos y aplicaciones:*

Como se ha mencionado en el transcurso del proyecto, el carbón activado es un material poroso que es utilizado para la adsorción de contaminantes generalmente, sin embargo, éste tiene un gran número de aplicaciones en la industria química, alimenticia, farmacéutica, minera, entre otros.

Los principales usos del carbón activado son:

- Adsorción de sustancias contaminantes
- Reducción de compuestos indeseados
- Catalizador de reacciones químicas
- Arrastre de biomasa y de químicos
- Purificación de líquidos y gases.

### 2.2.1 AREA DE INFLUENCIA

El carbón activado es un insumo químico utilizado en diferentes industrias; en Colombia solo se produce el 10% de la demanda del producto.

De acuerdo con Proexport y el directorio de empresas colombianas, esta empresa pertenece al sector químico del país, por lo tanto el análisis sectorial del carbón activado, se centrara en este sector productivo.

#### *Sector químico en Colombia*

En Colombia esta industria está muy limitada por los problemas de orden público que sufre el país, la producción ilegal de estupefacientes ha hecho que este sector este muy vigilado por las autoridades, limitando la producción y distribución de este tipo de productos.

Sin embargo existen varias industrias, en su mayoría de inversión extranjera, que producen toda clase de productos químicos; y otras que se encargan de distribuir productos químicos importados de otros países, especialmente de USA, Japón, China, Alemania, entre otros .

En el 2004 el sector químico representó el 1.9% del PIB aportando 4.347.600 millones de pesos. En Antioquia este sector es considerado como un sector prioritario para el desarrollo del departamento, según el “Plan de Desarrollo de Antioquia 2004-2007”

#### *Entorno mundial del sector*

- Se pronostica que la demanda mundial de carbón activado aumentara un 5.3 %, según un informe titulado world activated carbon (carbón activado mundial) publicado por el grupo Freedonia, una empresa de consultoría ubicada en Cleveland, Ohio. Con un valor proyectado de US \$1,200

millones, el crecimiento esperado, será el mas rápido en los mercados maduros como Estados Unidos y Europa Occidental. Los mercados industriales emergentes en Asia y aquellos mercados más pequeños de Latinoamérica, Europa Oriental y África están listos para crecer y aumentar su producción; un mayor énfasis en asuntos ambientales en los países en vía de desarrollo impulsará estos avances. [8].

- Los principales productores de carbón activado en el mundo son Estados Unidos y China seguidos de Malasia, Indonesia, Filipinas entre otros. Este último es el responsable del 6% de las exportaciones mundiales de Carbón Activado.
- En la Unión Europea esta la mayor demanda mundial de este producto. En el 2000 importaron 811 toneladas de carbón activado de China y esto solo representó el 10% del consumo total.
- Países de América Latina como Colombia, Chile y México importan más del 50% del Carbón activado requerido por sus industrias.

Esta información basada en un informe publicado por la comisión de las comunidades europeas, acerca de las importaciones de carbón activado. [9]

En la Tabla 2.2, se muestran los principales importadores de carbón activado en el mundo, para el año 2003.

**TABLA 2.2.2 Países importadores de carbón activado.**

<b>PAISES IMPORTADORES</b>	<b>TOTAL IMPORTADO 2003 (Miles de U\$)</b>	<b>CANTIDAD IMPORTADA EN 2003(Ton)</b>	<b>VALOR UNITARIO (U\$/und)</b>	<b>(%) PARTICIPACIÓN EN LAS IMPORTACIONES MUNDIALES</b>
Estimación Mundial	595.453	469.212	1.269	100
Japón	79.375	81.611	973	13
Estados Unidos	66.810	56.867	1.175	11
Alemania	42.726	27.900	1.531	7
Corea del Sur	36.586	31.047	1.178	6
Bélgica	34.658	28.840	1.202	6
Italia	32.578	28.367	1.148	5
Francia	29.578	22.071	1.348	5
Canadá	26.775	4.824	5.550	4
Reino Unido	24.981	18.420	1.356	4
Países Bajos	24.434	16.926	1.444	4

Fuente: Desarrollo de Nuevos Productos a Base de Desechos de Coco: Carbón Activado Como Purificador de Agua. Inteligencia Competitiva – DCE- Ministerio de economía. San Salvador. Mayo 2005.

Aunque son muchas las restricciones y políticas que se tienen en Colombia para la producción y distribución de los diferentes productos químicos, el carbón activado no hace parte de estos, ya que no es utilizado para la producción de sustancias peligrosas o controladas por el gobierno. La normatividad de este producto tiene que ver mas con parámetros de calidad y estándares requeridos por el cliente, dependiendo de la aplicación que este vaya a tener.

### ***Mercado***

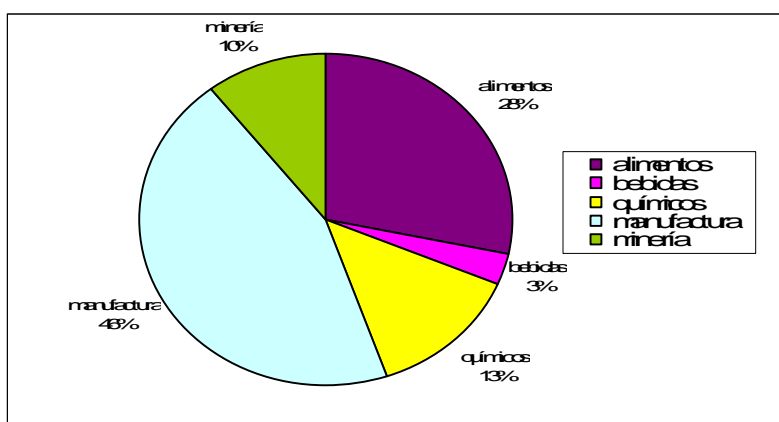
El mercado al cual se dirige el carbón activado, esta compuesto por un gran numero de empresas que utilizan el carbón activado dentro de su proceso productivo, o como parte de la purificación de sus servicios industriales. Entre éstas, se encuentran las empresas del sector alimenticio, algunas empresas del sector químico, textil, curtimbres, y en general todas aquellas empresas que realicen un tratamiento a sus aguas, antes o después del proceso.

Se pretende abarcar cuatro sectores industriales:

- Empresas de Bebidas
- Empresas de Alimentos
- Tratamiento de agua residual: Sector químico, manufacturero y agroindustrial.
- Minería

En Colombia existe gran cantidad de compañías que se encuentran dentro de los cuatro sectores industriales. El 67% de las industrias colombianas hacen parte de los sectores mencionados [10]. En la grafica se encuentra la distribución del 67% en cada uno de los sectores establecidos.

**GRÁFICA 2.1** Distribución de los sectores industriales de interés para el proyecto



Fuente: Colombia, Resumen de las Variables Principales de la Industria, Según Grupos Industriales. DANE. Total nacional 2003

Como se observa en el grafico, la industria manufacturera es la de mayor tamaño en Colombia con el 46%, seguida por la industria alimenticia, con el 28% y la industria química con el 13%. Estas industrias abarcan la mayor cantidad de consumidores potenciales del producto, pues es en éstas donde se hace indispensable el tratamiento de efluentes y purificaciones de agua y de gases.

Por lo tanto se podría decir que el mercado de este producto se dirige a una gran parte del sector industrial del país.

### ***Estimación de la demanda***

De acuerdo con un estudio realizado, a través de consultas directas con empresas de los diferentes sectores mencionados, se estima una demanda de carbón activado de 2500 Toneladas anuales.

En el sector de bebidas, se consultaron empresas como: Agua La Parcela, Agua Brisa, Agua Manantial. De las empresas consultadas, se estima un consumo de 800 Toneladas anuales carbón activado.

Además después de consultar con empresas de los sectores químico y manufacturero, se encontró un consumo aproximado de 1000 toneladas anuales. Para obtener esta información se consultó el consumo de carbón activado en empresas como Sofasa, EPM, Abocol, Colclinker, Cervunuion, Sotinsa, entre otras, las cuales utilizan el carbón activado, para la potabilización y tratamiento de sus aguas.

Entre las empresas del sector alimenticio y minero consumen un promedio aproximado de 700 toneladas anuales, según lo consultado en estos sectores.

### **Análisis del consumidor**

Como se menciona antes el principal consumidor de carbón activado, son un gran número de empresas de diferentes sectores productivos, que utilizan este producto dentro de su proceso o en la purificación de sus emisiones líquidas y gaseosas.

El carbón activado tiene un poder de adsorción muy alto, tiene la capacidad de conservar sus propiedades por periodos de 8 meses a un año, lo que hace que este producto tenga muy poca rotación. Las empresas generalmente hacen

pedidos de carbón máximo dos veces al año y la cantidad del pedido varia según el tipo de proceso y del filtro en el cual se utilizara el carbón.

Los principales distribuidores<sup>2</sup> de carbón activado en Medellín suministran un promedio de 150 – 200 kg mensuales. El precio del carbón que venden estos distribuidores varia según la granulometría y propiedades absorbentes del mismo (numero de yodo, número de azul de metileno, etc...). El precio va desde \$3500/kg hasta \$11000/kg de carbón mas especializado, el cual contiene mayor área superficial y mayor capacidad adsorbente o algún tipo de carga iónica que facilite el proceso de adsorción.

### **Ubicación geográfica del mercado**

Colombia es un país que por su ubicación geográfica, por sus dos océanos y abundantes recursos naturales, ha desarrollado importantes empresas nacionales y también se ha ido convirtiendo en una atractiva opción para los inversionistas extranjeros, por estas y otras razones, diferentes sectores industriales se han ubicado a lo largo y ancho del territorio nacional, aunque son las principales ciudades las que concentran la mayoría de estas empresas por poseer una adecuada infraestructura vial, fácil acceso a los puertos marítimos y por facilidad y disponibilidad de recursos, tanto técnicos, materiales, como humanos, entre estas ciudades están: Bogota, Cali, Medellín, las ciudades que conforman la región del eje cafetero y la zona norte del país, donde se encuentran las ciudades costeras, las cuales también concentran importantes complejos industriales. Por lo tanto, el mercado de este producto es un mercado disperso que no se encuentra concentrado en una zona específica del país.

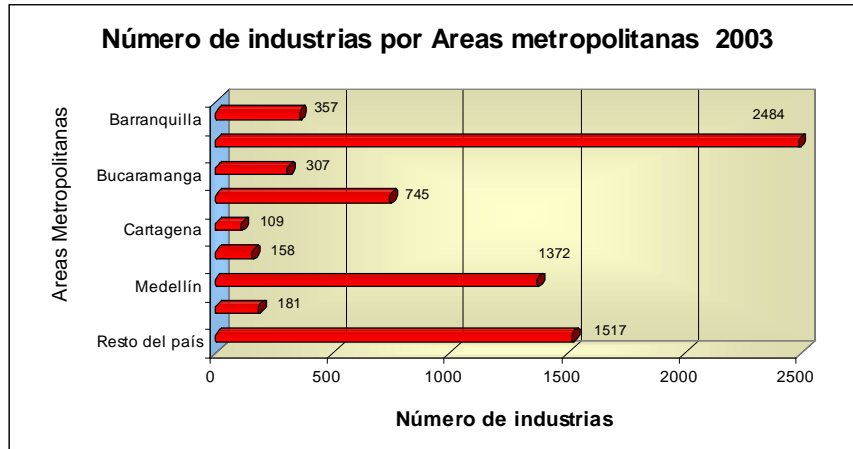
La Gráfica 2.2 muestra la distribución industrial de Colombia, dividida en las principales áreas metropolitanas del país.

---

<sup>2</sup> Los distribuidores consultados fueron, Carboquim, Aguater, Indumol, representantes Diver, todos localizados en el valle de aburra.



**GRÁFICA 2.2** Numero de industrias por áreas metropolitanas, 2003



Fuente: Resumen de las Variables Principales de la Industria Según Áreas Metropolitanas. Colombia. Total nacional 2003. DANE. Información estadística.

En la gráfica se ve que las industrias en Colombia están concentradas en las principales ciudades o en sus cercanías, el 34% está ubicado en Bogotá, el 18% en Medellín y el 10% en Cali, el otro 38% está distribuido en las otras zonas del país.

### 2.2.2 COMPORTAMIENTO DE LA OFERTA Y LA DEMANDA

En Colombia y en el mundo se está tomando conciencia del deber ambiental de las industrias, las legislaciones sobre vertimientos y descargas se han vuelto más estrictas, los recursos naturales se están considerando agotables.

A partir del decreto 1729 de 2002 que reglamenta la ordenación de las cuencas hidrográficas en Colombia, las industrias están más comprometidas a tratar sus efluentes, esto crea la necesidad de instalar plantas de tratamiento de agua y tratamiento de gases. El carbón activado es el material más utilizado en el tratamiento de agua residual y de gases, por lo tanto la demanda de este producto, a partir del cumplimiento de este decreto, tiende a aumentar año tras año.

La oferta de carbón activado esta dada en su mayoría por importación del producto, la producción colombiana no alcanza a abastecer la demanda, la oferta colombiana de este producto solo equivale al 10% de ésta por lo tanto en este sentido la evaluación de este proyecto se convierte en una alternativa interesante.

De este 10% hace parte Sulfoquimica, empresa localizada en el departamento de Antioquia y con varias plantas en otras ciudades del país. En la actualidad, produce y distribuye productos dirigidos al tratamiento de agua potable, aguas residuales, industrias del papel y a otras aplicaciones industriales. Por ser una de las pocas productoras nacionales de carbón activado, esta, es la principal competencia.

En esta compañía producen el carbón activado a través de una activación física con vapor de agua de productos maderables, además les ofrecen a los clientes la posibilidad de reactivar el carbón ya utilizado. Su principal producto es el carbón activado pulverizado, el cual ofrecen en tres referencias distintas, sin embargo tiene la posibilidad de producir carbón activado granular si el cliente lo requiere. Por otra parte esta empresa es flexible con el cliente pues esta dispuesto a cambiar las propiedades principales del producto si el cliente se lo pide [7].

Entre las compañías internacionales que distribuyen el carbón activado en el país se encuentran empresas de USA, Canadá, China, Ecuador.

Norit es una de las marcas de carbón activado mas reconocidas mundialmente. Su sede principal esta localizada en Atlanta, USA, pero cuenta con distribuidores y productores en países de Europa, Asia, África y Sur América.

Esta compañía, que cuenta con la experiencia de 100 años fabricando carbón activado, tiene clientes en todas partes del mundo, además ofrece 150 grados de carbón activado para mas de 10 aplicaciones.

En las diferentes ciudades del país se encuentra distribuidores de carbón activado y de productos químicos en general. Los más conocidos son Quisol Ltda, Carbot Corporation, en Bogota, otros distribuidores como Productos Brenntag y GMP Productos Químicos, tienen sedes en diferentes ciudades del país como Bogota, Medellín, Cali, Barranquilla, entre otras.

En la Tabla 2.3 se encuentra los distribuidores de carbón activado del departamento de Antioquia.

**TABLA 2.3** Distribuidores de carbón activado en Antioquia

<b>DISTRIBUIDOR</b>	<b>DIRECCION</b>	<b>COMENTARIOS</b>
CARBOQUIM	CL 32 # 41 - 49 ITAGÜI  TEL: 2779292	Distribuyen carbón activado para purificación de agua y eliminación de olores.  El carbón activado que distribuyen es marca Ecocarbon de Ecuador, malla 80x30.  Sus principales clientes son cultivadores de flores e industrias de alimentos.
AQUATEC LTDA.	CR 80 # 50 – 76 MEDELLÍN  TEL: 2340213	Distribuye carbón activado marca Carchem de China. Su principal uso es la purificación y tratamiento de agua.
INDUMOL LTDA.	CR 45 # 32 – 95 MEDELLÍN  TEL: 2621620	Ofrece carbón activado importado de Canadá, para purificación de fases líquidas y gaseosas.  Distribuye carbón en polvo, pellets o granular, en 10 referencias diferentes.
REPRESENTACIONES DIVER LTDA	CR 48 # 69S – 42 SABANETA  TEL: 2883574	No se tiene información disponible.

En la Tabla 2.3 se encuentran los distribuidores del departamento de Antioquia. Todos ellos importan el carbón de diferentes partes del mundo como aparece en la tabla.

Los distribuidores tiene muy poco inventario del producto, generalmente los clientes hacen los pedidos con anterioridad y así el distribuidor tiene tiempo de hacer el pedido a la casa matriz. Esto se debe a que la rotación del producto es muy baja, según uno de los distribuidores, “se vende carbón activado cada 3 o 4 meses”. El canal de comercialización entre los distribuidores y los clientes es directo, estos envían la cantidad y el producto requerido por el cliente.

La oferta de carbón activado a partir de corteza de pino pátula esta relacionada con la cantidad de corteza disponible, con relación a esto no se tendría ningún problema, ya que el volumen generado de este residuo en el departamento de Antioquia es muy alto y prácticamente solo se tendrían en cuenta los costos de transporte desde el punto de generación del residuo hasta la planta de producción, en este sentido, con la realización del proyecto se lograría abastecer gran parte del mercado que hoy depende de las importaciones.

### **Bienes sustitutos**

Como se ha mencionado anteriormente, el carbón activado es un material poroso, que es utilizado en el tratamiento y purificación de líquidos y gases, por lo tanto aunque este producto ofrezca ventajas únicas con respecto a otros materiales porosos, en caso de poder adquirir el producto por escasez se podrían evaluar procesos alternativos para tratar estos efluentes y diferentes materiales como, Placas porosas filtrantes realizadas a partir de la impregnación de un material orgánico esponjoso con sólidos cerámicos, aunque son materiales que apenas se encuentran en desarrollo y tendrían un mayor costo, debido a que requieren de procesos de producción más complejos.

Otros materiales que podrían sustituir el carbón activado para separar gases son algunos materiales compuestos como:

- Monolitos cerámicos celulares recubiertos de carbono.
- Monolitos de baja densidad de fibras de carbono activadas.
- Monolitos avanzados obtenidos por moldeo.
- Sílice Mesoporosa

### **2.3 GAS DE SINTESIS**

El gas de síntesis o gas energético, producto del proceso de transformación termoquímica de los residuos de madera, está compuesto en un 40% aproximadamente de gases combustibles (monóxido de carbono, hidrógeno y algo de metano), y un 60% restante no combustible, consiste principalmente en hidrógeno, dióxido de carbono y vapor de agua. [3]

El gas de síntesis puede ser utilizado como combustible en procesos de generación de energía, además puede hacer parte de la síntesis de compuestos como alcohol, amoníaco.

Por más de un siglo, el gas de síntesis proveniente de la gasificación de productos con contenido de carbono, se ha utilizado en motores de combustión interna, donde actúa como combustible del motor [11].

En el caso de este proyecto el aprovechamiento del gas energético dentro del mismo proceso podría ser para la producción de energía eléctrica o aprovechamiento del calor en los procesos de secado de la madera.

### **2.3.1 AREA DE INFLUENCIA**

El área de influencia de aprovechamiento del gas como se ha venido planteando, sería dentro de la misma empresa, pero también se debe tener en cuenta que si en un futuro se llegara a incrementar la producción de carbón activado, debido a la creciente demanda de este producto, podría generarse una cantidad adicional de gas al requerido por la empresa, por lo tanto desde este momento se debe pensar en los posibles consumidores externos de este gas.

En los últimos años el oriente antioqueño ha tenido un crecimiento acelerado, no solo en lo que se refiere a la población que se ha desplazado del área metropolitana y municipios aledaños, sino también a las empresas que han decidido trasladar sus sedes o abrir nuevas en esta región. Este crecimiento poblacional e industrial genera nuevas necesidades de todo tipo de bienes y servicios, como lo es la necesidad de cualquier forma de energía y es ahí donde tendría mercado el gas energético excedente que pueda producirse en el proceso de carbón activado.

### **2.3.2 COMPORTAMIENTO OFERTA Y DEMANDA**

El gas de síntesis tiene un mercado potencial bastante grande, pues el uso de energías renovables cada vez toma más fuerza, debido a las pocas reservas de petróleo que se tienen en el mundo, estimadas para cubrir una demanda de combustibles solo hasta los próximos 60 años, teniendo en cuenta que de la demanda total, el 80% proviene de fuentes no renovables [11]. Es por esta razón que los países industrializados cada vez se preocupan más por este tema y promuevan el uso de combustibles y energía a partir de fuentes renovables, como lo es la biomasa.

En Colombia la necesidad de recurrir a energías renovables, se está haciendo presente. A partir de los últimos años se ha empezado a utilizar mezclas gasolina con 10% alcohol carburante, porcentaje que se aumentara de manera gradual hasta llegar a mezclas con mayor porcentaje de alcohol que de

gasolina. Sin embargo con respecto al tema de energía eléctrica a partir de biomasa todavía no se tiene mucha información en el país, pero sin duda alguna se espera que la necesidad de este tipo de energía cada vez sea mayor, lo que supone una demanda creciente en los próximos años.

Dentro de estas nuevas alternativas se encuentran los residuos madereros, los cuales por su contenido de volátiles de aproximadamente 85%, tienen un alto potencial para la producción de energía dentro de un proceso de gasificación.

## **2.4 CERTIFICADOS AMBIENTALES**

El Protocolo de Kyoto, que fue aprobado en diciembre de 1997, establece para los países industrializados, metas específicas de reducción de emisiones de gases efecto invernadero (GEI) hacia el período 2008-2012. Los países en desarrollo no tienen compromisos específicos de reducción de emisiones. Colombia ratificó el Protocolo mediante la Ley 629 de 2000.

Para ayudar a cumplir las metas de reducción de emisiones de los países desarrollados y promover el desarrollo sostenible en los países en desarrollo, el Protocolo estableció el Mecanismo de Desarrollo Limpio (MDL). A través de este instrumento, un país desarrollado que sea parte del Protocolo y tenga compromisos cuantificados de reducción de emisiones, tiene la posibilidad de invertir en un proyecto que se implemente en un país en desarrollo y utilizar las reducciones o capturas de emisiones de gases efecto invernadero de dicho proyecto para cumplir con sus compromisos de reducción. Este mecanismo de “compensación” de emisiones se podría convertir en una fuente de inversión extranjera y de divisas de gran potencial para países como Colombia. Los países desarrollados podrán invertir en proyectos de reducción o captura de emisiones en sectores como energía, industria, transporte, agricultura y bosques. [12]

Como se menciono anteriormente, en el proceso de transformación térmica de los residuos madereros, por medio de una gasificación se generan dos productos; las cenizas, las cuales después de una activación física o química pueden ser convertidas en carbón activado y el gas energético que puede ser aprovecharlo para la producción de energía eléctrica o dentro de éste mismo proceso de producción. Es de esta forma como se pueden implementar estos mecanismos de compensación con países desarrollados.

Aprovechando este gas ya sea para producir energía eléctrica o como sustituto de un combustible, se esta dejando de emitir una cantidad de gases efecto invernadero a la atmósfera, por lo cual la empresa recibir certificados ambientales que pueden ser comercializados por medio de agencias internacionales acreditadas por las naciones unidas, las cuales se encargan de vender estos certificados a aquellas empresas de los países industrializados, que se comprometieron en el protocolo de Kyoto de diciembre de 1997, a reducir sus emisiones de gases efecto invernadero o a pagar por estos certificados a aquellas empresas que estén dejando de emitir esta misma cantidad. Esto se convierte en una alternativa interesante y que además todavía no ha sido muy explotada en Colombia.

Hay estudios que apuntan que para conseguir estabilizar las concentraciones equivalentes de CO<sub>2</sub> en la atmósfera en niveles que no conocemos desde los años 30 del siglo pasado, necesitaríamos que el 40% de la energía eléctrica producida en el mundo se obtenga a partir de la biomasa [13].

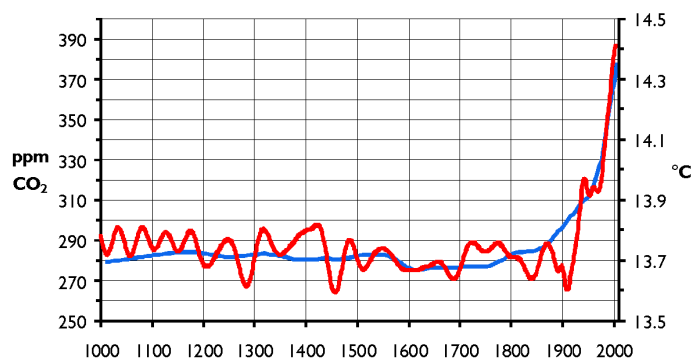
Una gran ventaja de la gasificación como precursor de energía a partir de la combustión con gas de síntesis, es el bajo contenido de azufre que contiene este gas, además el azufre en este proceso es liberado como H<sub>2</sub>S y no como SO<sub>2</sub>, de esta forma, el azufre se puede recuperar, generando una disminución en la contaminación.

La mayoría del CO<sub>2</sub> que se emite a la atmósfera es producido por las descargas de la combustión con petróleo, carbón o gas natural. En la siguiente



grafica se muestra como han aumentado las descargas de CO<sub>2</sub> en los ultimas 10 siglos y el efecto que esto trae en el calentamiento global.

**GRÁFICA 2.3** Gráfico de la concentración de dióxido de carbono en la atmósfera terrestre (azul) y la temperatura media global (rojo), en los últimos 1000 años.



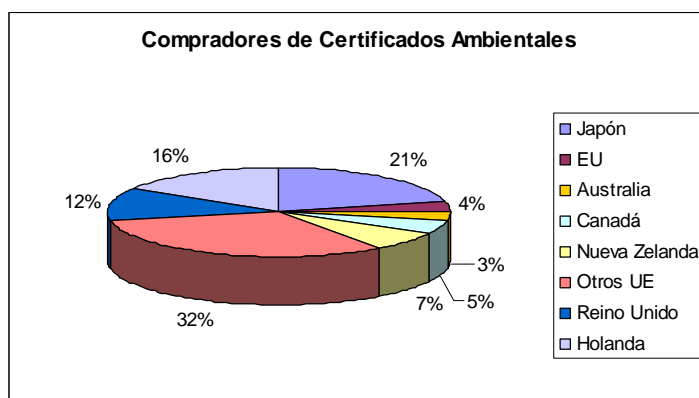
Fuente: Calentamiento Global. Wikipedia.org. 2006

Como se observa en el grafico, la concentración de CO<sub>2</sub> en el 2000 es de aproximadamente de 370 ppm y los combustibles fósiles son los causantes del 80% de esta concentración, aportando 296 ppm CO<sub>2</sub>, teniendo en cuenta que esta tendencia cada vez va en aumento y la escasez de combustibles fósiles que se podría presentar en un futuro, es necesario pensar en nuevas fuentes de energía.

#### 2.4.1 AREA DE INFLUENCIA

De acuerdo con lo pactado en el protocolo de Kyoto, los países industrializados comprometidos, son los más interesados en la compra de estos certificados, pues incentivan la reducción de emisiones por parte de otros países, que tengan reducciones cuantificadas, a través de los mecanismos de compensación.

**GRÁFICA 2.4** Compradores de certificados ambientales



Fuente: DOPAZO, Eduardo. Negocio de Financiación del Carbón del Banco Mundial. Madrid, Junio 2006.

En línea: <http://www.icex.es/protocolokioto/Seminario2206>

En la Gráfica 2.4 se observa que los mayores participantes en el mercado de estos bonos son los países de la Unión Europea, seguidos de Japón y Holanda, todos éstos, países industrializados que se comprometieron en el protocolo de Kyoto.

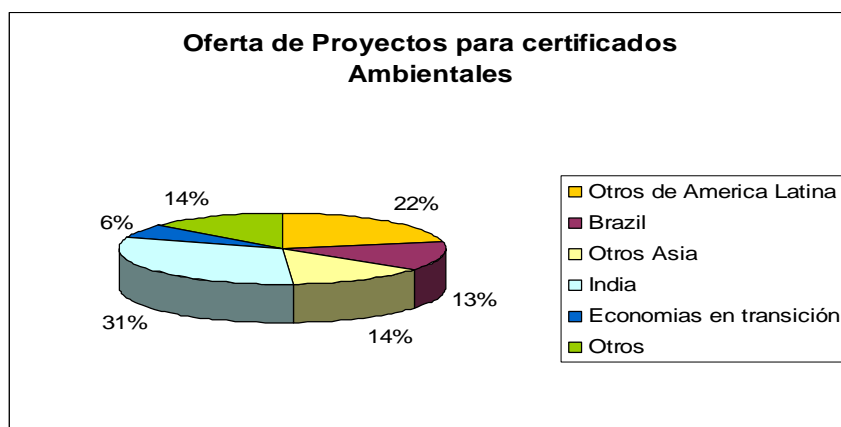
#### 2.4.2 COMPORTAMIENTO OFERTA Y DEMANDA

Indudablemente la demanda de estos certificados ambientales cada vez será mayor debido al compromiso ambiental no solo de los países industrializados sino también de los países en vía de desarrollo que pretenden entrar en un mercado globalizado mucho más exigente con las regulaciones ambientales.

En el caso de este proyecto, los mecanismos de compensación no funcionarían por reforestación, ni por consumo de CO<sub>2</sub>; sino por la disminución de emisiones de gases efecto invernadero a la atmósfera, a través de la implementación de mecanismos de desarrollo limpio, en el proceso productivo.

En la Gráfica 2.5, se muestran los países y regiones con mayor oferta de proyectos para certificados ambientales, de acuerdo con datos reportados por las Naciones Unidas.

**GRÁFICA 2.5** Oferta de proyectos para certificados ambientales



Fuente: DOPAZO, Eduardo. Negocio de Financiación del Carbón del Banco Mundial. Madrid, Junio 2006.  
En línea: <http://www.icex.es/protocolokioto/Seminario2206>

Como se observa en la Gráfica 2.5, la India es el país que tiene mayor participación en proyectos para certificados ambientales con un 31%, seguido por países de América latina con un 22%, sin tener en cuenta a Brasil que por sí solo cuenta con una participación del 13%. Estas cifras nos dan una idea del potencial que puede tener Colombia en este mercado, pues además esta oferta debe ser mayor para poder satisfacer toda la demanda.

En la actualidad el portafolio colombiano de proyectos del MDL cuenta con 31 proyectos, catorce de los cuales pertenecen al sector forestal. Diez de estos proyectos fueron formulados en el marco del Programa de Tutoría para la Formulación de Proyectos del MDL. [12]

Teniendo en cuenta el potencial que ofrece el MDL para países en desarrollo, el Ministerio ha desarrollado una serie de actividades tendientes a fomentar la implementación de la Convención de Cambio Climático y el Protocolo de Kyoto, dentro de las que se encuentran el Estudio de Estrategia para la Implementación del MDL en Colombia, el desarrollo de un portafolio de proyectos forestales de captura de CO<sub>2</sub>, y numerosas actividades de divulgación y capacitación.

El Estudio de Estrategia Nacional evaluó cuatro sectores de acuerdo al potencial de generación de Certificados de Reducción de Emisiones bajo el esquema del Mecanismo de Desarrollo Limpio. Estos sectores son: el agroforestal, generación de energía eléctrica, cemento y panela. En los sectores; eléctrico, cemento y panela se identificaron opciones de reducción de emisiones mediante acciones de aumento de la eficiencia de conversión de energía. En el Estudio de Estrategia se definió un plan de acción para la implementación del MDL en Colombia con cinco componentes, entre ellos: el fortalecimiento de la capacidad negociadora del país y el fortalecimiento de la capacidad nacional para el desarrollo de proyectos del MDL.

## **3 TAMAÑO Y LOCALIZACIÓN DE LA PLANTA**

El tamaño y la localización del proyecto se definen a partir del Capítulo 1, donde se determina la disponibilidad de la materia prima y la demanda de los productos, factores fundamentales para definir el tamaño y la localización.

### **3.1 TAMAÑO DEL PROYECTO**

En el tamaño de la proyecto se define por el número del bien producido por una unidad de tiempo. En este, se definen la capacidad de la planta a partir de factores determinantes.

Entre los aspectos determinantes, se encuentran, el mercado, la disponibilidad de la materia prima, la capacidad financiera, las políticas gubernamentales, entre otros, sin embargo, para este proyecto, la disponibilidad de la materia prima y el mercado son, quizá, los factores principales para definir el tamaño de la planta.

#### **3.1.1 DISPONIBILIDAD DE MATERIA PRIMA**

Inicialmente se pretende aprovechar la cantidad de residuos generada en el aserrío Maderas La Finca, es decir, 19 ton semanales.

Los demás materiales requeridos en el proceso tienen que ver con servicios industriales como vapor, electricidad y combustible, los cuales no son determinantes en la definición del tamaño, porque se pueden disponer a la medida que se necesiten.

El vapor de agua requerido se produce por una caldera, después de realizar un tratamiento químico para desmineralizar el agua suministrada por el acueducto municipal, aprovechando el gas energético, producto de la gasificación, como combustible, por lo tanto la disponibilidad del vapor esta relacionada con la disponibilidad de los residuos madereros.

### **3.1.2 MERCADO**

En el estudio de mercado (Cap. 2), se estima una demanda anual de carbón activado de 2500 toneladas, distribuidas en los diferentes sectores industriales del país.

## **3.2 CAPACIDAD DE LA PLANTA**

Después de contemplar los aspectos mencionados anteriormente, se define la capacidad, tanto la instalada como la utilizada. La capacidad se determina a partir de la disponibilidad de materia prima y de la demanda estimada en el estudio de mercado.

### **3.2.1 CAPACIDAD INSTALADA**

La capacidad de instalada es aquella que determina la capacidad máxima de los equipos del proceso.

Según la disponibilidad de la materia prima existen 76 ton/mensuales de residuos madereros que pueden procesarse para producir carbón activado. Contando con una eficiencia del proceso del 20% teniendo en cuenta que el 80% de estos residuos son compuestos volátiles y agua. Según esta eficiencia, a partir de los 76 ton/mensuales se obtiene 15.2 toneladas mensuales de carbón activado.

Sin embargo, después de realizar el estudio de mercado, se conoce que la demanda es inferior a esta cantidad. A partir de esto, y teniendo en cuenta que

Lo más influyente en cuanto al tamaño de la planta es la capacidad del mercado para percibir el producto, la capacidad de la planta se define a partir de lo reportado en el Numeral 3.1.2, ya que se conoce que se tiene suficiente materia prima para abarcar esta demanda.

Partiendo de una demanda de 2.500 Ton/anales y que el proyecto pretende cubrir el 5% de esta demanda, se define una capacidad de 125 Ton/anales, sin embargo, para el diseño de la planta es necesario tener en cuenta que la demanda del producto tiene una tendencia creciente, por lo tanto se pretende aumentar la producción anual de la planta en un 1%.

Partiendo de una vida útil de la planta de 20 años, se requiere tener en cuenta el crecimiento de la producción a este tiempo, es decir que a los 20 años se ha incrementado en 25 toneladas la producción, por lo tanto:

Capacidad de instalada: 150 Ton/anales de carbón activado que equivalen a 12.5 ton/mensuales. Para esto se requiere procesar 62.5 Ton/mensuales de residuos de pino pátula

### **3.2.2 CAPACIDAD UTILIZADA**

La capacidad utilizada, definida como la cantidad disponible, se define a partir de la producción del primer año de operación de la planta, definido a partir de la capacidad de instalada.

Capacidad Utilizada = 125 Ton/año = 10.42 Ton/mes

Para cubrir esta capacidad instalada se requiere procesar 52.1 Ton/mensuales de residuos de pino pátula.

### **3.3 LOCALIZACIÓN**

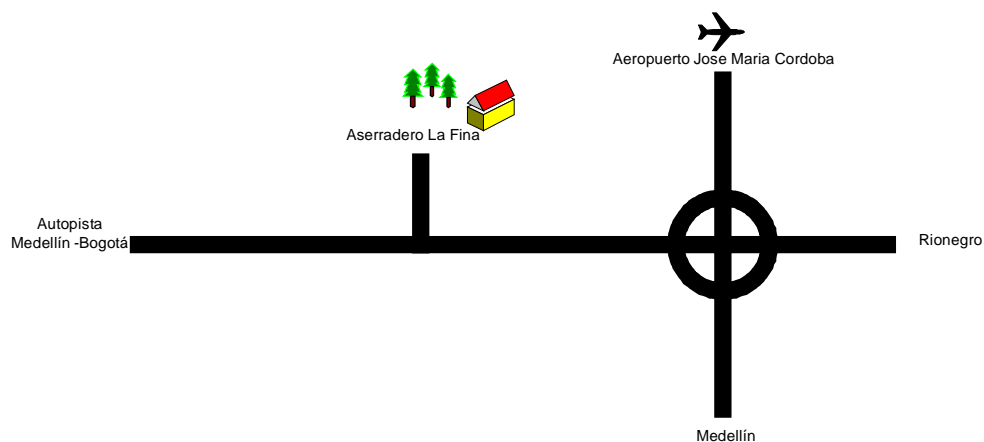
La planta de producción de carbón activado se localiza en el aserrío Maderas La Finca, ubicado en el municipio de Rionegro, en el oriente Antioqueño, exactamente en el kilómetro 3.4 vía aeropuerto - hipódromo de los Comuneros, en la vereda La Mosquita.

Esto, teniendo en cuenta que este aserrío es la fuente de abastecimiento de materia prima, y que uno de los mayores costos en los que incurre el producto es el transporte. Con un costo promedio de flete de residuos madereros de el oriente Antioqueño a Medellín, otra posible localización, de \$20.000/tonelada, al ubicar la planta en zonas cercanas a las fuentes de materia prima, se esta economizando aproximadamente \$250.000/mes, si se parte de la cantidad de materia prima requerida para cubrir la capacidad instalada.

La disponibilidad de materia prima es uno de los factores más importantes para la localización de la planta, pues al tratarse de un producto con un mercado disperso, es más influyente estar cerca de la fuente de las materias primas que cerca de los sitios donde se va a distribuir el producto terminado. En el oriente antioqueño se localizan gran cantidad de los aserraderos y plantaciones forestales de pino pátula, haciendo más fácil la consecución de materia prima dado el caso que no haya suficiente en Maderas La Finca o haya un incremento en la demanda de carbón activado que implique recurrir a nuevas fuentes de abastecimiento.

En la Figura 3.1, se muestra la ubicación del aserrío Maderas La Finca, donde también se pretende ubicar la planta de producción de carbón activado.



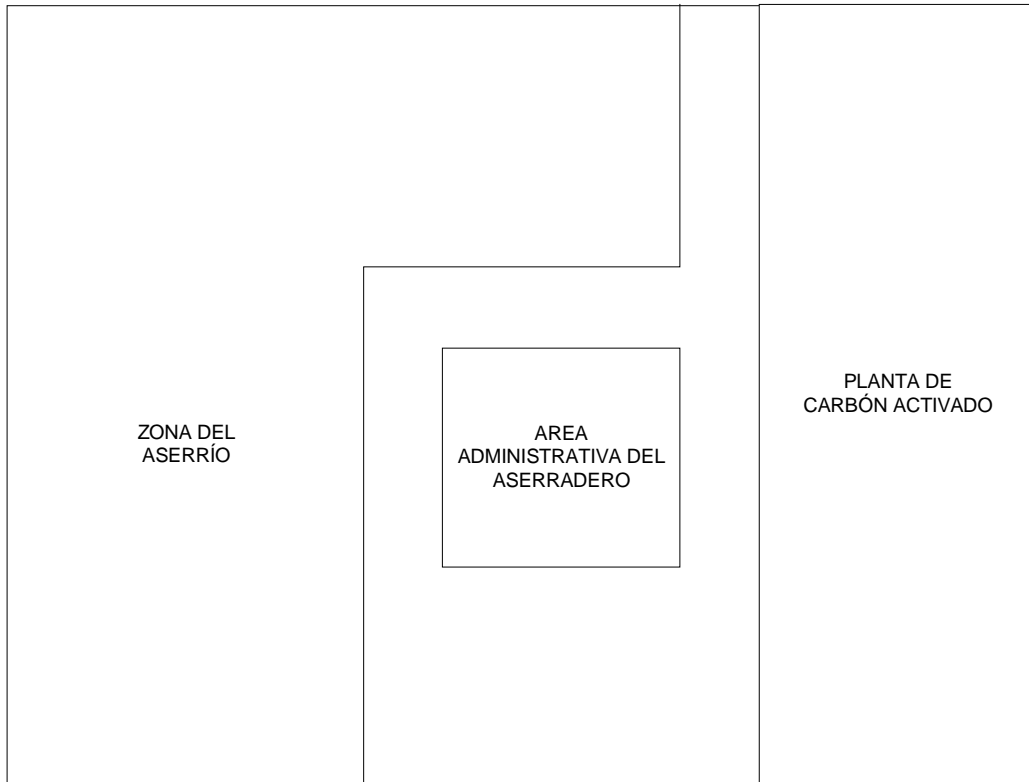


**FIGURA 3.1** Mapa de acceso a la planta

Como se observa en la figura, la localización de la planta se favorece también, por la facilidad y disponibilidad de vías de transporte, logrando un posible acceso a diferentes partes del país.

El oriente antioqueño es un punto estratégico para comunicarse con el centro del país por la autopista Medellín - Bogotá, hacia el norte por la troncal del caribe, hacia el sur occidente y eje cafetero, por la vía panamericana. Además, cuenta con una infraestructura adecuada y abastecimiento de servicios públicos y energéticos, ya que en los últimos años se ha convertido en una importante zona industrial, con muchas empresas que se han trasladado de la ciudad hacia este sector.

En la Figura 3.2 se encuentra la distribución del lote de maderas La Finca, incluyendo la planta de carbón activado.



**FIGURA 3.2** Distribución del lote de maderas la finca

## **4 DISEÑO DEL PROCESO**

El diseño del proceso de producción de carbón activado, es la combinación de principios físicos, químicos y biológicos del proceso; con el fin de satisfacer un propósito productivo y llegar el diagrama de flujo del proceso con el cual se conocen las condiciones de operación y variables críticas del proceso.

### **4.1 MATERIAS PRIMAS**

Para realizar un buen diseño del proceso se debe conocer las características principales, de las materias primas seleccionadas, además de las posibles alternativas de materiales.

#### **4.1.1 SÓLIDO CARBONOSO**

En la producción de carbón activado se puede utilizar carbón natural, diferentes tipos de maderas, entre otros productos naturales o artificiales, solo se requiere que el producto a utilizar tenga un alto contenido de carbono. Los carbones activados comerciales son producidos a partir de carbón mineral, madera, huesos y cáscaras de frutas, turba, breas y coque. Entre las diferentes especies de maderas utilizadas en este proceso se encuentran el Eucalipto, y los pinos Cipres y Pátula.

Partiendo de los diferentes precursores que existen para la producción de carbón activado, los residuos madereros siguen el alcance que se pretende dar al proyecto, que es el aprovechamiento de un residuo agroindustrial que se generan en una región cercana al municipio de Medellín.

Entre los diferentes residuos madereros encontrados, el pino pátula es el precursor de un carbón activado con mejores propiedades. [2]

#### **4.1.2 AGENTE ACTIVANTE**

Para la activación física se pueden utilizar varios agentes activantes, como el aire, el CO<sub>2</sub> y el vapor de agua.

A partir de un estudio realizado en la Universidad de Buenos Aires, donde se utilizaron residuos de carbón para la obtención de carbón activado empleando distintos agentes activantes [5], se concluyó que el vapor de agua es el agente activante que muestra mejores resultados, pues los carbones producidos a partir de este compuesto presentan mayor área superficial. Sin embargo, el CO<sub>2</sub> es también utilizado con alto rendimiento, lo que diferencia principalmente el uso de uno u otro compuesto es el tamaño del poro que se desea obtener. Con el CO<sub>2</sub> solo es posible obtener carbón activado con micro poros (diámetro menor a 2nm); mientras que con el vapor de agua se puede obtener carbones con micro y mesoporos (diámetro entre 2 – 50 nm).

Esto podría ser explicado por la naturaleza molecular, debido a que la molécula de agua es más pequeña que la de CO<sub>2</sub>, por lo tanto la difusión a micro poros, se logra más rápido [4].

El aire es el compuesto menos recomendado para la activación, pues el rendimiento y el área superficial obtenida son mucho menor a lo que se obtiene con los otros dos compuestos [5].

Por otra parte, en un estudio realizado por el departamento de ingeniería energética y control ambiental del instituto nacional de energía y tecnología industrial de Lisboa Portugal, obtuvieron carbones activados de buena calidad por gasificación de residuos de pino en una gasificación con vapor como agente activante, en un gasificador a escala piloto [4]

## **4.2 ETAPAS DEL PROCESO**

El proceso de producción de carbón activado depende tanto del uso que se le vaya a dar como del precursor del que se parte. El carbón activado a producir en este proyecto parte, como ya se ha definido, de los residuos madereros de pino pátula.

El proceso de producción del carbón activado en si, consta de una adecuación de materias primas, gasificación y activación física.

### **4.2.1 ADECUACIÓN DE MATERIA PRIMAS**

La etapa de adecuación de la materia prima consta de tres etapas: secado, trituración y clasificación, en donde se obtiene el material en condiciones y tamaño requeridas para el proceso.

**Trituración:** se realiza con el fin de obtener un tamaño de partícula acorde con la alimentación del gasificador, para evitar atascamientos en el equipo. Por otra parte, a partir de la etapa de trituración se puede definir el tamaño de partícula del carbón activado a producir.

**Clasificación:** la clasificación del material es necesaria para alimentar un tamaño uniforme de partícula al gasificador y además para garantizar la fluidización dentro del equipo gasificador.

**Secado:** El secado se hace con el fin de que la materia prima alimentada al gasificador tenga el contenido de humedad requerido por el proceso y se puedan dar las etapas de gasificación. El excedente de vapor generado a partir del gas energético producto de la gasificación, puede ser utilizado como servicio en esta etapa del proceso.

#### 4.2.2 TRANSFORMACIÓN DE LA MATERIA PRIMA

El proceso de transformación de la materia prima se realiza en un sola etapa, mediante la conversión termoquímica de la misma en el equipo gasificador. Aquí, se lleva a cabo la devolatilización de la materia orgánica y el desarrollo de porosidad de la materia prima.

En el gasificador, los residuos madereros se alimentan de forma continua por la parte inferior a través de una rosca sin fin, en la cual, su velocidad de giro es controlada por medio de un variador de frecuencia (VFD: *variator frequency driver*). Con base a esta velocidad, es conocida la descarga másica de la materia prima. El material particulado obtenido y el gas energético producido, salen por la parte superior del gasificador, donde un ciclón separa las partículas sólidas de la corriente gaseosa. Finalmente, un recipiente sellado herméticamente colecta el carbón producido.

**Gasificación:** La gasificación es el proceso de transformación termoquímica en el cual se convierte un combustible sólido en un combustible gaseoso, mediante la oxidación parcial a temperaturas comprendidas entre 700 y 850°C.

En la este proceso, bajo las condiciones adecuadas de operación (para el caso de la gasificación en lecho fluidizado: descargas másica de aire, materia prima y agente activante), la materia prima sufre una reorganización de los átomos de carbono, dando como resultado un residuo sólido carbonoso y un gas energético, compuesto principalmente de CO, CH<sub>4</sub> y H<sub>2</sub> como gases energéticos y CO<sub>2</sub>, N<sub>2</sub> y H<sub>2</sub>O.

Por otra parte, el gas energético es utilizado generalmente en cámaras de combustión para la obtención de calor (útil en diversas aplicaciones industriales), para la producción de vapor (para el caso, puede ser utilizado dentro del proceso como agente activante), y/o para la obtención de energía mecánica y/o eléctrica.

**Activación del sólido carbonoso:** Mediante la adición de un gas activante (generalmente vapor de agua o dióxido de carbono) al proceso de transformación termoquímica de la materia prima, y bajo las condiciones adecuadas de operación, se obtiene una matriz carbonosa cristalina con buenas características de área superficial y porosidad.

#### **4.2.3 APROVECHAMIENTO DEL GAS DE SINTESIS**

El gas de síntesis es un gas energético, por esta razón se puede aprovechar para suministrar energía y vapor de agua al proceso.

Una vez se separa el gas del sólido carbonoso, este se utiliza como combustible en una caldera para la producción de vapor de agua. Este vapor es alimentado al gasificador como agente activante según la cantidad requerida por el proceso.

Si se genera una cantidad superior de vapor a la requerida para la etapa de activación, éste podría ser utilizado en la etapa de secado de materia prima o para producir energía eléctrica en una turbina de vapor con el fin de suministrar energía a la planta.

#### **4.2.4 PREPARACIÓN Y EMPAQUE DEL PRODUCTO TERMINADO**

Las cenizas que se extraen del gasificador son clasificadas para determinar su granulometría y una muestra de cada lote es sometido a unas pruebas de laboratorio, como índice de yodo y densidad, para determinar sus propiedades específicas.

Una vez separado el carbón según su granulometría, este es empacado en bolsas de polipropileno de acuerdo a la cantidad solicitada por el cliente.

### **4.3 BALANCECES DE MASA Y ENERGIA PARA EL SISTEMA DE GASIFICACIÓN**

El balance de masa y energía para el sistema de gasificación, se realiza con base en la información encontrada en la literatura y a partir de análisis realizados a los residuos madereros y el gas combustible.

Este balance se hace para el sistema de transformación de materia prima, teniendo en cuenta que en esta etapa, ocurren las reacciones de gasificación y la obtención de los productos; sin embargo en las demás etapas del proceso se consideraran los flujos másicos de entradas y salidas, como se muestra en la Tabla de corrientes del diagrama de flujo del proceso (Tabla 4.15).

Para desarrollar estos balances es necesario conocer tanto la composición y propiedades de la biomasa como del gas de síntesis obtenido en el proceso.

**TABLA 4.1** Análisis elemental y propiedades físicas y químicas de la biomasa (residuos de pino pátula)

<b>Parámetro</b>	<b>Valor</b>
Análisis Elemental <sup>(1)</sup>	
Carbono (%)	48,7
Hidrógeno (%)	6,35
Oxígeno (%)	44,15
Nitrógeno (%)	0,25
Azufre (%)	0,05
Poder Calorífico <sup>(1)</sup> (MJ/kg)	18,93

(1) Base seca.

Fuente: Laboratorio de Carbones. Universidad Nacional de Colombia sede Medellín. Análisis elemental y de poder calorífico. Medellín: Grupo de Investigaciones Ambientales. Universidad Pontificia Bolivariana, 2005.



**TABLA 4.2** Composición estimada y compuestos energéticos del gas producto

<b>Gas Combustible</b>	<b>Composición Base Molar (%)</b>
CO	12,0
CH <sub>4</sub>	4,0
H <sub>2</sub>	3,0

Fuente: SANCHEZ G, Caio. Gasificação de biomasa. Brazil: UNICAMP. Faculdade de Engenharia Mecânica. Departamento de Engenharia Térmica e de Fluidos, 1997.

#### 4.3.1 BALANCES DE MASA

Para realizar los balances de masa es necesario conocer datos referentes a la composición química del gas combustible, dicha información se presenta en la Tabla 4.2, adicionalmente fue requerido la velocidad completa de fluidización de acuerdo a las características del equipo utilizado para los ensayos experimentales (Tabla 4.3), teniendo en cuenta que este equipo tiene una capacidad para procesar hasta 50kg/h de biomasa.

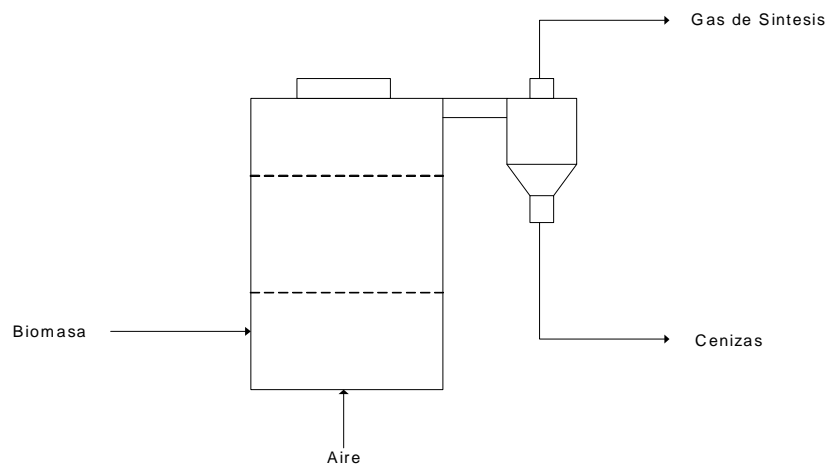
**TABLA 4.3** Información adicional del equipo

<b>PARÁMETRO</b>	<b>VALOR</b>
Velocidad de fluidización (m/s)	0,8
Diámetro del reactor (mm)	300

Fuente: Martinez A. Juan Daniel. Evaluación del rendimiento operacional de un gasificador para cascarilla de arroz en un reactor de lecho fluidizado a escala piloto. Medellín: upb, 2005. Tesis (ingeniero mecánico)

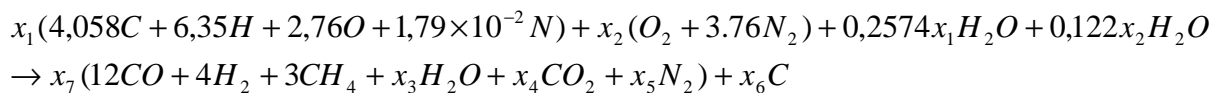
En una gasificación, además de los gases mencionados en la Tabla 3.2, también se tienen los gases típicos de una combustión normal ( $\text{CO}_2$ ,  $\text{H}_2\text{O}$ ,  $\text{N}_2$ , pocas cantidades de  $\text{O}_2$  y de alquitranes). Estos gases también son tenidos en cuenta en el balance de masa, sin embargo para simplificar los cálculos, se despreciara la cantidad de alquitranes.

El sistema de gasificación para los balances de materia se presenta en la Figura 4.1:



**FIGURA 4.1** Sistema de gasificación

Para realizar el balance de masa se parte de la reacción típica de gasificación



Ec (4.1)

**Moles de agua en los residuos de pino Pátula:** el contenido de humedad en base seca, de la biomasa esta definido por:

$$h_{(b-s)} = \frac{W_h - W_s}{W_s} = \frac{W_{agua}}{W_s} \quad Ec (4.2)$$

Donde:

$W_h$ : Masa de combustible húmedo.

$W_s$ : Masa de combustible seco.

$W_{\text{agua}}$ : Masa de agua.

De acuerdo con el cálculo de la composición molar de la biomasa, tomando una base de 100 gramos en base seca, presentado en la Tabla 4.1, la masa seca de biomasa en la reacción gasificación se define por la siguiente relación:

$$W_{(s)} = 100 \cdot x_1 \quad \text{Ec (4.3)}$$

La masa de agua contenida en la biomasa, se obtiene a partir de sustituir el valor de la humedad en base seca y despejar el peso del agua en la Ecuación 4.2

$$W_{(\text{agua})} = 4,63 \cdot x_1 \quad \text{Ec (4.4)}$$

En moles:

$$n_{(\text{agua})} = a = 0.2574 \cdot x_1 \quad \text{Ec (4.5)}$$

**Moles de agua en el aire:** a partir de la teoría básica de la psicrometría, se determina la relación de humedad absoluta y humedad relativa, en una mezcla vapor de agua – aire, a partir de las siguientes relaciones:

$$w = \frac{m_v}{m_a} \quad \text{Ec (4.6)}$$

$$f = \frac{P_v}{P_g} \quad \text{Ec (4.7)}$$

$$w = 0,622 \cdot f \cdot \frac{P_g}{P - f \cdot P_g} \quad \text{Ec (4.8)}$$

Donde:

$m_v$ : Masa de vapor de agua.

$m_a$ : Masa de aire seco.

$P_v$ : Presión parcial de vapor de agua.

$P_g$ : Presión de saturación a la temperatura de operación.

$P$ : Presión atmosférica.

Para el cálculo de la humedad absoluta, se requiere de los valores promedio de temperatura, presión atmosférica y humedad relativa de la ciudad de Medellín.

**TABLA 4.4** Propiedades psicrométricas del aire para la ciudad de Medellín

Propiedad	Valor	Unidad
Temperatura	27	°C
Presión de saturación (27 °C)	3567	kPa
Presión atmosférica	84900	kPa
Humedad relativa	60	%

Fuente: MARTINEZ, Juan Daniel.

Al remplazar los valores de la Tabla 4.4 en la Ecuación 3.8, se encuentra el valor de la humedad absoluta para estas condiciones.

$$w = 0,016 \frac{g_{agua}}{g_{aire-seco}} \quad Ec (4.9)$$

La composición del aire es de 21% de oxígeno y 79% de nitrógeno, en volumen, por lo tanto, por cada mol de Oxígeno intervienen 3,76 moles de Nitrógeno.

A partir de la reacción de gasificación (Ecuación 4.1), se determina la relación masa sobre aire seco, en función de los coeficientes de reacción.

$$m_a = 137,28 \cdot x_2 \quad Ec (4.10)$$

De acuerdo a la Ecuación 4.7, la humedad relativa de Medellín y la Ecuación 4.10, se obtiene la relación final para el cálculo de masa de agua en el aire, en función de los coeficientes de la reacción de gasificación.

$$m_v = 2,196 \cdot x_2 \quad Ec (4.11)$$

En moles:

$$n_v = b = 0,122 \cdot x_2 \quad Ec (4.12)$$

**Carbono en las cenizas:** este se refiere a la cantidad de biomasa que no alcanzo a transformarse en gas, para el presente proyecto se define que el 20% de la biomasa inicial son convertidos en cenizas y que además el 99% de estas cenizas es considerado carbono disponible para la activación

$$Carbono_{residual} = 99\% \Rightarrow 0,99 = \frac{m_{carbono\_residual}}{m_{cenizas}} \quad Ec (4.13)$$

$$Cenizas = 20\% \Rightarrow 0,2 = \frac{m_{cenizas}}{m_{biomasa(b,s)}} \quad Ec (4.14)$$

$$m_{carbono\_residual} = 0,198 \cdot m_{biomasa(b,s)} \quad Ec (4.15)$$

La sustitución de la Ecuación 4.5 en la Ecuación 4.15 permite obtener la masa de carbono residual:

$$m_{carbono\_residual} = 19,8 \cdot x_1 \quad Ec (4.16)$$

En moles:

$$n_{carbono\_residual} = 1,65 \cdot x_1 \quad Ec (4.17)$$

**Flujo molar de aire seco:** después de seleccionar la velocidad completa de fluidización (0,8 m/s), y con el diámetro del reactor (300 mm), Tabla 4.3, y la ecuación de continuidad, se determina la cantidad de aires seco alimentado:

$$\dot{m}_{aire(b,s)} = U_{f_{c.o}} \cdot A_T \cdot r_{aire(c.o)} \quad Ec (4.18)$$

Donde:

$\dot{m}_{aire(b,s)}$ : Flujo másico de aire seco (kg/s).

$\rho_{aire(c.o)}$ : Densidad del aire a condiciones de operación (kg/m<sup>3</sup>).

$A_T$ : Área transversal del reactor (m<sup>2</sup>).

$U_{f_{c.o}}$ : Velocidad de fluidización a condiciones de operación (m/s).

Las condiciones de gasificación en reactor de lecho fluidizado, en régimen burbujeante y atmosférico, son: 800 °C y 1 atmósfera, siguiendo la ecuación de gas ideal se puede hallar la densidad del aire.

$$r_{c.o} = \frac{P_{c.o}}{R_{aire} \cdot T_{c.o}} \quad Ec (4.19)$$

Donde:

$P_{c.o}$ : Presión a condiciones de operación (1 atm=101,325 kPa).

$T_{c.o}$ : Temperatura a condiciones de operación (800°C=1073,15 K).

$R_{aire}$ : Constante de gas para el aire (0,287 kJ/kg.K).

A partir de las Ecuaciones 4.18 y 4.19, se obtiene el flujo másico del aire:

$$\dot{m}_{aire(b,s)} = 0,0186 \frac{kg}{s} \quad Ec (4.20)$$

Con el peso molecular del aire (28,84 g/mol), se determina el flujo molar de aire seco para la gasificación.

$$\dot{n}_{aire(b,s)} = \frac{\dot{m}_{aire(b,s)}}{MW_{aire}} \quad Ec (4.21)$$

$$\dot{n}_{aire(b,s)} = 0,000645 \text{ kmol/s} \quad Ec (4.22)$$

**Coefficientes de reacción global de gasificación:** para cada elemento presente en la reacción de gasificación, se determina un balance molar, para hallar los coeficientes de la reacción.

$$x_1(4,058C + 6,35H + 2,76O + 1,79 \times 10^{-2}N) + x_2(O_2 + 3,76N_2) + 0,2574x_1H_2O + 0,122x_2H_2O \rightarrow x_7(12CO + 4H_2 + 3CH_4 + x_3H_2O + x_4CO_2 + x_5N_2) + x_6C \quad Ec (4.23)$$

Para el carbono:

$$4,058x_1 = 12x_7 + 3x_7 + x_4x_7 + x_6 \quad Ec (4.24)$$

Para el nitrógeno:

$$1,79 \times 10^{-2}x_1 + (3,76 \cdot 2)x_2 = 2x_5x_7 \quad Ec (4.25)$$

Para el oxígeno:

$$2,76x_1 + 2x_2 + 0,2574x_1 + 0,122x_2 = 12x_7 + x_3x_7 + 2x_4x_7 \quad Ec (4.26)$$

Para el hidrogeno

$$6,35x_1 + (0,2574 \cdot 2)x_1 + (0,122 \cdot 2)x_2 = (4 \cdot 2)x_7 + (3 \cdot 4)x_7 + 2x_3x_7 \quad Ec (4.27)$$

De la composición estimada del gas producto:

$$x_3 + x_4 + x_5 = 81 \quad Ec (4.28)$$

Del carbono residual en las cenizas se obtiene:

$$x_6 = 1,65x_1 \quad Ec (4.29)$$

Adicionalmente el coeficiente de reacción del aire  $x_2$  es la relación entre el flujo molar de aire seco que garantiza la velocidad de completa fluidización

seleccionada y las moles netas de aire que intervienen en el proceso de oxidación:

$$x_2 = \frac{\dot{n}_{aire(b,s)}}{4,76mol} \quad Ec (4.30)$$

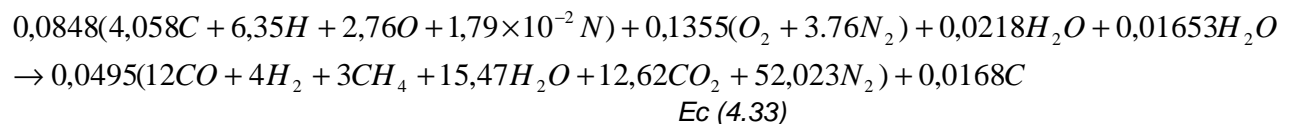
Remplazando la Ecuación 4.22 en la Ecuación 4.30 se obtiene:

$$x_2 = \frac{0,645 \text{ mol/s}}{4,76mol} = 0,1355s^{-1} \quad Ec (4.31)$$

Teniendo estas siete ecuaciones con siete incógnitas, se puede resolver el sistema y obtener los coeficientes de reacción;

$$\begin{aligned} x_1 &= 0,0848s^{-1} \\ x_2 &= 0,1355s^{-1} \\ x_3 &= 10,57s^{-1} \\ x_4 &= 6,88s^{-1} \\ x_5 &= 63,54s^{-1} \\ x_6 &= 0,0168s^{-1} \\ x_7 &= 0,0495s^{-1} \end{aligned} \quad Ec (4.32)$$

Teniendo los coeficientes, la reacción queda:



**Flujo de residuos de pino Pátula:** teniendo el valor de  $x_1$  y la Ecuación 4.3, se calcula el flujo másico de la biomasa. Para determinar este flujo en base húmeda, se suma el agua contenida en el material (Ecuación 4.4), al flujo seco.

$$\dot{m}_{biomasa(b,s)} = 30,528 \frac{kg}{h} \quad Ec (4.34)$$



$$\dot{m}_{biomasa(b,h)} = 30,92 \text{ kg/h} \quad Ec (4.35)$$

**Flujo de aire:** el flujo másico de aire húmedo se determina, sumando a la Ecuación 4.36, la cantidad de agua presente en el aire (Ecuación 4.10).

$$\dot{m}_{aire(b,s)} = 66,96 \text{ kg/h} \quad Ec (4.36)$$

$$\dot{m}_{aire(b,h)} = 67,26 \text{ kg/h} \quad Ec (4.37)$$

**Flujo de cenizas:** el flujo de cenizas se establece a partir del valor encontrado para  $x_1$  y la Ecuación 4.16.

$$\dot{m}_{cenizas} = 6,12 \text{ kg/h} \quad Ec (4.38)$$

A partir de la ecuación de flujo de carbón residual, se obtiene la descarga de carbón residual.

$$\dot{m}_{carbono-residual} = 6,045 \text{ kg/h} \quad Ec (4.39)$$

**Flujo del gas producto:** éste se determina a partir del balance de masa global, del sistema mostrado en la Figura 4.1.

Despejando el flujo másico del gas, del balance global, se tiene:

$$\dot{m}_{biomasa(b,h)} + \dot{m}_{aire(b,h)} = \dot{m}_{cenizas} + \dot{m}_{gas} \quad Ec (4.40)$$

Donde:

$\dot{m}_{biomasa(b,h)}$ : Flujo de biomas en base húmeda.

$\dot{m}_{aire(b,h)}$ : Flujo de aire en base húmeda.

$\dot{m}_{cenizas}$  : Flujo de cenizas.

$\dot{m}_{gas}$  : Flujo gas producto.

La Tabla 4.5 muestra las fracciones molares del gas producto, con sus respectivos pesos moleculares.

**TABLA 4.5** Fracciones y pesos moleculares de los componentes del gas producto.

<b>Gas</b>	<b>Fracciones Molares</b>	<b>Pesos moleculares (kg/kmol)</b>
CO	12	28
CH <sub>4</sub>	3	16
H <sub>2</sub>	4	2
CO <sub>2</sub>	10,57	44
H <sub>2</sub> O	6,88	18
N <sub>2</sub>	63,54	28

Remplazando los datos de la Tabla 4.5, en la Ecuación 4.41, se obtiene el peso molecular del gas:

$$\dot{m}_{gas} = 91,443 \frac{kg}{h} \quad Ec (4.41)$$

$$\overline{Mw}_{gas} = \sum (y_i \cdot Mw_i) \quad Ec (4.42)$$

$$\overline{Mw}_{gas} = 27,6 \frac{kg}{kmol} \quad Ec (4.43)$$

De acuerdo a las Ecuaciones 4.41 y 4.43 se determina el flujo molar del gas producto:

$$\dot{n}_{gas} = 3,31 \frac{kmol}{h} \quad Ec (4.44)$$

En la Tabla 4.6, se encuentran los flujos másicos teóricos para el sistema de gasificación de residuos de pino Pátula, encontrados, por medio de los balances de masa.

**TABLA 4.6** Flujos másico teóricos para el sistema de gasificación

Flujo	Símbolo	Valor (kg/h)
Residuos de pino en base húmeda	• $m_{biomas(b,h)}$	30,92
Aire en base húmeda	• $m_{aire(b,h)}$	67,26
Cenizas	• $m_{cenizas}$	6,12
Gas energético	• $m_{gas}$	91,443

Con base en los valores de los flujos de la Tabla 4.6, se estiman los valores de los flujos que corresponden a la capacidad de la planta, tomando como base la cantidad de biomasa alimentada, de acuerdo con las características del equipo y teniendo en cuenta la demanda estimada en el estudio de mercado.

En la Tabla 4.7 se encuentran los flujos másicos del sistema de gasificación, calculados con base en la demanda estimada en el Numeral 2.2.1, donde se planteó satisfacer inicialmente un 5% de la demanda, es decir una producción anual de 125 Toneladas de carbón activado, trabajando los 12 meses del año, 5 días a la semana y con un turno de 8 horas al día (lo que equivale a 65,104 kg/h).

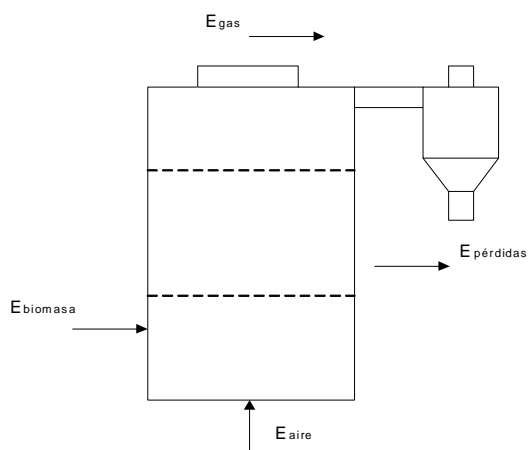
**TABLA 4.7** Flujos másicos calculados para la capacidad de la planta.

Flujo	Símbolo	Valor (kg/h)
Residuos de pino en base húmeda	• $m_{biomas(b,h)}$	326
Aire en base húmeda	• $m_{aire(b,h)}$	708,43
Cenizas	• $m_{cenizas}$	64,53
Gas energético	• $m_{gas}$	914.11

A partir de estos flujos se determinan las capacidades para la selección de los equipos involucrados dentro del proceso en el Capítulo 5.

#### 4.3.2 BALANCE DE ENERGÍA

En los balances de energía fueron considerados los flujos energéticos, del sistema de gasificación que se muestra en la Figura 4.2



**FIGURA 4.2** Flujos energéticos del sistema de gasificación

El balance de energía global en el sistema de gasificación es:

$$E_{biomasa} + E_{aire} = E_{pérdidas} + E_{gas} \quad Ec (4.45)$$

Donde:

$E_{biomasa}$  : Energía correspondiente a la biomasa.

$E_{aire}$  : Energía debida al aire de fluidización.

$E_{pérdidas}$  : Energía correspondiente a las pérdidas de calor.

$E_{gas}$  : Energía del gas producto de la gasificación.

**Energía correspondiente a los residuos de pino Pátula:** la energía que desprende la biomasa durante el proceso de gasificación, corresponde a la siguiente expresión:

$$E_{biomasa} = \dot{m}_{biomasa(b.s)} \times PCI_{biomasa} \quad Ec (4.46)$$

Al remplazar el flujo másico de la biomasa en base seca (Ecuación 4.34) y su poder calorífico (Tabla 4.1), en la Ecuación 4.46, se obtiene:

$$E_{biomasa} = 160,53kW \quad Ec (4.47)$$

**Energía correspondiente al aire de fluidización:** Considerando que el aire alimentado al sistema de gasificación, entra a la misma temperatura de referencia (25 °C), la energía debida al aire es cero.

$$E_{aire} = 0 \quad Ec (4.48)$$

**Energía del gas producto de la gasificación:** La energía del gas producto de la gasificación es la suma de la energía sensible del gas y la energía química o energía útil:

$$E_{gas} = (E_{química})_{gas} + (E_{sensible})_{gas} \quad Ec (4.49)$$

La energía química o útil del gas producto corresponde a la energía contenida en los gases combustibles (CO, CH<sub>4</sub> y H<sub>2</sub>), de la mezcla:

$$(E_{química})_{gas} = \dot{n}_{gas} \times PCI_{gas} \quad Ec (4.50)$$

Para cada componente se calcula el poder calorífico, como la diferencia entre la entalpía de los reactivos y la entalpía de los productos cuando se produce la combustión completa a una determinada temperatura y presión:

$$PCI = \sum_R n_i \left( \overset{\circ}{h}_f + \Delta \bar{h} \right)_i - \sum_P n_e \left( \overset{\circ}{h}_f + \Delta \bar{h} \right)_e \quad Ec (4.51)$$

Donde:

$\overset{\circ}{h}_f$ : Entalpía de formación de cada producto – reactivo.

$\Delta \bar{h}$ : Cambio de entalpía entre las temperaturas de referencia y de interés para cada producto – reactivo.

$n_i$ : Moles de los productivos.

$n_e$ : Moles de los reactivos.

Para una temperatura de gas producto de 25 °C, se obtiene a partir de la Ecuación 4.51:

$$PCI = \sum_R n_i \left( \overset{\circ}{h}_f \right)_i - \sum_P n_e \left( \overset{\circ}{h}_f \right)_e \quad Ec (4.52)$$

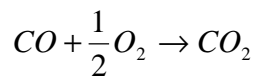
En la Tabla 4.8, se presentan las entalpías de formación para los componentes del gas producto.

**TABLA 4.8** Entalpías de formación para los componentes del gas producto.

Gas	Entalpías de Formación (kJ/kmol)
CO	-110.527
CO <sub>2</sub>	-393.525
H <sub>2</sub> O	-241.826
CH <sub>4</sub>	-74.873
O <sub>2</sub>	0
N <sub>2</sub>	0
H <sub>2</sub>	0

Fuente: VAN WYLEN Gordon J. Fundamentos de Termodinámica.  
Limusa Wiley. México. p 892. 2002

Para el Monóxido de Carbono (CO):

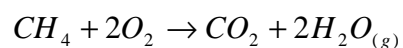


$$PCI_{CO} = \left[ n_{CO} \left( h_f^\circ \right)_{CO} + n_{O_2} \left( h_f^\circ \right)_{O_2} \right] - \left[ n_{CO_2} \left( h_f^\circ \right)_{CO_2} \right]$$

$$PCI_{CO} = \left[ 1 \cdot (-110.527) + \frac{1}{2} \cdot (0) \right] - \left[ 1 \cdot (-393.522) \right]$$

$$PCI_{CO} = 282.995 \frac{kJ}{kmol} \quad Ec (4.53)$$

Para el Metano (CH<sub>4</sub>):

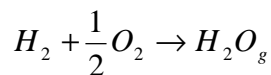


$$PCI_{CH_4} = \left[ n_{CH_4} \left( \overset{\circ}{h}_f \right)_{CH_4} + n_{O_2} \left( \overset{\circ}{h}_f \right)_{O_2} \right] - \left[ n_{CO_2} \left( \overset{\circ}{h}_f \right)_{CO_2} + n_{H_2O} \left( \overset{\circ}{h}_f \right)_{H_2O} \right]$$

$$PCI_{CH_4} = [1 \cdot (-74.873) + 2 \cdot (0)] - [1 \cdot (-393.522) + (-241.826)]$$

$$PCI_{CH_4} = 802.301 \frac{kJ}{kmol} \quad Ec (4.54)$$

Para el Hidrogeno (H<sub>2</sub>):



$$PCI_{H_2} = \left[ n_{H_2} \left( \overset{\circ}{h}_f \right)_{H_2} + n_{O_2} \left( \overset{\circ}{h}_f \right)_{O_2} \right] - \left[ n_{H_2O} \left( \overset{\circ}{h}_f \right)_{H_2O} \right]$$

$$PCI_{H_2} = \left[ 1 \cdot (0) + \frac{1}{2} \cdot (0) \right] - [1 \cdot (-241.826)]$$

$$PCI_{H_2} = 241.826 \frac{kJ}{kmol} \quad Ec (4.55)$$

Con el PCI para cada uno de los compuestos que reaccionan con el oxígeno, y con la fracción molar de cada componente del gas producto, se puede hallar el PCI del gas.

$$PCI_{gas} = \sum (y_i * PCI_i) \quad Ec (4.56)$$

$$PCI_{gas} = 282.995(\%CO) + 802.301(\%CH_4) + 241.826(\%H_2) \quad Ec (4.57)$$

Reemplazando las concentraciones de CO, CH<sub>4</sub> y H<sub>2</sub> de la Tabla 4.2, en la Ecuación 4.57, se obtiene:



$$PCI_{gas} = 67.701 \frac{kJ}{kmol} \quad Ec (4.58)$$

La energía química del gas se obtiene sustituyendo el flujo molar del gas de la Ecuación 4.44 y el poder calorífico de la Ecuación 4.58.

$$(E_{química})_{gas} = 62,25kW \quad Ec (4.59)$$

La energía sensible del gas generado incorpora la entalpía de cada componente del gas producto a la temperatura de salida del gas:

$$(E_{sensible})_{gas} = \dot{n}_{gas} * \sum (y_i \cdot h_i) \quad Ec (4.60)$$

Donde:

$h_i$  : Entalpía de cada gas combustible a la temperatura de operación del gasificador (800 °C) en kJ/kmol.

$y_i$  : Fracciones molares de los gases componentes del gas producto.

Asumiendo que cada compuesto de la mezcla se comporta como gas ideal:

$$Cp = \frac{dh}{dT} \quad Ec (4.61)$$

Donde:

$Cp$  : Calor específico a presión constante.

$dh$  : Cambio de entalpía.

$dT$  : Cambio de temperatura.

Al despejar  $dh$  de la Ecuación 4.61 e integrando desde una temperatura de referencia de 25 °C (298,15 °K) hasta 800 °C (1073,15 °K), se obtuvo la relación termodinámica para cada una de las entalpías de los gases componentes del gas producto (CO, CH<sub>4</sub>, H<sub>2</sub>, CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>O<sub>(g)</sub>, N<sub>2</sub>):

$$h_i = \int_{298,15}^{1073,15} C_{p_i} dT \quad \text{Ec (4.62)}$$

En la Tabla 4.9, se presentan las capacidades caloríficas en función de la temperatura para el cálculo de la entalpía de cada componente del gas.

**TABLA 4.9** Calor específico de cada componente del gas en función de la temperatura

Gas	Calor específico. ( $C_p$ ) (kJ/kmol. °K)
CO	27,63+0,005T
CH <sub>4</sub>	22,36+0,048T
H <sub>2</sub>	27,72+0,0034T
CO <sub>2</sub>	43,29+0,0115T-818.519,4T <sup>-2</sup>
H <sub>2</sub> O <sub>(g)</sub>	34,41+0,00063T+0,0000056T <sup>2</sup>
N <sub>2</sub>	27,21+0,0041T

Fuente: PERRY H. Robert. Biblioteca del Ingeniero Químico. Volumen 1. 2º ed.  
México: Mc Graw Hill. 1986.

Desarrollando la integral de la Ecuación 4.62, teniendo en cuenta las funciones para el calor específico de cada uno de los componentes del gas producto (Tabla 4.9), se obtienen las entalpías de los gases que conforman la mezcla, como se muestra en la Tabla 4.10.

**TABLA 4.10** Entalpías de los componentes del gas energético.

Gas	Entalpía (kJ/kmol)
CO	21.678,94
CH <sub>4</sub>	42.835,18
H <sub>2</sub>	23.289,69
CO <sub>2</sub>	37.678,004
H <sub>2</sub> O <sub>(g)</sub>	26.576,70
N <sub>2</sub>	23.266,40

Remplazando los valores de fracción molar (Tabla 4.5), entalpía (Tabla 4.10) y el flujo molar del gas, Ecuación 4.44, se obtiene la energía sensible del gas producto.

$$(E_{sensible})_{gas} = 22,99kW \quad Ec (4.63)$$

Teniendo la energía química y la energía sensible del gas, se puede hallar la energía del gas a partir de la Ecuación 4.49.

$$E_{gas} = 85,24kW \quad Ec (4.64)$$

**Pérdidas de energía:** la energía perdida en el proceso corresponde a la diferencia del balance energético teórico (Ecuación 4.45). Esta energía esta compuesta por el calor de pérdidas por paredes más la energía contenida en los residuos sólidos.

$$E_{pérdidas} = E_{pared} + E_{residuos} \quad Ec (4.65)$$

Remplazando la energía de la biomasa (Ecuación 4.47), del aire (Ecuación 4.48) y del gas (Ecuación 4.64), en la Ecuación 4.45, se obtienen las pérdidas de energía, para el sistema de gasificación.

$$E_{pérdidas} = 75,29kW \quad Ec (4.66)$$

La energía que sale con los residuos sólidos esta compuesta por la pérdida de energía en el carbono inquemado (carbono residual) y la perdida de energía en las cenizas.

$$E_{residuos} = E_{carbono-residual} + E_{cenizas} \quad Ec (4.67)$$

La energía perdida por carbono residual es la suma de la energía química del carbón inquemado y la energía sensible del mismo.

$$E_{carbono-residual} = \dot{m}_{carbono-residual} \cdot (PCI_{carbono} + h_{carbono}) \quad Ec (4.68)$$

Donde:

$\dot{m}_{\text{carbono-residual}}$  : Flujo másico de carbono residual en las cenizas.

$PCI_{\text{carbono}}$  : Poder calorífico inferior del carbono.

$h_{\text{carbono}}$  : Entalpía del carbono a 800 °C

Para determinar el poder calorífico inferior del carbono fue planteada la reacción de oxidación:



En la Tabla 4.11, se muestran las entalpías de formación para la obtención del poder calorífico inferior del carbono residual.

**TABLA 4.11** Entalpías de formación para la combustión de carbono.

<b>Compuesto – Elemento</b>	<b>Entalpía (kJ/kmol)</b>
CO <sub>2</sub>	-393.525
O <sub>2</sub>	0
C	0

Fuente: VAN WYLEN Gordon J. fundamentos de Termodinámica.  
Limusa Wiley. México. p 892. 2002.

Reemplazando los valores de la Tabla 4.11 en la Ecuación 4.52, y dividiendo por el peso molecular del carbono, se obtiene el PCI del carbono.

$$PCI_{\text{carbono}} = 32793,15 \text{ kJ / kg} \quad \text{Ec (4.70)}$$

La energía sensible del carbono residual se obtiene de manera análoga a la energía sensible del gas producto de la gasificación. La entalpía del carbono se determina con la diferencia entre el calor específico del CO<sub>2</sub> y la entalpía del O<sub>2</sub>, de acuerdo con los calores específicos en función de la temperatura.

$$h_{\text{carbono}} = 1000.789 \text{ kJ / kg} \quad \text{Ec (4.71)}$$

La energía del carbono residual se obtiene, reemplazando las Ecuaciones 4.39, 4.70 y 4.71 en la Ecuación 4.68.

$$E_{\text{carbono-residual}} = 56,746 \text{ kW} \quad \text{Ec (4.72)}$$

Por otra parte, la energía perdida en las cenizas fue calculada a partir de la siguiente ecuación [3]:

$$E_{\text{cenizas}} = (820 + 1,67 \cdot T_{\text{cenizas}}) \cdot \dot{m}_{\text{cenizas}} \quad \text{Ec (4.73)}$$

Donde:

$T_{\text{cenizas}}$  : Temperatura de las cenizas (°C)

$\dot{m}_{\text{cenizas}}$  : Flujo de cenizas (kg/s)

De la Ecuación 4.38 y asumiendo una temperatura de la cenizas igual a la temperatura de operación (800 °C), se obtiene la energía de las cenizas.

$$E_{\text{cenizas}} = 3,67 \text{ kW} \quad \text{Ec (4.74)}$$

Para obtener la energía de los residuos se sustituyen las Ecuaciones 4.72 y 4.74 en la Ecuación 4.67.

$$E_{\text{residuos}} = 60,416 \text{ kW} \quad \text{Ec (4.75)}$$

La energía perdida por la pared se calcula a partir de la Ecuación 4.65 y los valores de las Ecuaciones 4.66 y 4.75.

$$E_{\text{pared}} = 14,87 \text{ kW} \quad \text{Ec (4.76)}$$

En la Tabla 4.12, se resumen los flujos energéticos para el sistema de gasificación.

**TABLA 4.12** Flujos energéticos del sistema de gasificación

Flujo Energético		Valor (kW)	Porcentaje (%)
$E_{biomasa}$		160,53	100,00
$E_{aire}$		0	0,00
$E_{gas}$	$E_{química}$	62,25	38,78
	$E_{sensible}$	22,99	14,32
	$E_{total}$	85,24	53,10
$E_{pérdidas}$	$E_{residuos}$	60,42	37,64
	$E_{pared}$	14,87	9,26
	$E_{total}$	75,29	46,90

Con los valores de los flujos energéticos presentados en la Tabla 4.12, se puede calcular la eficiencia del equipo en frío y en caliente.

**Eficiencia en frío:**

$$h_{frío} = \frac{E_{química}}{E_{biomasa}} \times 100 \quad Ec (4.77)$$

$$h_{frío} = 38,78\% \quad Ec (4.78)$$

**Eficiencia en caliente:**

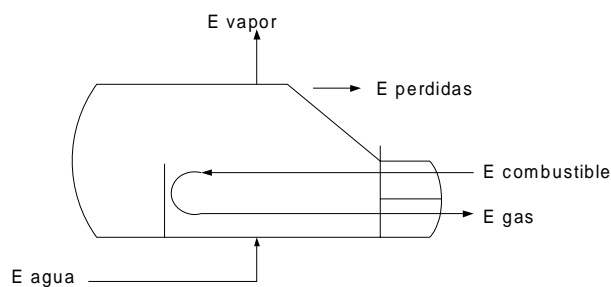
$$h_{caliente} = \frac{E_{química} + E_{sensible}}{E_{biomasa}} \times 100 \quad Ec (4.79)$$

$$h_{caliente} = 53,10\% \quad Ec (4.80)$$

### 4.3.3 BALANCES DE MATERIA Y ENERGÍA EN LA CALDERA

Para la generación de vapor en la caldera se utiliza como combustible el gas energético generado en el proceso de gasificación; para cuantificar la cantidad de vapor que puede generar este gas, se realizó un balance de energía para el sistema de generación de vapor (caldera).

La Figura 4.3 muestra el balance de energía para este sistema.



**FIGURA 4.3** Sistema generador de vapor.

$$E_{Combustible} = E_{vapor} + E_{perdidas} \quad Ec(4.81)$$

Donde:

$E_{Combustible}$  : Energía química útil del gas energético.

$E_{vapor}$  : Energía del vapor.

$E_{perdidas}$  : Pérdidas de energía en el sistema.

La energía del combustible es la energía útil del gas generado durante el proceso de gasificación, y se determina mediante la siguiente ecuación:

$$E_{Combustible} = \dot{n}_{gas} * PCI_{gas} \quad Ec(4.82)$$

La energía química del gas energético se encuentra con el flujo molar de gas para la capacidad de la planta y el poder calorífico inferior del gas (Ecuación 4.58)

El flujo molar del gas se halla con el flujo másico de gas para la capacidad de la planta (Tabla 4.8) y el peso molecular del mismo (Ecuación 4.43).

Por lo tanto, para:

$$\dot{n}_{gas} = 33,1199 \text{ kmol/h}$$

$$E_{Combustible} = 622,85 \text{ kW} \quad \text{Ec(4.83)}$$

Asumiendo, para efectos de cálculos, que las pérdidas de energía equivalen a un 20% de la energía del combustible, la Ecuación 4.81 queda:

$$0,8 * E_{Combustible} = E_{vapor}$$

$$E_{vapor} = 498,28 \text{ kW} \quad \text{Ec(4.84)}$$

Teniendo la energía del vapor, se puede determinar la cantidad de vapor que se puede generar con dicha energía.

$$E_{vapor} = \dot{m}_{vapor} * h_{fg(120^\circ C)} \quad \text{Ec(4.85)}$$

Donde:

$\dot{m}_{agua}$  : Flujo másico de agua

$h_{fg(120^\circ C)}$  : Entalpía de vaporización del agua a 120 °C y 1,97 atmósferas.

**TABLA 4.13** Entalpía de vaporización del agua a 120 °C y 1,97 atmósferas

Compuesto	Entalpía de vaporización $h_{fg}$ (kJ/kg)
H <sub>2</sub> O	2201,9

Fuente: CENGEL, Yunus A. BOLES, Michael A. Termodinamica. 2<sup>da</sup> ed. Tomo 1. McGRAW-HILL. Mexico. 2000.



Reemplazando los valores de la Ecuación 4.84 y la Tabla 4.13 en la Ecuación 4.85, se tiene el flujo másico de vapor.

$$\dot{m}_{vapor} = 814,664 \frac{kg}{h} \quad Ec(4.86)$$

Esta cantidad de vapor esta disponible para ser utilizado como agente activante dentro del proceso activación del sólido carbonoso y para la producción de energía para abastecer el consumo de la planta.

#### **4.4 VARIABLES DEL PROCESO**

En el proceso de transformación térmica de los residuos madereros en un reactor gasificador de lecho fluidizado intervienen diferentes variables, que determinan la transformación de las materias primas en los productos deseados.

En la gasificación la importancia de las variables radica en que se de una buena fluidización durante el proceso, que permita que la conversión a sólido carbonoso dentro del reactor sea de manera uniforme para todas las partículas [3].

Algunas variables se pueden definir de manera preliminar, con los valores encontrados en los balances de masa y energía. Las variables a tener en cuenta son:

**Velocidad mínima de fluidización:** Es la velocidad del fluido, a partir de la cual, las partículas se separan unas de otras y son mantenidas individualmente en suspensión [14]. Esta velocidad se puede determinar a partir de varias correlaciones como la de Kunii y Levenspiel. Para el presente proyecto esta velocidad se selecciono con base en un estudio realizado para diferentes tipos

de biomasa, la velocidad mínima de fluidización recomendada por PALACIO, es de 0,22m/s a 25 °C y 1 atmósfera.

Al corregir esta velocidad a las condiciones de operación se tiene:

$$P_1 \cdot V_1 \cdot T_2 = P_2 \cdot V_2 \cdot T_1 \quad Ec (4.87)$$

Donde:

$P_1$ : Presión a las condiciones de operación 1

$V_1$ : Velocidad de fluidización 1

$T_1$ : Temperatura a las condiciones de operación 1

$P_2$ : Presión a las condiciones de operación del gasificador.

$V_2$ : Velocidad de fluidización a las condiciones del gasificador.

$T_2$ : Temperatura a las condiciones de gasificación.

Teniendo en cuenta que las presiones de operación en los dos casos son las mismas (1 atmósfera), la velocidad de fluidización corregida es:

$$V_2 = 0,8m/s \quad Ec (4.88)$$

**El factor de aire:** El factor de aire ( $F.A$ ) del proceso de gasificación es uno de los parámetros adimensionales para el ajuste de las condiciones de operación. El factor de aire define la proporción de biomasa quemada (combustión completa), con la relación a la cantidad gasificada (oxidación parcial y/o reducción) [3]

El factor de aire se define como se muestra en la Ecuación 4.89.

$$F.A = \frac{\left( R_{A/B} \right)_{real}}{\left( R_{A/B} \right)_{estequiometrica}} \quad Ec (4.89)$$

Donde:

$\left( R_{A/B} \right)_{estequiometrica}$  : Relación Aire - Combustible (biomasa) estequiométrica

$\left( R_{A/B} \right)_{real}$  : Relación Aire – Combustible (biomasa) real

La relación aire – combustible estequiométrica se define por la siguiente ecuación:

$$\left( R_{A/B} \right)_{estequiometrica} = 0.0889 * \%C + 0.265 * \%H - 0.033 * \%O \quad Ec (4.90)$$

Los porcentajes de cada uno de los elementos se encuentran en la Tabla 4.1, análisis elemental de los residuos de pino pátula y bajo condiciones normales de temperatura y presión (0 °C y 1 atm), se calcula esta relación.

$$\left( R_{A/B} \right)_{estequiometrica} = 4,688 \text{ Nm}^3 / \text{kg}_{biomasa} \quad Ec (4.91)$$

La relación aire – combustible real se define como:

$$\left( R_{A/B} \right)_{real} = \frac{\dot{V}_{aire(c.n)}}{\dot{m}_{biomasa(b.s)}} \quad Ec (4.92)$$

Donde:

$\dot{V}_{aire(c.n)}$  : Flujo volumétrico de aire a condiciones normales de temperatura y presión.

$\dot{m}_{biomasa(b.s)}$  : Flujo másico de biomasa (residuos de pino Pátula), en base seca.

El flujo volumétrico de aire se puede determinar, a partir de la velocidad de fluidización seleccionada (0,8 m/s), a las condiciones de operación del proceso

de gasificación (800 °C y 1 atm) y teniendo el área transversal del reactor a utilizar (diámetro interno 300 mm).

$$\dot{V}_{aire(c.n)} = Uf_{c.o} * A_T * \left( \frac{T_{c.n}}{T_{c.o}} \right) \quad Ec (4.93)$$

Donde:

$Uf_{c.o}$  : Velocidad de fluidización a condiciones de operación

$A_T$  : Área transversal del reactor

$T_{c.n}$  : Temperatura del aire a condiciones normales (273 °K)

$T_{c.o}$  : Temperatura del aire a condiciones de operación.

$$\dot{V}_{aire(c.n)} = 0,0144 Nm^3/s \quad Ec (4.94)$$

Teniendo este flujo se puede hallar la relación aire - combustible real, con el flujo másico de biomasa (Ecuación 4.34).

$$\left( R_{A/B} \right)_{real} = 1,698 Nm^3_{aire} / kg_{biomasa} \quad Ec (4.95)$$

Teniendo las dos relaciones, reemplazando en la Ecuación 4.87, se puede determinar el factor de aire.

$$F.A = 0,3622 \quad Ec (4.96)$$

Para garantizar una gasificación, el factor de aire debe ser menor a 1, de lo contrario, se esta dando es una combustión normal, donde no se generan gases limpios aprovechables energéticamente [3].

**Temperatura:** la temperatura en la zona de reacción, esta condicionada principalmente por la composición elemental de la biomasa a gasificar y los productos que se deseen obtener.

De acuerdo con GARCIA- GARCIA y SIMÓN, la temperatura de reacción recomendada en una gasificación de residuos de pino, para la obtención de carbón activado es de 800 °C

**Tiempo de residencia:** Determina el grado de conversión de la biomasa, para que se de una buena conversión, éste debe ser mayor al tiempo que tarda el sistema en alcanzar la temperatura de reacción y estabilizarse.

Éste tiempo incluyendo la activación del carbón, que se hace dentro del gasificador, oscila entre 1 y 4 horas, en estudios previos [4], para el mismo proceso, en condiciones similares.

**Flujo de agente activante:** el flujo de agente activante, determina el grado de activación de las cenizas obtenidas en el proceso de gasificación, dependiendo del tiempo que se encuentre en contacto con el sólido, además, el tipo de agente que se use también va a determinar el área superficial del carbón obtenido. Este flujo se define, de acuerdo con la relación agente activante/biomasa, empleada por GARCÍA-GARCÍA, como se muestra en la Ecuación 4.97.

$$\frac{\text{Agente}_- \text{Activante}}{\text{Biomasa}} = 0,24 \quad \text{Ec (4.97)}$$

De acuerdo con los balances de masa, teniendo el flujo de biomasa en base seca (Ecuación 4.34), se puede calcular el flujo de agente activante.

$$\dot{\text{Agente}}_- \dot{\text{Activante}} = 7,327 \text{kg} / \text{h} \quad \text{Ec (4.98)}$$

Para el proceso productivo, el flujo de agente activante se calcula a partir del flujo másico de biomasa en base seca, que es el 98,7% del flujo másico de biomasa en base húmeda reportado en la Tabla 4.7.

$$\dot{\text{Agente}}_- \dot{\text{Activante}} = 77,248 \text{kg} / \text{h} \quad \text{Ec (4.99)}$$

De acuerdo con lo determinado en el balance para el sistema de generación de vapor (caldera), con el gas energético producto de la gasificación se puede producir una cantidad de vapor de 814,66 kg/h (Ecuación 4.86) y teniendo en cuenta que el flujo de vapor necesario en el proceso como agente activante es de 77,248 kg/h (Ecuación 4.99), existe un excedente de vapor de 737,412 kg/h, que puede ser utilizado en la generación de energía para el suministro de la planta.

### ***Aprovechamiento del gas de síntesis en la caldera***

Como se menciono anteriormente el gas energético producto de la gasificación puede emplearse como combustible en una caldera, para la generación de vapor, al aprovechar este gas como sustituto de un combustible fósil, diesel para este caso (combustible de la caldera), se esta dejando de emitir una cantidad de CO<sub>2</sub> a la atmósfera. Para saber cuanto dinero puede generarse al reducir estas emisiones, se determina la cantidad de diesel que seria necesaria para producir la misma cantidad de energía que produce la biomasa (Ecuación 3.83) y así tomando los factores de la Tabla 4.14, se pueden cuantificar los ingresos por disminución de emisiones de CO<sub>2</sub>.

**TABLA 4.14** Factores de emisión para combustibles

<b>Combustible</b>	<b>MJ/kg</b>	<b>kWh / kgComb</b>	<b>Ton CO<sub>2</sub> / Ton Comb</b>	<b>Densidad (kg/m<sup>3</sup>)</b>
<b>Carbón</b>	28,10	7,81	2,30	
<b>Metano</b>	50,60	14,06	2,78	0,667*
<b>Diesel</b>	42,80	11,89	3,15	829,00
<b>Biogás</b>				1,23

Fuente: CADAVID, Carlos. Centro Nacional de Producción Mas Limpia. 2006

La energía del gas equivale a 5'381.424. kW/año (Ecuación 3.83). Asumiendo que el combustible que se sustituye en el proceso de generación de vapor es Diesel, se determina la cantidad de este combustible necesaria para producir esta energía, de acuerdo con los valores de la Tabla 4.14 (11,89 kWh/kg).

$$Cantidad\_Diesel = 453 \frac{Ton\_Diesel}{año} \quad Ec (4.100)$$

A partir de la Tabla 4.14, cuando se hace combustión, 1 tonelada de Diesel emite 3,15 toneladas de CO<sub>2</sub>, por lo tanto para la cantidad de diesel sustituido en el proceso, se calculan las emisiones de CO<sub>2</sub>/ año.

$$EmisionesCO_2 = 1427 \frac{TonCO_2}{año} \quad Ec (4.101)$$

Teniendo en cuenta que la tonelada de CO<sub>2</sub> que se deje de emitir, tiene un valor de 8 euros en el mercado internacional [15] y haciendo la conversión a pesos Colombianos, se obtiene el valor de los ingresos que pueden generarse al reducir estas emisiones.

$$Ingresos = \$34'246.800 /año \quad Ec (4.102)$$

## **4.5 PRUEBAS EXPERIMENTALES**

Con los ensayos experimentales se pretende probar la factibilidad técnica de producir carbón activado a partir de la materia prima y el proceso propuesto.

### **4.5.1 MATERIALES**

Para la realización de los ensayos experimentales se utilizaron residuos de pino pátula generados en el aserrío Maderas La Finca. Se utilizó aserrín, con el fin de reducir las etapas de preparación, y por mayor facilidad, ya que este tipo de residuo maderable cuenta con tamaño de partícula aproximado al necesario en el proceso experimental, que es aproximadamente de 1 a 2mm.

Como agente activante se utilizó CO<sub>2</sub> comercial, debido a la falta de disponibilidad de vapor de agua, agente activante definido en el proceso.

#### **4.5.2 EQUIPOS EMPLEADOS Y METODOLOGÍA**

La metodología seguida en los ensayos experimentales esta muy relacionado con el proceso explicado en el Numeral 4.2, .Los equipos utilizados, al igual que la materia prima, son también, aproximados a los requeridos en el proceso.

Para la adecuación de la materia prima se utilizó los equipos de los laboratorios de la universidad EAFIT, mientras que la etapa de transformación y activación de los residuos de pino pátula se llevo a cabo en el gasificador de lecho fluidizado, que se describe en el Numeral 4.5.2.2.

A Continuación se describe el procedimiento realizado en cada una de las etapas del proceso, para los ensayos experimentales.

##### **Clasificación**

Para la clasificación del aserrín se utilizo una zaranda con malla de aluminio con perforaciones de 2 mm y marco de madera reforzado con lámina de hierro galvanizado, como se muestra en la siguiente ilustración, con el fin de eliminar el material con tamaño de partícula superior.

La variable de mayor relevancia en esta etapa del proceso es conseguir el tamaño de partícula adecuado para la alimentación al gasificador, pues este es uno de los factores más importantes para que se dé la fluidización en el gasificador, además la alimentación al gasificador se hace por medio de un tornillo sin fin, por lo tanto debe tenerse en cuenta que si el tamaño de partícula es superior a la holgura existente entre la hélice del tornillo y la tubería, no se dará una alimentación adecuada, ocasionando obstrucciones.

*Tamaño de partícula:* El tamaño de partícula seleccionado para la realización de las pruebas experimentales es de 1 a 2 mm. Estos valores se definen de acuerdo con lo recomendado por diferentes autores como García -García y Simón M, para la gasificación de residuos de pino, en un reactor de lecho fluidizado y un reactor de lecho fijo, respectivamente. Además teniendo en



cuenta los requerimientos para la alimentación al equipo, este es un tamaño que se ajusta a las necesidades y que no va a tener problemas para que se dé una correcta fluidización.



**FIGURA 4.4** Zaranda utilizada para la separación del aserrín.

### **Transformación de la materia prima**

El equipo a utilizar en la realización de los ensayos experimentales, se encuentra en la empresa PREMAC S.A., dedicada a la producción de hornos industriales, ubicada en el municipio de Sabaneta Antioquia. Este equipo a escala piloto, fue desarrollado por el Grupo de Investigaciones Ambientales (GIA) de la Universidad Pontificia Bolivariana (UPB), consiste en un gasificador con cámara de reacción en lecho fluidizado para operación en régimen burbujeante y atmosférico, que utiliza aire como agente reactivo a fin de producir gas combustible de bajo poder calorífico a partir de residuos de Pino Pátula.

### ***Descripción del equipo***

El gasificador se encuentra compuesto por varios subsistemas: reactor, precalentador, alimentador de combustible, separador de cenizas, eliminador de gases combustibles, muestreador de gas producto, registrador de datos de proceso, alimentador de aire de fluidización – gasificación y chasis. A continuación se dará una breve descripción de cada uno de los subsistemas, para facilitar el posterior entendimiento del proceso.

- **Subsistema Reactor**

Es el subsistema donde se dan las reacciones químicas que convierten los residuos de Pino Patula en Carbón Activado y gas de síntesis, o gas combustible, esta compuesto por lo módulos de reacción, por la placa distribuidora de aire para la fluidización y la gasificación, así como, la cámara amortiguadora de velocidad.

- **Subsistema precalentador del Lecho Fluidizado**

Este subsistema se encarga de calentar el material inerte, arena en este caso, residente en los módulos de reacción a la temperatura necesaria para promover la auto-ignición de los residuos de madera antes de la gasificación.

Para el precalentamiento se utiliza gas natural como combustible, en el quemador industrial acoplado a la cámara amortiguadora de velocidad. La arena es calentada por los gases que salen del quemador y pasan a través de ésta, llevándola hasta una temperatura aproximada de 450 °C [3], cuando se alcanza esta temperatura, el quemador deja de operar, para continuar con la adecuación de las condiciones de alimentación de residuos de Pino Pátula y aire.

- **Subsistema Alimentador de Combustible**

Suministra los residuos de pino Pátula a la cámara de reacción del gasificador a una tasa de descarga continua. Lo componen un silo de almacenamiento, un tornillo dosificador, un tornillo alimentador, un motorreductor, un sistema de refrigeración para la rosca alimentadora y un variador de frecuencia con el que se controla la velocidad del motorreductor y posteriormente la rata de alimentación de residuos de Pino Pátula.

- **Subsistema Separador y Colector de material Particulado**

A medida que se produce el gas energético es necesario realizarle una limpieza para retirar el material particulado que puede ser arrastrado a la salida del reactor por la fluidización, para esto se utiliza un ciclón de alta eficiencia, que se encuentra localizado a la salida del modulo superior de reacción y su objetivo es la captura de cenizas y posibles in quemados elutriados del reactor.

La recolección de los sólidos separados se hace en un tambor hermético que se encuentra en la parte inferior del ciclón.

- **Subsistema Eliminador de Gas Combustible**

Aunque el objetivo del equipo gasificador es aprovechar el gas energético, éste también cuenta con un quemador atmosférico con alimentación de gas natural posicionado en la boca de la chimenea, el cual tiene la función de transformar el gas combustible ( $H_2$ ,  $CH_4$ ,  $CO$  e hidrocarburos pesados en forma de alquitranses,  $C_xH_y$ ), en los productos típicos de una combustión ( $CO_2$ ,  $H_2O$ ,  $N_2$ ), con el fin de no ocasionar un impacto mayor en el ambiente.

- **Subsistema Muestreador de Gas Combustible**

Para la evaluación y posterior análisis del gas combustible en el cromatógrafo, el subsistema muestreador se encarga de la adecuación y colección del gas, utilizando bolsas *Tedlar*<sup>®</sup> de 1 litro de capacidad, acopladas a una sonda de muestreo y a una bomba de vacío, la cual no permite un contacto directo con el gas. [3]

- **Subsistema Registrador de Temperatura de Proceso**

La temperatura por ser una de las variables más importantes del proceso, debe ser controlada durante las etapas de precalentamiento, calentamiento y gasificación, para esto el equipo tiene medidores de temperatura localizados en diferentes puntos estratégicos, que permiten llevar un control y análisis de las condiciones de operación en tiempo real, durante los ensayos.

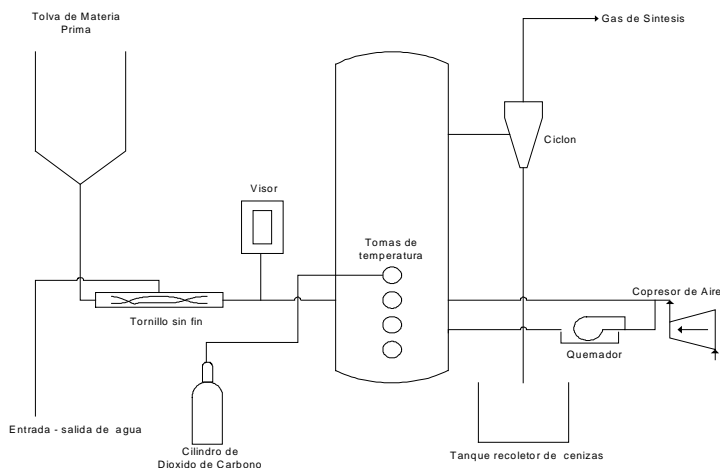
- **Subsistema Alimentador del Aire de Fluidización y Gasificación**

Para conseguir un lecho fluidizado es necesario mantener en suspensión las partículas sólidas alimentadas al reactor, debido a la fuerza ascendente del agente gasificante que se incluya en el sistema, en este caso aire atmosférico se utiliza para esta finalidad. Para controlar y medir caudal de aire se tiene una placa de orificio.

- **Subsistema Chasis**

Es la estructura soporte del equipo de gasificación

En la Figura 4.5 se presenta un esquema del montaje realizado para los ensayos experimentales.



**FIGURA 4.5** Esquema de gasificador utilizado para las pruebas experimentales

### 4.5.3 CONDICIONES DE OPERACIÓN

Las condiciones de operación de los ensayos experimentales, reportadas en la Tabla 4.15, se definen teniendo en cuenta los estudios mencionados en el Capítulo 1; y de acuerdo a las especificaciones del equipo gasificador.

**TABLA 4.15** Variables y relaciones de operación

VARIABLES DE ENTRADA	
<b>ENSAYOS</b>	<b>1</b>
Velocidad de fluidización a 800°C – aprox (m/s)	0,8
Factor de Aire	0,36
Flujo de aire (kg/h)	66,956
Flujo de M (kh/h)	31,59
Flujo de CO <sub>2</sub> (L/min)	20,75
RELACIONES	
M/Aire	0,472
M/CO <sub>2</sub>	1,58
Aire/CO <sub>2</sub>	3,348
CO <sub>2</sub> /M	0,24

La entrada del agente activante, fue posicionada en la toma superior de temperatura del modulo inferior de reacción, buscando el mayor contacto posible con la materia prima. La Figura 4.5, muestra la conexión realizada.

#### **4.5.4 RESULTADOS OBTENIDOS Y RECOMENDACIONES**

Para los análisis experimentales no se realizo un secado previo de la materia prima. El contenido de humedad de esta fue de 80% base seca.

Una vez alcanzada la temperatura teórica de ignición de la materia prima (estimada en 450 °C para biomasa seca), se alimentó residuos de pino Pátula al sistema gasificador a condiciones de combustión, con el fin de aumentar la temperatura de la cámara de reacción al valor estimado donde ocurre la transformación (800 °C aproximadamente). No obstante, fue evidenciado un descenso de la temperatura de reacción, debido al contenido de humedad presente en el residuo, que desfavoreció la reacción de combustión. El perfil de temperaturas del reactor, se muestra en el **Anexo X**.

De acuerdo a lo anterior y a datos encontrados en la revisión bibliográfica, se determinó que la humedad apropiada de la biomasa para su conversión termoquímica y producción del carbón activado, debe ser como máximo del 30%.

La gasificación de materiales biomásicos puede entenderse como un todo exotérmico; sin embargo, bajo las condiciones de humedad anteriormente mencionadas (80% base seca), el proceso sería endotérmico; es decir necesitaría calor adicional para llevarse a cabo.

No obstante, es importante mencionar que un alto contenido de agua en la materia prima, favorecería la producción de metano e hidrógeno, con lo que se alcanzaría un mayor poder calorífico en el gas producido. Con base a lo anterior, se plantea la necesidad de iniciar investigaciones en relación al contenido óptimo de humedad de la materia prima, de tal modo que se alcance un equilibrio térmico en las reacciones de gasificación involucradas en el proceso y un alto contenido energético en el gas producido.

Finalmente, en las pruebas experimentales no se obtuvo carbón activado, debido a los problemas mencionados anteriormente; por lo tanto no se pudo realizar las pruebas de laboratorio definidas. La literatura y experimentos realizados en otras instituciones comprueban la factibilidad de realizar carbón activado a partir de residuos de madera tal y como se mencionó en el Capítulo 1.

## **4.6 DIAGRAMAS DEL PROCESO**

Por medio de los diagramas del proceso se hace una síntesis de éste, además se ilustran los equipos requeridos y las diferentes etapas del proceso.

### **4.6.1 DIAGRAMA DE BLOQUES**

El diagrama de bloques ilustra de una manera sencilla las etapas del proceso.  
Figura 4.5

### **4.6.2 DIAGRAMA DE FLUJO**

El diagrama de flujo se compone de la descripción del proceso, el diagrama del proceso y las tablas de corrientes y de equipos.

En el diagrama de flujo se conoce el proceso de una forma mas especifica, en este se ilustran los equipos, corrientes y condiciones del proceso.

Figura 4.6

### **Descripción del Proceso**

El proceso de producción de carbón activado, mostrado en la Figura 4.6, produce 25Toneladas de carbón.

Los residuos de pino pátula, son triturados, TM-101 y posteriormente, Corriente 1, clasificados, SC-101, para sacar las partículas mayores a 2mm de diámetro, las partículas con tamaño optimo, Corriente 2 son alimentadas al gasificador de lecho fluidizado, GS-101, el cual es alimentado de aire, Corriente 9, comprimido, P-101, en el GS-101 se elimina el agua que contiene los residuos, aproximadamente 80%; posteriormente se incineran a 300°C y por ultimo se lleva la gasificación a 800°C, en este momento se alimenta el vapor de agua, Corriente 10, para producir la activación de las cenizas.

Una vez se termina el proceso de transformación de la materia prima en el GS-101, los productos son enviados a un ciclón, S-101, donde se separan las cenizas, Corriente 4, de los gases, Corriente 5. Las cenizas, carbón activado, son clasificadas por tamaño en un tamiz, SC-102, y empacadas para la venta. Los gases, Corriente 5, se alimentan a la caldera, CV-101, como combustible, en donde se produce vapor de agua que es alimentado el proceso, Corriente 8.

El agua Demi es alimentada al CV-101 para la producción de vapor.

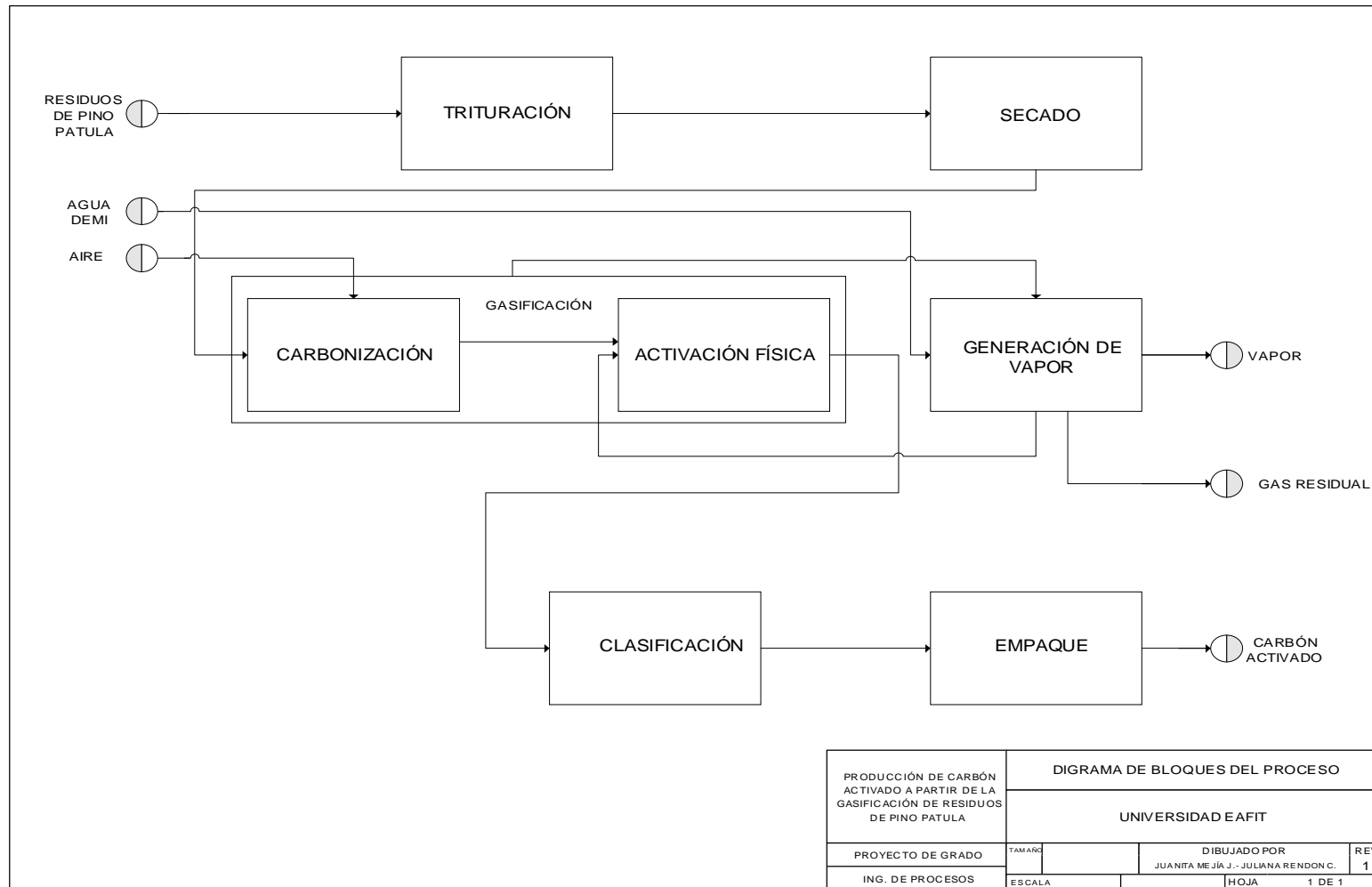


FIGURA 4.6 Diagrama de bloques



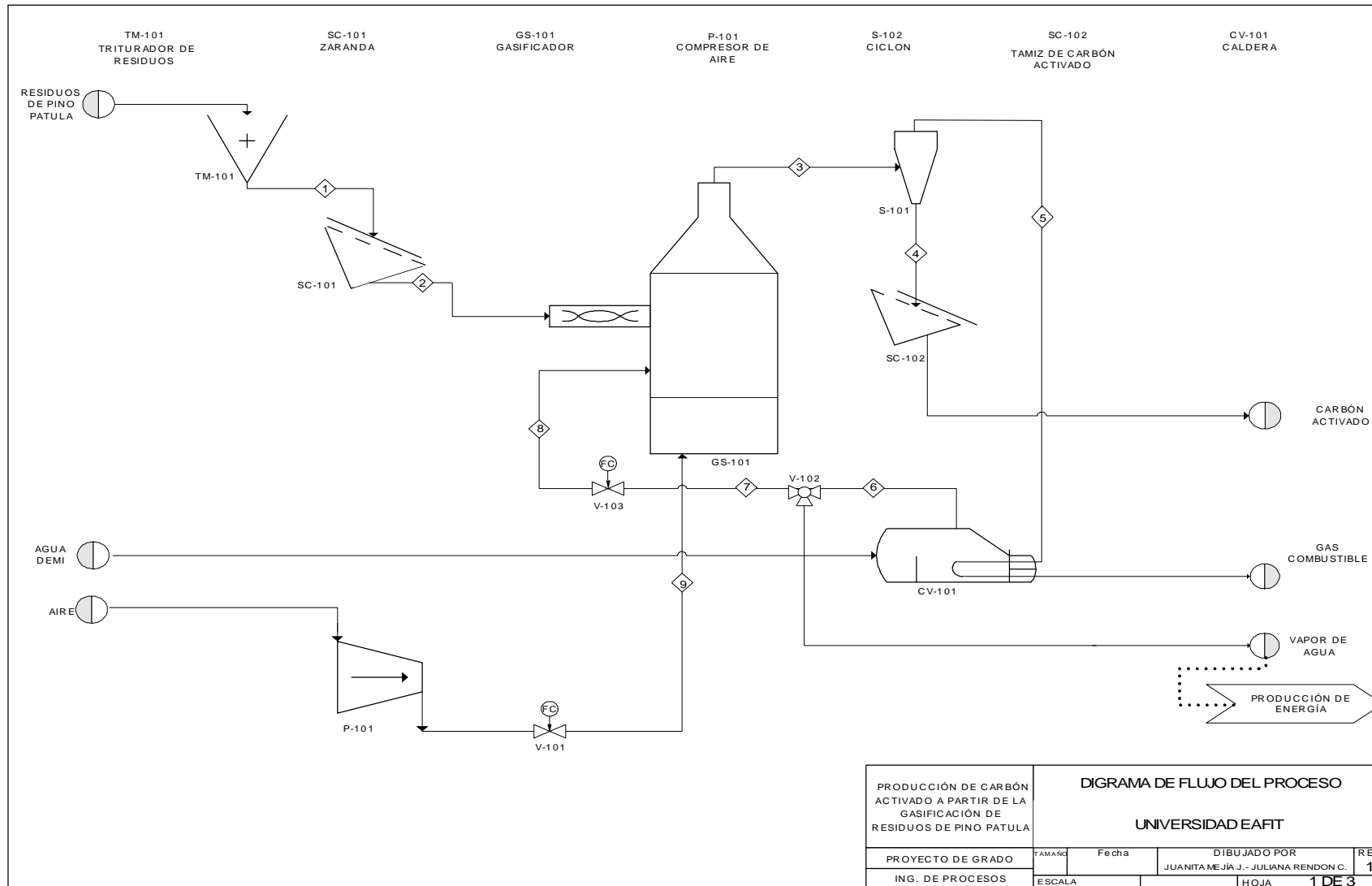


FIGURA 4.7 Diagrama de flujo

**TABLA 4.16** Tabla de Corrientes

<b>CORRIENTE No.</b>	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>4</b>	<b>5</b>	<b>6</b>	<b>7</b>	<b>8</b>	<b>9</b>
<b>Temperatura (°C)</b>	30	30	795	550	400	120	120	120	40
<b>Presión (bar)</b>	14,69	14,69	14,69	14,69	14,69	14,69	14,69	14,69	6
<b>Fracción de vapor</b>	0	0	0	0	0	1	1	1	0
<b>Flujo másico (kg/h)</b>	362,2	325,98	978,64	64,53	914,11	78,24	78,24	78,24	708,43
<b>Flujo másico de los componentes (kg/hr)</b>									
Residuos de pino									
pátula	72,44	65,2	-	-	-	-	-	-	-
Agua	289,76	260,78	-	-	-	78,24	78,24	78,24	-
Aire	-	-	-	-	-	-	-	-	708,43
Carbón Activado	-	-	64,53	64,53	-	-	-	-	-
Gas Combustible	-	-	914,11	-	914,11	-	-	-	-

## **5 DISEÑO DE LA PLANTA**

En el diseño de la planta se definen los aspectos necesarios para el montaje de esta, se determina las edificaciones e instalaciones, la mano de obra requerida, además de los equipos requeridos con sus determinadas dimensiones.

### **5.1 EDIFICIOS E INSTALACIONES**

Las edificaciones e instalaciones de la planta se refieren a la infraestructura y las obras de construcción que se requiere para el desarrollo del proyecto.

#### **5.1.1 CÁLCULO DE NECESIDADES DE INFRAESTRUCTURA**

En el cálculo de la infraestructura se busca optimizar el proceso a partir de los siguientes factores:

- Disminuir tiempos de producción.
- Disminuir el costo de capital.
- Reducir los recorridos en el transporte de materiales dentro de la planta.
- Facilitar los sistemas de programación y control.
- Ofrecer la mayor flexibilidad en el proceso.
- Valerse de la totalidad del espacio disponible.

Para lograr esta optimización se plantea el mínimo número de espacio, ubicando de forma continua cada etapa del proceso.

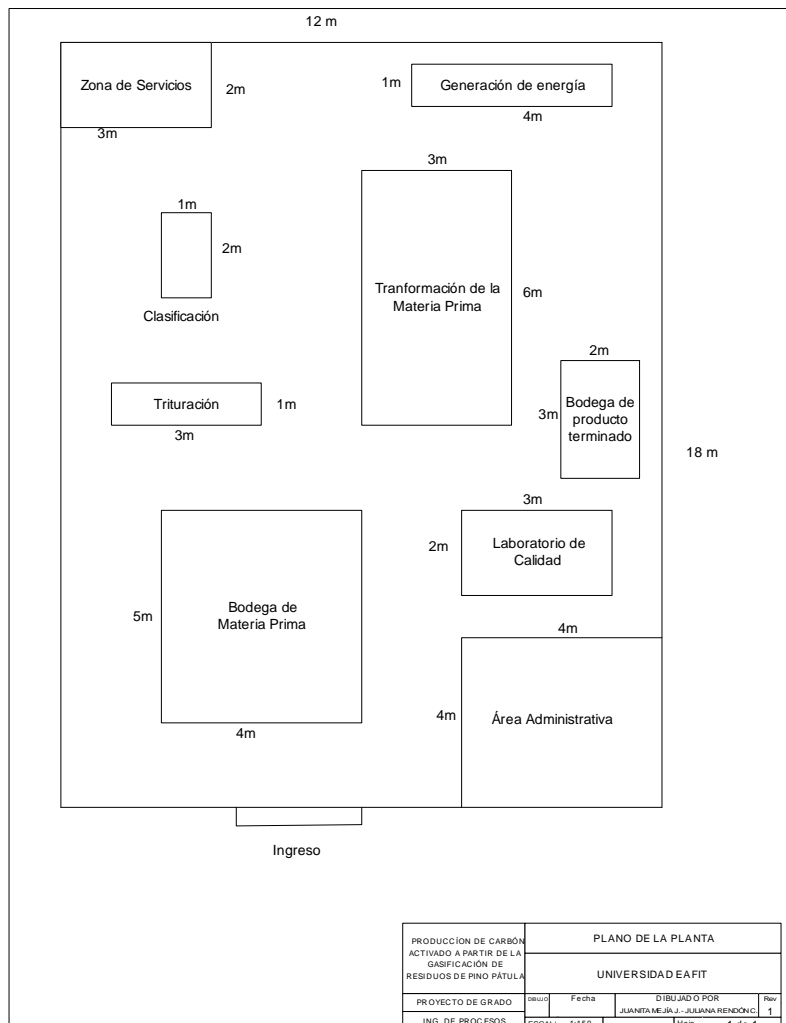
En la Tabla 5.1 se encuentran los principales espacios requeridos, con sus determinadas dimensiones.

**TABLA 5.1** Dimensiones y especificaciones de los espacios de la planta

<b>DESCRIPCION</b>	<b>DIMENSION LARGO</b>	<b>DIMENSION ANCHO</b>	<b>AREA TOTAL M2</b>
Bodega de materia prima	4	5	20
Triturado	3	1	3
Clasificación de materia prima	1	2	2
Transformación de materia prima	3	6	18
Aprovechamiento de los gases	4	1	4
Bodega de producto terminado	2	3	6
Laboratorio de calidad	3	2	6
Área administrativa	4	4	16
<b>AREA TOTAL (m)</b>			<b>216</b>

Al determinar el tamaño de los espacios y teniendo en cuenta que la distribución se hace siguiendo las etapas del proceso, se plantea un posible plano de la planta con las dimensiones establecidas.

A continuación se da a conocer un esquema de la planta física en la cual se encuentran establecidas las medidas por metro cuadrado de los sectores de la planta.



**FIGURA 5.1** Plano de la planta, distribución y áreas

### 5.1.2 OBRAS NECESARIAS

Como se observa en la Figura 5.1, para la planta de elaboración de carbón activado, se necesita una bodega amplia, sin muchas divisiones en su interior que permita realizar cualquier cambio en la distribución, en el tiempo.

Por otra parte, la planta de producción debe seguir las siguientes restricciones, tanto por optimización del proceso como por medidas de seguridad.

- Las tuberías deben estar a una altura de 3 m, soportadas por un rack, donde no obstruyan el paso de los operarios, ni interfieran con los equipos [16].
- Los equipos deben disponer de un espacio para su mantenimiento, debe ser de aproximadamente 1m alrededor. La caldera debe estar ubicada fuera del área de producción, pero muy cerca de ella, de esta manera se ahorra transporte y se disminuyen pérdidas [17].
- El laboratorio y el área administrativa no deben estar expuestas a riesgos de explosión o incendio. Se deben construir de tal manera que no se vean afectados por emergencias en las zonas del proceso o de almacenamiento.
- La altura de las instalaciones debe ser de mínimo de 6m. Las puertas de acceso de personas deben tener una altura 2.20m con un ancho de 1m

Se espera que las instalaciones tengan una vida útil de 20 años, sin embargo hay que tener presente que las instalaciones eléctricas deben ser revisadas periódicamente para garantizar el buen funcionamiento.

## **5.2 EQUIPOS**

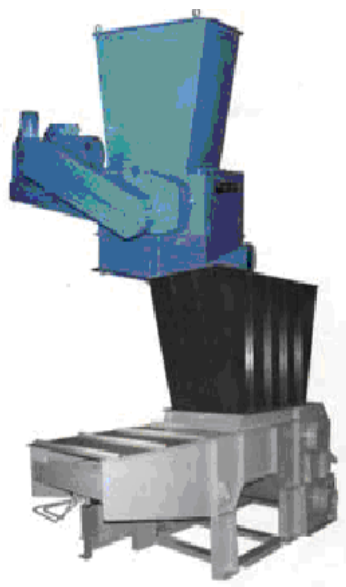
La selección de los equipos se realiza a partir de las condiciones establecidas para el proceso, tanto por los balances de masa y energía, como por las especificaciones de las variables. Esta selección proporciona información importante para determinar el gasto energético necesario durante el proceso, además de las especificaciones para obtener los costos de capital.

Cada una de las etapas de proceso requiere de uno o dos equipos especiales, a continuación se especifican los equipos según la etapa en la cual se requieren.

## 5.2.1 ADECUACIÓN DE MATERIAS PRIMAS

Como se explica en el Capítulo 3, la transformación de la materia prima consiste en la trituración y clasificación de los residuos madereros.

**Trituración:** Trituradora para residuos madereros marca Vecoplan.



**FIGURA 5.2** Trituradora de madera  
(TM-101)

Referencia: VAZ 120/105 U  
Long. Entrada: 1.240mm  
Anchura entrada: 1.075mm  
Nº cuchillas: 27 (40x40)  
Capacidad aprox: 650 kg/h(madera sólida)  
450 Kg/h(con palets).

Componentes:

- § Tolva alimentación
- § Soporte de 500 mm
- § Cinta transportadora con tambor magnético
- § Cinta transportadora de evacuación
- § Panel de control eléctrico.

Precio: \$15.900.000

Fuente: [www.industrystocks.com](http://www.industrystocks.com)

**Clasificación:** para la clasificación de la materia prima se utiliza la criba, mostrada en la Figura 5.3:



**FIGURA 5.3** Zaranda de clasificación  
de materia prima  
(SC-101)

Referencia: Separador vibrador  
Intervalo de medición: De 75  $\mu$ m (malla 200)  
hasta 101 mm (4")  
Capacidad: 100 Kg  
Materia: Acero al Carbón  
Precio: \$4.000.000  
Fuente: W:S TYLER CANADA

**Compresor:** Compreso de pistones para aire



Reguladores de presión  
Presión de salida: 140 psi  
Precio: \$2.680.000  
Fuente: Pegaso Compresores S.A.

**FIGURA 5.4** Compresor de aire  
(P-101)

## 5.2.2 TRANSFORMACIÓN DE LA MATERIA PRIMA

**Gasificador:** Gasificador de lecho fluidizado.



**FIGURA 5.5** Gasificador  
(GS-101)

Tolva de Alimentación: Capacidad de 70kg/h  
Material: Acero al carbón  
La tolva debe estar acondicionada de manera tal, que en ella ocurra el proceso de secado de la materia prima

Tornillo sin fin: regula la alimentación al reactor por medio de las RMP que se le impriman.

Tamaño de Partícula: Máximo 2cm

Visor: Materia: Vidrio con marco de acero

Tanque Reactor: Material:

Forma Interna: Cónica

Forma Externa: Cilíndrica

Tomas de temperatura y presión

Quemador

Compresor de Aire

Precio: \$50.000.000

Fuente: MEJÍA, Pablo José. Ing. Electrónico. DIES



### 5.2.3 APROVECHAMIENTO DEL GAS DE SINTESIS

**Caldera:** Vaporizador instantáneo, caldera tipo serpentín.



Marca: BABCOCK WANSON

Potencia: 20Hp

Capacidad: 345 Lb

Presión máx trabajo: 160psi

Propiedades:

§ Volumen de Agua  
reducido

§ Vapor seco

Precio: \$20.000.000

Fuente: Calderas JCT S.A.

**FIGURA 5.6** Caldera  
(CV-101)

### 5.2.4 PREPARACIÓN DEL PRODUCTO TERMINADO

**Clasificación de producto terminado:** Para la clasificación de la materia prima se utiliza una criba similar a la utilizada para la clasificación de materia prima, solo se diferencian en la capacidad y número de tamices. La figura 5.7 ilustra el esquema de esta criba.



Referencia: Porta-criba

Intervalo de medición: De 75  $\mu$ m  
(malla 200) hasta 50,8 mm (2")

Tamices: 5 or 7 tamices de 14" x  
14" (356 x 356 mm)

Capacidad: 30 Kg

Materia: Acero al Carbón

Precio: \$2.680.000

Fuente: LAVAL LAB<sub>INC</sub>

**FIGURA 5.7** Tamiz clasificador de  
producto terminado  
(SC-102)

Los tamices vibratorios son ideales para el análisis de piedra triturada, arena, grava, minerales, carbón y trozos de madera. Estos dispositivos pueden procesar muestras grandes (de 30 a 50 kg).

Tamiz diseñado a partir de la norma ASTM – E11

## **6 ESTUDIO ORGANIZACIONAL**

El estudio organizacional proporciona información sobre el número de empleados requeridos por el proyecto, asignando funciones, salarios y estableciendo una estructura organizacional que permita realizar el cronograma de la empresa.

### **6.1 ORGANIZACIÓN JURÍDICA**

Para la creación de una empresa existen varios tipos de organizaciones jurídicas que se pueden conformar, como la Sociedad Colectiva, Sociedad Anónima, Sociedad en Comandita, Sociedad de Responsabilidad Limitada, Empresa unipersonal y Sociedad de Hecho.

En el caso de este proyecto, la empresa se conforma bajo la modalidad de Sociedad Anónima. Para conformar el grupo de socios, mínimo 5, se acudirá a inversionistas que quieran apoyar al proyecto. Las características y obligaciones de la sociedad anónima se encuentran en la Tabla 6.1.

Para la conformación de la sociedad se requiere diligenciar en La Cámara de Comercio el nombre de la sociedad y la conformación de la misma.

La empresa productora de Carbón activado creada a partir de este proyecto se llama Carbones Activados de Oriente, y la sociedad está conformada principalmente por los creadores de este proyecto, la propietaria y administradora del aserrío Maderas La Finca, y como se mencionó anteriormente, los socios faltantes serán inversionistas interesados en el proyecto.

**TABLA 6.1** Características y obligaciones de la sociedad anónima

<b>Tipo de Sociedad</b>	<b>Sociedad Anónima</b>
<b>Tipo de Socios</b>	Accionistas
<b>Capital Social</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- El capital se divide en acciones de igual valor.</li> <li>- Las acciones en circulación corresponden al capital parado por los accionistas.</li> <li>- Se pueden emitir acciones privilegiadas, acciones de goce o industria, acciones con dividendo preferencial y sin derecho a voto, y bonos obligatoriamente convertibles en acciones</li> </ul>
<b>Numero de socios o Accionistas</b>	Mínimo 5 accionistas y no hay límite máximo.
<b>Responsabilidad de los socios</b>	Hasta el monto de sus aportes.
<b>Órganos Sociales</b>	Asamblea general de accionistas.  Junta de Socios  Representante Legal
<b>Cesión de Participaciones Sociales</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Las acciones son libremente negociables, salvo que se pacte derecho de preferencia.</li> <li>- No requiere reforma estatutaria.</li> </ul>
<b>Pago de Capital</b>	Suscribir el 50% del capital parte del capital suscrito, autorizado y pagar la tercera.
<b>Revisor Fiscal</b>	Requiere

Fuente: Estructura Empresarial. Proexport Colombia. 2006

## **6.2 ESTRUCTURA ORGANIZACIONAL**

La estructura organizacional de la empresa cuenta en primera instancia con los socios, quienes aparecen en la escritura publica de la constitución de la empresa y aportan el capital.

La junta directiva se conforma por decisión de los socios quienes delegan funciones de representación y gestión. A las juntas deben asistir los accionistas escogidos y sus respectivos suplentes.

Entre los empleados de la empresa se encuentra la mano de obra directa e indirecta; a continuación se especifica la cantidad de empleados requeridos y sus determinadas funciones.

### 6.2.1 MANO DE OBRA DIRECTA

La mano de obra directa es aquella que se involucra directamente en el proceso; no realizan funciones administrativas. Esta conformada por los operarios, quienes se encargan de manipular los equipos, de mantenimiento y de llevar a cabo el proceso productivo.

El número de operarios requeridos se determina a partir de las etapas del proceso, Tabla 6.2

**TABLA 6.2** Numero de operarios requeridos por etapa del proceso

<b>Etapas del Proceso</b>	<b>Numero de operarios</b>
Preparación de la materia prima	0.5
Transformación de la materia prima	1
Generación de vapor de agua y de energía	1
Preparación del producto terminado	0.5
<b>TOTAL</b>	<b>3</b>

Teniendo en cuenta que la planta opera 8 horas al día durante 5 días de la semana, los operarios trabajan simultáneamente en un turno de 8 horas.

## 6.2.2 MANO DE OBRA INDIRECTA

La mano de obra indirecta es aquella que no interactúa con el proceso, generalmente realizan funciones netamente administrativas.

La mano de obra indirecta incluye el personal administrativo, de ingeniería y de Seguridad.

### ***Personal Administrativo:***

- § Administrador: el administrador es el encargado, como su nombre lo dice, de las funciones administrativas, además, este debe llevar la contabilidad del negocio y actuar como personal de mercadeo y ventas, con soporte del ingeniero.
- § Secretaria: la secretaria se encarga de ayudar al administrador en sus funciones, además de realizar las funciones de recepcionista.

### ***Personal de Ingeniería:***

- § Ingeniero: el ingeniero es encargado tanto del proceso como de la calidad de los productos y de las materias primas. Este debe dar soporte al área de producción, tomando decisiones y controlando el proceso; además debe realizar los análisis de laboratorio al producto terminado y controlar la calidad de la materia prima.

### ***Personal de seguridad:***

- § Vigilante: este se encarga de velar por la seguridad de la planta durante las 24 horas del día, para esto se requiere de dos vigilantes que cubran un turno de 12 horas cada uno.

El administrador, secretaria e ingeniero deben trabajar solo un turno diario de 8 horas, sin embargo, estos hacen parte de personal de confianza, por lo tanto, deben estar disponibles las 24 horas del día para cualquier emergencia.

### 6.3 MONTOS SALARIAL

En la Tabla 6.3 se encuentra la mano de obra requerida por el proyecto con sus respectivos costos sin tener en cuenta las obligaciones del empleador.

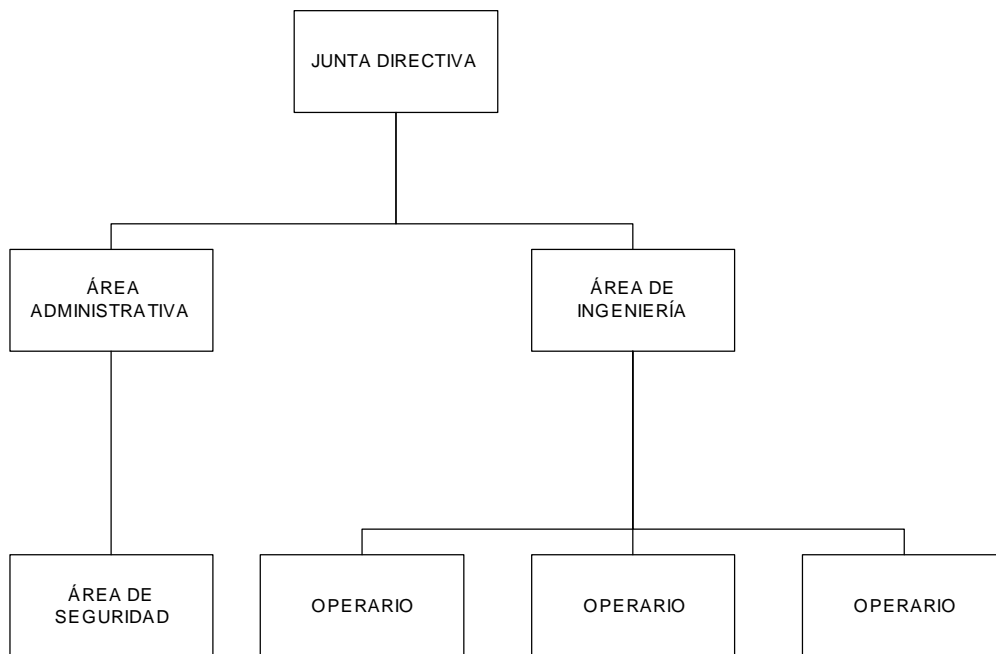
**TABLA 6.3** Balance de personal requerido por el proyecto

<b>BALANCE DE PERSONAL</b>			
<b>CARGO</b>	<b>VOLUMEN DE PRODUCCIÓN (UNIDADES)</b>		
	<b>CANTIDAD</b>	<b>REMUNERACIÓN ANUAL</b>	
		<b>Costo/ persona</b>	<b>Costo Total</b>
Operarios	3	4.896.000	14.688.000
Vigilante	2	6.000.000	12.000.000
Administrador	1	18.000.000	18.000.000
Secretaria	1	6.000.000	6.000.000
Ingeniero	1	18.000.000	18.000.000
<b>Total</b>	<b>8</b>		<b>68'688.000</b>

### 6.4 ORGANIGRAMA

El organigrama ilustra la estructura organizacional de la empresa, los niveles jerárquicos, las líneas de autoridad y las responsabilidades por departamento.

Se sigue una estructura lineal que permita ver la máxima autoridad a nivel superior y las divisiones a partir de ella.



**FIGURA 6.1** Organigrama de la empresa.



## 7 ESTUDIO FINANCIERO

El estudio financiero permite determinar la conveniencia del proyecto; en este se resume toda la información contenida en los capítulos anteriores del proyecto. Se considera principalmente los rubros económicos referentes a la inversión inicial, como equipos, gastos operativos y mano de obra directa e indirecta.

Este estudio se realiza con un horizonte de tiempo de 5 años, y con una inflación esperada para este mismo periodo de tiempo de 5.5% según un informe realizado por El Banco de la Republica.

### 7.1 INVERSIONES FIJAS

Las inversiones fijas son los bienes tangibles que son adquiridos por la empresa para usarlos durante toda su vida útil.

**TABLA 7.1** Inversiones fijas.

<b>EQUIPOS</b>	<b>CANTIDAD</b>	<b>PRECIO UNITARIO (\$)</b>	<b>PRECIO TOTAL (\$)</b>
Triturador de madera	1	15.900.000	15.900.000
Zaranda Materia Prima	1	5.000.000	4.000.000
Gasificador	1	50.000.000	50.000.000
Tamiz	1	2.680.000	2.680.000
Caldera	1	20.000.000	20.000.000
Compresor	1	2.500.000	2.500.000
Equipos para el Laboratorio	-	5.700.000	5.700.000
Accesorios y Herramientas	-	600.000	600.000
Adecuaciones y obras físicas	-	28.300.000	28.300.000
Muebles	-	5.000.000	5.000.000
<b>TOTAL</b>			<b>134.680.000</b>

**Activos Diferidos:** dentro de este concepto esta la constitución de la empresa, tiene un costo de \$519.000

**Activos Intangibles:** de estos hace parte la adecuación de la bodega y el laboratorio, registro de marcas. Dichas inversiones se amortizan a 5años.

**TABLA 7.2** Activos intangibles.

<b>ACTIVOS INTANGIBLES</b>	
Adecuación de la bodega	\$3.000.000
Registro de marca	\$600.000
<b>TOTAL</b>	<b>\$3.600.000</b>

## **7.2 COSTOS DE PRODUCCIÓN**

Los costos de producción involucran todo lo requerido para el proceso, tanto directos como indirectos.

### **7.2.1 COSTOS DIRECTOS**

En estos se especifica el costo de la materia prima y de la mano de obra directa.

#### **6.2.1.1 Materia Prima**

En la siguiente tabla se encuentra la cantidad de materia prima requerida para producir un kilogramo de carbón activado. Estas cantidades son calculadas a partir de los balances de materia, Numeral 3.5.

**TABLA 7.3** Consumo de materia prima por kg. de carbón activado.

<b>CONSUMO DE MATERIA PRIMA PARA UN KILOGRAMO DE PRODUCTO</b>				
<b>Materia Prima</b>	<b>Cantidad</b>	<b>Unidad</b>	<b>Costo Unitario</b>	<b>Costo Total</b>
Residuos de Pino Pátula	5	kg	\$12	\$60
Bolsas de Polipropileno	0,2	Unidad	\$70	\$14
Agua	1,21	m <sup>3</sup>	\$1445.71	\$1756,86
<b>TOTAL</b>				<b>\$1830</b>

### 6.2.1.2 Mano de obra directa

A continuación se encuentra el monto salarial de la mano de obra directa, teniendo en cuenta las prestaciones sociales y obligaciones del empleador.

**TABLA 7.4** Monto salarial de la mano de obra directa por año

<b>Cargo</b>	<b>Salario Básico</b>	<b>Subsidio de Transporte</b>	<b>Obligaciones del Empleador</b>	<b>Total Empleado</b>	<b>No. de Empleados</b>	<b>Total</b>
Operario	\$4.896.000	\$572.400	\$2.950.749	\$8.419.149	3	<b>\$25.157.446</b>

Para el cálculo de las obligaciones del empleador se tiene en cuenta la Tabla 6.4

**TABLA 7.5** Prestaciones sociales y obligaciones del empleador

<b>Concepto</b>	<b>Porcentaje</b>
Prima	8.33%
Cesantías	8.33%
Interés a la cesantía	1%
Vacaciones	4.17%
Dotación	2%
Aportes parafiscales	9%
Seguridad Social	21.13%
<b>TOTAL</b>	<b>53.96%</b>

Fuente: Código Laboral. 2006

## 7.2.2 COSTOS INDIRECTOS

Los costos indirectos se refieren a los materiales indirectos y a la mano de obra indirecta

### 6.2.2.1 Materiales indirectos

Los gastos referentes a los materiales indirectos se encuentran en la Tabla 6.5.

**TABLA 7.6** Gastos de materiales indirectos

<b>MATERIALES</b>	<b>GASTO ANUAL</b>
Gastos generales de mantenimiento	\$800.000
Combustible	\$3.000.000
Papelería y útiles de oficina	\$1.000.000

### 6.2.2.2 Mano de obra indirecta

**TABLA 7.7** Monto salarial de la mano de obra indirecta por año

<b>Cargo</b>	<b>Salario Básico</b>	<b>Subsidio de Transporte</b>	<b>Obligaciones del Empleador</b>	<b>Total Empleado</b>	<b>No. de Empleados</b>	<b>Total</b>
Vigilante	\$ 6.000.000	\$ 572.400	\$ 3.546.467	\$ 10.118.867	2	\$ 20.237.734
Secretaria	\$ 6.000.000	\$ 572.400	\$ 3.546.467	\$ 10.118.867	1	\$ 20.237.734
Ingeniero	\$ 14.400.000	-	\$ 7.761.600	\$ 22.161.600	1	\$ 22.161.600
Administrador	\$ 14.400.000	-	\$ 7.761.600	\$ 22.161.600	1	\$ 22.161.600
<b>TOTAL</b>						<b>\$ 84.798.668</b>

### 6.2.2.3 Otros gastos indirectos

Estos gastos incluyen las depreciación y amortización del local, de la maquinaria y equipo de la fabrica, además, de los servicios entre otros.

## **Servicios**

Según lo determinado en los balances de masa y energía (Numeral 3.5), se conoce la cantidad de energía requerida. En los servicios también se incluye lo que hay que pagar por acueducto y teléfono.

**TABLA 7.8** Consumo y costos de los servicios

<b>Servicio Público</b>	<b>Costos Anual</b>
Energía (kw/h)	\$20.000.000
Acueducto (m <sup>3</sup> )	\$1.400.000
Teléfono	\$2.580.000
<b>TOTAL</b>	<b>\$23.980.000</b>

## **Seguro**

La fabrica cuenta con seguro contra robo y contra incendio por los montos mostrados a continuación.

**TABLA 7.9** Costo de los seguros de la planta

<b>Concepto</b>	<b>Valor asegurado</b>	<b>Gasto Anual</b>
Incendio	\$45.000.000	\$2.500.000
Robo	\$45.000.000	\$2.500.000

## **Otros Gastos**

**TABLA 7.10** Otros gastos indirectos

<b>Concepto</b>	<b>Gastos</b>
Arriendo	\$6.000.000

### 7.3 PRODUCCIÓN

Inicialmente se pretende abarcar el 5% de la demanda total, con una capacidad utilizada igual a la instalada, de 52,1 Ton/mes.

Con un aumento anual de la capacidad de 1%, se determina la producción en los 5 años.

**TABLA 7.11** Producción anual de carbón activado

<b>Año</b>	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>4</b>	<b>5</b>
Producción anual (Ton)	125	126,25	127,5125	128,787625	130,0755013
Capacidad instalada (Ton)	150	150	150	150	150
Capacidad utilizada anual (%)	83%	84%	85%	86%	87%

### 7.4 INGRESOS

Los ingresos esperados se refieren inicialmente a los kilos de carbón activado vendidos, posteriormente, en estos ingresos se puede incluir las ventas de certificados ambientales. El precio del kilo de carbón activado es de \$3.500 aproximadamente.

**TABLA 7.12** Ingresos por ventas

	<b>Año 1</b>	<b>Año 2</b>	<b>Año 3</b>	<b>Año 4</b>	<b>Año 5</b>
<b>Nivel de Producción</b>	83%	84%	85%	86%	87%
<b>Cantidad de Carbón Activado (kg)</b>	125000	126250	127512,5	128787,625	130075,5013
<b>Precio de venta (\$)</b>	3500	3850	4235	4659	51525
<b>Ingresos por ventas (\$)</b>	437.500.000	486.062.500	540.015.438	600.021.545	6.702.140.202
<b>Ingresos Totales (\$)</b>	437.500.000	486.062.500	540.015.438	600.021.545	6.702.140.202

## 7.4.1 DEPRECIACIONES Y AMORTIZACIONES

Todos los activos se deprecian a 5 años, empezando desde el primero ya que se llevan a final de periodo. Las amortizaciones son también a 5 años, pero solo los activos intangibles y diferidos.

**TABLA 7.13** Depreciaciones y Amortizaciones

DEPRECIACIÓN						
	Año 0	Año 1	Año 2	Año 3	Año 4	Año 5
<b>DEPRECIACIÓN</b>		\$ 26.936.000	\$ 26.936.000	\$ 26.936.000	\$ 26.936.000	\$ 26.936.000
<b>ACTIVOS FIJOS</b>	\$ 134.680.000	\$ 107.744.000	\$ 80.808.000	\$ 53.872.000	\$ 26.936.000	-
AMORTIZACIÓN						
	Año 0	Año 1	Año 2	Año 3	Año 4	Año 5
<b>ACTIVOS INTANGIBLES</b>	\$ 0	\$ 700.000	\$ 700.000	\$ 700.000	\$ 700.000	\$ 700.000
<b>ACTIVOS DIFERIDOS</b>	\$ 0	\$ 103.800	\$ 103.800	\$ 103.800	\$ 103.800	\$ 103.800
<b>TOTAL AMORTIZACIONES</b>	\$ 0	\$ 803.800	\$ 803.800	\$ 803.800	\$ 803.800	\$ 803.800

## 7.5 FLUJO DE PRODUCCIÓN

Para determinar el flujo de producción se desglosan las inversiones, costos, depreciaciones, amortizaciones del proceso.

### 7.5.1 VENTAS

A continuación se encuentran las ventas anuales de carbón activado, teniendo en cuenta, que toda la producción es vendida.

**TABLA 7.14** Ventas

	Año 0	Año 1	Año 2	Año 3	Año 4	Año 5
<b>Ventas</b>						
<b>Cantidad de Carbón Activado</b>		125000	126250	127512,5	128787,625	130075,5013
<b>Precio de venta (\$)</b>		3500	3850	4235	4659	5124
<b>Ingresos por ventas</b>		437.500.000	486.062.500	540.015.438	600.021.545	666.506.868
<b>Ventas Totales</b>		437.500.000	486.062.500	540.015.438	600.021.545	666.506.868

## 7.5.2 INVERSIONES

En la Tabla 6.14 se encuentran las compras y adquisiciones de maquinaria y equipos, también se encuentran las adecuaciones e instalaciones y todo lo que se requiere para poner en marcha la planta.

**TABLA 7.15** Inversiones del proyecto

<b>INVERSIONES INICIALES</b>	
<b>Activos Fijos</b>	<b>\$</b>
Maquinaria y Equipo Básico	100.780.000
Maquinaria y Equipo Complementario	5.600.000
Adecuaciones y obras físicas	28.300.000
<b>Total Activos Fijos</b>	<b>134.680.000</b>

## 7.5.3 COSTO Y CAPITAL DE TRABAJO

La Tabla 7.16 muestra el costo necesario para llevar a cabo el proyecto, como el capital de trabajo y los materiales directos e indirectos.

El capital de trabajo se calcula a partir de los costos directos durante los primeros tres meses del proyecto.

**TABLA 7.7.166** Inversiones del proyecto

<b>AÑO</b>	<b>0</b>	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>4</b>	<b>5</b>
<b>COSTOS</b>						
Mano de obra directa		25.157.446	26.541.106	28.000.866	29.540.914	31.165.664
Materiales directos		228.750.000	231.037.500	233.347.875	235.681.354	238.038.167
Otros Materiales			0	0	0	0
Materiales Indirectos		4.800.000	5.064.000	5.342.520	5.636.359	5.946.358
Mano de obra indirecta		84.798.668	89.462.595	94.383.037	99.574.105	105.050.680
Servicios		23.980.000	25.298.900	26.690.340	28.158.308	29.707.015
Arriendo		6.000.000	6.330.000	6.678.150	7.045.448	7.432.948
Seguros		5.000.000	5.275.000	5.565.125	5.871.207	6.194.123
<b>TOTAL GASTOS</b>		<b>378.486.114</b>	<b>389.009.100</b>	<b>400.007.913</b>	<b>411.507.694</b>	<b>423.534.956</b>
<b>Capital de Trabajo</b>	<b>94.621.529</b>					



## 7.5.4 FLUJO DE EFECTIVO

El flujo de efectivo anual se define a partir de los datos anteriores.

**TABLA 7.17** Flujo de efectivo del proyecto

FLUJO DE EFECTIVO DEL PROYECTO PURO						
Descripción	Año					
	0	1	2	3	4	5
Ventas		437.500.000	508.156.250	590.223.484	685.544.577	796.260.026
Costos de Producción		253.907.446	256.194.946	258.505.321	260.838.800	263.195.613
Costos Fijos		102.996.668	108.661.485	114.637.866	120.942.949	127.594.811
Depreciaciones		26.936.000	87.500.000	87.500.000	87.500.000	87.500.000
Amortizaciones		700.000	700.000	700.000	700.000	700.000
<i>Utilidad Antes de Impuestos</i>		52.959.886	55.099.819	128.880.297	215.562.828	317.269.602
Impuestos		20.389.556	21.213.430	49.618.914	82.991.689	122.148.797
<i>Utilidad Neta</i>		32.570.330	33.886.389	79.261.383	132.571.139	195.120.805
Depreciaciones		26.936.000	87.500.000	87.500.000	87.500.000	87.500.000
Amortizaciones		700.000	700.000	700.000	700.000	700.000
Inversiones Iniciales	157.180.000					
Valor de Salvamento						39.295.000
Inversión en Capital de trabajo	94.621.529					
Recuperación de Capital de trabajo						47.310.764
<b>Flujo de Efectivo</b>	<b>-251.801.529</b>	<b>60.206.330</b>	<b>122.086.389</b>	<b>167.461.383</b>	<b>220.771.139</b>	<b>369.926.569</b>

## 7.6 MÉTODOS DE VIABILIDAD FINANCIERA

Los métodos más empleados para evaluar la viabilidad financiera de un proyecto son el VPN, TIR y la TVR, enunciados a continuación.

### 7.6.1 VALOR PRESENTE NETO (VPN)

Este, método es el más utilizado dentro de una evaluación financiera porque ilustra en pesos de hoy, tanto los ingresos como egresos futuros, facilitando la inversión.

Para el cálculo del VPN se considera una TMR de %7.25 y una inflación esperada de %5.5 para el presente año. Para dar una mayor exigencia al proyecto, como se menciona en el Numeral 7.6, se aumenta cuatro puntos a la TMR, considerando una TMR de 11.25% para evaluar el proyecto.

El VPN se calcula partiendo del flujo neto efectivo, Tabla 7.18:

**TABLA 7.18** Valor Presente Neto

<b>AÑO</b>	<b>Flujo de Efectivo</b>	<b>VPN (11,7%)</b>
0	-251.801.529	-251.801.529
1	60.206.330	54.733.027
2	98.769.249	81.627.478
3	144.144.243	108.297.703
4	197.453.999	134.863.738
5	346.609.429	215.217.185
<b>VPN (11,7)</b>		<b>342.937.604</b>

Para un VPN de 342.937.604 superior a cero, como en este caso, se define un proyecto viable financieramente, para ratificar esta conclusión, se analizan otros métodos de viabilidad financiera, como la TIR.

### **7.6.2 TASA INTERNA DE RETORNO (TIR)**

En esta tasa se descuentan los flujos de caja, de tal forma que los ingresos = egresos; desde el punto de vista matemático. La TIR es la tasa a la cual el VPN se hace cero.

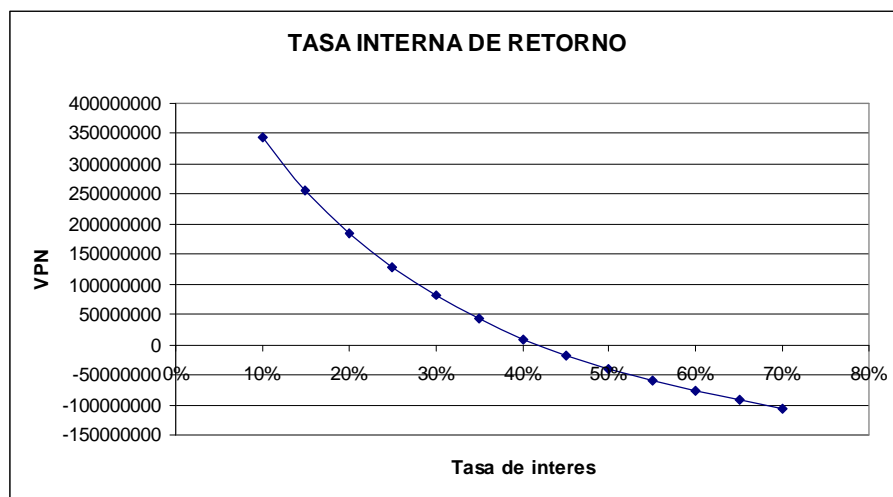
Para diferentes tasas de interés se calcula el VPN, como se muestra a continuación:

**TABLA 7.19** Valor Presente Neto para diferentes Tasa de Interés

TASA DE INTERES	VPN
10%	342.937.604
15%	255.233.833
20%	184.894.333
25%	127.831.843
30%	81.050.084
35%	42.322.126
40%	9.971.691
45%	-17.277.936
50%	-40.409.827
55%	-60.188.685
60%	-77.215.029
65%	-91.964.648
70%	-104.817.663

El comportamiento del VPN con respecto a las diferentes tasas de interés se ilustra en la Gráfica 7.1

**GRÁFICA 7.1** Valor Presente Neto vs. Tasa de Interés



Con un resultado de TIR = 41% para un VPN = 0, teniendo en cuenta que la TIR es mayor a la tasa de interés utilizada, se dice que el proyecto es viable financieramente.

## 7.7 ANÁLISIS DE SENCIBILIDAD

Para saber cuanto influye la implementación de mecanismos de desarrollo limpio, por medio de la venta de certificados ambientales, se realiza el análisis financiero teniendo en cuenta este valor como un ingreso constante para el periodo del análisis financiero, en el flujo de efectivo.

**TABLA 7.20** Flujo de efectivo para el proyecto con ventas de certificados ambientales

FLUJO DE EFECTIVO DEL PROYECTO (con CER`s)						
Descripción	Año					
	0	1	2	3	4	5
Ventas		437.500.000	508.156.250	590.223.484	685.544.577	796.260.026
Ventas Certificados Ambientales		34.246.800	34.246.800	34.246.800	34.246.800	34.246.800
Costos de Producción		253.907.446	256.194.946	258.505.321	260.838.800	263.195.613
Costos Fijos		102.996.668	108.661.485	114.637.866	120.942.949	127.594.811
Depreciaciones		26.936.000	26.936.000	26.936.000	26.936.000	26.936.000
Amortizaciones		700.000	700.000	700.000	700.000	700.000
<i>Utilidad Antes de Impuestos</i>		87.206.686	149.910.619	223.691.097	310.373.628	412.080.402
Impuestos		33.574.574	57.715.588	86.121.072	119.493.847	158.650.955
<i>Utilidad Neta</i>		53.632.112	92.195.031	137.570.025	190.879.781	253.429.447
Depreciaciones		26.936.000	26.936.000	26.936.000	26.936.000	26.936.000
Amortizaciones		700.000	700.000	700.000	700.000	700.000
Inversiones Iniciales	157.180.000					
Valor de Salvamento						39.295.000
Inversión en Capital de trabajo	94.621.529					
Recuperación de Capital de trabajo						47.310.764
<b>Flujo de Efectivo</b>	<b>-251.801.529</b>	<b>81.268.112</b>	<b>119.831.031</b>	<b>165.206.025</b>	<b>218.515.781</b>	<b>367.671.211</b>

Teniendo en cuenta que al aumentar los ingresos por las ventas de estos certificados ambientales (CER`s) aumenta el flujo de efectivo del proyecto, mostrando una influencia positiva en los métodos de evaluación financiera, VPN y TIR, como se muestra a continuación.

**TABLA 7.21** VPN teniendo en cuenta los certificados ambientales

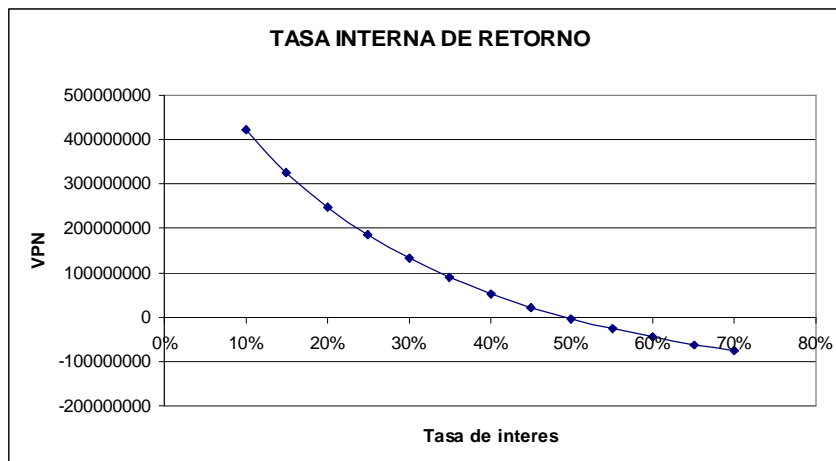
<b>AÑO</b>	<b>Flujo de Efectivo</b>	<b>VPN (11,7%)</b>
0	-251.801.529	-251.801.529
1	81.268.112	73.880.102
2	119.831.031	99.033.910
3	165.206.025	124.121.732
4	218.515.781	149.249.219
5	367.671.211	228.294.895
<b>VPN (11,7%)</b>		<b>422.778.328</b>

Comparando el VPN del proyecto puro con el VPN del análisis de sensibilidad, como era de esperarse, se nota un aumento en este último de aproximadamente el 19%.

**TABLA 7.22** VPN para diferentes tasas de interés teniendo en cuenta los certificados ambientales

<b>TASA DE INTERES</b>	<b>VPN</b>
10%	422.778.328
15%	325.836.193
20%	247.881.954
25%	184.472.872
30%	132.347.523
35%	89.078.470
40%	52.835.870
45%	22.224.011
50%	-3.833.399
55%	-26.174.833
60%	-45.459.739
65%	-62.211.395
70%	-76.848.508

**GRÁFICA 7.2** TIR teniendo en cuenta los certificados ambientales



Al tener en cuenta la venta de certificados ambientales, la tasa interna de retorno se acerca más al 50%, lo que indica que al quinto año se puede recuperar aproximadamente el 50% de la inversión inicial, aproximadamente 14% efectivo anual, comprobando que un proyecto en el cual se implementen mecanismos de desarrollo limpio puede resultar más rentable y de esta manera convertirse en una alternativa interesante para cualquier inversionista.

## 8 CONCLUSIONES

- § La creación de una empresa productora de carbón activado a partir de residuos de pino pátula, es factible de acuerdo con los resultados obtenidos en cuanto al estudio de mercado, el estudio técnico y la evaluación financiera.
- § En los aserríos y empresas procesadoras de madera, el 65% de la madera rolliza que entra en el proceso, se convierte en residuos, generando un problema de disponibilidad de los mismos; de este modo, los residuos se convierten en un contaminante por su alto volumen de generación y porque no se hace una adecuada disposición de los mismos.
- § El carbón activado hace parte del sector químico en Colombia, este sector tiene grandes posibilidades de crecimiento, en la actualidad éste representa el 1.9% del PIB nacional, lo que indica que a futuro, los proyectos que hacen parte de este sector están también favorecidos por este comportamiento.
- § Se puede afirmar, después de realizar el diseño del proceso y los balances de materia y energía, que el proceso de producción de carbón activado a partir de residuos de pino pátula es técnicamente factible, debido a que tanto la composición de la materia prima como las condiciones de operación, permiten que se den las reacciones y condiciones de atmósfera en defecto de oxígeno y temperatura, para que ocurra la gasificación.
- § El proceso de gasificación, hasta ahora, ha sido pensado principalmente para la producción de gas energético, se convierte en un proceso en el cual además del gas, se puede obtener un sólido con alto valor agregado, como en este caso, el carbón activado. A partir de los balances de masa y energía

se determino que el 7% de las entradas al proceso de gasificación (residuos de pino pátula y aire) son convertidas en un solidó carbonoso apto para ser activado y que el 93% restante corresponde al gas energético, lo que lo convierte en el producto potencial que es aprovechado para la producción de vapor de agua requerido por el proceso.

- § Un factor adicional, constituye el aprovechamiento del vapor generado en la caldera para la etapa de secado de la materia a gasificar; pues, como se comprobó a partir de los ensayos experimentales, la humedad juega un papel importante en la eficiencia del proceso; un alto contenido de humedad (mayor al 30%), limita el proceso evitando que se alcancen las condiciones para que se de la gasificación.
- § El proceso de fabricación de carbón activado es un proceso sencillo, donde la transformación completa de la materia prima ocurre en una sola etapa, además no se requiere de la implementación de alta tecnología.
- § Producir carbón activado por medio de un proceso que disminuye las emisiones de gases efecto invernadero como el CO<sub>2</sub>, fuera de traer un beneficio ambiental, trae un beneficio económico, al adquirir certificados ambientales, los cuales pueden ser vendidos a países que excedan la cuota de emisión de estos gases, cuota establecida durante el protocolo de Kyoto.
- § El vapor de agua es la materia prima que más influye en los costos directos de producción de carbón activado, representando el 96% de los costos, esto teniendo en cuenta que la materia prima principal del proceso, son residuos por lo tanto tiene un bajo costo, haciendo que los demás costos de materiales directos influyan mucho mas en los costos de producción.
- § Desde el punto de vista financiero el proyecto puro, resulta factible, debido a que el valor del proyecto a los cinco años, traído al presente, es superior a cero (VPN = 342.937.604); y que además, al final de este mismo periodo, se



recupera el 21% de la inversión inicial (TIR = 21%); estos valores pueden mejorarse en la perspectiva de venta de CER`s de acuerdo con el protocolo de Kyoto.

- § Al comparar los métodos de viabilidad financiera del proyecto puro con los del proyecto con venta de CER`s, se obtiene valores superiores de VPN (422.778.328) y TIR (49%). Esto ratifica que al implementar mecanismos de desarrollo limpio, en este tipo de proyectos, se puede obtener una mayor rentabilidad, haciendo el proyecto más atractivo para el inversionista.
  
- § Bajo un desarrollo apropiado, este proyecto podría hacer parte de una agrupación industrial concebida como iniciativa ZERI.

## BIBLIOGRAFÍA

# ANEXOS