

**DISEÑO BASICO DE UN SISTEMA SECADOR DE CARBON  
UTILIZANDO GASES DE COMBUSTION**

**JAIME RODOLFO DANGOND DAZA**

**ARMANDO JOSE BAUTE ARREDONDO**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER  
FACULTAD DE INGENIERIAS FISICOQUIMICAS  
ESCUELA DE INGENIERIA QUIMICA  
BUCARAMANGA**

**2007**

**DISEÑO BASICO DE UN SISTEMA SECADOR DE CARBON  
UTILIZANDO GASES DE COMBUSTION**

**JAIME RODOLFO DANGOND DAZA**

**ARMANDO JOSE BAUTE ARREDONDO**

**Trabajo de Grado presentado para optar el Título de:  
Ingeniero Químico**

**Director**

**Ph.D Álvaro Ramírez García**

**UIS**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER  
FACULTAD DE INGENIERIAS FISICOQUIMICAS  
ESCUELA DE INGENIERIA QUIMICA  
BUCARAMANGA**

**2007**

## **CONTENIDO**

INTRODUCCIÓN.....	1
1. PRESENTACIÓN DEL PROBLEMA Y METODOLOGIA.....	3
1.1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	3
1.2. METODOLOGÍA.....	4
2. GENERALIDADES DE SECADO.....	5
2.1 CONCEPTOS BÁSICOS.....	5
2.2 EQUIPOS DE SECADO.....	6
3. CARACTERIZACIONES, PRUEBAS Y RESULTADOS.....	8
3.1 CARACTERIZACIÓN DE LOS GASES DE CHIMENEA.....	8
3.2 CARACTERIZACIÓN DEL MATERIAL HÚMEDO.....	10
3.3 PRUEBAS DE SECADO.....	11
4. DISEÑO DEL SISTEMA DE SECADO.....	15
4.1 DISEÑO CONCEPTUAL DEL SISTEMA DE SECADO.....	15
4.2 BALANCES DE MASA Y ENERGÍA.....	17
4.3 DIMENSIONAMIENTO DE SECADOR ROTATORIO.....	21
4.4 EVALUACIÓN ECONÓMICA DEL PROYECTO.....	24
5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	33
5.1. CONCLUSIONES.....	33
5.2. RECOMENDACIONES.....	33
6. BIBLIOGRAFÍA.....	34
ANEXOS.....	35

## INDICE DE TABLAS

Tabla 1. Estudio Isocinético.....	8
Tabla 2. Material Particulado.....	9
Tabla 3. Composición del Gas de Chimenea en base Húmeda.....	9
Tabla 4. Datos del Gas de Chimenea.....	9
Tabla 5. Granulometría del Carbón que se va a secar.....	10
Tabla 6. Resultados Pruebas de Secado.....	13
Tabla 7. Resultados del Balance de Masa.....	18
Tabla 8. Temperaturas de las corrientes del sistema.....	18
Tabla 9. Requerimientos del Gas.....	19
Tabla 10. Resultados del Balance De Energía.....	20
Tabla 11. Valores de los parámetros de diseño.....	22
Tabla 12. Dimensiones del Secador Rotatorio.....	22
Tabla 13. Costo de Equipos Principales.....	26
Tabla 14. Estimación de Inversiones.....	26
Tabla 15. Inversión en Diferidos.....	27
Tabla 16. Costos de Operación Anual.....	27
Tabla 17. Estudio Financiero Alternativa 1.....	30
Tabla 18. Estudio Financiero Alternativa 2.....	30
Tabla 19. Análisis de Sensibilidad Alternativa 1.....	31
Tabla 20. Análisis de Sensibilidad Alternativa 2.....	32

## INDICE DE FIGURAS

Figura 1. Curva típica de secado de carbón.....	5
Figura 2. Cámara de Pruebas de Secado.....	12
Figura 3. Curvas de Secado.....	13
Figura 4. Esquema general del Balance de Masa.....	17
Figura 5. Balance de Masa del Gas.....	19
Figura A1. Diagrama de Flujo Proceso Actual.....	35
Figura A2. Diagrama de Flujo Proceso Vía Húmeda.....	36
Figura A3. Diagrama de Flujo Proceso Vía Seca.....	37

## **AGRADECIMIENTOS**

A Dios por el regalo de la vida y la salud.

A mis padres Luciano Dangond y Palmira Daza; mis hermanos Leonor, Luciano y Jorge Lucas; mis sobrinos José Javier y María Verónica. Por el apoyo y el amor.

Al Doctor Álvaro Ramírez García por su confianza y amistad.

Al Doctor Aristóbulo Centeno por sus sabios consejos.

**JAIME DANGOND DAZA**

## AGRADECIMIENTOS

A Zulma y Estefanía, que son mi fuente de inspiración, mi motor para vivir y para ser cada vez una mejor persona. ***“Son lo más hermoso que me ha sucedido en toda mi existencia. LAS AMO”***

A mi madre, quien ha dado su vida por mí y mis hermanos. ***“Este triunfo es la confirmación de que todas tus oraciones no fueron en vano”***.

A la señora Blanca, quien ha sido como una madre y un punto de apoyo para alcanzar mis más importantes metas.

A los ingenieros Ricardo Gallo, Mario Morales, Francisco Montoya y a toda la familia **COLCARBÓN**, quienes me han dado desinteresadamente la oportunidad de desarrollarme como profesional y principalmente como persona. ***“Los considero como ejemplos a seguir y siento hacia ustedes tres una infinita admiración.”***

Al Doctor Álvaro Ramírez García, quien durante este trabajo nos brindó la confianza y el apoyo necesario para llevarlo a un feliz término.

**ARMANDO JOSÉ BAUTE**

## RESUMEN

**TÍTULO:** “DISEÑO BASICO DE UN SISTEMA SECADOR DE CARBÓN UTILIZANDO GASES DE COMBUSTIÓN”.\*

**AUTORES:** DANGOND DAZA, Jaime Rodolfo  
BAUTE ARREDONDO, Armando José\*\*

**PALABRAS CLAVE:** Secador Rotatorio, secado, carbón, Gases de combustión, coquización, Producción mas Limpia.

### DESCRIPCIÓN:

En este proyecto se propuso para el secado de carbón un sistema secador rotatorio en el cual se aprovechan los gases de combustión generados al quemarse la materia volátil producida durante la coquización en hornos tipo colmena. Surge de la necesidad de la empresa COLCARBON S.A. C.I. de mejorar sus parámetros de calidad en cuanto al contenido de cenizas del coque exportado; para lograrla se debe limpiar el carbón y para ello se proponen plantas limpiadoras de carbón vía húmeda (en vez de las actuales que son neumáticas con eficiencias que disminuyen durante los meses de lluvias cuando la humedad del carbón de salida llega al 9%). Por vía húmeda el carbón sale con alto contenido de humedad, lo que dificulta la molienda y aumenta los costos de operación y de transporte y debe, por tanto, ser sometido a secado.

Se caracterizaron los gases de chimenea y el carbón húmedo, se realizaron pruebas de secado con las mismas características en que operaría un secador industrial obteniéndose curvas que indican la velocidad de secado para diferentes rangos de tamaño de partícula. Se hizo el diseño básico de un secador industrial de 50 toneladas por hora, utilizando los datos obtenidos experimentalmente. Finalmente se realizó un análisis económico con el fin de determinar la factibilidad de esta propuesta.

Se puede afirmar que lo propuesto es una alternativa para valorizar las corrientes de residuo del proceso de coquización mediante su utilización en el mismo bajo el concepto de producción más limpia y permite un ahorro en los costos de producción.

---

\* Trabajo de Grado

\*\*Facultad de Ingenierías Físicoquímicas, Escuela de Ingeniería Química, PhD. Álvaro Ramirez García, Universidad Industrial de Santander.

## ABSTRACT

**TITLE:** "BASIC DESIGN OF A COAL DRYER SYSTEM USING COMBUSTION GASES"\*

**AUTHORS:** DANGOND DAZA, Jaime Rodolfo  
BAUTE ARREDONDO, Armando José\*\*

**KEY WORDS:** Clean, drying, rotary dryer, coal, combustion gases, coke, coking.

### DESCRIPTION:

For improve the quality parameters regarding to the content of ash in the coke, is necessary to implement wet cleaning processes; however this practice presents inconveniences because the coal goes out with a high content of humidity, increasing the milling and transport costs. In addition, the current plants for cleaning are pneumatic whose efficiency diminishes in winter, increasing the coal humidity to 9% approximately. As solution to the problem, this project intends to design a coal drying system using the gases from the volatile matter combustion obtained during the coking process.

The chimney gases and the material to be used in drying were analyzed, drying tests were carried out with the same characteristics that would operate in an industrial dryer. Curves that indicate the drying speed for different particle ranges were obtained. A basic design of an industrial dryer of 50 tons per hour was done, using the data obtained from the tests. Finally, an economic analysis was carried out with the purpose of determining the financial feasibility of the project.

The conclusion is that the system offers an alternative to give value to the residual currents from the coking process using them in increasing the quality of the steel coke. This is a goal of cleaner production that offers also important production cost savings.

---

\* Graduation work

\*\* Physicist chemistries engineerings, Chemical engineering. PhD. Álvaro Ramírez García

## **INTRODUCCION**

El coque es un carbón procesado que se utiliza en la industria siderúrgica en la fundición del mineral de hierro para la obtención del acero. La coquización es un proceso mediante el cual se le retira la materia volátil al carbón al someterlo a altas temperaturas en hornos de diferentes tipos.

Previo a la coquización el carbón se somete a un tratamiento para disminuir humedad y cenizas. La humedad ocasiona atascamientos en molinos y las cenizas indican en el mercado baja calidad del coque.

Para disminuir la humedad del carbón es necesario someterlo a una operación de secado.

Los gases de combustión producidos en la coquización se tratan como una corriente de residuo en la planta. En éste proyecto se propone una operación secado que aproveche la energía interna de los gases de combustión para disminuir la humedad del carbón.

El objetivo general de este trabajo de grado es desarrollar un diseño básico de un proceso de secado de carbón semibituminoso para coquización reutilizando los gases de combustión producidos en la misma coquización. Los objetivos específicos son i) Proponer un diagrama de flujo del proceso de secado de carbón con gases de combustión; ii) Evaluar las variables operacionales del secado mediante ensayos a pequeña escala; iii) Dimensionar un sistema de secado con gases de combustión; iv) Evaluar la factibilidad tanto técnica como económica del diseño propuesto.

En el primer capítulo de este trabajo se hace una presentación del problema y de la metodología utilizada para alcanzar los objetivos propuestos. En el segundo capítulo se presentan conceptos básicos y generales sobre los procesos de secado y los equipos utilizados

particularizando el caso de tratamiento de carbones. En el capítulo tercero se presentan los resultados de mediciones experimentales que permiten caracterizar tanto los gases de chimenea como el carbón que sirve de materia prima del proceso. También se presentan los resultados de pruebas de secado del carbón materia prima, que se realizaron a escala de laboratorio. En el cuarto capítulo se desarrolla el diseño básico del proceso de secado que incluye balances de masa y energía, y análisis económico. El capítulo quinto presenta las conclusiones y recomendaciones. En los anexos se encuentra la propuesta de diagrama de flujo con el proceso de secado.

# 1. PRESENTACION DEL PROBLEMA Y METODOLOGIA

## 1.1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

La empresa COLCARBON S.A. C.I. es exportadora de coque siderúrgico, que debe cumplir con los requisitos de calidad exigidos por los mercados internacionales en cuanto a contenido de cenizas y humedad. Para cumplir con los límites de ceniza establecidos por el mercado (menor del 11.5%), el carbón antes de la coquización es llevado a las plantas limpiadoras vía seca llamadas JIG. (Ver Diagrama del proceso actual figura A1 en anexos).

La operación de limpieza se ve afectada cuando el carbón alimentado alcanza niveles de humedad superiores al 7% a causa de los fenómenos de tensión superficial que impiden una correcta estratificación del lecho de carbón. Además de afectar la operación de lavado, la humedad dificulta la clasificación inicial por tamaños de partícula, debido a que taponan las mallas de la criba. En la actualidad se están construyendo plantas lavadoras vía húmeda que tienen la desventaja de que el producto limpio tiene una humedad cercana al 18 %, lo que dificulta el posterior proceso de molienda debido a los rebosamientos y atascamientos en el molino de martillos, que redundan en tiempos más largos de operación de la planta.

Para solucionar los problemas mencionados anteriormente, se sugiere implementar secadores de carbón en cada una de las plantas con capacidades aproximadas de 50 ton/h.

Por otra parte, en los hornos de coquización se descargan 500 ton diarias de gases producidos por el craqueo de la materia volátil. Los gases salen por los conductos a altas temperaturas y se enfrían en la chimenea para sacarlos a la atmósfera. De esta manera se pierden grandes

cantidades de energía. Con este proyecto se busca analizar la factibilidad técnica y económica de utilizar los gases de chimenea en un sistema de secado, conducente a mejorar la operación de la planta bajo esquemas de uso racional de energía.

## **1.2. METODOLOGIA**

Inicialmente se hizo una visita a la planta tal para conocer in situ las condiciones y esquemas de operación. Luego se realizó una revisión bibliográfica para puntualizar conceptos generales sobre secado y sobre equipos de secado utilizados en la industria. Se procedió luego a realizar mediciones experimentales para caracterizar los gases de chimenea y el carbón materia prima. Estos datos fueron confrontados y complementados con datos históricos que se tienen en la planta.

También se hicieron pruebas preliminares en la planta sobre conducción de los gases de chimenea y utilización como gases de secado. Con esta información experimental y de familiarización con el proceso, se procedió a formular el diseño básico de la operación de secado, objetivo de este trabajo, y finalmente se hizo un análisis de la experiencia para formular conclusiones y recomendaciones.

## 2. GENERALIDADES DE SECADO

### 2.1 CONCEPTOS BASICOS

El término secado [2, 3, 4, 8] se refiere generalmente a la eliminación de humedad en un sólido. En un lecho de carbón húmedo, el agua puede encontrarse en la superficie, en los poros y en los intersticios de las partículas [1].

La mayor cantidad de agua se concentra en los poros e intersticios del carbón por lo que el contenido de humedad del carbón debe reducirse mediante un proceso de transferencia de masa y energía (Secado Térmico) [1].

Es sabido que al reducir la humedad en el carbón en 1%, aumenta cerca del 0,1% su eficiencia térmica y además equivale a reducir 4% de cenizas [1].

Al secar un sólido húmedo en un medio con temperatura y humedad fijas, aparece un patrón general de comportamiento. Las características del secado se pueden obtener mediante una curva de secado que indica el cambio del contenido de humedad con el tiempo.

En la siguiente figura se puede observar una curva de secado en la que pueden identificarse tres secciones [2].

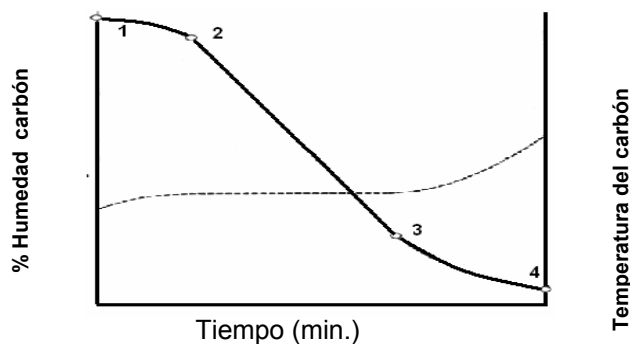


Figura 1. Curva típica de secado de carbón.

**Sección 1-2:** Aumenta la temperatura del carbón y comienza una lenta disminución de humedad.

**Sección 2-3:** Sección de velocidad constante de secado y la temperatura permanece prácticamente constante.

**Sección 3-4:** Sección de velocidad decreciente. La temperatura del carbón aumenta.

El punto 3 se conoce como humedad crítica. Este valor puede variar dependiendo de la transferencia de energía y propiedades del carbón.

El conocimiento de la curva de secado es valioso para programar y controlar la operación. Por ejemplo si el carbón se seca muy lentamente, puede producir un valor bajo de humedad crítica, mientras que si el mismo carbón se seca a altas temperaturas, puede producir un valor alto de humedad crítica. De lo anterior también se deduce que la curva de secado debe obtenerse a las mismas condiciones de secado industrial.

El valor de la humedad crítica es muy importante debido a que el proceso de secado es más simple cuando se opera en la región de secado constante <sup>[2]</sup>.

## **2.2 EQUIPOS DE SECADO**

Los equipos de secado se clasifican según el método de operación como continuos o por lotes y según el método de obtención de calor como directos o indirectos <sup>[2, 3, 4, 8]</sup>.

- **Secado Continuo:** La operación se integra fácilmente a los procesos industriales sin necesidad de almacenamiento intermedio, además el producto tiene un contenido uniforme de humedad. El equipo que se

utiliza depende del tipo de material que se va a secar. Pueden utilizarse el secado directo o indirecto y algunas veces los dos al tiempo.

- **Secado por lotes:** El secado por lotes es una operación costosa comparada con el secado continuo por lo que se limita a operaciones a pequeña escala. Es muy útil para trabajos de investigación y para secar materiales valiosos cuyo costo total será poco alterado por el costo agregado en la operación de secado.
- **Secadores indirectos:** Se aplica en los casos en que el material que se va a secar no puede ser expuesto directamente al gas de secado o que ocurra arrastre excesivo de polvo por el paso los gases a través de la corriente alimentada. El calor se transfiere por conducción y radiación mediante el calentamiento de una superficie de contacto a una alta temperatura para irradiar energía hacia la corriente del alimento.
- **Secadores directos:** Involucran el contacto del material húmedo con una corriente de gas caliente que puede ser gas de combustión, de tal manera que el calor se transfiere por convección. Debido al contacto con la corriente alimentada, los gases deben ser sometidos a una limpieza de las partículas según estándares ambientales.

Es recomendable que la operación continua de secado se haga en co-corriente para que así la corriente de gases caliente entre en contacto con el carbón más húmedo y se disminuya el riesgo de ignición del carbón <sup>[1]</sup>.

### 3. CARACTERIZACIONES, PRUEBAS Y RESULTADOS

#### 3.1 CARACTERIZACION DE LOS GASES DE CHIMENEA

La fuente de energía propuesta para el secado del carbón son los gases de combustión de chimenea que salen a altas temperaturas de los hornos de coquización. Su uso implica el aprovechamiento de los desechos del proceso (gases de chimenea), que se convierten en recurso para una integración energética y ayuda a una producción mas limpia.

Estos gases se encuentran a temperaturas entre 480 y 540°C. Además por el bajo contenido de oxígeno se crea una atmósfera inerte que puede retardar la ignición espontánea del carbón.

Los gases podrían tener la desventaja de que se presenta una dependencia entre los hornos y el secador, pero en éste caso el volumen es suficiente para cubrir las necesidades operacionales.

Un estudio isocinético hecho en el año 2005 proporciona información bastante detallada acerca de los gases de chimenea de la planta. Los datos más interesantes para éste caso son los siguientes:

		<b>GASES DE CHIMENEA</b>	<b>UNIDAD</b>	<b>VALOR</b>
O R S A T		Oxigeno	%Volumen	11
		Dióxido de Carbono	%Volumen	5
		Nitrógeno	%Volumen	84
		Monóxido de Carbono	%Volumen	0
G A S		Humedad	%Volumen	9.06
		Temperatura (Entrada chimenea)	°C	548.5
		Temperatura (Salida chimenea)	°C	119,44
		Caudal Normal	(m3/s)	12,51
		Caudal Chimenea	(m3/s)	53,14
		Velocidad	(m/s)	5,85

Tabla 1. Estudio Isocinético

Además el estudio isocinético proporciona información sobre los otros componentes de las emisiones de la chimenea que pueden ser útiles para un estudio mas detallado. Esa información se encuentra en la siguiente tabla:

<b>MATERIAL PARTICULADO</b>	<b>UNIDAD</b>	<b>VALOR</b>
Concentración normal	mg/m <sup>3</sup>	230,43
Concentración Chimenea	mg/m <sup>3</sup>	54,24
Velocidad de Emisión	Kg/h	6,894
<b><u>SO<sub>x</sub></u></b>		
Concentración normal	mg/m <sup>3</sup>	1209,8
Concentración Chimenea	mg/m <sup>3</sup>	284,76
Velocidad de Emisión	Kg/h	36,194
<b><u>NO<sub>x</sub></u></b>		
Concentración normal	mg/m <sup>3</sup>	241,08
Concentración Chimenea	mg/m <sup>3</sup>	56,75
Velocidad de Emisión	Kg/h	7,212

Tabla 2. Material Particulado

En la siguiente tabla se presentan las composiciones en base húmeda y el cálculo de la capacidad calorífica y peso molecular promedio de los gases:

GASES DE CHIMENEA	PM(Kg/Kmol)	Composición (%)	Cp(J/mol.*K)480°C.
Oxigeno	32	10,00	29,09
Dióxido de Carbono	44	4,5	35,83
Nitrógeno	28	76,39	29,08
Monóxido de Carbono	28	0	29,7
Agua	18	9,06	33,52

Tabla 3. Composición del Gas de Chimenea en base Húmeda

Peso Molecular Gas de Chimenea Seco	29,25	Kg/Kmol
Peso Molecular del Aire	28,95	Kg/Kmol
Cp Gas de Chimenea Seco	29,4195	(kJ/kmol*K) 480°C
Cp Aire Seco	29,0812	(kJ/kmol*K) 480°C
Humedad Absoluta de los gases	0,0614	Kg Agua/Kg Gas Seco

Tabla 4. Datos del Gas de Chimenea

Luego de observar los datos anteriores se demuestra la similitud de algunas propiedades entre los gases de chimenea y el aire.

Aprovechando ésta similitud se estimó aproximadamente que el porcentaje en peso del material particulado, SO<sub>x</sub> y NO<sub>x</sub> en los gases de chimenea, es 0,2735% que es un valor insignificante para el caso de estudio.

### 3.2 CARACTERIZACION DEL MATERIAL HÚMEDO

En el proceso de coquización se utilizan varios tipos de carbones subbituminosos con un contenido de materia volátil entre 18 y 32%. De esta cantidad depende la temperatura de ignición del carbón. En los diferentes tipos de carbón utilizados en las mezclas, ésta temperatura varía entre 160 y 610°C [7] por lo tanto el gas de secado debe estar a temperaturas inferiores a 160°C para evitar que se encienda el carbón durante la operación.

Otras temperaturas que deben tenerse en cuenta en el secado de carbón (para sistemas en ausencia de oxígeno) son [1]:

- **100 – 150°C:** Desprendimiento de humedad.
- **150 – 350°C:** Desprendimiento de gases ocluidos (CO<sub>2</sub> y CH<sub>4</sub>).
- **350 – 600°C:** Descomposición rápida del carbón (Pirolisis).

#### 3.2.1 GRANULOMETRIA

La siguiente tabla presenta el estudio granulométrico del carbón que se va a secar:

<b>GRANULOMETRIA</b>	
<b>Malla(mm)</b>	<b>Retención(%)</b>
32	8,0
25	3,9
16	10,1
12	6,4
6	13,9
3	21,8
2	5,3
1	9,4
0,5	8,5
Menor 0,5	12,7

Tabla 5. Granulometría del Carbón que se va a secar.

En este perfil granulométrico casi el 60% del material tiene un tamaño de partícula inferior a 12 mm. Esta fracción es la más fina; en ella se concentra la mayor cantidad de humedad, además a menor tamaño de partícula el secado es más manejable <sup>[1]</sup>.

### **3.3 PRUEBAS DE SECADO**

Con el fin dimensionar los equipos para ésta operación es necesario conocer el tiempo requerido para retirar la humedad del material hasta una cantidad deseada. Deben realizarse curvas de secado experimentales debido a que el conocimiento sobre el mecanismo de secado de muchas sustancias es desconocido.

La rapidez de secado se determina suspendiendo una muestra en un gabinete o tubería expuesta a un gas caliente. La humedad de la muestra secada se mide en función del tiempo <sup>[2]</sup>.

Para que los datos obtenidos sean confiables, se deben tener precauciones como por ejemplo la forma de soportar la muestra, la relación entre la superficie seca y no seca, condiciones de transferencia de calor y además el gas de secado debe ser similar al del modelo a gran escala.

Teniendo en cuenta que la temperatura de operación del secador no debe ser mayor a 160°C <sup>[7]</sup>, se realizaron varias pruebas de secado para carbón a una temperatura máximo de 150°C.

#### **3.3.1 Pruebas de Secado para Carbón**

Se realizaron pruebas de secado en planta para lo cual se construyeron instalaciones temporales como se indica a continuación.

Las pruebas de secado se realizaron a las condiciones de trabajo del modelo industrial en una cámara de secado (Ver figura 2) en la que se

expuso el carbón un flujo de  $0.68 \text{ m}^3/\text{s}$  de gas de combustión a una temperatura de  $560^\circ\text{C}$  que mezclados con aire del ambiente mediante la abertura de una compuerta se logró controlar a una temperatura entre  $110$  y  $160^\circ\text{C}$  teniendo en cuenta el siguiente procedimiento.

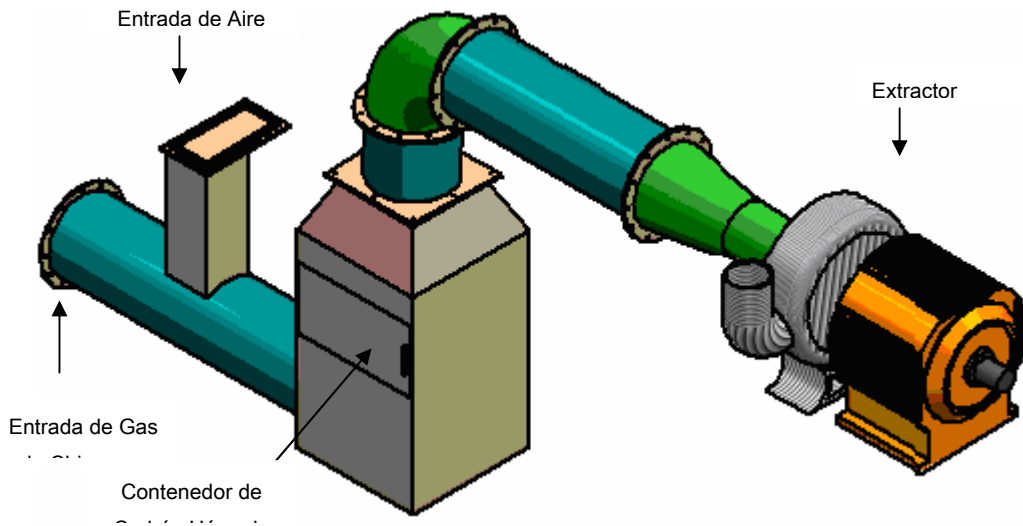


Figura 2. Cámara de Pruebas de Secado

1. Tomar una muestra representativa de carbón crudo (20 Kg.). Realizar ensayo de humedad residual (2 horas a  $110^\circ\text{C}$ )
2. Realizar perfil granulométrico y escoger tres rangos de granulometría.
3. Adicionar agua al carbón hasta completar el 17% de humedad.
4. Realizar una curva de secado para cada intervalo granulométrico escogido.

### 3.3.2 RESULTADOS

Inicialmente se obtuvo una curva de secado general, es decir para todas las granulometrías inferiores a malla 12 mm y a una humedad del 12% aproximadamente. Esta prueba preliminar se realizó en una estufa de laboratorio y luego se corroboró en el sitio donde se piensa construir el secador industrial con resultados muy parecidos.

Es importante destacar de la curva general que la pérdida de humedad se estabiliza al cabo de 13 minutos y el secado es casi total. Por lo tanto el

intervalo de tiempo escogido para realizar las pruebas de secado es de 0 hasta 13 minutos porque en éste se observan la mayoría de las características del secado.

Luego se realizaron dos curvas de secado, una para una granulometría entre 12 mm y 6 mm 69.8% y el 30.92% restante inferior a 6 mm (Gruesos) y otra para una granulometría entre 6mm y 3 mm 30% y el 70% restante inferior a 3 mm (Finos). Se obtuvieron los siguientes resultados:

Curva General			Gruesos	Finos
Tiempo (min)	Humedad (%)	Tiempo (min)	Humedad (%)	Humedad (%)
0	11,56	0	4,8	16,26
1	9,84	1	2,83	6,63
2	7,65	2	1,5	3,36
3	7,17	3	1,29	2,93
5	3,05	5	1,15	2,69
8	0,53	7	0,87	1,75
13	0,32	9	0,75	1,2
21	0,26	11	0,7	0,75
34	0,14	13	0,69	0,47

Tabla 6. Resultados Pruebas de Secado

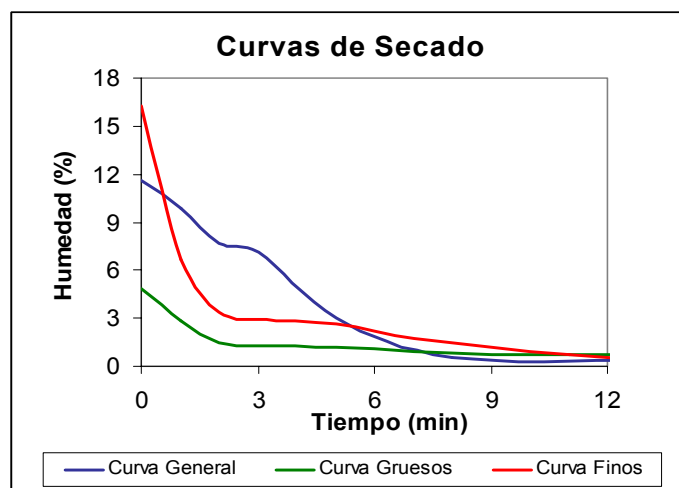


Figura 3. Curvas de Secado

En las curvas de secado se muestran las regiones de pérdida de humedad constante.

### 3.3.3 ANALISIS DE RESULTADOS

Algo muy importante para resaltar es que la mezcla de carbón no se pudo llevar a una humedad de 17%. La granulometría mas fina fue la que más agua absorbió acercándose al valor anterior. Se demuestra que es en la granulometría más fina donde se concentra la mayor parte de la humedad del sólido <sup>[1]</sup>. Debido a esto se podría realizar una separación previa a la operación de secado para enviar a éste proceso el material mas fino.

En la curva general podemos observar que la humedad llega al valor deseado antes de un tiempo de 5 minutos, por lo tanto el secado continuo del carbón es posible con un tiempo de residencia de 5 minutos.

También es de notar que las partículas finas se secan más rápidamente que las partículas gruesas. Esto puede ser útil para ajustar los tiempos de residencia del carbón en el secador si se van a secar los gruesos y los finos por separado. Aunque lo mas posible es que solo se sequen los finos.

## 4. DISEÑO DEL SISTEMA DE SECADO

### 4.1 DISEÑO CONCEPTUAL DEL SISTEMA DE SECADO

Para el diseño de un tipo de secador específico se deben tener en cuenta características específicas de secado que se deben determinar experimentalmente.

Inicialmente debe tenerse en cuenta <sup>[3]</sup>:

- Características del material que se va a secar.
- Condiciones iniciales y finales de humedad.
- Granulometría del material.

La información del comportamiento de secado del material se obtiene de las curvas de secado <sup>[2]</sup>.

Debe seleccionarse un sistema de secado que sea apropiado para el manejo del material a secar y que se ajuste a las necesidades operacionales del caso particular teniendo en cuenta los balances de materia y energía.

A continuación se mencionan algunos factores importantes que se deben considerar en la selección preliminar del secador de carbón:

#### 1. Propiedades del carbón:

- Comportamiento del carbón húmedo.
- Inflamabilidad.
- Tamaño de partícula.
- Corrosividad.

#### 2. Características del secado:

- Tipo de humedad.
- Humedad inicial y final.
- Temperatura de ignición del carbón.

3. Flujo del material al secador:
  - Cantidad de carbón a secar.
  - Operación continua o por lotes.
  - Proceso anterior y posterior al secado.
  
4. Propiedades del carbón seco:
  - Contaminación.
  - Descomposición.
  - Temperatura del producto.
  
5. Recuperación de polvos.
  
6. Ubicación e instalación:
  - Espacio disponible.
  - Condiciones atmosféricas.
  - Combustible y electricidad disponible.
  - Pérdidas de calor, ruido, vibraciones.
  - Descarga de gases.

En éste caso es recomendable un secador continuo debido a las condiciones de operación y necesidades del proceso: alto volumen de material húmedo y de gases de chimenea; naturaleza y granulometría del carbón que se va a secar. , Se seleccionó un secador rotatorio porque en éste es más fácil el manejo del carbón húmedo debido a que el movimiento de rotación evita aglomeración de las partículas pequeñas, también el contacto del material con el gas caliente es mas íntimo <sup>[1]</sup>.

Otra razón para la selección es que la recuperación del material fino arrastrado por los gases de secado puede resultar más sencilla en el secador rotatorio <sup>[1,8]</sup>. Esta recuperación de polvos se puede lograr mediante un filtro de mangas al final del secador.

## 4.2 BALANCES DE MASA Y ENERGIA

Con los balances de masa y energía se obtiene información necesaria para un diseño básico del sistema de secado. Para realizar los balances se deben tener en cuenta varios factores tales como las propiedades del material que se va a secar, la caracterización de los gases de combustión, además de muchos parámetros que deben ser escogidos a conciencia por quien diseña debido a que la mayoría de éstos son datos heurísticos que pertenecen a correlaciones de datos recomendados en la literatura especializada.

Por otra parte es indispensable hacer los balances de materia y energía, así como cualquier cálculo adicional teniendo en cuenta las condiciones atmosféricas de presión y temperatura del lugar donde probablemente se va a instalar el proceso.

### 4.2.1 BALANCE DE MASA

En el siguiente esquema general se presentan las entradas y salidas del sistema:

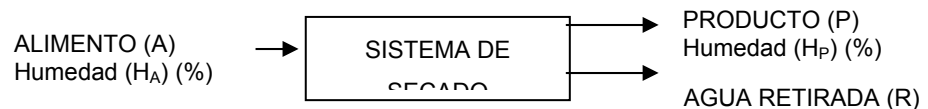


Figura 4. Esquema general del Balance de Masa

Balance General:

$$A = P + R$$

Balance de Humedad:

$$A \cdot H_A = P \cdot H_P + R$$

En la siguiente tabla se registran los resultados obtenidos del balance de masa:

BALANCE DE MASA	Valor	Unidades
Masa de Alimento (A) (50 ton/h)	45359,24	Kg/h
Cantidad de agua en el alimento (Ha)	10	%
Cantidad de agua en el producto (Hp)	5	%
Masa del Alimento Seco (Ss)	40823,31	Kg/h
Masa del Producto (P)	42971,91	Kg/h
Masa de Agua Removida (R)	2387,33	Kg/h
Masa de Agua en el Producto (Hp)	2148,60	Kg/h

Tabla 7. Resultados del Balance de Masa

El carbón alimentado entra al sistema a una temperatura aproximada de 10°C y debe salir del proceso a una temperatura que no supere 70°C.

El agua removida es retirada en forma de vapor por medio de una corriente de gas caliente. La cantidad de agua en el gas es expresada como humedad del gas (Kg Agua/Kg Gas seco).

Las temperaturas de las corrientes del sistema son las siguientes:

CORRIENTE	T (°C)
Alimento	10
Producto	35
Gases de entrada	150
Gases a la Salida	45

Tabla 8. Temperaturas de las corrientes del sistema.

Es necesario conocer la cantidad máxima de humedad que puede soportar el gas sin que haya condensación a unas condiciones de presión y temperatura.

La fórmula para el cálculo de la humedad máxima es <sup>[1]</sup>:

$$H_{\max} = \frac{PM_{H_2O}}{PM_{GAS} * \left(\frac{P_{atm}}{P_{sat}} - 1\right)}$$

A una temperatura de 45°C y una presión atmosférica de 72.1 kPa, la humedad máxima es aproximadamente 0.09 Kg Agua/Kg Gas seco. La relación entre la humedad del gas y la máxima es la humedad relativa <sup>[1]</sup>:

$$H_R = \frac{H}{H_{\max}}$$

Con ésta relación y teniendo en cuenta que la humedad relativa recomendable para el secado debe estar entre 90 y 95% <sup>[1]</sup>, en el siguiente esquema se muestra el balance del gas de chimenea en el secador

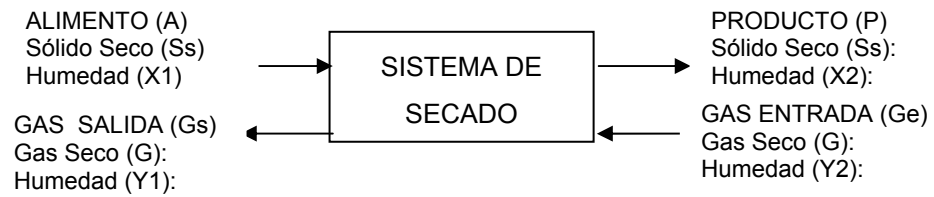


Figura 5. Balance de Masa del Gas.

Balance de Humedad en el Gas <sup>[2]</sup>:

$$A \cdot X_1 + G \cdot Y_2 = P \cdot X_2 + G \cdot Y_1$$

La siguiente tabla muestra los resultados de requerimiento del gas:

CALCULO DE LA CANTIDAD DE GAS	Valor	Unidades (SI)
Humedad Inicial del Gas	0,0614	Kg Agua/Kg Gas
Humedad Relativa	90	%
Capacidad de Arrastre del Gas	0,023	Kg Agua/Kg Gas
Masa de Gas Requerida	101607,22	Kg/h
Humedad Final	0,085	Kg Agua/Kg Gas

Tabla 9. Requerimientos del Gas.

La temperatura de rocío del gas a la humedad y temperatura final se calcula mediante la siguiente ecuación <sup>[1]</sup>.

$$T_{\text{rocío}} = \frac{B}{A - LN \left[ \left( \frac{PM_{H_2O}}{PM_{Gas} * H} + 1 \right) * \frac{1}{Patm} \right]}$$

A las condiciones anteriores la temperatura de rocío es 43°C.

#### 4.2.2 BALANCE DE ENERGIA:

Con el balance de energía se determinan los requerimientos energéticos para remover la humedad.

Balance de entalpía <sup>[1]</sup>:

$$\Delta H = \int_{T_1}^{T_2} Cp(T)$$

El cambio de la entalpía se puede aproximar con la siguiente ecuación:

$$\Delta H = \overline{Cp} * \Delta T$$

En la siguiente tabla se registran los resultados obtenidos del balance de energía:

BALANCE DE ENERGIA	Valor	Unidad
Energía para que 1 lb de Agua aumente T a 100°C	170,92	KJ
Energía para vaporizar y enfriar 1lb a T Producto	966,62	KJ
Energía para evaporar 1 lb de Agua	1137,54	KJ
Energía necesaria para remover la Humedad	5987053,26	KJ/h
Energía en el producto por lb de Humedad	104,67	KJ/Kg
Energía por hora en el Alimento Seco	14,24	KJ/h
Energía por hora perdida en el producto	4347940,70	KJ/h
Energía total para remover la humedad	262943,84	KJ/h
Energía para calentar el gas a T entrada (gas)	51088,20	KJ/h
Energía total para remover la humedad	13147191,87	KJ/h
Energía para evaporar 1 lb de Agua en el Carbón	1069,98	KJ/KgH2O

Tabla 10. Resultados del Balance De Energía

Asumiendo pérdidas de un 20% <sup>[1]</sup>, la cantidad total de energía por masa de agua removida necesaria para el sistema es 1337.47 KJ/Kg. Agua.

La temperatura a la que el gas de secado debe entrar al sistema puede estimarse mediante la siguiente fórmula <sup>[1]</sup>:

$$T_G = T_P + \frac{E_E}{Cp_{GAS} * M_G}$$

$T_P$ =Temperatura del producto.

$E_E$ =Cantidad de energía por unidad de tiempo para evaporar el agua.

Esta temperatura es aproximadamente 134°C

### 4.3 DIMENSIONAMIENTO DE UN SECADOR ROTATORIO PARA CARBON

Un parámetro heurístico importante que se usa comúnmente para dimensionar equipos de secado es la rapidez de evaporación específica (REE). Esta cantidad se calcula dividiendo la masa de agua que se va a evaporar por unidad de tiempo entre el volumen del secador [1].

$$REE = \frac{Kg_{HUMEDAD\_RETIRADA} / hora}{m^3 \text{ sec ador}}$$

El valor de REE en secadores rotatorios debe estar entre 28.83 y 120.14

$\frac{Kg / h}{m^3}$ , Pero en éste intervalo se recomienda un valor entre 48 y 80 [1].

Sabiendo la cantidad de humedad que se va a retirar y escogiendo un valor de REE que se encuentre en el intervalo recomendado se puede calcular el volumen del secador rotatorio.

Otro parámetro que debe tenerse en cuenta para el diseño de un secador rotatorio es la fracción del volumen del secador que es ocupada por el material sólido. El valor de esta fracción se encuentra entre 5 y 12% del volumen [3, 8].

Además existe una relación entre la longitud y el diámetro del secador (L/D) que debe estar entre 4 y 8. Después de calcular el volumen del secador y teniendo en cuenta la relación (L/D), se pueden conocer la longitud y el diámetro del secador rotatorio [2, 3].

A continuación se presentan los valores escogidos para los parámetros heurísticos de diseño:

Rapidez de evaporación específica (REE)	48	Kg./h*m3
Relación Longitud sobre Diámetro (L/D)	5	
Fracción de volumen ocupada por el material (Fv)	12	%

Tabla 11. Valores de los parámetros de diseño

Con los valores anteriores se calcula el volumen del secador<sup>[1]</sup>:

$$m^3 \text{ sec ador} = \frac{Kg \text{ HUMEDAD\_RETIRADA} / \text{hora}}{REE}$$

Como ya se conoce la masa de agua que se va a retirar, se calcula el volumen del secador y con la relación (L/D) se calcula la longitud despejando de la siguiente fórmula:

$$V = \frac{\pi * D^2 * L}{4}$$

$$V = \frac{\pi * D^3 * (L/D)}{4}$$

Los resultados son los siguientes:

Volumen del Secador (V)	42	m3
Longitud (L)	13.8	m
Diámetro (D)	2	m

Tabla 12. Dimensiones del Secador Rotatorio

Una variable muy importante en el secado es el tiempo de residencia del material en el secador ( $\tau$ ) y en secadores rotatorios para carbón se estima mediante la siguiente fórmula<sup>[1]</sup>:

$$\tau = \frac{3 * F_v * V}{2 * A}$$

El tiempo de residencia es 5.3 minutos. Puede observarse en la curva de secado preliminar que en 5 minutos se llega a una humedad del 3.05% por lo tanto ésta fórmula es una buena aproximación.

El secador debe trabajar en contracorriente debido a que el carbón es inflamable y por consiguiente es recomendable que la corriente de gas más caliente haga contacto con el material más húmedo. De lo contrario habrá más riesgo de explosión.

Los secadores rotatorios disponen de unos elevadores cuya función es levantar el material para ponerlo en contacto con la corriente de gas. El número de levantadores es aproximadamente 6 a 10 veces el diámetro en metros. Los elevadores se extienden desde la pared del secador una longitud que es alrededor del 8 al 12% del diámetro [2].

El número de elevadores del secador se calcula así:

$$NE = D * 6$$

El número de elevadores del secador es 12.

La inclinación del secador debe estar entre 0 y 10°, en éste caso se fijará una inclinación de 5°.

Para hallar las revoluciones por minuto del secador rotatorio se utiliza la siguiente relación [3]:

$$\theta = \frac{0.35 * l}{s * N^{0.9} * D} - 0.6 * \frac{BlG_V}{G_F}$$

En esta ecuación:

- $\theta$  es el tiempo de residencia.
- $l$  es la longitud del secador.
- $s$  es la inclinación del secador.

- *N* es el número de revoluciones por minuto.
- *B* es una constante que depende del tamaño de partícula  

$$(B = 5.2 * D_p^{-0.5})$$
- $D_p$  es el peso promedio de partícula.
- $G_v$  es la velocidad del gas.
- $G_f$  es la velocidad del sólido seco.

Mediante la ecuación anterior se encontró que el número de revoluciones por minuto del secador rotatorio debe ser 4.37.

#### **4.4 EVALUACION ECONOMICA DEL PROYECTO**

Para determinar la conveniencia económica del proyecto es necesario tener en cuenta que el proceso de secado tiene objetivos diferentes dependiendo de la planta donde se realice la operación. Por tal motivo se analizarán por separado dos alternativas independientes entre sí. Es de notar que todos los costos se calcularon mediante datos históricos de la empresa COLCARBÓN S.A. C.I.

##### **ALTERNATIVA 1**

Actualmente ingresan 25000 toneladas mensuales de carbón sucio a la Planta Salamanca ubicada en el municipio de Samacá, proveniente de las minas del norte de Boyacá. Se acopia en pilas de donde se envía al proceso de mezcla, limpieza, molienda y coquización.

Con el fin de aprovechar la ubicación de la planta Andalucía en el norte de Boyacá se piensa en realizar el proceso de lavado del carbón vía húmeda y luego secarlo antes de ser llevado a la planta Salamanca (Ver Diagrama del proceso Vía Húmeda, figura A2 en anexos).

De esta forma a la planta Salamanca llegará una mezcla lista para coquizar, evitándose el transporte de carbón con alto contenido de ceniza, lo que disminuye el costo de transporte y el costo de molienda por tonelada.

El mercado exige que el coque tenga un contenido de ceniza del 10,5%. Para lograr éste contenido se deben usare en el proceso mezclas de carbón coquizable con 7% de ceniza aproximadamente lo cual se puede conseguir mediante plantas lavadoras que por ser vía húmeda tienen la desventaja de aumentar el contenido de humedad del carbón lavado, pero al implementar el sistema de secado se soluciona este problema.

## **ALTERNATIVA 2**

La operación de secado se realizaría en las plantas Montecristo y Castilla ubicadas en los municipios de Cucunubá y Guachetá (Cundinamarca). Estas plantas consumen 25.000 toneladas mensuales de carbón en cada una, las cuales son sometidas a un proceso de limpieza vía neumática. La operación se ve afectada en época de invierno debido a que el alto contenido de humedad dificulta la operación de limpieza aumentándose el contenido de ceniza en un punto porcentual lo que trae como consecuencia disminución en el precio por tonelada de coque (Ver Diagrama del proceso Vía Seca, figura A3 en anexos).

El proceso de secado en estas plantas mejoraría el proceso de limpieza, evitaría las pérdidas de dinero por disminución en el precio por tonelada de coque y disminuiría los costos de molienda por tonelada.

### **4.5.1. CALCULO DE LA INVERSION**

#### **Inversión Fija**

Debido a que los terrenos para la construcción de las instalaciones ya existen dentro de las plantas, la única inversión fija no depreciable son los estudios preliminares, los cuales corresponden a todos los ensayos a escala piloto que permiten determinar los parámetros de diseño de la planta de secado. Se estima un costo de \$15.000.000.

#### Bienes depreciables

- Construcción y obras civiles: el costo global de la obra incluye la adecuación del terreno de la planta y la construcción del cuarto de control. El costo total se cotizó en \$10.000.000.
- Maquinaria y equipo: en la tabla 13 se presenta el costo de los principales equipos utilizados en la planta de secado.

<b>COSTO TOTAL DE MAQUINARIA Y EQUIPOS</b>	
<b>Concepto</b>	<b>Costo</b>
Secador Rotatorio	\$ 200.000.000
Sistema de extracción de gases	\$ 25.000.000
Filtro de mangas	\$ 120.000.000
Tubería	\$ 45.000.000
Sistema de aire comprimido	\$ 20.000.000
Chimenea	\$ 18.000.000
Instalaciones eléctricas	\$ 70.000.000
Estructura metálica (cubierta)	\$ 120.000.000
<b>TOTAL</b>	<b>\$ 618.000.000</b>

Tabla 13. Costo de Equipos Principales

- Repuestos: se fijó como el 5% del costo de los equipos principales.

<b>CARGOS POR DEPRECIACIÓN Y AMORTIZACIÓN DE LA INVERSIÓN FIJA</b>				
<b>Concepto</b>	<b>Inversión Inicial</b>	<b>Tasa (%)</b>	<b>Costo anual</b>	<b>Valor de Salvamento (10 años)</b>
Construcción y obras civiles	\$ 10.000.000	5	\$ 500.000	\$ 2.000.000
Maquinaria y equipo	\$ 618.000.000	10	\$ 61.800.000	\$ 123.600.000
Repuestos	\$ 30.900.000	10	\$ 3.090.000	\$ 6.180.000
<b>TOTAL</b>	<b>\$ 658.900.000</b>	<b>-</b>	<b>\$ 65.390.000</b>	<b>\$ 131.780.000</b>

Tabla 14. Estimación de Inversiones

En la tabla 14 se estiman los costos correspondientes a la inversión fija de la planta junto a los cargos por depreciación y amortización.

### **Inversión en Diferidos**

Compra de servicios necesarios para la puesta en marcha del proyecto.

En la tabla 15 se presentan los costos correspondientes.

<b>INVERSION EN DIFERIDOS</b>	
<b>Concepto</b>	<b>Costo</b>
Gastos de montaje (20%)	\$ 123.600.000
Imprevistos (10%)	\$ 61.800.000
<b>TOTAL</b>	<b>\$ 185.400.000</b>

Tabla 15. Inversión en Diferidos

### **Inversión de Trabajo**

Corresponde al conjunto de insumos necesarios para la operación en forma normal del proyecto durante un ciclo productivo. Incluye ítems como efectivo y bancos, inventario de materias primas y materiales indirectos, cuentas por cobrar, etc. Se estimó como el 35% de la inversión fija, equivalente a \$315.320.320.

### **4.5.2. COSTOS DE OPERACIÓN**

La tabla 16 presenta los costos de operación para períodos de un año.

<b>COSTOS DE OPERACIÓN</b>	
<b>Concepto</b>	<b>Costo</b>
Mano de obra directa	\$ 24.000.000
Servicios industriales (energía eléctrica)	\$ 144.000.000
Mantenimiento (5%)	\$ 384.600.000
Depreciación	\$ 65.390.000
Gastos administrativos	\$ 0
<b>TOTAL</b>	<b>\$ 617.990.000</b>

Tabla 16. Costos de Operación Anual

### **4.5.3. INGRESOS**

Los ingresos son diferentes dependiendo de la alternativa para la cual se analice.

### **Ingresos Alternativa 1**

La operación de secado realizada en la planta Andalucía generaría ingresos relacionados con el ahorro en los costos de transporte por tonelada de carbón al evitar el transporte de agua y ahorro en el costo de molienda por tonelada mezcla.

De las 25.000 toneladas de carbón que se coquizan mensualmente en la planta SALAMANCA, 23.750 ton son transportadas desde el norte de Boyacá (95%), a un costo de \$23.000 por tonelada. El carbón después de lavado sale con 15% de humedad y al someterlo al proceso de secado se baja esta humedad hasta el 5%, lo que indica que se evita transportar 10% de exceso de agua, lo que incrementaría el costo a \$25.555 por tonelada. Quiere decir que gracias al proceso de secado se ahorran \$2.555 por tonelada de carbón, equivalentes a \$60.681.250 mensuales ó \$728.175.000 al año.

La molienda es una de las etapas más importantes en la preparación de la mezcla a coquizar, debido a que la granulometría del carbón incide directamente en la resistencia mecánica del coque. El costo de la operación de molienda equivale a \$50.000.000 mensuales. Si la humedad del carbón es menor al 7% aproximadamente se muelen 25.000 toneladas mensuales, sin embargo, con un carbón de 15% de humedad el rendimiento disminuye a 15.000 toneladas aproximadamente, incrementándose el costo de \$2.000 a \$3.333 por tonelada. Quiere decir que con el proceso de secado se ahorrarían \$1.333 por tonelada, equivalentes a \$31.658.750 mensuales ó \$379.905.000 al año.

### **Ingresos Alternativa 2**

La operación de secado en las plantas Montecristo y Castilla se realizaría únicamente en épocas de lluvia (5 meses al año aproximadamente).

La operación de secado realizada en estas plantas, al igual que en la alternativa 1, produce un ahorro en el costo de molienda por tonelada y además evita los castigos al precio del coque por aumento en el porcentaje de cenizas. El castigo por punto porcentual encima de 11,5% en ceniza es de \$8.000 por tonelada. Se exportan 15.000 toneladas de coque al mes, lo que indica que con el proceso de secado se evitaría la pérdida de \$120.000.000 mensuales ó \$600.000.000 al año.

En el proceso de molienda se ahorrarían \$1.333 por tonelada de carbón, equivalentes a \$33.325.000 mensuales ó \$166.625.000 al año.

#### **4.5.4. EVALUACIÓN ECONOMICA**

Para el estudio financiero se tuvieron en cuenta los siguientes parámetros:

- Se estimó una inflación anual del 7%, para realizar la proyección de los costos del proyecto.
- Se utilizó un aumento en los ingresos del 6% anual durante todos los años de la proyección.
- Tasa de interés del mercado del 14%, la cual se utilizó para calcular el VPN.
- Impuestos sobre utilidades del 35%, se consideró este valor constante porque aunque puede aumentar o disminuir anualmente, no se cuenta con la forma para predecir su valor real en el futuro.
- El horizonte del proyecto se fijó en diez años.
- El valor de salvamento se estimó en un 20% del valor de compra.

En las tablas 17 y 18 se presentan los resultados del estudio financiero para las dos alternativas.

ALTERNATIVA 1											
ESTUDIO FINANCIERO DE PLANTA DE SECADO (Cifras en millones de pesos)											
Año	Inversión Inicial (\$)	Ingreso por transporte (\$)	Ingresos por costos de molienda (\$)	Costos de operación (\$)	Utilidad bruta (\$)	Impuestos sobre utilidades (\$)	Utilidad neta (\$)	Depr.-ciación (\$)	Flujo Neto (\$)	VPN (\$)	TIR (%)
0	1.175								-1.175	-1.175	-
1		728	380	618	490	172	319	65,4	384	-838	-
2		772	403	661	513	180	334	65,4	399	-531	-23,1
3		818	427	708	538	188	349	65,4	415	-251	1,0
4		867	452	757	563	197	366	65,4	431	4	14,2
5		919	480	810	589	206	383	65,4	448	237	21,9
6		974	508	867	616	216	400	65,4	466	449	26,6
7		1.033	539	927	644	226	419	65,4	484	643	29,7
8		1.095	571	992	674	236	438	65,4	503	819	31,7
9		1.161	606	1.062	704	247	458	65,4	523	980	33,1
10		1.230	642	1.136	736	258	478	65,4	544	1.127	34,1

Tabla 17. Estudio Financiero Alternativa 1

ALTERNATIVA 2											
ESTUDIO FINANCIERO DE PLANTA DE SECADO (Cifras en millones de pesos)											
Año	Inversión Inicial (\$)	Ingreso por precio coque (\$)	Ingresos por costos de molienda (\$)	Costos de operación (\$)	Utilidad bruta (\$)	Impuestos sobre utilidades (\$)	Utilidad neta (\$)	Depr.-ciación (\$)	Flujo Neto (\$)	VPN (\$)	TIR (%)
0	1.175								-1.175	-1.175	-
1		600	167	300	467	163	303	65,4	369	-851	-
2		636	177	321	491	172	319	65,4	385	-555	-25,0
3		674	187	344	518	181	337	65,4	402	-284	-0,8
4		715	198	368	545	191	355	65,4	420	-35	12,6
5		757	210	393	574	201	373	65,4	439	193	20,4
6		803	223	421	605	212	393	65,4	459	402	25,3
7		851	236	450	637	223	414	65,4	479	593	28,5
8		902	251	482	671	235	436	65,4	501	769	30,6
9		956	266	516	706	247	459	65,4	524	930	32,0
10		1.014	282	552	743	260	483	65,4	549	1.078	33,1

Tabla 18. Estudio Financiero Alternativa 2

Para la alternativa 1 se obtuvo una TIR de 21,9% para 5 años y 34,1% para 10 años. El tiempo de recuperación de la inversión es de 4 años. El criterio de comparación de la TIR es el 12 % que es el que utiliza ECOPETROL.

Para la alternativa 2 se obtuvo una TIR de 20,4% para 5 años y 33,1% para 10 años. El tiempo de recuperación de la inversión es de 5 años.

#### 4.5.4.1. ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD

Para el análisis de sensibilidad de las 2 alternativas se proponen escenarios pesimistas con las siguientes variables económicas:

##### Alternativa 1

- Disminución en un 10% del valor del flete por tonelada de carbón, lo cual disminuye el ahorro por transporte de agua.
- La inversión inicial será 30% mayor.
- Los costos de operación son 5% mayor, tanto para la operación de molienda como de secado.

##### Alternativa 2

- Disminución del precio del coque en 20% y por ende en el descuento por aumento en cenizas.
- La inversión inicial será 30% mayor.
- Los costos de operación son 5% mayor, tanto para la molienda como de secado.

ALTERNATIVA 1											
ESTUDIO FINANCIERO DE PLANTA DE SECADO (Cifras en millones de pesos)											
Año	Inversión (\$)	Ingresos por transporte (\$)	Ingresos por costos de molienda (\$)	Costos de operación (\$)	Utilidad bruta (\$)	Impuestos sobre utilidades (\$)	Utilidad neta (\$)	Depreciación (\$)	Flujo Neto (\$)	VPN (\$)	TIR (%)
0	1.527								-1.527	-1.527	-
1		656	399	649	406	142	264	65,4	329	-1.238	-
2		695	423	694	423	148	275	65,4	341	-976	-
3		737	448	743	442	155	287	65,4	353	-738	-17,5
4		781	475	795	461	161	300	65,4	365	-522	-3,7
5		828	504	851	481	168	312	65,4	378	-326	4,9
6		877	534	910	501	175	326	65,4	391	-148	10,5
7		930	566	974	522	183	339	65,4	405	14	14,3
8		986	600	1.042	543	190	353	65,4	419	160	16,9
9		1.045	636	1.115	566	198	368	65,4	433	294	18,8
10		1.107	674	1.193	588	206	382	65,4	448	414	20,2

Tabla 19. Análisis de Sensibilidad Alternativa 1

Los cambios realizados en alternativa 1 disminuyen la TIR a 4,9% en 5 años y a 20,2% en 10 años; el tiempo de recuperación de la inversión pasó al año 7. El proyecto sigue siendo económicamente factible.

ALTERNATIVA 2 ESTUDIO FINANCIERO DE PLANTA DE SECADO (Cifras en millones de pesos)											
Año	Inversión (\$)	Ingreso por precio coque (\$)	Ingresos por costos de molienda (\$)	Costos de operación (\$)	Utilidad bruta (\$)	Impuesto sobre utilidades (\$)	Utilidad neta (\$)	Depreciación (\$)	Flujo Neto (\$)	VPN (\$)	TIR (%)
0	1.527								-1.527	-1.527	-
1		480	175	315	340	119	221	65,4	286	-1.276	-
2		509	185	337	357	125	232	65,4	297	-1.047	-45,5
3		539	197	361	375	131	244	65,4	309	-838	-22,5
4		572	208	386	394	138	256	65,4	322	-648	-8,4
5		606	221	413	414	145	269	65,4	334	-474	0,5
6		642	234	442	435	152	282	65,4	348	-316	6,3
7		681	248	473	456	160	297	65,4	362	-171	10,4
8		722	263	506	479	168	311	65,4	377	-39	13,3
9		765	279	541	502	176	327	65,4	392	81	15,4
10		811	296	579	527	185	343	65,4	408	191	16,9

Tabla 20. Análisis de Sensibilidad Alternativa 2

Los cambios realizados en alternativa 2 disminuyen la TIR a 0,5% en 5 años y a 16,9% en 10 años; el tiempo de recuperación de la inversión pasó al año 9. El proyecto no sería factible económicamente.

## **5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES**

### **5.1. CONCLUSIONES**

Después de realizar un análisis técnico y económico del secado de carbón con gases de combustión se puede afirmar que éste ofrece una buena alternativa para valorizar las corrientes de residuo del proceso de coquización mediante su utilización en el mismo bajo el concepto de producción más limpia.

La construcción del sistema de secado propuesto es recomendable porque permite el ahorro en los costos de producción y además tiene un impacto positivo en la calidad del producto final. Esto tiene como efecto el aumento de los precios del coque, lo que trae beneficios económicos.

Al aprovechar la alta temperatura de los gases de combustión se le daría un valor agregado a la producción de la planta porque se estaría consumiendo una gran cantidad de energía que actualmente es disipada en las chimeneas al enfriar los gases sin obtener ningún beneficio de esta.

### **5.2. RECOMENDACIONES**

Un análisis del impacto ambiental del proyecto de secado de carbón con gases de combustión puede ser recomendable porque podrían encontrarse muchos beneficios ambientales debido a la disminución en temperatura de las emisiones.

Se sugiere construir un modelo de secador rotatorio a escala piloto para obtener información mas precisa al momento de construir el secador industrial.

## 6. BIBLIOGRAFIA

- (1) Leonard, Joseph W; Hardinge, Byron C. Coal Preparation, 5th edition. Society for Mining, Metallurgy and Exploration Inc. 1991
- (2) Treybal E., Robert. Operaciones de Transferencia de Masa, Edición 2. Mc Graw Hill, México.
- (3) Foust, Alan S. Principio de Operaciones Unitarias, Edición 1. CECSA, México 1972.
- (4) Mc Cabe, Warren L.; Smith, Julian C.; Harriot, Setter. Operaciones Unitarias en Ingeniería Química, Edición 4. Mc Graw Hill, Madrid 1991.
- (5) Newnan, Donald G. Análisis Económico en Ingeniería, Mc Graw Hill. México 1985.
- (6) Infante Villarreal, Arturo. Evaluación financiera de proyectos de inversión, Norma. Bogotá 1988.
- (7) Clete R.; Stephan, P. E. Coal Dust Explosion Hazards. Mine Safety and Health Administration Pittsburg, Pennsylvania.
- (8) Perry, Robert H; Maloney, James O. Perry Manual del Ingeniero Químico, Edición 3, Mc Graw Hill. México 1996.

# ANEXOS

## DIAGRAMAS DE FLUJO DIAGRAMA DE FLUJO PROCESO DE SECAO (PROCESO DE LIMPIEZA Y AHUMEDA)

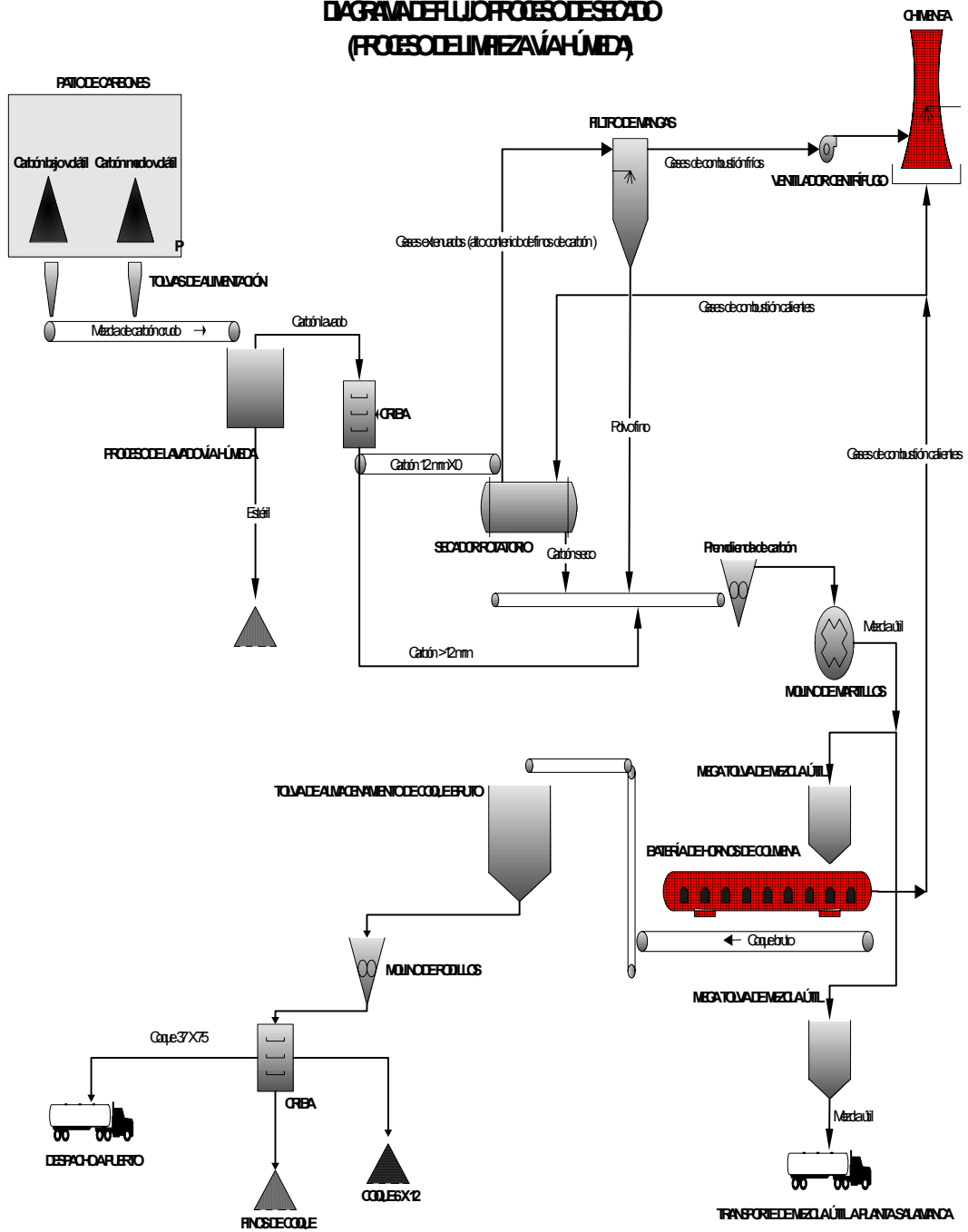


Figura A1. Diagrama de flujo Proceso Actual

## DIAGRAMA DE FLUJO PROCESO DE SECAO (PROCESO DE LIMPIEZA VÍA HÚMEDA)

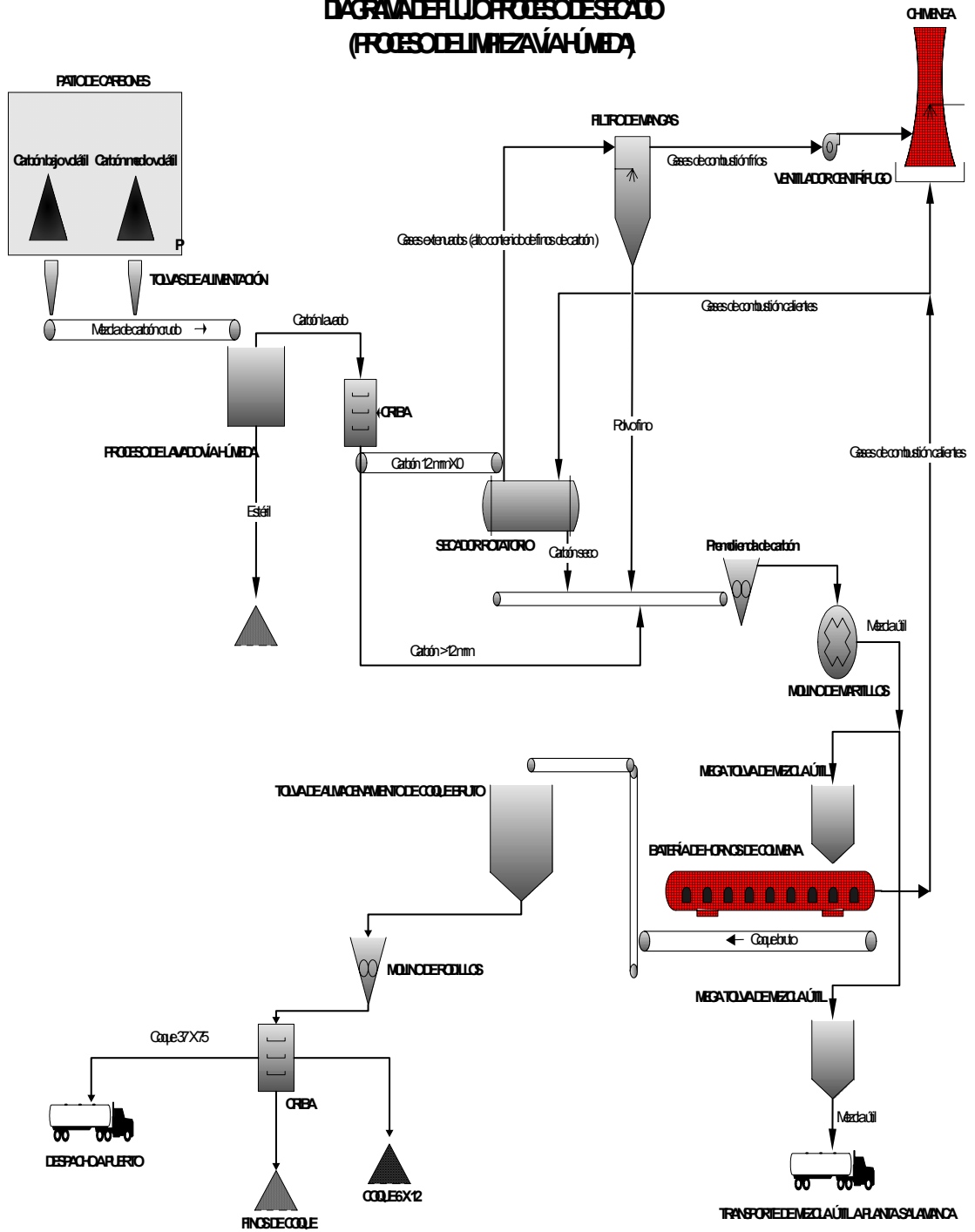


Figura A2. Diagrama de flujo Proceso Vía Húmeda

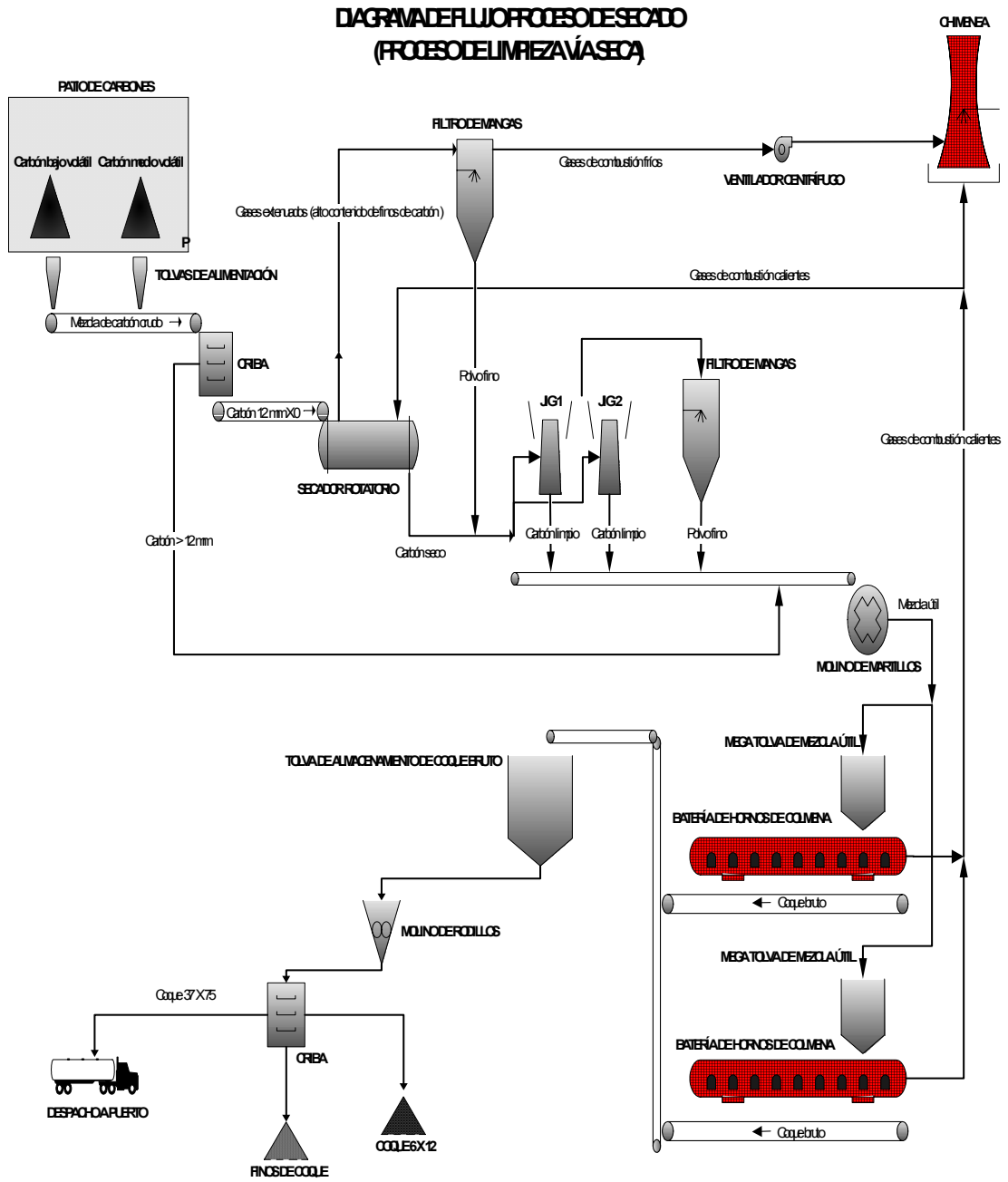


Figura A3. Diagrama de flujo Proceso Vía Seca