

## Información Importante

La Universidad de La Sabana informa que el(los) autor(es) ha(n) autorizado a usuarios internos y externos de la institución a consultar el contenido de este documento a través del Catálogo en línea de la Biblioteca y el Repositorio Institucional en la página Web de la Biblioteca, así como en las redes de información del país y del exterior con las cuales tenga convenio la Universidad de La Sabana.

Se permite la consulta a los usuarios interesados en el contenido de este documento para todos los usos que tengan finalidad académica, nunca para usos comerciales, siempre y cuando mediante la correspondiente cita bibliográfica se le de crédito al documento y a su autor.

De conformidad con lo establecido en el artículo 30 de la Ley 23 de 1982 y el artículo 11 de la Decisión Andina 351 de 1993, La Universidad de La Sabana informa que los derechos sobre los documentos son propiedad de los autores y tienen sobre su obra, entre otros, los derechos morales a que hacen referencia los mencionados artículos.

**BIBLIOTECA OCTAVIO ARIZMENDI POSADA**  
UNIVERSIDAD DE LA SABANA  
Chía - Cundinamarca

**BENEFICIO DE LOS FINOS DE COQUE**

**FERNANDO MORA CAMACHO**

**Código. 201013693**



**UNIVERSIDAD DE LA SABANA**  
**INSTITUTO DE POSTGRADOS FORUM**  
**ESPECIALIZACIÓN EN GERENCIA DE PRODUCCIÓN Y OPERACIONES**  
**SEPTIEMBRE DE 2015**

**BENEFICIO DE LOS FINOS DE COQUE**

**FERNANDO MORA CAMACHO**

**Código. 201013693**

**Asesor:**

**JAIME ALBERTO RINCON ALMANZA**

**Jurado:**



**UNIVERSIDAD DE LA SABANA  
INSTITUTO DE POSTGRADOS FORUM  
ESPECIALIZACIÓN EN GERENCIA DE PRODUCCIÓN Y OPERACIONES  
SEPTIEMBRE DE 2015**

**Tabla de contenido**

Tabla de Figuras .....	6
1. Problema de Investigación.....	11
1.1. Descripción del Problema .....	11
1.2. Propósito de la Investigación con Relación al Problema.....	13
1.3. Justificación.....	14
1.4. Objetivo General.....	14
1.5. Objetivos Específicos.....	14
2. Marco teórico .....	14
2.1 Contexto organizacional. ....	14
2.2 Marco Teórico .....	19
2.2.1. Diseño de procesos. (Groover, 1997) .....	19
• Operaciones de procesamiento. (Groover, 1997).....	21
• Operaciones de ensamblado. (Groover, 1997).....	22
• Líneas de Producción. (Groover, 1997).....	23
• Líneas de producción automatizadas. (Groover, 1997).....	23
• Planeación de procesos. (Groover, 1997) .....	23
• Directrices y consideraciones para decidir los procesos y su secuencia en la planeación del proceso. (Groover, 1997).....	25
• Capacidad del proceso. (Groover, 1997) .....	26

• Diseño Robusto. (Groover, 1997) .....	27
• Control estadístico de procesos. (Groover, 1997) .....	28
2.2.2. Valor agregado de producto. (Rojas, 2013) (Equihua, 2011) .....	30
2.2.3. Finos de Coque, usos y aplicaciones en la industria. ....	33
2.2.3.1. Fabricación de briquetas.....	34
2.2.3.2. Generación de energía eléctrica.....	37
2.2.3.3. Combustible.....	40
2.2.3.4. Materia prima en la mezcla para coquizar .....	43
2.3. Consideraciones a partir del marco teórico. ....	47
3. Diseño Metodológico .....	48
3.1 Definición del tipo de trabajo .....	48
3.2 Unidad de análisis.....	48
3.3 Variables: descripción y medida de las variables.....	49
3.4 Fuentes y recolección de la información.....	52
3.5 Métodos de procesamiento y análisis de la información. ....	52
3.6 Recursos, presupuesto y cronograma.....	52
4. Resultados de la investigación .....	54
4.1. Antecedentes de la producción. ....	54
4.2. Caracterización de los finos de coque.....	55
4.3. Resultados de las pruebas a escala industrial. ....	56

4.4. Análisis de resultados.....	58
4.5. Proceso productivo para los finos de coque. ....	59
5. Discusión y conclusiones. ....	60
5.1. Técnicos.....	60
5.2. Mejoras del proceso productivo.....	61
5.3. Beneficios económicos.....	62
6. Referencias.....	64

**Tabla de Figuras**

Ilustración 1. Origen de los finos de coque.....	12
Ilustración 2. Proceso de clasificación del coque.....	12
Ilustración 3. Pilas de finos de coque .....	13
Ilustración 4. Clasificación del carbón .....	15
Ilustración 5. Clasificación del carbón metalúrgico .....	16
Ilustración 6. Proceso productivo C.I.MILPA S.A. ....	17
Ilustración 7. Proceso de coquización .....	18
Ilustración 8. Clasificación de procesos de manufactura. (Groover, 1997).....	20
Ilustración 9. Gráfica de control. (Groover, 1997).....	29
Ilustración 10. Diagrama de proceso planta de briquetas 10 t/h .....	35
Ilustración 11. Esquema de caldera de lecho fluidizado. (Prieto, 2010) .....	40
Ilustración 12. Proceso de Mezcla de obtención de combustible a partir de los finos de coque	42
Ilustración 13. Mezcla y molienda para coquización .....	44
Ilustración 14. Esquema mezcla con finos de coque .....	46

### Índice de Tablas

Tabla 1. Evaluación de la alternativa de uso como briqueta.....	36
Tabla 2. Evaluación de la alternativa de uso para generación de energía .....	40
Tabla 3. Evaluación de la alternativa de uso como combustible limpio .....	43
Tabla 4. Evaluación de la alternativa de uso en la mezcla para coquizar .....	47
Tabla 5. Valores de S.....	50
Tabla 6. Valores de M40 y M10 .....	50
Tabla 7. Resumen de variables a evaluar.....	52
Tabla 8. Detalle del presupuesto .....	53
Tabla 9. Cronograma .....	53
Tabla 10. Mezcla actual.....	54
Tabla 11. Propiedades de la mezcla actual .....	54
Tabla 12. Parámetros de la coquización .....	55
Tabla 13. Características del coque actual.....	55
Tabla 14. Análisis granulométrico de los finos de coque.....	56
Tabla 15. Resultados de molienda.....	56
Tabla 16. Mezclas para la prueba industrial .....	57
Tabla 17. Propiedades de las mezclas .....	57
Tabla 18. Resultados proceso de coquización.....	57
Tabla 19. Coque obtenido con los ensayos .....	58
Tabla 20. Resultados obtenidos.....	59
Tabla 21. Control del proceso .....	60
Tabla 22. Mejoras en la producción de coque.....	62
Tabla 23. Reducción del costo de producción .....	62
Tabla 24. Aumento de tamaños gruesos de coque .....	63



## Resumen

En este trabajo de investigación se plantea una alternativa de comercialización para los finos de coque, subproducto del proceso de coquización, por medio del diseño de un proceso productivo que permita dar un valor agregado a este producto. A partir del marco teórico se definieron 4 alternativas técnicamente viables para el beneficio de los finos de coque, en las cuales se hace énfasis y se desarrollan, planteando ventajas y desventajas de cada una de ellas. Al final se plantean las hipótesis de la investigación con la alternativa técnica y económicamente más viable para la empresa. Par el desarrollo de la investigación se usaran las herramientas de diseño de productos y procesos así como un planteamiento de las variables a controlar en el proceso diseñado a partir del control estadístico, teniendo siempre presente los parámetros de control de calidad del coque aceptados ampliamente en la industrial a nivel mundial.

Para la confirmación de las hipótesis se plantearon 3 mezclas de carbón que se probaron a nivel industrial en una de las plantas de coquización del a compañía, los resultados obtenidos se compararon con los estándares de la industria y también con los que viene manejando la empresa en su operación normal. Finalmente se seleccionó la mezcla óptima desde el punto de vista de los resultados esperados por la empresa, y a partir de una serie de características con las que se evaluaron las 4 alternativas

Partiendo de la mezcla optima, la implantación del proceso productivo que da valor agregado a los finos de coque, permitirá a la compañía mejorar su flujo de caja y solucionar los problemas que plantea la no comercialización de este producto, teniendo también unas mejoras técnicas en los procesos que se traducen en beneficios económicos para la compañía.

El control estadístico de procesos permitirá tener bajo control los parámetros de calidad de productos y procesos, garantizando que la implementación de este nuevo proceso impacte positivamente en los indicadores de la compañía manteniendo los beneficios proyectados a partir de las pruebas industriales.

Futuros trabajos se deben concentrar en tratar de llegar a otros productos de mayor especificación, usando los finos de coque y produciendo con costos de producción que nos permitan ser competitivos en los mercados del coque a nivel mundial.

## INTRODUCCIÓN

Uno de los grandes retos de los productores de coque en Colombia es lograr competir con la producción del coque Chino, mayor competidor en el terreno internacional, contribuyendo al mejoramiento del medio ambiente en la actividad de producción de coque a través de nuevas tecnologías limpias, mientras se mejoran los indicadores de eficiencia y de rentabilidad de la empresa.

Para el logro del objetivo principal de la investigación y desarrollo del concepto de negocio, debe buscarse en forma armónica el desarrollo de los siguientes conceptos de manera integral:

- Ambiental: Un cambio de paradigma en la producción de coque hacia tecnología limpia, mediante el uso de un subproducto que está impactando negativamente el medio ambiente.
- Eficiencia: Menor cantidad de carbón por unidad de coque, debido a mejoras productivas.
- Calidad: Mayor dureza (M40) y por ende recuperación de tamaños superiores (mejor precio).
- Mejoramiento índice de rentabilidad: Mayores ingresos y eficiencia.

Las ventajas competitivas surgen del punto anterior y se resumen en una mayor generación de ingresos para la empresa a partir del uso de un subproducto que permite operar de manera más eficiente en consumo de carbón y mejorar la calidad del producto final con ventajas ambientales y desarrollo sostenible.

La manera como se ha estructurado la investigación permite dar luces de algunas ventajas competitivas para asumir los nuevos retos tecnológicos y de mercado que debe enfrentar los productores colombianos de coque.

## 1. Problema de Investigación.

### 1.1. Descripción del Problema

El coque se define como el producto sólido de la destilación a alta temperatura y en ausencia de oxígeno de un carbón o mezcla de carbones bituminosos, al cual se le elimina el contenido de volátiles, incrementando el carbono fijo, y adquiriendo unas propiedades especiales para servir de materia prima en la producción de acero en los altos hornos. (Rodríguez, 2000).

Luego de ser producido en los hornos de coquización, el coque sale con una granulometría todo uno, por lo cual debe someterse a un proceso de cribado en donde se clasifica de acuerdo al tamaño de grano, atendiendo los requerimientos del cliente final. En general se considera que un coque que cumple con las especificaciones de coque metalúrgico y que no pasa por una malla de 50 x 50 milímetros es apto para su uso en el alto horno, tamaños de grano que pasen la malla de 50 x 50 mm no son aptos para este uso ya que perjudican la producción del acero.

Las principales características del coque metalúrgico en la producción de acero son las siguientes:

- **Fundente:** Debe tener un poder calorífico alto para lograr fundir el mineral de hierro en el alto horno.
- **Soporte:** Debe tener la suficiente resistencia mecánica para resistir el peso de todo el mineral de hierro en el alto horno.
- **Porosidad:** Debe ser lo suficientemente poroso para permitir el paso del material fundido y gases a través de él.
- **Carbono:** Debe tener un alto contenido de carbono fijo para aportar en la aleación del acero.

Los finos de coque son un subproducto del cribado del coque todo uno en las plantas de coquización; en general se considera finos de coque los tamaños de grano que pasan por una malla con abertura de 5 x 5 milímetros. En este tamaño de partícula se concentran también todas las impurezas del proceso de coquización, por ejemplo: carbón no transformado, refractario de los hornos, cenizas del carbón, etc. (Ver Ilustración 1 y 2)

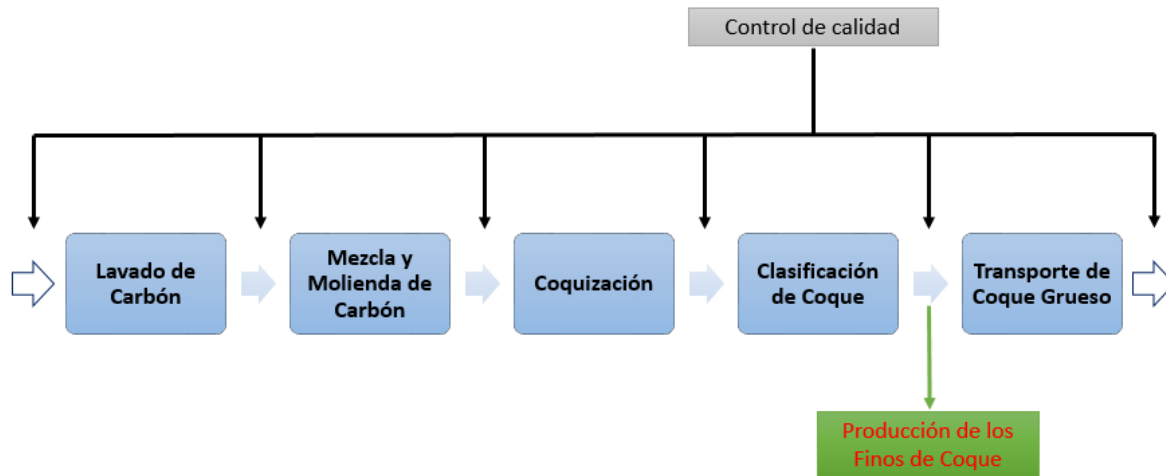


Ilustración 1. Origen de los finos de coque

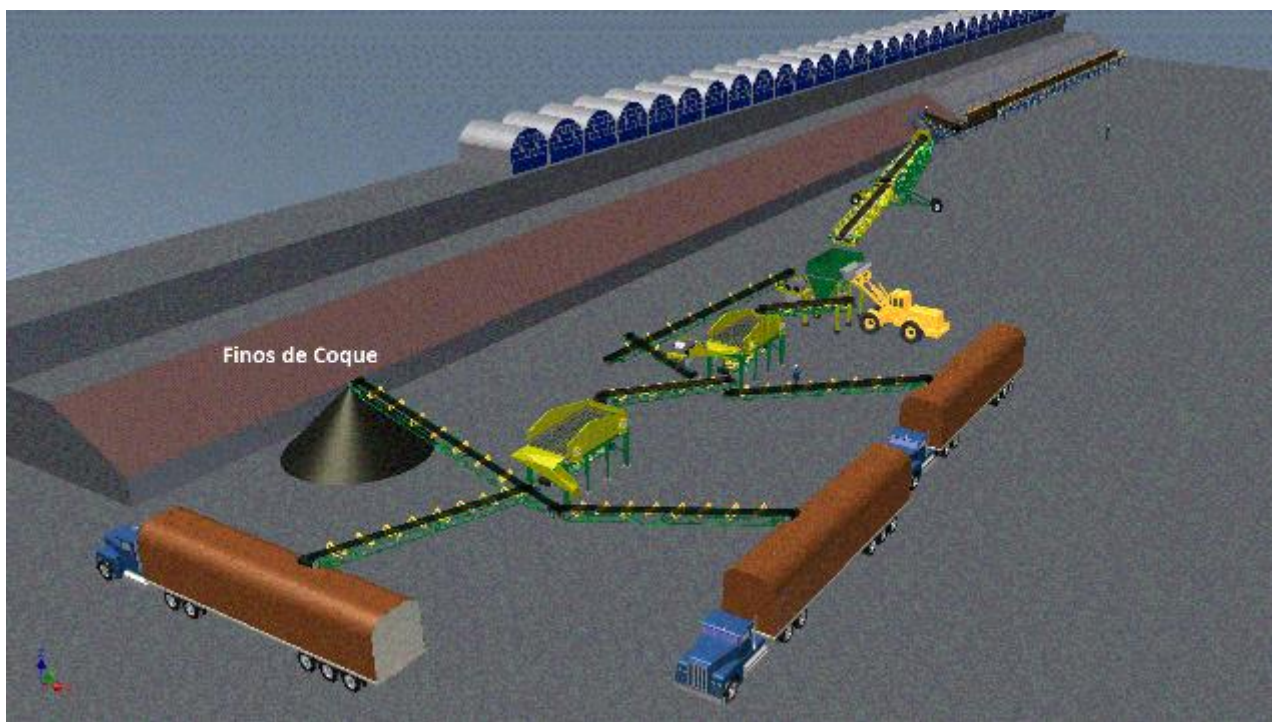


Ilustración 2. Proceso de clasificación del coque

El problema fundamental es que no se encuentra mercado para este subproducto, por lo cual se requiere encontrar un proceso que permita dar un valor agregado a los finos de coque y de esta manera habilite su comercialización o su uso industrial.

En la siguiente fotografía se puede observar una de las pilas de finos de coque que actualmente tiene la compañía



*Ilustración 3. Pilas de finos de coque*

## **1.2. Propósito de la Investigación con Relación al Problema.**

El departamento comercial de la compañía no ha tenido éxito en la comercialización de este producto en las condiciones actuales de producción, el resultado final de este estudio servirá de punto de partida para la toma de una decisión estratégica por parte de la gerencia general, esta decisión involucrará los inventarios disponibles y la producción futura.

Encontrar un proceso que permita dar un valor agregado a los finos de coque, con la expectativa de comercialización o uso industrial.

Esta investigación marcará la ruta para solucionar un problema de inventarios de producto terminado, de flujo de caja y evitara en el futuro un problema ambiental.

### **1.3. Justificación**

En este momento la empresa tiene un inventario de finos de coque de más de 50.000 toneladas almacenadas en los centros productivos; cada mes se producen 1500 toneladas adicionales; darle un valor agregado a este coque y encontrar un uso para este producto, permitirá:

- Dar salida a los inventarios de finos de coque
- Cumplir la política de cero inventarios de producto terminado en nuestras plantas
- Liberar espacio en los centros productivos donde se almacenan los finos de coque
- Dar viabilidad a los planes de aumento de producción de la compañía, ya que de la manera actual los terrenos de la empresa serían insuficientes para almacenar los finos de coque producidos.

Esta investigación involucrará a la gerencia general, planeación, ingeniería, producción, departamento ambiental y comercial de la compañía.

### **1.4. Objetivo General**

Diseñar un proceso productivo que permita dar un valor agregado a los finos de coque.

### **1.5. Objetivos Específicos**

- Realizar una caracterización física y química de los finos de coque.
- Investigar diferentes usos para los finos de coque.
- Elaborar una propuesta técnica para dar valor agregado a los finos de coque que se producen en la compañía.

## **2. Marco teórico**

### **2.1 Contexto organizacional.**

La compañía C.I. MILPA S.A. produce y comercializa coque, atendiendo diferentes mercados en el mundo; el valor y cliente del producto terminado se define a partir del tamaño de partícula siendo el coque grueso (Mas de 50mm) el producto con mejor precio. En la actualidad se tiene una oportunidad de mejora con un producto terminado, que tiene un tamaño menor de 5 mm, el cual se conoce como finos de coque, que no se está comercializando, debido a las características con las que se está produciendo.

El carbón mineral es una roca sedimentaria utilizada como combustible fósil; el cual se puede dividir en varias categorías dependiendo del porcentaje de carbono y del grado de evolución geológica y biológica, como se muestra a continuación (World Energy Council, 2010):

- Carbones de bajo rango
  - Lignito
  - Sub-bituminoso
- Carbón de alta dureza
  - Bituminoso
    - Térmico
    - Metalúrgico
  - Antracita

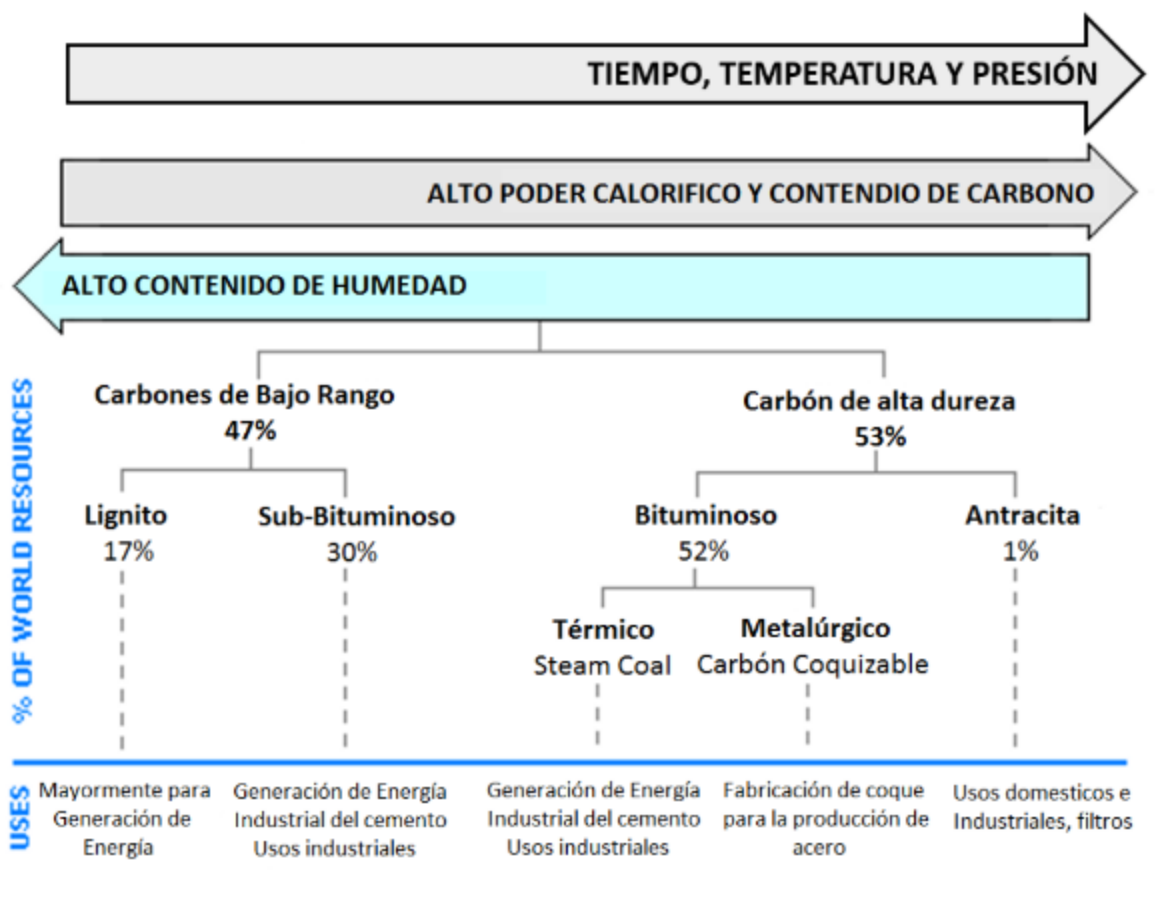
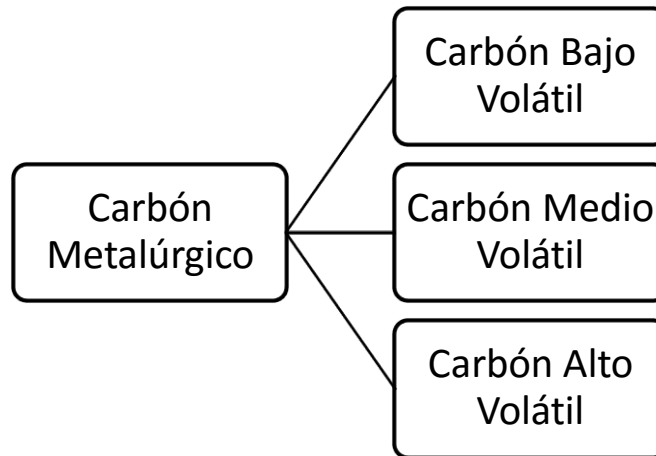


Ilustración 4. Clasificación del carbón



A su vez el carbón metalúrgico tiene una subdivisión a partir de la materia volátil del carbón de la siguiente forma:



*Ilustración 5. Clasificación del carbón metalúrgico*

El coque es un combustible sólido poroso formado a partir de la pirolisis del carbón tipo Hulla – Metalúrgico en hornos de coquización a temperaturas entre 800 y 1300 grados centígrados, este material es usado principalmente para la fabricación de acero en los altos hornos de las siderúrgicas (Nersesian, 2010).

**C.I. MILPA S.A.** es una compañía que se dedica a la explotación, comercialización y transformación de carbón tipo **Hulla – Metalúrgico**; y la producción y comercialización de coque. El proceso productivo se puede resumir como se muestra en la ilustración 1:

- Minería subterránea.

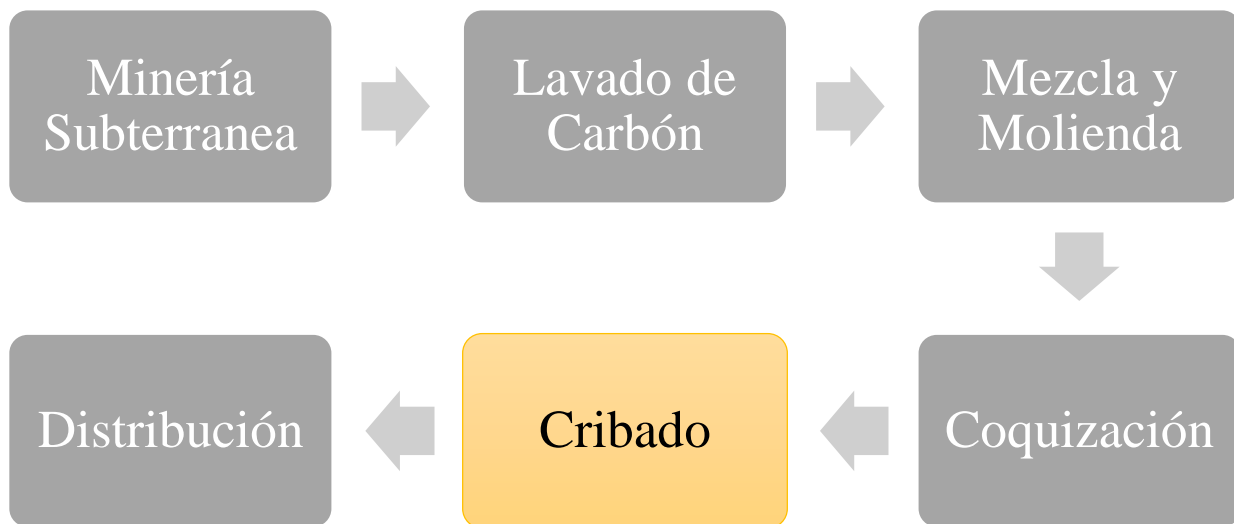
El carbón es explotado en minas subterráneas y sacado a superficie para luego ser llevado a los centros de acopio.

- Lavado de carbón.

Durante el proceso de minado el carbón se mezcla con otros minerales inertes que hacen parte de los techos y pisos de los mantos de carbón, estos minerales afectan la calidad del coque por lo que deben ser retirados, para esto se utilizan las plantas de lavado de carbón, las cuales por medios físico químicos retiran estos materiales inertes y potencian las propiedades del carbón.

- Mezcla y molienda.

Antes de ser llevado a los hornos de coquización el carbón debe cumplir con algunas características físicas y químicas que aseguran la calidad del coque que se producirá, para esto se deben mezclar diferentes tipos de carbón de acuerdo a fórmulas previamente establecidas; una vez mezclado el carbón pasa por un proceso de molienda donde es reducido hasta obtener el tamaño de partícula ideal para producir el coque.



*Ilustración 6. Proceso productivo C.I.MILPA S.A.*

- Coquización.

En este proceso el carbón es cargado en hornos precalentados entre 400-700 grados centígrados, una vez ahí y en ausencia de oxígeno se produce la carbonización del carbón llegando a temperaturas de hasta 1300°C por un periodo de tiempo determinado hasta originar el coque, cuando el proceso termina el coque es enfriado con agua y dispuesto para el siguiente proceso. En las siguientes ilustraciones se puede ver algunas partes del proceso de coquización:



*Ilustración 7. Proceso de coquización*

- Cribado.

El coque bruto producido se debe separar por tamaños de acuerdo al requerimiento del cliente final, esta separación se realiza en cribas o zarandas vibratorias donde se obtienen los siguientes productos:

- Coque 50mm x 150mm
- Coque 5mm x 50mm
- **Coque < 5mm (Finos de coque)**

- Distribución.

Una vez separado por tamaño, el coque es cargado en tracto camiones y llevado a puerto donde se vende FOB al cliente final. Los mercados mundiales de coque, demandan casi todos los productos que se producen en la compañía, el coque 50x150mm corresponde al 75% de la producción total, el coque 5x50mm corresponde al 20%.

Los finos de coque representan el 5% de la producción y equivalen a 1500 toneladas mensuales, este producto en la actualidad no se comercializa, debido a que por sus propiedades físicas (tamaño) y químicas (cenizas), no puede ser usado por los clientes que requieren coque para sus procesos.

## **2.2 Marco Teórico**

### **2.2.1. Diseño de procesos. (Groover, 1997)**

Los procesos de manufactura pueden dividirse en dos tipos básicos:

1. Operaciones de proceso
2. Operaciones de ensamble

Una operación de proceso transforma un material de trabajo de una etapa a otra más avanzada, que lo sitúa cerca del estado final deseado para el producto. Esto le agrega valor al cambiar la geometría, las propiedades o la apariencia del material inicial. Por lo general, las operaciones de proceso se ejecutan sobre partes discretas de trabajo, pero algunas de ellas se aplican también a artículos ensamblados. Una operación de ensamble une dos o más componentes para crear una nueva entidad llamada ensamble, sub-ensamble o cualquier otra manera que se refiera al proceso de unir.

En la siguiente ilustración se presenta una clasificación de los procesos de manufactura:

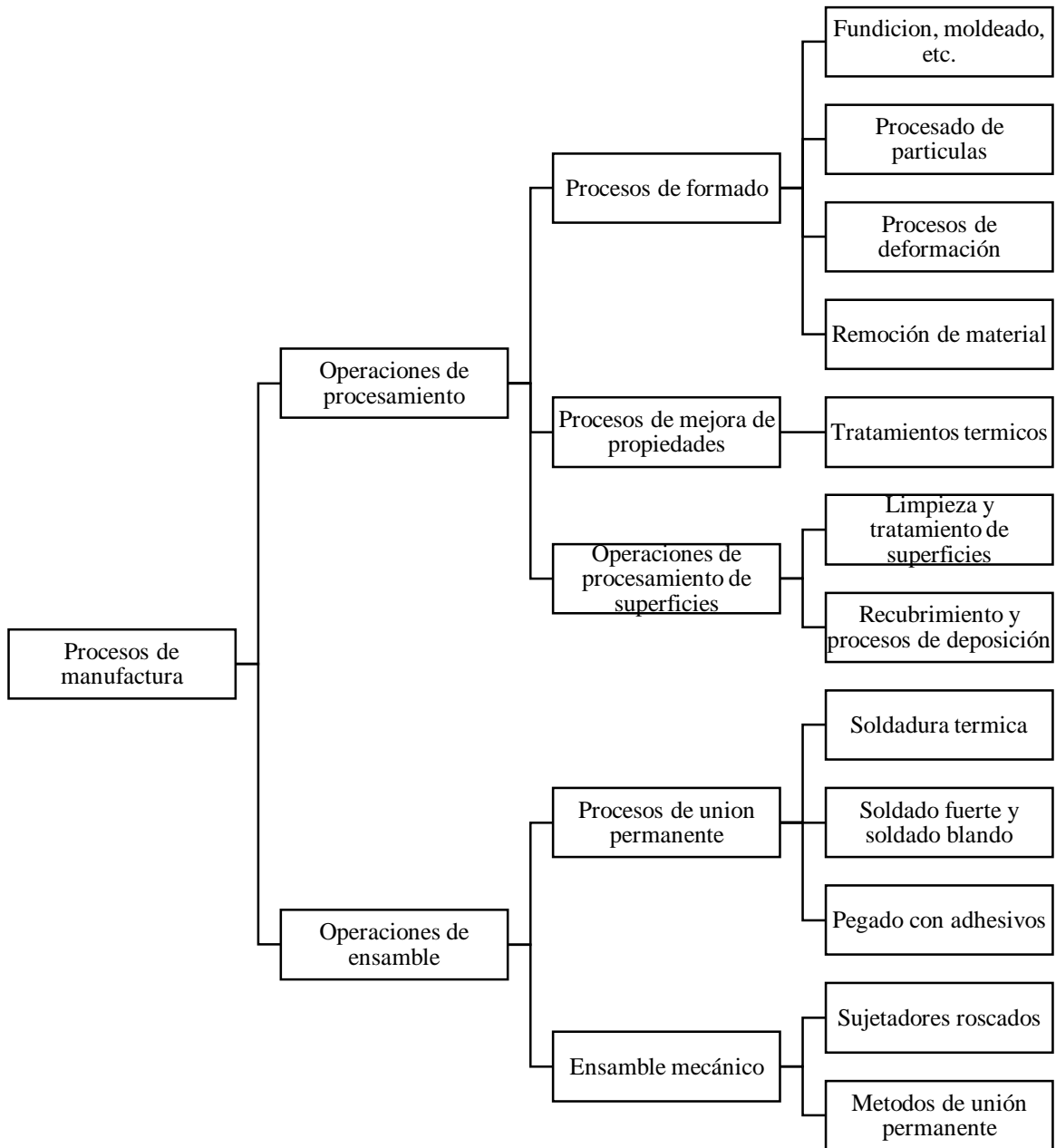


Ilustración 8. Clasificación de procesos de manufactura. (Groover, 1997)

- **Operaciones de procesamiento. (Groover, 1997)**

Una operación de procesamiento utiliza energía para modificar la forma, las propiedades físicas o la apariencia de una pieza, a fin de agregar valor al material. Las formas de la energía incluyen la mecánica, térmica, eléctrica y química. La energía se aplica en forma controlada por medio de maquinaria y herramientas. También se requiere de la energía humana, pero los trabajadores se emplean por lo general para controlar las máquinas, supervisar las operaciones y cargar y descargar las piezas antes y después de cada ciclo de operación. La mayoría de las operaciones de producción generan desperdicios o sobrantes, sea como un aspecto natural del proceso (por ejemplo, remoción de material como en el maquinado) o en forma de piezas defectuosas ocasionales. Un objetivo importante de la manufactura es reducir el desperdicio en cualquiera de esas formas. Por lo general se requiere más de una operación de procesamiento para transformar el material de inicio a su forma final. Las operaciones se llevan a cabo en la secuencia particular que se requiere para alcanzar la geometría y condición definidas por las especificaciones del diseño.

Se distinguen tres categorías de operaciones de procesamiento: 1) operaciones de formado, 2) operaciones de mejoramiento de una propiedad, y 3) operaciones de procesamiento de una superficie. Las operaciones de formado alteran la geometría del material inicial de trabajo por medio de varios métodos. Los procesos comunes de formado incluyen al moldeado, la forja y el maquinado. Las operaciones de mejoramiento de una propiedad agregan valor al material con la mejora de sus propiedades físicas sin cambio de la forma. El ejemplo más común es el tratamiento térmico. Las operaciones de procesamiento de una superficie se ejecutan para limpiar, tratar, recubrir o depositar material sobre la superficie exterior del trabajo. Ejemplos comunes del recubrimiento son el cromado y el pintado.

**Procesos de formado:** La mayor parte de los procesos de formado aplican calor o fuerzas mecánicas o una combinación de ambas para que surtan un efecto en la geometría del material de trabajo. Hay varias maneras de clasificar los procesos de formado. La clasificación tiene cuatro categorías: 1) procesos de moldeado, en los que el material con que se comienza es un líquido calentado o semifluido que se enfría y solidifica para formar la geometría de la pieza; 2) procesos de sinterizado o procesamiento de partículas, en los que los materiales de inicio son polvos, que se forman y calientan con la geometría deseada; 3) procesos de deformación, en los que el material

con que se comienza es un sólido dúctil (metal, por lo común) que se deforma para crear la pieza; y 4) procesos de remoción de material, en los que el material de inicio es un sólido (dúctil o quebradizo), a partir del cual se retira material de modo que la pieza resultante tenga la geometría que se busca. En la primera categoría, el material de inicio se calienta lo suficiente para transformarlo a un líquido o a un estado altamente plástico (semifluido). Casi todos los materiales se pueden procesar de esta manera. Los metales, vidrios cerámicos y plásticos pueden calentarse a temperaturas suficientemente elevadas para convertirlos en líquidos. El material en forma líquida o semifluida se vacía o se le fuerza para que fluya en una cavidad llamada molde, donde se enfría hasta la solidificación, con lo que adopta la forma del molde. La mayoría de procesos que operan de esta manera se denominan fundición o moldeo.

**Procesos de mejoramiento de una propiedad:** El segundo tipo principal de procesamiento de una pieza se lleva a cabo para mejorar las propiedades mecánicas o físicas del material de trabajo. Estos procesos no alteran la forma de la pieza, salvo de manera accidental en algunos casos. Los procesos más importantes de mejoramiento de una propiedad involucran los tratamientos térmicos, que incluyen varios procesos de recocido y templado de metales y vidrios. El sinterizado de metales y cerámicos pulverizados, que se mencionó antes, también es un tratamiento a base de calor que aglutina una pieza de metal pulverizado y comprimido.

**Procesamiento de una superficie:** Las operaciones de procesamiento de una superficie incluyen 1) limpieza, 2) tratamientos de una superficie, y 3) procesos de recubrimiento y deposición de una película delgada. La limpieza incluye procesos tanto químicos como mecánicos para retirar de la superficie suciedad, aceite y otros contaminantes.

- **Operaciones de ensamblado. (Groover, 1997)**

El segundo tipo básico de operaciones de manufactura es el ensamblado, en el que dos o más piezas separadas se unen para formar una entidad nueva. Dichos componentes se conectan ya sea en forma permanente o semipermanente. Los procesos de unión permanente incluyen la soldadura homogénea, soldadura fuerte, soldadura blanda, y unión mediante adhesivos.

- **Líneas de Producción. (Groover, 1997)**

Una línea de producción consiste en una serie de estaciones de trabajo ordenadas para que el producto pase de una estación a la siguiente y en cada ubicación se realice una parte del trabajo total. La velocidad de producción de la línea se determina por medio de su estación más lenta. Las estaciones de trabajo con ritmos más rápidos que el de la estación más lenta estarán limitadas por este cuello de botella. La transferencia del producto a lo largo de la línea por lo general se realiza mediante un dispositivo de transferencia mecánica o sistema de transporte, aunque algunas líneas manuales simplemente pasan entre las estaciones el producto a mano. Las líneas de producción se asocian con la producción masiva. Si las cantidades del producto son muy grandes y el trabajo se va a dividir en tareas separadas que pueden asignarse a estaciones de trabajo individuales, entonces una línea de producción es el sistema de manufactura más apropiado.

- **Líneas de producción automatizadas. (Groover, 1997)**

Las líneas de producción manual utilizan normalmente un sistema de transferencia mecanizado para mover las piezas entre las estaciones de trabajo, pero las estaciones también son operadas por trabajadores. Una línea de producción automatizada consiste en estaciones de trabajo automatizadas, conectadas a un sistema de transferencia de piezas, cuya actuación está coordinada con la de las estaciones. En una situación ideal, no hay trabajadores en la línea, excepto para realizar funciones auxiliares como cambiar herramientas, cargar y descargar piezas al inicio y al final de la línea y actividades de reparación y mantenimiento. Las líneas automatizadas modernas son sistemas integrados que operan bajo el control de una computadora.

- **Planeación de procesos. (Groover, 1997)**

Tradicionalmente, la planeación de procesos es realizada por ingenieros en manufactura que conocen los procesos particulares que se usan en la fábrica y son capaces de leer dibujos de ingeniería. Con base en su conocimiento, capacidad y experiencia, llevan a cabo los pasos de procesamiento que se requieren en la secuencia más lógica. Con frecuencia, algunos de estos detalles se delegan a especialistas, como diseñadores de herramientas; pero la responsable por dichos detalles es la ingeniería de manufactura. A continuación se enlistan varios detalles y decisiones que por lo general se incluyen dentro del ámbito de la planeación de procesos:



**Procesos y secuencias.** El plan del proceso debe describir brevemente todos los pasos de procesamiento que se usan en la unidad de trabajo (por ejemplo, ensamble de piezas), así como el orden en el cual se realizan.

**Selección del equipo.** En general, la ingeniería de manufactura pretende implantar planes de procesos que utilicen equipo existente. Cuando esto no es posible, debe comprarse el componente en cuestión o debe instalarse equipo nuevo en la planta.

**Herramientas, dados, moldes, soportes y calibradores.** El planificador del proceso debe decidir qué herramientas necesita cada proceso. El diseño de estos artículos por lo general se delega al departamento de diseño de herramientas y la fabricación se realiza en un taller de herramientas.

**Herramientas de corte y condiciones de corte para las operaciones de maquinado.** Éstas las especifica el planificador de procesos, el ingeniero, el encargado de taller o el operador de máquinas, con frecuencia de acuerdo con las recomendaciones de un manual estándar.

**Métodos.** Los métodos incluyen movimientos de la mano y el cuerpo, distribución del lugar de trabajo, herramientas pequeñas, grúas para levantar piezas pesadas. Deben especificarse métodos para operaciones manuales (por ejemplo, ensamble) y las partes manuales de los ciclos de maquinado (como cargar y descargar una máquina para la producción). La planeación de métodos ha sido tradicionalmente el ámbito de los ingenieros industriales. El énfasis actual en los equipos de trabajo auto dirigidos y la adquisición de poder de los trabajadores hicieron que gran parte de las responsabilidades del análisis de métodos de los ingenieros pasaran a los trabajadores que deben realizar las tareas.

**Estándares de trabajo.** Se aplican técnicas de medición del trabajo para establecer estándares de tiempo para cada operación.

**Estimación de los costos de producción.** Con frecuencia lo realizan estimadores de costos con ayuda del planificador de procesos.

**Manejo de materiales.** Debe considerarse el problema de mover materiales y el trabajo en proceso dentro de la fábrica.

Distribución de la planta y diseño de instalaciones. Por lo general, esto es responsabilidad del departamento de ingeniería de la planta que trabaja con la ingeniería de manufactura.

- **Directrices y consideraciones para decidir los procesos y su secuencia en la planeación del proceso. (Groover, 1997)**

**Requerimientos de diseño.** La secuencia de procesos debe satisfacer las dimensiones, tolerancias, acabados de superficies y otras especificaciones establecidas por el diseño de productos.

**Requerimientos de calidad.** Deben seleccionarse procesos que satisfagan los requerimientos de calidad en términos de tolerancias, integridad de las superficies, consistencia y capacidad de repetición, y otras medidas de calidad.

**Volumen y velocidad de producción.** El proceso debe ser capaz de cumplir el volumen y la velocidad requerida de producción. ¿Se encuentra el producto en la categoría de producción baja, mediana o alta? El volumen y la velocidad de producción influyen de gran manera en los procesos y los sistemas de manufactura.

**Procesos disponibles.** Si el producto y sus componentes se van a hacer en forma interna, el planificador debe seleccionar, en lo posible, los procesos y el equipo disponible en la fábrica.

**Utilización del material.** Es conveniente que la secuencia de procesos use en forma eficiente los materiales y reduzca el desperdicio. Cuando sea posible, deben seleccionarse procesos de formas netas o casi netas.

**Restricciones de precedencia.** Son requerimientos de secuencia tecnológica que determinan o restringen el orden en el cual se realizan los pasos del procesamiento.

**Superficies de referencia.** Ciertas superficies de la pieza deben formarse (generalmente mediante maquinado) casi al principio de la secuencia a fin de que funcionen como superficies de ubicación para otras dimensiones que se formarán después.

**Minimizar la preparación.** Debe minimizarse la cantidad de preparaciones separadas de máquinas. Cuando sea posible, las operaciones deben combinarse en la misma estación de trabajo. Esto ahorra tiempo y reduce el manejo de materiales. Esta directriz se aplica principalmente a operaciones secundarias.

**Eliminar pasos innecesarios.** La secuencia de procesos debe planearse con la cantidad mínima de pasos de procesamiento. Deben evitarse las operaciones innecesarias y pedirse cambios en el diseño para eliminar características que no son absolutamente necesarias, y por ende suprimir los pasos de procesamiento asociados con dichas características.

**Flexibilidad.** Cuando sea posible, el proceso debe ser suficientemente flexible para adoptar cambios en el diseño de ingeniería. Con frecuencia esto es un problema cuando deben diseñarse

herramientas especiales para producir la pieza; si se cambia el diseño de la pieza, la herramienta especial puede resultar obsoleta.

**Seguridad.** La seguridad de los trabajadores debe considerarse en la selección de un proceso. Esto tiene un buen sentido económico y es una ley.

**Costo mínimo.** La secuencia de procesos debe ser el método de producción que satisfaga todos los requerimientos anteriores y también obtenga el costo de producto más bajo posible.

- **Capacidad del proceso. (Groover, 1997)**

En cualquier operación de manufactura existe variabilidad en el resultado del proceso. En una operación de maquinado, que es uno de los procesos más exactos, las piezas maquinadas pueden parecer idénticas, pero una inspección más cercana revela diferencias de dimensiones de una pieza con la siguiente. Las variaciones en la manufactura se dividen en dos tipos: aleatorias y asignables.

**Las variaciones aleatorias:** Son causadas por muchos factores: la variabilidad humana con cada ciclo de operaciones, las variaciones en las materias primas, la vibración de las máquinas, etc. En forma individual, estos factores tal vez no representen mucho, pero colectivamente los errores pueden acumularse en forma significativa para provocar problemas, a menos que estén dentro de las tolerancias de la pieza. De manera típica, las variaciones aleatorias forman una distribución estadística normal. El resultado del proceso tiende a agruparse alrededor del valor de la media, en términos de la característica de calidad del producto de interés (por ejemplo, la longitud y el diámetro). Una gran proporción de la población de piezas se centra alrededor de la media, mientras que menos piezas se alejan de ella. Cuando las únicas variaciones en el proceso son de este tipo, se dice que el proceso está en control estadístico. Este tipo de variabilidad continuará mientras el proceso opere en forma normal. Cuando el proceso se desvía de esta condición de operación normal aparecen las variaciones del segundo tipo.

Las variaciones asignables indican una excepción de las condiciones de operación normales. Ha ocurrido algo en el proceso que no está considerado dentro de las variaciones aleatorias. Entre las razones de las variaciones asignables están los errores de los operadores, las materias primas defectuosas, las fallas en las herramientas, los desperfectos de las máquinas, etcétera. Las variaciones asignables en la manufactura por lo general se delatan a sí mismas al causar que el

resultado se desvíe de la distribución normal. El proceso ya no está en control estadístico. La capacidad del proceso se relaciona con variaciones normales inherentes en el resultado cuando el proceso está en control estadístico. Por definición, la capacidad del proceso es igual a más o menos 3 desviaciones estándar alrededor del valor de la media del resultado (un total de seis desviaciones estándar):

$$PC = \mu \pm 3\sigma$$

En donde PC es igual a la capacidad del proceso;  $\mu$  es igual a la media del proceso, que se establece como el valor nominal de la característica del producto y  $\sigma$  es igual a la desviación estándar del proceso. Los supuestos subyacentes en esta definición son: 1) el resultado se distribuye en forma normal y 2) se ha obtenido una operación estable y el proceso está en control estadístico. Bajo estos supuestos, el 99.73% de las piezas producidas tendrán valores en el resultado que caen dentro del  $\pm 3.0\sigma$  desde la media.

- **Diseño Robusto. (Groover, 1997)**

Un propósito fundamental del control de calidad es minimizar las variaciones. Taguchi denomina a las variaciones como factores de ruido. Un factor de ruido es una fuente de variaciones que es imposible o difícil de controlar y que afecta las características funcionales del producto. Pueden distinguirse tres tipos de factores de ruido: 1) unidad a unidad, 2) internos y 3) externos.

**Los factores de ruido de unidad a unidad** consisten en variaciones aleatorias inherentes al proceso o al producto, provocadas por la variabilidad en materias primas, maquinaria y participación humana. Éstos son factores de ruido que ya se han llamado previamente variaciones aleatorias en el proceso. Se asocian con un proceso de producción que está en control estadístico.

**Los factores de ruido internos** son fuentes de variaciones internas en el producto o proceso. Incluyen factores que dependen del tiempo, como el desgaste de los componentes mecánicos, el desperdicio de las materias primas y la fatiga de las piezas metálicas; y los errores operativos, como las especificaciones incorrectas del producto o la máquina herramienta.

**Un factor de ruido externo** es una fuente de variación que es ajena al producto o proceso, como la temperatura externa, la humedad, el abastecimiento de materia prima y el voltaje de entrada. Los factores de ruido internos y externos constituyen lo que antes se ha denominado variaciones asignables.

**En el diseño robusto**, el funcionamiento y rendimiento del producto son relativamente insensibles a las variaciones del diseño y los parámetros de manufactura. Involucra tanto el diseño del producto como el diseño del proceso para que el producto manufacturado casi no resulte afectado por todos los factores de ruido.

- **Control estadístico de procesos. (Groover, 1997)**

El control estadístico de procesos implica el uso de métodos estadísticos para valorar y analizar las variaciones en un proceso. Los métodos incluyen simplemente mantener registros de los datos de la producción, histogramas, análisis de capacidad del proceso y gráficas de control. Estas últimas constituyen el método de mayor uso.

El principio subyacente en las gráficas de control es que las variaciones en cualquier proceso se dividen en dos tipos 1) variaciones aleatorias, que son las únicas presentes si el proceso está en control estadístico y 2) variaciones asignables, que indican una salida del control estadístico. El objetivo de una gráfica de control es identificar cuándo el proceso ha salido de control estadístico, señalando así que debe tomarse alguna acción correctiva.

Una gráfica de control es una técnica gráfica en la cual se trazan estadísticas calculadas a partir de valores medidos de ciertas características del proceso durante un periodo, a fin de determinar si el proceso sigue bajo control estadístico. La forma general de una gráfica de control se ilustra en la Ilustración 3. La gráfica consiste en tres líneas horizontales que permanecen constantes con el tiempo: una central, un límite de control inferior (LCL, por sus siglas en inglés) y un límite de control superior (UCL, por sus siglas en inglés). La línea central generalmente se establece en el valor nominal de diseño. Los límites de control superior e inferior se establecen en  $\pm 3$  desviaciones estándar de las medias de muestra.

Es poco probable que una muestra obtenida del proceso se encuentre fuera de los límites de control superior o inferior, mientras las operaciones están en control estadístico. Por lo tanto, si

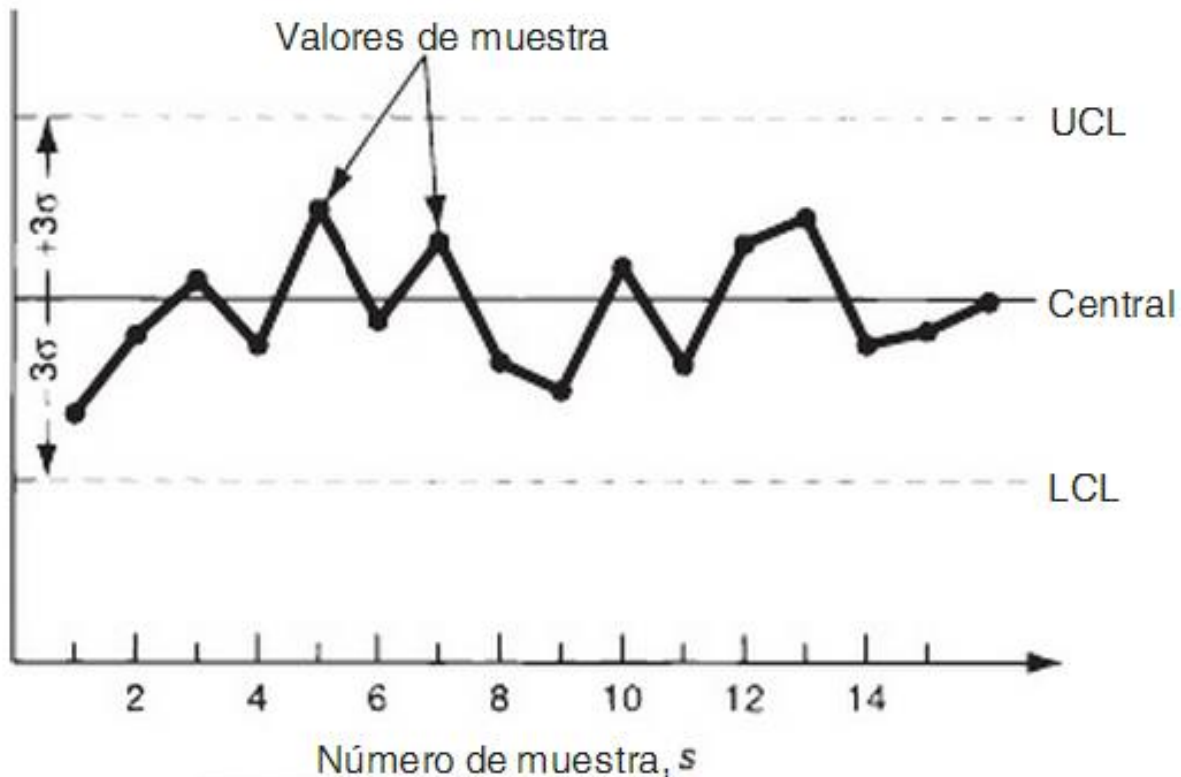


Ilustración 9. Gráfica de control. (Groover, 1997)

Un valor de muestra cae fuera de estos límites, se interpreta que el proceso está fuera de control. Por consiguiente se realiza una investigación para determinar la razón de la condición fuera de control, con acciones correctivas convenientes para eliminar tal condición. Por las mismas razones, si el proceso se encuentra en control estadístico y no hay evidencias de tendencias no deseadas en los datos, no deben hacerse ajustes, puesto que introducirían una variación asignable en el proceso. En las gráficas de control, es aplicable la filosofía de “si no se rompe, no lo arregles”.

Existen dos tipos básicos de diagramas de control: 1) gráficas de control por variables y 2) gráficas de control por atributos. Las gráficas de control por variables requieren una medición de la característica de calidad que interesa. Las gráficas de control por atributos simplemente requieren la determinación de si una pieza es defectuosa o cuántos defectos hay en la muestra.

### **2.2.2. Valor agregado de producto. (Rojas, 2013) (Equihua, 2011)**

Valor agregado o valor añadido, es una característica o servicio extra que se le da a un producto o servicio con el fin de darle un mayor valor en la percepción del consumidor, generalmente se trata de una característica o servicio extra poco común o poco usado por los competidores, y que le da a la empresa o negocio cierta diferenciación.

El concepto de agregar valor de la visión sistémica explica el proceso de creación de riqueza. Agregar valor es crear riqueza para el cliente y en consecuencia para toda la comunidad. Presupone ponerse en el lugar del cliente y ser competitivos. El gran reto de alcanzar nuevos mercados, es que seamos capaces de mejorar nuestros procesos para abordarlos con éxito. Para poder agregar valor hay que darle un enfoque sistémico a los procesos. Asimismo la sinergia juega un rol fundamental en dicha aditividad.

El valor agregado forma parte de aquel valor que se le añade al producto en cada una de las etapas del proceso productivo, es decir, la totalidad de los ingresos de que se apropian los responsables por los factores implicados en la producción

La palabra valor, tiene dos significados diferentes, pues a veces expresa la utilidad de un objeto particular y otras, la capacidad de comprar otros bienes, capacidad que deriva de la posesión del dinero. Al primero lo podemos llamar ‘valor de uso’ y al segundo, ‘valor de cambio.

El valor de los productos (valor agregado) se eleva de manera incremental, lo cual puede discriminarse, contabilizarse, medirse y permite establecer el costo de lo fabricado, lo que a su vez tiene una relación relativa con el precio en el mercado. Es posible precisar tres aspectos dentro del proceso de incremento del valor.

Tipo de trabajo que agrega valor:

- Cuando se diseña o crea
- Durante su fabricación
- Durante su distribución y comercialización
- Al desecharlo y potencialmente reciclarlo

**Calidad del trabajo que agrega valor:** Existen diferentes calidades de trabajo derivadas de las distintas experiencias, conocimientos y habilidades de los involucrados, así como de los medios (tecnología) utilizados durante el trabajo.

**Secuencia en la que el trabajo agrega valor:** Para fabricar cada producto existe una serie de pasos relacionados con el tipo de trabajo requerido; cada paso puede ser identificado y tipificado, también puede medirse el tiempo parcial de cada paso y el total de la secuencia, sin olvidar los recursos necesarios involucrados.

Con relación al espectro de valores agregados nos preguntamos: ¿cuál es el primer valor que se agrega a un artículo o producto? Sin duda la respuesta sería el diseño del producto.

El diseño industrial como actividad generadora de valor en la secuencia de adición de valor, es el primero que se agrega; el tipo es intangible y la calidad es variable, ya que depende de los conocimientos, las habilidades y destrezas de quien o quienes diseñen; lo cual tiene una relación directa con la cualidad innovadora (diferente o menos igual a lo que ya existe) cuando se diseña un producto. Para comprender mejor la idea del valor agregado por el diseño industrial proponemos cuatro categorías diferentes, en cada una de las cuales es posible identificar su efecto o efectos, así como la manera de medir dicho efecto.

- **Valor estético:** Tiene efecto en la emociones y en la voluntad, por ello en la conducta/comportamiento de los consumidores «las emociones cambian la manera en que pensamos y sirven de guías constantes para un comportamiento apropiado, nos alejan de lo malo y nos guían hacia lo bueno, las emociones ayudan en la toma de decisiones. Sirve para diferenciar al producto. También gracias a sus propiedades estéticas los productos adquieren valor de signo por su capacidad de representar. El valor estético produce deleite o placer en los observadores y varía en intensidad; tiene manifestaciones en la conducta de los consumidores o poseedores de los objetos. Es un valor subjetivo-cualitativo.
- **Valor ergonómico:** Tiene efecto en la comodidad y seguridad de los usuarios, es percibido por la eficacia en el vínculo sistémico usuarios-objeto-entorno y resuelve las relaciones entre los tres componentes integrados en un sistema. Es objetivo-cuantitativo, porque puede medirse por su eficiencia para reducir la incomodidad y la inseguridad.



- **Valor práctico o utilitario:** Es el origen del producto, su núcleo y la respuesta a la necesidad del usuario, tiene efecto posibilitando el objetivo o actividad que el usuario desempeña y se basa en el principio práctico que le permite realizar una tarea determinada. Es objetivo-cuantitativo. Se mide por su adecuación o inadecuación para cumplir su objetivo, en otras palabras por su eficacia.
- **Valor productivo.** Tiene efecto en el aprovechamiento racional y eficiente de los recursos industriales, materiales y procesos de manufactura disponibles; se relaciona con el volumen de fabricación del producto y con el costo de producción deseado. Es objetivo-cuantitativo. Se mide por la eficacia productiva en función de las ganancias de la empresa.

Los cuatro valores del diseño del producto deben responder, hasta donde sea posible, a la problemática planteada en la información del mercado por su efecto en el costo de producción y en el precio percibido. Los cuatro valores resueltos o mejorados y con cierto grado de innovación son, en suma, el trabajo que realiza el diseñador para incrementar el valor del producto. El resultado de las ideas y del proceso creativo de diseño se visualiza en la forma del objeto cuando éste se concreta y los usuarios pueden tener el producto en sus manos, momento en el que perciben su valor de uso en términos prácticos y el valor de cambio en términos monetarios. Lo que definitivamente influirá en la satisfacción de los usuarios-consumidores y claro está, en el volumen de ventas y en su precio en el mercado.

El producto o artículo terminado es tangible. Idealmente lo adquirirán los consumidores, pero en un principio fue intangible, cuando a partir de la intención de una empresa se identificó una necesidad-demanda de los usuarios-consumidores; se generaron ideas y conceptos, se diseñó y desarrolló para producirlo con los medios industriales al alcance. Ese antecedente, la necesidad-deseo<sup>14</sup> de un mercado, está constituido por un cúmulo de información en desorden e indeterminación que el diseñador se encargará de ordenar y finalmente determinar, con cierto grado de innovación, lo cual sucede durante el proceso proyectual cuando el diseñador imagina, configura y materializa la forma de un producto-objeto.

Actualmente el proceso de diseño de un producto no debe ser llevado a cabo de manera unilateral por el o los diseñadores. Sin duda la integración de un equipo multidisciplinario es el caldo de

cultivo imprescindible para configurar/diseñar las mejoras o un producto nuevo. Dentro del equipo el grupo multidisciplinario el diseñador contribuye con su trabajo, con gasto metabólico/calórico, agregando el primer valor a un producto antes de su fabricación, pues hasta este punto es intangible (bocetos, dibujos, manuales o digitales, especificaciones, etc.). Sólo será tangible cuando sea fabricado, conformando los materiales en operaciones sucesivas, durante las cuales serán adicionados otros valores.

Hemos dicho que en la cadena productiva el primer valor agregado a un producto es el diseño, esto será cierto en la medida que el consumidor-objetivo perciba tal valor y se sienta satisfecho de haber seleccionado y adquirido el producto. La elección la hace pensando en cuál de todos los productos disponibles le ofrece más valor. El consumidor consigue beneficios y asume costos. Los beneficios incluyen beneficios funcionales y beneficios emocionales. Los costos incluyen costos monetarios, costos en tiempo, costos en energía y costos psicológicos.

Para dar valor agregado a un producto se deben responder las siguientes preguntas:

- ¿Qué se quiere hacer?
- ¿Qué se necesita para hacer lo que se quiere?
- ¿Cómo lo se hace?
- ¿Lo que se quiere hacer es útil para quién?
- ¿Cómo y a quien se vende?
- ¿Cuál es el objetivo al hacer ese producto o servicio?

Para generar valor en un producto se debe escuchar y responder la voz del cliente final, de esta forma a partir de sus expectativas se pueden diseñar productos y procesos exitosos.

### **2.2.3. Finos de Coque, usos y aplicaciones en la industria.**

Los finos de coque son un desafío para la industria minera que se dedica a la producción de coque; en los últimos años se ha innovado con diferentes alternativas de uso a lo largo de todo el mundo; a partir de la investigación en bases de datos y la experiencia de otras empresas del sector en todo el mundo, los usos más representativos se presentan a continuación:

- **Briquetas:** Como se presentó antes en este documento el valor del coque incrementa proporcionalmente con el tamaño de partícula, la fabricación de briquetas con los finos de coque consiste en reagrupar el coque aplicando presión y un aglutinante para de esta forma aumentar el tamaño y potenciar su uso en diferentes procesos.
- **Generación de energía:** La tecnología de quema de combustibles de bajo poder calorífico en calderas de lecho fluidizado permiten usar los finos de coque para generar calor, y posteriormente generar energía eléctrica, en este caso se hace uso del poder calorífico de este combustible.
- **Combustible:** Consiste en mezclar los finos de coque con un carbón de alto poder calorífico y luego someter la mezcla a un proceso de beneficio que le de viabilidad a su uso en procesos que requieran generar calor a partir de un combustible sólido. (Secado)
- **Materia prima en la mezcla para coquizar:** El coque se obtiene a partir de una mezcla de carbones con diferentes calidades; la alternativa de uso de los finos en la mezcla consiste en reemplazar parte del carbón usado en la mezcla por finos de coque.

#### 2.2.3.1.Fabricación de briquetas.

Las briquetas de coque son un combustible, que se obtienen a partir de la compactación de finos de coque (tamaños menores a 5mm), con la ayuda de un aglutinante. La forma de la briqueta es variable dependiendo la maquinaria utilizada para fabricarla, algunas de sus propiedades son:

- Densidad es mayor que la del coque sin briqueteado
- Bajas emisiones al fundir en los altos hornos
- Alta dureza
- Homogéneas

Cuando pequeñas partículas de materiales solidos se prensan juntas para moldear formas coherentes de mayor tamaño, a ese proceso se le denomina briqueteado.

En la ilustración 6 se muestra el diagrama de proceso típico de una planta para la fabricación de briquetas.

El proceso inicia cuando el coque con tamaños menores de 5 milímetros es llevado a una tolva principal, esta alimenta a una banda transportadora con control de velocidad que permite controlar el flujo de carga que ingresa a la planta.

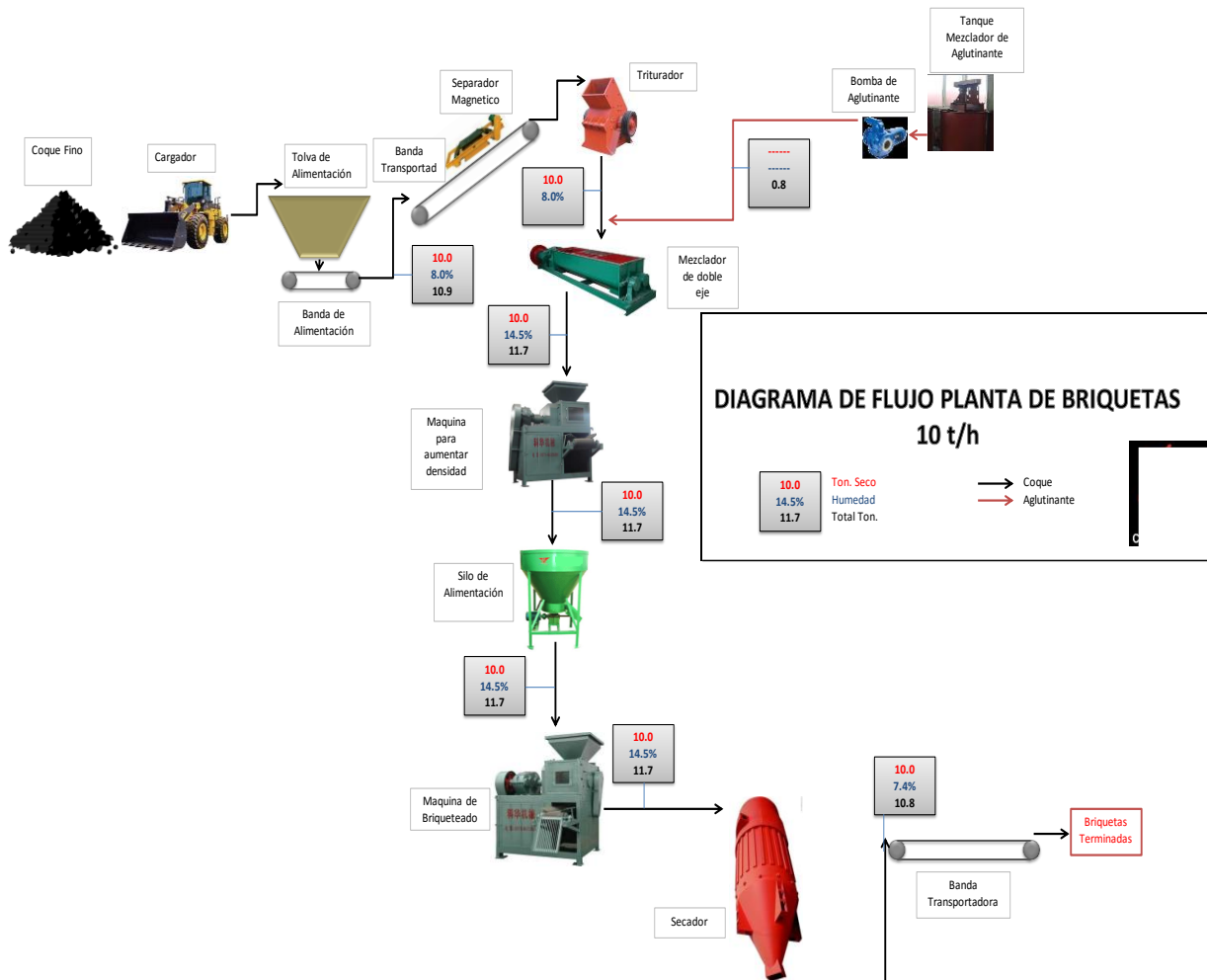


Ilustración 10. Diagrama de proceso planta de briquetas 10 t/h

Todo el material debe ser reducido en tamaño 100% pasante malla de 3 milímetros, por esta razón luego de ser dosificado el flujo es llevado a una trituradora para cumplir con este requerimiento; después de ser triturado se lleva a un mezclador de doble eje donde el coque se mezcla homogéneamente con el aglutinante este último en una proporción de 6 a 8% porcentaje en peso.

Luego de pasar por el mezclador, el producto es llevado a una máquina para aumentar la densidad, este equipo retira el aire de la mezcla lo que permite una disminución del volumen, y una preparación óptima para el briqueteado.

Posteriormente la mezcla homogénea se almacena en un silo provisto de un sistema de alimentación, que dosifica la materia prima a la briqueteadora, donde dos rodillos le dan la forma final a la briqueta. Luego de esto el producto terminado es llevado a un horno de secado vertical donde se le retira la humedad dándole la dureza y consistencia final.

### **Ventajas.**

- Se obtiene un producto final de buenas especificaciones que tiene un uso potencial procesos que requieran de un combustible sólido.

### **Desventajas.**

- El uso del aglutinante es intensivo por lo que se requiere un proveedor local que pueda atender la demanda de este aditivo sin incrementar el costo de producción.
- Desarrollo de nuevo producto, los clientes tendría que modificar procesos para poder usarlo

*Tabla 1.*

*Evaluación de la alternativa de uso como briqueta*

Dificultad de aplicación	Inversión Inicial	Costo del Proceso	Potencial Comercial	OBSERVACIONES
Media	Media	Medio	Bajo	Se requiere el desarrollo de un nuevo producto y encontrar el proveedor del aglutinante.

### **2.2.3.2. Generación de energía eléctrica.**

Esta aplicación consiste en el uso de los finos de coque como combustible de una caldera para generación de energía mediante el uso de calderas de lecho fluidizado.

La combustión en lecho fluido (LF), aunque conocida desde hace tiempo, solo se ha aplicado a la producción de vapor en las últimas tres décadas, desarrollándose dos familias de lechos, según que la combustión tenga lugar a presión atmosférica (lecho fluido burbujeante y lecho fluido circulante) o a presión superior a la atmosférica (lecho fluido presurizado, ya en la segunda generación).

El resultado es una gama completa de calderas de lecho fluido probadas, fiables y eficientes, que compite con éxito frente a otras tecnologías. En las calderas de lecho fluido, la combustión se produce de forma controlada en todo el hogar y sistema de recirculación (ciclones) de forma que el tiempo de residencia de las partículas en ignición es muy superior al de las calderas convencionales de carbón pulverizado, con temperaturas que no suelen superar los 850 °C, mucho más bajas que las que se dan en el interior del hogar de las calderas convencionales. Al no alcanzarse las temperaturas de ablandamiento y fusión de cenizas, no se producen fenómenos de formación de escorias en el hogar.

Esto permite la utilización de combustibles pobres de bajo poder calorífico y asegura una gran flexibilidad desde el punto de vista de utilización de otros combustibles distintos del de diseño. Además, la temperatura de combustión se encuentra por debajo de la de formación de óxidos de nitrógeno de origen térmico, lo que limita la producción de este agente contaminante, conocido como NOX el cual es altamente controlado por la legislación Colombiana.

El termino fluidización, se emplea para describir un tipo de proceso o fenómeno, consistente en el contacto entre solidos (granos) y fluidos, de modo que las partículas sólidas aparecen suspendidas en el fluido, que se mueve a través del lecho formado por dichas partículas en dirección vertical y en sentido ascendente. El lecho fluido se comporta de modo similar a un líquido.

Se puede describir imaginando un cilindro vertical que contiene un lecho poroso formado por un material granular, por ejemplo arena, que se encuentra apoyada sobre una placa perforada y por el

que puede circular un fluido en sentido ascendente. Al introducir el combustible, este permanece en suspensión y en contacto con el aire caliente produciendo una ignición uniforme y completa. En la caldera se introducen los serpentines que llevarán el líquido que se quiere evaporar, el gas caliente entra en contacto con el serpentín más no con el líquido transfiriendo el calor al líquido y evaporándolo.

**Ventajas:**

- Debido a la intensa agitación existente en un lecho gas-sólido, la distribución de temperaturas es mucho más uniforme que en un lecho fijo o móvil, llegando a condiciones casi isotérmicas.
- El tamaño de partículas es de un orden de magnitud menor que en un lecho fijo o móvil, aumentando la superficie de contacto gas-sólido y disminuyendo la resistencia a la difusión de los productos sólidos.
- El carácter de comportamiento similar a un líquido que presenta un lecho fluido hace que sea muy fácil la incorporación o extracción de sólidos.
- La velocidad de transferencia de calor entre el gas y las partículas es mayor que en los lechos fijos.
- Debido a las altas velocidades de transferencia de calor entre las partículas y el gas, los lechos fluidos permiten una más fácil recuperación del calor contenido en los sólidos residuales.
- Debido a la fuerte agitación que caracteriza a los lechos fluidos, los coeficientes de transferencia de calor entre el lecho y superficies de calefacción son mayores que los correspondientes a lechos fijos o móviles.
- La posibilidad de circulación de sólidos entre dos lechos fluidos hace posible transportar grandes cantidades de calor, que permiten compensar el calor consumido o producido en grandes reactores.
- Flexibilidad en la utilización de combustibles diversos; todo tipo de carbones, coque, madera, residuos industriales combustibles, etc.
- Permite la eliminación de desechos combustibles, evitando los gastos y riesgos de vertidos o almacenamiento de los mismos.

- Permite la utilización de combustibles de baja calidad, de alto contenido en cenizas y azufre y combustibles pobres.
- No necesita de un combustible muy selectivo, aceptando todo tipo de tamaños, hasta 50 mm.
- Baja temperatura de combustión, reduciéndose sus efectos sobre los materiales y la operación de la caldera (aproximadamente 850 °C, 900 °C).
- Debido a la baja temperatura de combustión, no se funden las cenizas, facilitándose su evacuación y manejo.
- Las cenizas pueden extraerse por la base del lecho (cenizas de fondo), en los ciclones y en los filtros de limpieza de los gases (cenizas volantes).
- Mejora de la transferencia de calor, al poder disponer de tubos vaporizadores en el lecho y/o en las paredes de la cámara de combustión.
- Se logra una buena homogeneización de temperatura del lecho, por la rapidez de la mezcla. Es casi isotérmico, lo que optimiza la eficiencia térmica.
- Alta eficiencia de combustión y alto rendimiento de la caldera.

**Desventajas.**

- Inversión inicial elevada para una aplicación industrial.
- Poca cantidad de finos de coque para esta aplicación

En la ilustración 7 se presenta el esquema de una caldera con lecho fluidizado.



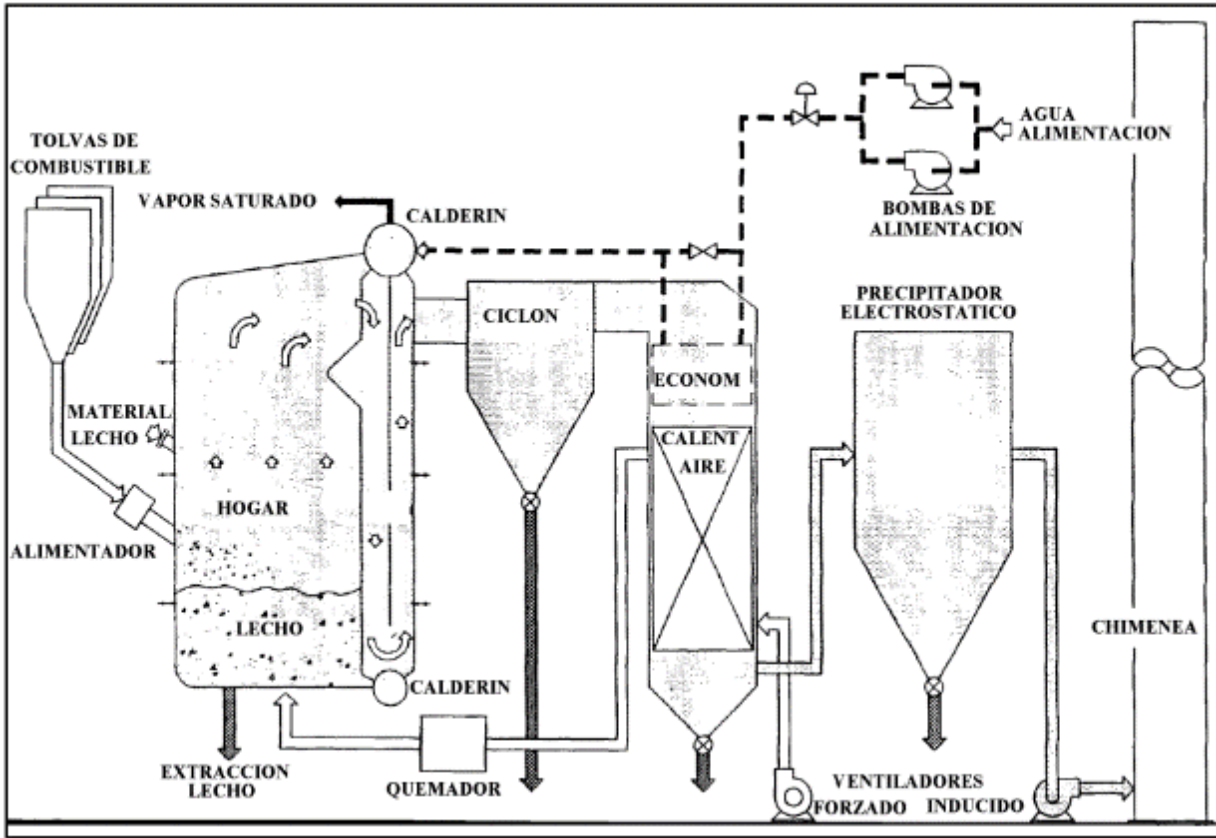


Ilustración 11. Esquema de caldera de lecho fluidizado. (Prieto, 2010)

Tabla 2.

Evaluación de la alternativa de uso para generación de energía

Dificultad de aplicación	Inversión Inicial	Costo del Proceso	Potencial Comercial	OBSERVACIONES
Alta	Alta	Bajo	Alto	Poca materia prima para una aplicación a escala industrial

### 2.2.3.3. Combustible.

Cuando el carbón se convierte en coque elimina más del 95% de la materia volátil en un proceso controlado que evita las emisiones al medio ambiente, una vez el coque es formado se mantiene la propiedad del poder calorífico, esto hace que el coque sea un combustible idóneo para ser utilizado

en procesos que requieran de combustibles sólidos, ya que la emisión de contaminantes es mínima debido a que se retiraron en el proceso de la coquización.

Es económicamente inviable usar coque grueso con tamaños mayores de 5mm como combustible sólido, pero algunas empresas utilizan finos de coque mezclados con otro combustible de poder calorífico alto generalmente carbón térmico, en sus procesos de calentamiento, reduciendo en gran medida la contaminación generada.

El proceso se describe en la ilustración 8. Inicialmente los finos de coque se llevan a un secador industrial donde se elimina la humedad hasta que se obtenga un valor por debajo de 3% porcentaje en peso, luego los finos se mezclan con carbón térmico para alcanzar un poder calorífico superior a 7000 kcal/kg, la mezcla es llevada a un circuito de molienda donde se reduce el tamaño de partícula por debajo de 2mm.

**Ventajas.**

- Se disminuyen las emisiones en los procesos que utilicen la mezcla

**Desventajas.**

- Se debe realizar una inversión inicial alta en equipos para obtener la mezcla
- Se requieren carbones térmicos con poder calorífico alto; y la integración de estos proveedores al proceso, siendo difícil encontrar un proveedor confiable en la zona.
- Bajo consumo de los finos de coque, debido a los pocos procesos que podría utilizar el combustible producido.

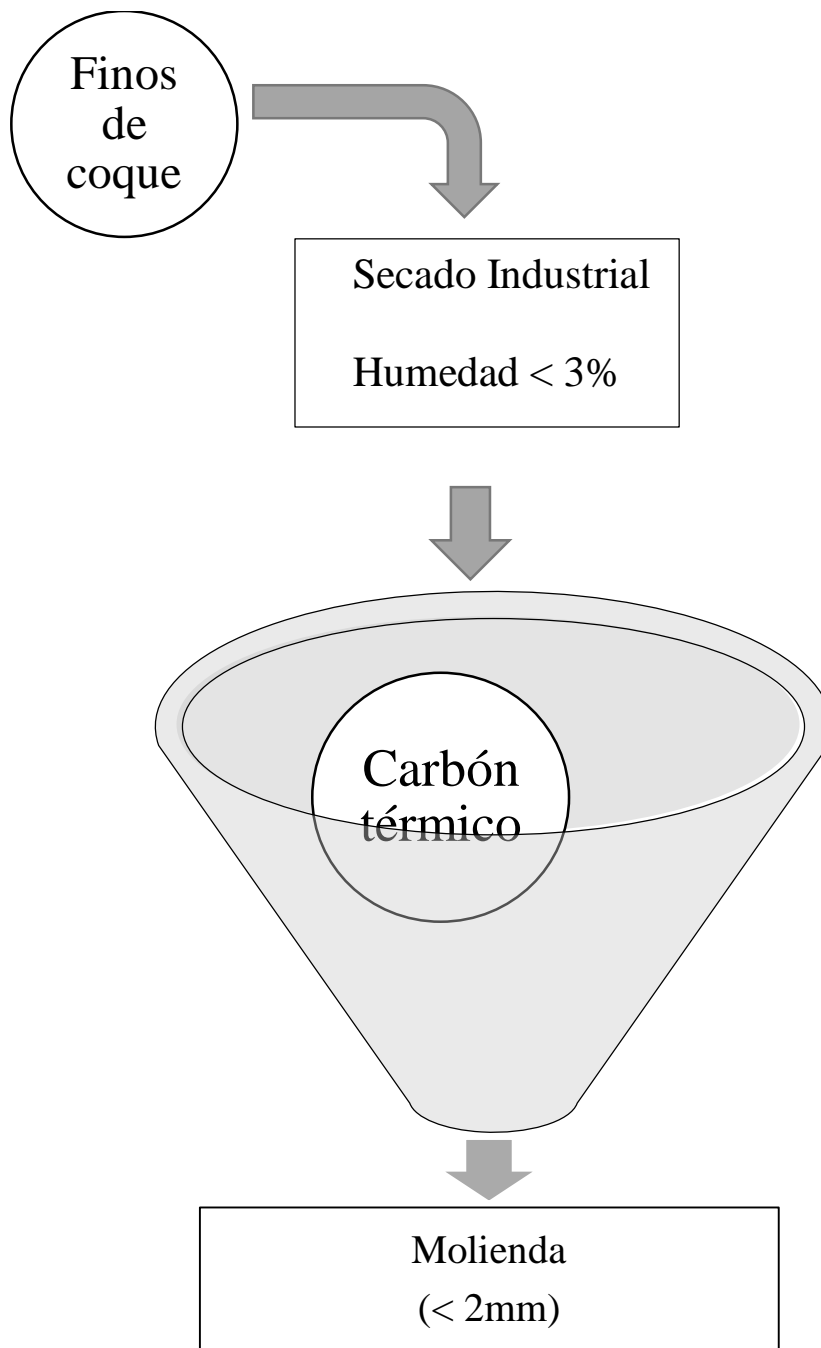


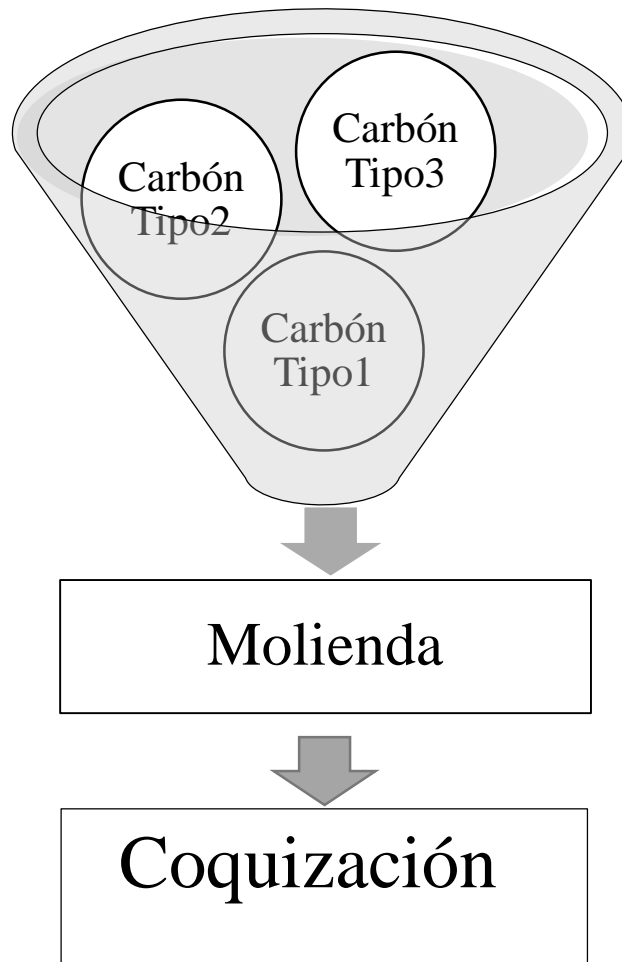
Ilustración 12. Proceso de Mezcla de obtención de combustible a partir de los finos de coque

*Tabla 3.**Evaluación de la alternativa de uso como combustible limpio*

Dificultad de aplicación	Inversión Inicial	Costo del Proceso	Potencial Comercial	OBSERVACIONES
Baja	Media	Bajo	Bajo	Mercado pequeño y dominado por coques de menor calidad.

#### **2.2.3.4. Materia prima en la mezcla para coquizar**

El coque se produce a partir de una mezcla de diferentes tipos de carbones coquizables, luego de ser mezclados los carbones se someten a un proceso de molienda, donde se reduce el tamaño de partícula hasta 100% pasante malla de 4mm cuadrados. En la ilustración 4 se presenta un esquema del proceso para la obtención de la mezcla de coquización.



*Ilustración 13. Mezcla y molienda para coquización*

El uso de los finos de coque en la mezcla de carbones antes de la coquización consiste en reemplazar parte del carbón de la mezcla por finos de coque, estos finos deben cumplir con unas características físicas y químicas específicas que se describen a continuación:

- Cenizas: Menos de 15% porcentaje en peso
- Materia Volátil: Menos de 10% porcentaje en peso
- Humedad : Menos de 15% porcentaje en peso

El proceso para el uso de los finos de coque en la mezcla de carbón se muestra en la ilustración 5 y se describe a continuación:

1. El material se somete una molienda en donde se reduce su granulometría hasta 100% pasante malla de 3mm cuadrados.
2. Luego de tener el tamaño de partícula requerido se adiciona a la mezcla normal de carbones a razón de 15% porcentaje en peso.
3. La mezcla se homogeniza en la molienda junto con los carbones usados normalmente y posteriormente se lleva a los hornos para continuar con el proceso de coquización.

**Beneficios.**

- Se utiliza un material subutilizado en las plantas (léase finos de coque)
- Se da un valor a los finos de coque, igual al carbón coquizable
- El ciclo del proceso de coquización aumenta

**Desventajas.**

- Se requiere mayor temperatura en los hornos de coquización

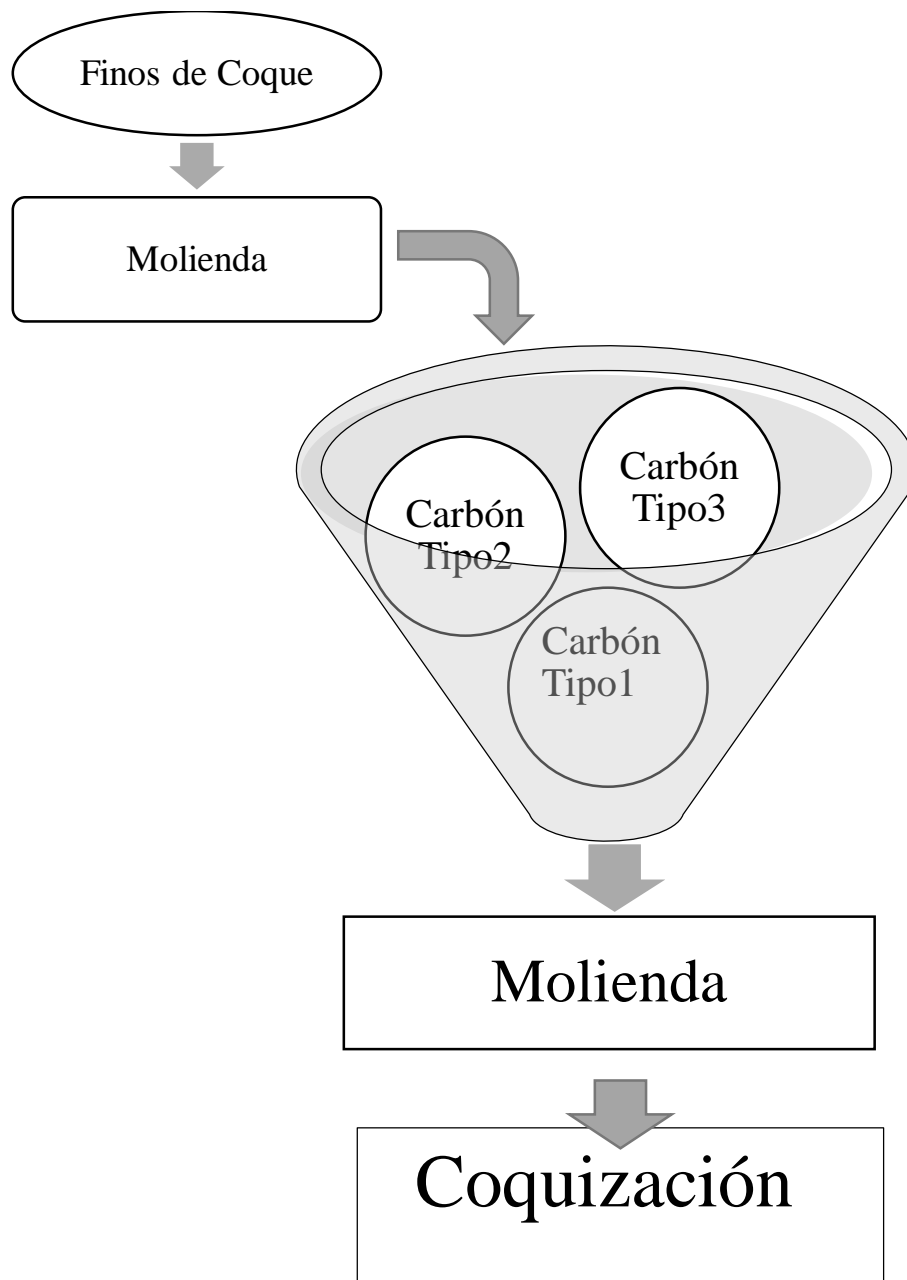


Ilustración 14. Esquema mezcla con finos de coque

Tabla 4.

*Evaluación de la alternativa de uso en la mezcla para coquizar*

Dificultad de aplicación	Inversión Inicial	Costo del Proceso	Potencial Comercial	OBSERVACIONES
Baja	Baja	Bajo	Alto	En pruebas de laboratorio, la adición de finos mejorar algunas propiedades del proceso.

### 2.3. Consideraciones a partir del marco teórico.

- Luego de investigar las innovaciones que se han realizado en el mundo para dar uso a los finos de coque, se encontraron 4 usos técnicamente viables.
- La alternativa de las Briquetas es técnicamente y económicamente viable, sin embargo representa un desafío para el departamento de comercialización, ya que se tendría que salir al mercado con un producto nuevo, para el cual los clientes tendrían que realizar modificaciones a sus procesos para el uso de este producto, por esta razón esta alternativa se descarta.
- La alternativa de la generación de energía se descarta debido a la poca cantidad de materia prima para esta aplicación y al nivel de inversión tan alto que se requeriría para esta opción.
- El uso de los finos como combustible se descarta debido a la baja demanda para el producto resultante.
- La mejor alternativa para desarrollar en la compañía es la utilizar los finos de coque en la mezcla de coquización, se selecciona esta alternativa porque es la que presenta el mejor costo beneficio para la compañía, costo en la implantación y beneficios en el producto obtenido.
- Con la implementación de los finos de coque en la mezcla se tendrá una baja dificultad de implementación, inversión inicial baja, bajo costo del proceso, y un potencial de comercialización para los finos y para el producto final obtenido.
- Se planteó desarrollar una prueba a escala industrial para comprobar el efecto de los finos de coque en el proceso de coquización y en el coque producido.



- Para el desarrollo de la prueba se seleccionó una de las plantas de coquización de la empresa, Planta Santo Tomas.
- Se realizaron pruebas en esta planta con los finos de coque para evaluar el impacto que generará en la compañía la selección de esta alternativa.
- Los porcentajes que se usaron en las mezclas de prueba fueron de 10, 15 y 20% respectivamente.
- Los datos de las mezclas, procesos y productos se tabularon para encontrar el porcentaje de mezcla óptimo.
- Al final se evaluarán las alternativas de mezcla y se determinará cual es la que representa un mayor beneficio para la compañía

### **3. Diseño Metodológico**

#### **3.1 Definición del tipo de trabajo**

El tipo de trabajo que se desarrollara es experimental, una vez identificada la alternativa del uso de los finos de coque en la mezcla de coquización, se deben realizar pruebas a escala industrial para determinar el impacto que tendrá en la compañía el uso de esta alternativa como solución al problema de esta materia prima.

#### **3.2 Unidad de análisis.**

La prueba se realizará en la planta de hornos Santo Tomas, propiedad de C.I. MILPA S.A. los resultados que se obtengan en esta planta serán representativos para la producción total de la compañía, se elige esta planta porque es la que permite tener un mayor control de todas las variables que intervienen en la investigación, y su producción corresponde al 30% de la producción total (180.000 toneladas de coque por año). Esta planta está compuesta por 100 hornos con capacidad de 20 toneladas cada uno.

Es necesario y de acuerdo a la experiencia previa en la operación de los hornos, que la mezcla se trabaje por 15 días de producción.

Los finos de coque se adicionaran a la mezcla a razón de 10, 15 y 20%, esto corresponde a se trabajará cada mezcla durante 5 días y al final de los ensayos se determinará por medio de los resultados cual es la mejor proporción para aplicarla en toda la producción.

### 3.3 Variables: descripción y medida de las variables.

- **Ensayo Micum** : Consiste en someter una muestra de 50 kg de trozos de coque producido con la mezcla, de tamaños superiores a 50 mm a un movimiento de rotación dentro de un tambor metálico de un metro de diámetro y un metro de longitud, provisto de cuatro aletas longitudinales. Al cabo de 100 vueltas, efectuadas en cuatro minutos, se determina la granulometría del producto resultante estableciéndose, con cribas de agujeros redondos, las categorías superiores a 40 mm y 20 mm y la inferior a 10 mm, expresadas en tanto por ciento del peso original. De acuerdo con este ensayo **la abrasividad** del coque puede representarse por el porcentaje de tamaños inferiores a 10 mm.

$$A = M_{-10}$$

En tanto que fragilidad puede caracterizarse por el porcentaje de tamaños comprendidos entre 40 mm y 10 mm, o sea:

$$F = M_{-40} - M_{-10}$$

Teniendo en cuenta que, en relación con el comportamiento del coque y la marcha del alto horno, la abrasividad es más perjudicial que la fragilidad, la solidez del coque puede expresarse, a partir de los valores A y F por una fórmula de tipo:

$$S = 100 - F - b * A$$

Siendo b un coeficiente superior a la unidad que, en la práctica, se toma igual a 2.5.

Sustituyendo en esta fórmula este valor de b y poniendo en lugar de A y F sus valores se obtiene, teniendo en cuenta que:

$$100 - M_{-40} = M_{+40}:$$

$$S = M_{+40} - 1.5 M_{-10}$$

El valor de S deducido del ensayo Micum sirve para clasificar los coques, en relación con su comportamiento en el horno alto, con arreglo de la siguiente forma:

Tabla 5.

*Valores de S*

<b>Calidad del Coque</b>	<b>Valor de S</b>
Mala	Menor de 50
Mediocre	Entre 50 y 60
Mediana	Entre 60 y 68
Buena	Entre 68 y 73
Excelente	Entre 73 y 77

Con arreglo a esta clasificación, los valores normales de M+40 (denominada simplemente Índice Micum) y de M-10 de las diferentes categorías de coque son los siguientes:

Tabla 6.

*Valores de M40 y M10*

	<b>Micum 40</b>	<b>Micum 10</b>
Mala	Menor de 60	Mayor de 9
Mediocre	60 – 72	9 – 7.8
Mediana	72 – 78	7.8 – 7.2
Buena	78 – 82	7.2 – 6
Excelente	82 - 85	Menor de 6

La fragilidad del coque es debida principalmente a su estado de fisuración, en tanto que la abrasividad es consecuencia de una fusión incipiente. El coque siderúrgico debe pues estar, a la vez, poco fisurado y bien fundido; ambas propiedades relacionadas por la expresión:

$$F = 100 - M_{+40} - A_{-10}$$

En este estudio se usaran como referencia los ensayos de Micum 40 y 10 para determinar la calidad del coque producido con la mezcla, y para saber si cumple con los estándares de calidad de la compañía. Estas variables se medirán todos los días que dure el ensayo tomando una muestra representativa y analizándola en el laboratorio de la compañía para determinar su valor.

- **Porcentaje de coque con tamaño mayor a 50mm:** Consiste en determinar la cantidad de Coque mayor de 40mm que se obtiene a partir del coque todo uno proveniente de los hornos de coquización, esta recuperación se determina en la criba.

El total de coque producido durante los 15 días del ensayo se determinara por medio de bascula el peso total del coque obtenido, posteriormente se pesará la cantidad de coque mayor de 50mm que obtiene luego de seleccionar el coque en la zaranda vibratoria; el porcentaje de coque con tamaño mayor a 40mm será igual al peso total del coque mayor de 50mm dividido por el total del coque obtenido en los hornos. Esta variable se controlará diariamente y deberá estar por encima de 75%.

- **Porcentaje de rendimiento de los hornos:** Corresponde a determinar la cantidad de coque que se obtiene en cada horno, a partir de la cantidad de mezcla de carbón con la que fue cargado el horno.

Se obtiene tomando el peso del coque producido en cada horno, dividido por el peso del carbón con el cual fue cargado el horno previamente descontando las humedades. Esta variable se medirá diariamente y para cada horno, deberá ser mayor de 70%.

- **Tiempo de ciclo de coquización:** Determina el tiempo que tarda el carbón en convertirse en coque dentro del horno de coquización, generalmente este tiempo se mide en horas y estará influenciado por parámetros como la temperatura de los hornos, la materia volátil de la mezcla de carbón y la cantidad de carga de mezcla de carbón que se pone en el horno al inicio del ciclo.

En resumen las variables a medir durante los ensayos se muestran en la siguiente tabla:

Tabla 7.

*Resumen de variables a evaluar*

<b>PARAMETRO</b>	<b>VALOR ACTUAL</b>	<b>META</b>
Micum 40	83%	> 82%
Micum 10	5.5%	< 6 %
Tiempo de ciclo de Coquización	80 horas	< 80 horas
% Coque >50mm	75%	> 75%
Rendimiento de Hornos %	70%	> 70%

**3.4 Fuentes y recolección de la información**

Las fuentes de recolección de la información serán:

- Las planillas diarias de operación de la planta de hornos
- Los informes diarios de laboratorio
- Los reportes diarios de bascula
- Los indicadores de gestión de la planta de hornos

**3.5 Métodos de procesamiento y análisis de la información.**

La información se procesara utilizando una hoja de cálculo de Microsoft Excel.

**3.6 Recursos, presupuesto y cronograma**

Los recursos para la realización del proyecto serán asumidos por la compañía.

La empresa asigno un presupuesto de \$100.000.000 para la realización del ensayo industrial, de esta cantidad la molienda de los finos de coque representa el 70% del presupuesto, ya que este servicio debe ser subcontratado con un tercero. El 30% restante se usará de para cubrir los demás gastos que se puedan generar en el prueba. El resumen del presupuesto se muestra en la siguiente tabla:

Tabla 8.

*Detalle del presupuesto*

	<b>Cantidad</b>	<b>Valor Unitario</b>	<b>Valor Total</b>
Molienda finos de coque	1600 t	\$ 43,750	\$ 70,000,000
Analisis Proximos de Carbones	15	\$ 150,000	\$ 2,250,000
Analisis Proximos de Coques	15	\$ 200,000	\$ 3,000,000
Analisis de Micum en Coques	15	\$ 500,000	\$ 7,500,000
Gastos de desplazamiento	Global	\$ 5,000,000	\$ 5,000,000
		Sub Total	\$ 87,750,000
		Imprevistos	\$ 12,250,000
		<b>TOTAL</b>	<b>\$ 100,000,000</b>

El cronograma propuesto es el siguiente:

Tabla 9.

## Cronograma

	Semana 1	Semana 2	Semana 3	Semana 4	Semana 5	Semana 6
Molienda de finos (tercero)						
Preparación y socialización de la prueba						
Prueba industrial						
Recolección de información						

Semana 1: Del 4/02/2013 al 10/02/2013

Semana 2: Del 11/02/2013 al 17/02/2013

Semana 3: Del 18/02/2013 al 24/02/2013

Semana 4: Del 25/02/2013 al 03/03/2013

Semana 5: Del 4/03/2013 al 10/03/2013

Semana 6: Del 11/03/2013 al 17/03/2013

#### 4. Resultados de la investigación

##### 4.1. Antecedentes de la producción.

En la actualidad la mezcla de carbones que ingresan a los hornos de coquización está compuesta como se muestra en la siguiente tabla:

Tabla 10.

*Mezcla actual*

<b>TIPO DE CARBÓN</b>	<b>% EN PESO</b>
CARBÓN TIPO C1	35%
CARBON TIPO F5	45%
CARBÓN TIPO Z4	20%

Las propiedades físicas y químicas de la mezcla se muestran en la siguiente tabla:

Tabla 11.

*Propiedades de la mezcla actual*

<b>PARAMETRO</b>	<b>VALOR</b>
Cenizas %	11%
Materia volátil %	27%
Índice de Hinchamiento	5
Humedad Total %	7%
Tamaño partícula	90% Menor 4mm

En cuanto al proceso de coquización se tienen los siguientes parámetros:

Tabla 12.

*Parámetros de la coquización*

<b>PARAMETRO</b>	<b>VALOR</b>
Tiempo de ciclo de coquización	80 horas
Temperatura del horno	1000 – 1100 °C
Rendimiento de coquización	70%

El coque obtenido tiene las siguientes especificaciones:

Tabla 13.

*Características del coque actual*

<b>PARAMETRO</b>	<b>VALOR</b>
Cenizas %	13%
Materia volátil %	2.0%
Humedad Total	5%
Micum 40	83%
Micum 10	5.5%
Tamaño 50 x 150mm (%)	75%
Tamaño 5 x 50mm (%)	20%
Tamaño Menor de 5mm (%)	5%

#### **4.2. Caracterización de los finos de coque.**

Se toma una muestra representativa de finos de coque de lo que se tiene en inventario, la muestra fue de 2000 toneladas que se usaran para realizar las pruebas de coquización a escala industrial.

Esta muestra seleccionada para las pruebas fue caracterizada en los laboratorios de la compañía, los resultados del muestreo se muestran en la siguiente tabla:



Tabla 14.

*Análisis granulométrico de los finos de coque*

Malla (# Tyler)	Abertura (mm)	Cenizas (%)	Peso (g)	Retenido (%)	Ret. Acum. (%)	Pas. Acum. (%)
---	10	19.89	130	3.05	3.05	96.95
---	6.00	22.20	390	9.15	12.21	87.79
4	4.75	22.68	260	6.10	18.31	81.69
8	2.36	25.21	680	15.96	34.27	65.73
14	1.18	22.71	540	12.68	46.95	53.05
60	0.25	22.84	1900	44.60	91.55	8.45
+60	+0.25	25.79	360	8.45	100	0.00

Una vez caracterizados, los finos se llevaron a un proceso de molienda, usando un molino de martillos, los datos de los finos después de la molienda se muestran en la siguiente tabla:

Tabla 15.

*Resultados de molienda*

<b>PARAMETRO</b>	<b>VALOR</b>
Cenizas %	20.0%
Materia volátil %	4.0%
Humedad Total %	5%
Tamaño partícula	90% Menor 3mm

**4.3.Resultados de las pruebas a escala industrial.**

Con las diferentes mezclas se realizaron pruebas a escala industrial durante 5 días continuos de producción. Los finos de coque se llevaron primero a una molienda primaria, donde se redujo su tamaño a 90% pasante malla de 3mm. Los resultados de estos ensayos se muestran a continuación:

Las mezclas de carbones que ingresaron a los hornos de coquización se realizaron como se muestra en la siguiente tabla:

Tabla 16.

*Mezclas para la prueba industrial*

<b>TIPO DE CARBÓN</b>	<b>Prueba 1</b>	<b>Prueba 2</b>	<b>Prueba 3</b>
CARBÓN TIPO C1	31.5%	29.8%	28.0%
CARBÓN TIPO F5	40.5%	38.2%	36.0%
CARBÓN TIPO Z4	18.0%	17.0%	16.0%
<b>Finos de Coque</b>	<b>10.0%</b>	<b>15.0%</b>	<b>20.0%</b>

Las propiedades físicas y químicas de las mezclas se muestran en la siguiente tabla:

Tabla 17.

*Propiedades de las mezclas*

<b>PARAMETRO</b>	<b>Prueba 1</b>	<b>Prueba 2</b>	<b>Prueba 3</b>
Cenizas %	10.8%	11.3%	11.5%
Materia volátil %	27.2%	26.8%	26.5%
Indice de Hinchamiento	6	5	4
Humedad Total %	7%	7%	7%
Tamaño partícula	90% Menor 4mm	90% Menor 4mm	90% Menor 4mm

En cuanto al proceso de coquización los datos se muestran en la siguiente tabla:

Tabla 18.

*Resultados proceso de coquización*

<b>PARAMETRO</b>	<b>Prueba 1</b>	<b>Prueba 2</b>	<b>Prueba 3</b>
Tiempo de ciclo de coquización	80 horas	77 horas	76 horas
Temperatura del horno	1000 – 1100 °C	1000 – 1100 °C	1000 – 1100 °C
Rendimiento de coquización	71.3%	72.0%	72.5%

El coque obtenido con las tres mezclas tuvo las siguientes especificaciones:

Tabla 19.

*Coque obtenido con los ensayos*

<b>PARAMETRO</b>	<b>Prueba 1</b>	<b>Prueba 2</b>	<b>Prueba 3</b>
Cenizas %	12.8%	13.2%	13.5%
Materia volátil %	2.0%	1.8%	1.5%
Humedad Total	5.0%	5.0%	5.0%
Micum 40	83.2%	84.0%	82%
Micum 10	5.5%	5.0%	6.0%
Tamaño 50 x 150mm (%)	75.4%	78.0%	76.5%
Tamaño 5 x 50mm (%)	18.3%	18.0%	18.0%
Tamaño Menor de 5mm (%)	6.3%	4.0%	5.5%

#### **4.4. Análisis de resultados.**

A partir de los resultados de las pruebas podemos determinar que la mejor mezcla es la que se realizó en la prueba #2, por esta razón esta mezcla es industrialmente viable para ser implementada en la compañía.

Los datos comparativos de la producción actual y la producción con la mezcla #2 usando los finos de coque se muestran en la tabla siguiente.

Tabla 20.

*Resultados obtenidos*

<b>PARAMETROS</b>	<b>Producción Normal (Ton.)</b>	<b>Producción con Finos de Coque (Ton.)</b>
Cantidad de Mezcla de Carbón necesaria Año	228,571	231,481
Rendimiento de coquización	70.00%	72.00%
Coque Producido Año	160,000	166,667
Carbón tipo C1 \$/ton	\$100,000	\$100,000
Carbón tipo F5 \$/ton	\$95,000	\$95,000
Carbón tipo Z4 \$/ton	\$90,000	\$90,000
Finos de Coque \$/ton	\$40,000	\$40,000
Mezcla de Carbón \$/ton	\$97,750	\$87,390
Costo Proceso de Coquización / ton coque	\$45,000	\$45,000
Precio Coque Todo Uno \$/ton	\$203,929	\$183,875
Tamaño coque 50x100mm	75%	78%
Costo de Cribado de coque \$/ton	\$6,000	\$6,000
Costo de Producción coque 50x100mm \$/ton	\$279,905	\$243,429

#### **4.5. Proceso productivo para los finos de coque.**

A partir de los resultados obtenidos en las pruebas el proceso productivo para los finos de coque se describe a continuación:

1. Transportar los finos hasta la estación de molienda
2. Alimentar la tolva de la planta de molienda
3. Dosificar el material
4. Realizar la molienda en el molino de martillos
5. Recoger el material molino y llevarlo hasta la planta de dosificación de la mezcla
6. Dosificar los finos junto con los 3 tipos de carbones
7. Homogenizar en la planta de molienda de mezcla
8. Realizar el proceso de coquización

### 9. Realizar el proceso de cribado.

Las variables que se deben controlar durante el proceso son las siguientes:

Tabla 21.

#### *Control del proceso*

<b>VARIABLE</b>	<b>VALOR MINIMO</b>	<b>VALOR MAXIMO</b>
% Mayor a 3mm en la molienda de los fino	5%	10%
% Alimentación finos de coque en la mezcla	14.5%	15.5%
% Cenizas en los finos de coque	15%	21%
% Materia volátil en los finos de coque	3%	6%

## **5. Discusión y conclusiones.**

Luego de realizar el proceso investigativo se encontró un proceso viable para dar uso a los finos de coque, este proceso permitirá resolver un problema de inventarios de producto terminado en la compañía, y por otra parte aportara algunos beneficios a la producción actual.

Podemos dividir los resultados obtenidos en 3 categorías:

### **5.1.Técnicos.**

- Podemos concluir que la alternativa del uso de coque en la mezcla de carbón es viable a escala industrial.
- Se debe realizar un proceso de molienda previa de los finos de coque antes del ingresar al proceso productivo, este proceso agregará valor a los finos, permitirá su “comercialización” y traerá otros beneficios económicos a la compañía.
- Durante el proceso de coquización, no se presenta ninguna dificultad en la operación, es decir los hornos operaron normalmente sin presentar síntomas de alguna deficiencia. Las

temperaturas que se obtienen permiten acelerar el proceso ligeramente, estos es con la misma carga los hornos disminuyen el ciclo de coquización en 3 horas.

- La apariencia del coque producto es una granulometría homogénea, es decir no hay tamaños excesivamente gruesos y finos, sino que es un tamaño intermedio y regular.
- El producto luego de pasar por la criba de clasificación, muestra aumento en la recuperación del material arriba de 50 mm, esto es alrededor de 3% con respecto a la operación actual,
- La resistencia mecánica del coque, aumenta alrededor de un 1% para el Micum 40, y disminuye en el Micum 10, esto beneficiará la comercialización del coque producido.

## **5.2.Mejoras del proceso productivo**

- Durante el desarrollo de las pruebas se encontró que los finos de coque permiten mejorar algunas características de producto y proceso que aportaran beneficios económicos adicionales a la compañía
- Disminución del tiempo de ciclo del proceso, y de rendimiento de la coquización que mide cuantas toneladas de carbón necesito para producir una de coque.
- Se requeriría una mayor cantidad de carbón debido al aumento de producción por la reducción del tiempo de ciclos y la mejora en el rendimiento de coquización.
- Aumento de producción producto 50x150mm
- Se obtendrá un producto más homogéneo
- Se aumentará la recuperación de coque con tamaños grandes
- Se incrementará la resistencia mecánica del coque, la cual es una característica importante para el cliente

### 5.3. Beneficios económicos

- Aumento en la producción de coque, como se muestra en la siguiente tabla

Tabla 22.

*Mejoras en la producción de coque*

	SITUACIÓN ACTUAL	MEZCLA FINOS DE COQUE	
Numero de Hornos	100	100	
Carga de carbón por horno (Ton.)	20	20	
Tiempo de ciclo de coquización (Horas)	80	77	
Rendimiento de Coquización (%)	70%	72%	Diferencia
Producción de Coque (año)	183,960	196,588	12,628

- Se tendría un aumento en la producción de 12.628 toneladas de coque por año
  - Este aumento corresponde a un ahorro en la producción de \$505, 122,077 por año.
- Reducción de costo de producción, como se muestra en la siguiente tabla:

Tabla 23.

*Reducción del costo de producción*

	Producción Normal	Producción con Finos de Coque
Carbón tipo C1 \$/ton	\$100,000	\$100,000
Carbón tipo F5 \$/ton	\$95,000	\$95,000
Carbón tipo Z4 \$/ton	\$90,000	\$90,000
Finos de Coque \$/ton	N/A	\$40,000
Costo del proceso de molienda de finos \$/ton	N/A	\$20,000
Mezcla de Carbón \$/ton	\$97,750	\$90,390

Costo Proceso de Coquización / ton		
coque	\$40,000	\$40,000
Precio Coque Todo Uno \$/ton	\$196,786	\$181,097

- Se tendría una reducción de \$15,688 por tonelada de coque producida
  - Sobre una producción de 180.000 toneladas al año, esto representa un ahorro de \$2,823,928,571 por año.
- Aumento del tamaño de grano medio del coque como se puede ver en la siguiente tabla:  
Tabla 24.

*Aumento de tamaños gruesos de coque*

	Producción Normal	Producción con Finos de Coque
Coque todo uno producido por año (Ton)	183,960	196,588
Tamaño coque 50x100mm	75%	78%
Producción coque 50x100mm (Ton)	137,970	153,339

- El aumento de recuperación de tamaños grandes, permitirá sobre la producción normal, recuperar 5519 toneladas de coque que en condiciones normales serían finos de coque.
- El precio del coque 50x100mm es de USD \$100 y el de los finos es de USD \$15, por lo tanto con esta mejora productiva, se aumenta el flujo de caja en USD \$469,098 al año.

Podemos concluir que es fundamental para la gerencia implementar este proceso en la compañía lo antes posible, esto permitirá mejorar los flujos de dinero en la empresa y resolverá un problema ambiental que podría salirse de control debido a los excesos de inventario de este producto en todas las plantas.



## 6. Referencias

- Alvarez, R. (2005). La tecnología de producción de coque de horno alto ante el nuevo milenio. *Revista de metalurgia*, 29-34.
- Belkin, A. (2003). Use of iron-coke briquets on a cement binder in blast-furnace smelting. *Metallurgist*, 147-154.
- Benk, A. (2008). Phenolic resin binder for the production of metallurgical quality briquettes from coke breeze. *Elsevier*, 28-37.
- Benk, A. (2011). Molasses and air blown coal tar pitch binders for the production of metallurgical quality formed coke from anthracite fines or coke breeze. *Elsevier*, 1078-1086.
- Benk, A., & Coban, A. (2010). *Investigation of resole, novalac and coal tar pitch blended binder for the production of metallurgical quality formed coke briquettes from coke breeze and anthracite*. Kayseri, Turkey: Elsevier.
- Cimadevilla, J. (1999). Comparación de la calidad del coque siderúrgico obtenido a diferentes escalas. *Revista de Metalurgia*, 1-5.
- Das, A. (2010). Efficient recovery of combustibles from coking coal fines. *Mineral Processing & Extractive Metall*, 236-249.
- Diez, M., Alvarez, R., & Cimadevilla, J. (2011). *Briquetting of carbon-containing wastes from steelmaking for metallurgical coke production*. Oviedo, España: Elsevier.
- Equihua, L. (22 de 11 de 2011). *Que es el valor agregado*. Obtenido de <http://foroalfa.org/articulos/que-es-el-valor-agregado>
- Groover, M. P. (1997). *Fundamentos de manufactura moderna*. Mexico: Prentice Hall.
- Guerrero, C. (2012). *Construcción de un modelo de mezcla de carbones colombianos para la producción de coque*. Bogotá: Universidad Nacional de Colombia.
- Gupta, A., & D.S., Y. (2006). *Mineral Processing Design and Operations an Introduction*. Netherlands: Elsevier.
- Gutierrez, M., Mora, W., Rodriguez, L., & Ramirez, J. (2011). Aprovechamiento de partículas de ultrafinos de carbón de una planta lavadora en la producción de coque metalúrgico. *Ingeniería e investigación*, 65-73.
- Kulkova, T. (2007). Use of resin-bearing wastes from coke and coal chemicals production at the novokuznetsk metallurgical combine. *Metallurgist*, 206-210.

- Logachov, G. (2012). Evaluating the effectiveness of using coke breeze in blast-furnace smelting. *Metallurgist*, 15-21.
- Mahoney, M. (2005). Pilot scale simulation of cokemaking in integrated steelworks. *Ironmaking and Steelmaking*, 468-478.
- Maistrenko, A. (2007). Numerical analysis of the process of combustion and gasification of the polydisperse coke residue of high-ash coal under pressure in a fluidized bed. *Journal of Engineering Physics and Thermophysics*, 1019-1032.
- Majumder, A., & Shan, H. (2009). Applicability of a dense-medium cyclone and vorticity separator for upgrading non-coking coal fines for use as a blast furnace injection fuel. *International Journal of Coal Preparation and Utilization*, 23-33.
- Mota, O., & Campos, J. (1995). Combustion of coke with high ash content in fluidised beds. *Chemical Engineering Science*, 433-439.
- Nersesian, R. L. (2010). *Coal and the Industrial Revolution*. U.K.
- Nomura, S. (2012). Effect of coke contraction on mean coke size. *Elsevier*, 176-183.
- Pinho, C. (2006). Fragmentation on batches of coke or char particles during fluidized bed combustion. *Elsevier*, 147-155.
- Pitak, Y. (2010). Study of the properties of ceramic surfacing material used for restoring coking chamber linings. *Refractories and industrial ceramics*, 114-119.
- Prachethan, P. (2008). Maximisation of non-coking coals in coke production from non-recovery coke ovens. *Ironmaking and Steelmaking*, 33-39.
- Prieto, I. (2010). *Centrales termicas sistemas de combustión en lecho fluido*. España.
- Rodriguez, I. B. (2000). *Manual de Carbones y Coquización*. Tunja: UPTC.
- Rojas, J. (2013). *Productos de valor agregado*. Monterrey: Raady 2 eat consulting.
- Sahu, A. (2009). Development of air dense medium fluidized bed technology for dry beneficiation of coal – a review. *International Journal of Coal Preparation and Utilization*, 216-241.
- Sutcu, H. (2006). Effect of hydroxides on carbonization of bituminous coal. *Coal Preparation*, 201-208.
- Totten, G. E., Funatani, K., & Xie, L. (2004). *Handbook of Metallurgical Process Desing*. USA: Marcel Dekker.
- Umadevi, T. (2008). Influence of coke breeze particle size on quality of sinter. *Ironmaking and steelmaking*, 567-575.

- Wang, B. (2012). Experimental investigation of secondary reactions of intermediates in delayed coking. *Res Chem Intermed*, 2295-2307.
- Wills, B., & Napier-Munn, T. (2006). *Wills Mineral Processing Technology*. Elsevier.
- World Energy Council. (2010). *2010 Survey of Energy Sources*. Obtenido de <http://www.worldenergy.org/>
- Yarar, B. (1984). *Mineral Processing Design*. Turkey: Kluwer Academic Publishers.