

MINISTERIO DE MINAS Y ENERGIA

GASIFICACION DE MADERA

ISAGEN

1997

20



ESTUDIO DE NUEVAS TECNOLOGÍAS DE
**ESTUDIO DE NUEVAS
TECNOLOGÍAS DE GENERACIÓN**

CONTRATO No. AP70

GASIFICACIÓN DE MADERA
GASIFICACIÓN DE MADERA

REVISION 00

Qene
CONSULTORÍA S.A.

Santafé de Bogotá D.C., Septiembre 1 de 1997



**ESTUDIO DE NUEVAS TECNOLOGÍAS DE
GENERACIÓN**

CONTRATO No AP70

GASIFICACIÓN DE MADERA

REVISIÓN 00

Santafé de Bogotá D.C., 1 de septiembre de 1997



LISTA DE DISTRIBUCIÓN

Las copias de este documento fueron entregadas al Director de Gestión Tecnológica de ISAGEN E.S.P., por AENE Consultoría. Las observaciones que resulten de su revisión deben ser informadas al Director del Proyecto, para proceder a realizar sus modificaciones.

PERSONA	CARGO	COPIAS
Francisco Javier León	Director Gestión Tecnológica ISAGEN	3
Jairo Ramírez Castro	Director del Proyecto AENE	1
Bernardo Restrepo M.	Coordinador de Proyecto AENE	1
Nubia Pineda	Biblioteca AENE	1

ÍNDICE DE MODIFICACIONES

Índice de Revisión	Sección modificada	Fecha de modificación	Observaciones
00		97-09-01	Versión original

DOCUMENTO : GASIFICACIÓN DE MADERA

CONTRATO No: AP70

NOMBRE DEL CONTRATO: ESTUDIO DE LAS NUEVAS TECNOLOGÍAS DE GENERACIÓN

REVISIÓN Y APROBACIÓN

Actividad: Gasificación de madera					
Título documento: Gasificación de madera					
NUMERO DE REVISIÓN		0	1	2	3
Responsable por elaboración	Nombre	J. Casabianca			
	Firma	<i>[Firma]</i>			
	Fecha	97-09-01			
	Nombre	B. Restrepo			
	Firma	<i>[Firma]</i>			
	Fecha	97-09-01			
	Nombre	A. Pérez			
	Firma	<i>[Firma]</i>			
	Fecha	97-09-01			
	Nombre	Luis. E. Buitrago			
	Firma	<i>[Firma]</i>			
	Fecha	97-09-01			
Responsable por revisión	Nombre	F. Rodríguez			
	Firma	<i>[Firma]</i>			
	Fecha	97-09-01			
	Nombre	B. Restrepo			
	Firma	<i>[Firma]</i>			
	Fecha	97-09-01			
Control calidad	Nombre	J. Ramírez			
	Firma	<i>[Firma]</i>			
	Fecha	97-09-01			
Control calidad	Nombre	M. Hernández			
	Firma	<i>[Firma]</i>			
	Fecha	97-09-01			

TABLA GENERAL DE CONTENIDO

CAPÍTULO 1	INTRODUCCIÓN
CAPÍTULO 2	DESCRIPCIÓN DEL RECURSO
CAPÍTULO 3	CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS DEL PROCESO DE GASIFICACIÓN DE MADERA
CAPÍTULO 4	ESTADO DEL ARTE
CAPÍTULO 5	ANÁLISIS AMBIENTAL
CAPITULO 6	ANÁLISIS ECONÓMICO
CAPÍTULO 7	EVALUACIÓN PROSPECTIVA AL MEDIO COLOMBIANO

INTRODUCCIÓN

TABLA DE CONTENIDO

1. INTRODUCCIÓN	1
1.1 OBJETIVO	1
1.2 ALCANCE Y METODOLOGÍA	1
1.3 ORGANIZACIÓN DEL DOCUMENTO	2

1. INTRODUCCIÓN

1.1 OBJETIVO

El objetivo del presente documento es el de presentar a ISAGEN el informe del estudio de la Tecnología de la Gasificación de la Madera, dentro del marco de referencia dado por el proyecto de Estudio de Nuevas Tecnologías de Generación, que AENE Consultoría está desarrollando para ISAGEN.

1.2 ALCANCE Y METODOLOGÍA

Para el desarrollo del estudio de la gasificación de la madera, AENE Consultoría conformó un grupo interdisciplinario de profesionales, especializados en el tema de la generación de energía eléctrica aprovechando la energía almacenada en la madera, así como profesionales especializados en las áreas económica y ambiental.

Con el presente estudio se pretende dar a ISAGEN una imagen general del estado actual de la tecnología de la gasificación de la madera, estableciendo y presentando los últimos avances tecnológicos, los costos asociados con esta tecnología para su implantación, operación y mantenimiento y los problemas o beneficios ambientales que se pueden presentar al acometer, operar y mantener un proyecto con esta tecnología.

Así mismo, se averiguó sobre nuevos proyectos de investigación asociados con la generación eléctrica empleando la gasificación de la madera, determinando las tendencias tecnológicas esperadas y el comportamiento de los costos.

Durante el estudio de esta tecnología, se desarrollaron las siguientes actividades.

- Recolección de información. Se ubicó y consultó información técnica, económica y ambiental en bibliotecas públicas y privadas, universidades y centros de investigación nacionales e internacionales. Por otro lado se tomó información vía Internet siguiendo un procedimiento metódico y guiado por directorios consultados previamente.

- Se analizó la información ubicada y se procedió a recomendar a ISAGEN la continuación de las restantes actividades para el desarrollo del estudio de la gasificación de la madera. ISAGEN con base en el informe presentado sobre dichas actividades procedió a autorizar la continuación del estudio.
- Con base en la información ubicada y consultada, los especialistas y el grupo de trabajo procedieron a elaborar la descripción del recurso (la madera) y del proceso de generación de energía eléctrica con diferentes tecnologías de gasificación de la madera.
- A la luz de las investigaciones realizadas durante el desarrollo de la actividad anterior, se procedió a determinar el estado del arte de la tecnología y a describir una planta considerada la más moderna en la actualidad, para ilustrar el avance actual y real de esta tecnología. De igual manera se vio cual es la tendencia del desarrollo tecnológico y económico que se espera para un futuro en la generación a partir de la gasificación de la madera.
- Con la descripción tecnológica obtenida durante el estudio y con información recogida previamente, se procedió a estimar los posibles impactos ambientales y las acciones encaminadas a mitigarlos en las fases de construcción, operación y mantenimiento de una central de generación a partir de la gasificación de la madera.
- A partir de los datos de tipo económico obtenidos durante la recolección de información se establecieron los costos índices que presenta en este momento la tecnología de la gasificación de madera y se realizaron pruebas de sensibilidad ajustando los principales ítems de costos.
- Por último se realizó la prospección de la gasificación de la madera en Colombia, en los aspectos relacionados con los costos y el medio ambiente.

1.3 ORGANIZACIÓN DEL DOCUMENTO

El resultado del estudio de la tecnología de generación a partir de la gasificación de la madera se incluye en el presente documento que tiene la siguiente organización :

CAPÍTULO 2 : En este capítulo se presenta desde el punto de vista técnico el recurso energético (la madera), incluyendo la forma de obtenerlo y sus características.

CAPÍTULO 3 : Se hace una descripción técnica en éste, del proceso de obtención de energía eléctrica empleando gas obtenido por varios procesos de gasificación de la madera.

CAPÍTULO 4 : El tema de éste, es la evaluación del estado del arte de la tecnología de la generación eléctrica a partir de la gasificación de la madera y de sus tendencias hacia el futuro. Además se describe la planta mas recientemente construida en el mundo empleando esta tecnología.

CAPÍTULO 5 : En este capítulo se hace la evaluación sobre el impacto ambiental, derivado de la implantación de un sistema de generación a partir del gas obtenido de la madera en las etapas de construcción, operación, mantenimiento y desmantelamiento.

CAPÍTULO 6 : A partir de la información económica encontrada, en el capítulo se hace el análisis económico a la inversión, operación y mantenimiento, hasta obtener unos valores índices que permiten establecer los costos de una planta de generación a partir de la gasificación de la madera.

CAPÍTULO 7 : En el capítulo 7 se hace la prospección de la tecnología de la gasificación de la madera, obteniéndose una corrección de los costos de inversión operación y mantenimiento así como de aspectos ambientales de acuerdo al medio Colombiano y resaltando las ventajas y desventajas de implantar esta tecnología en el país.

DESCRIPCIÓN DEL RECURSO

TABLA DE CONTENIDO

2. DESCRIPCIÓN DEL RECURSO	1
2.1 BOSQUES NATURALES	1
2.2 SISTEMAS DEDICADOS DE SUMINISTRO DE MADERA	1
2.3 COMPOSICIÓN DE LA MADERA.....	3

LISTA DE TABLAS

TABLA 2-1. Características comparativas de madera y carbón (% por peso).....	3
---	---

2. DESCRIPCIÓN DEL RECURSO

La madera ha sido durante largo tiempo una fuente de energía para cocción y calentamiento.

La madera, a diferencia del petróleo y otros combustibles fósiles tiene muy poco contenido de azufre lo que la hace ambientalmente favorable frente a otros combustibles.

Es un combustible renovable que puede ser producido de manera sostenible y tiene la ventaja, sobre otras energías renovables (i.e eólica y solar), que la energía está almacenada en el mismo combustible, lo cual evita los procesos de almacenamiento de energía.

Existen dos posibilidades de suministrar madera para utilizar en generación de energía eléctrica. En primer lugar se encuentran los bosques naturales y en segundo lugar se encuentran los sistemas dedicados de suministro. Estas dos fuentes se presentarán en las secciones 2.1 y 2.2.

2.1 BOSQUES NATURALES

Estos ecosistemas suministran gran cantidad de "servicios" ambientales, tales como mantener la diversidad biológica, suministrar un habitat para vida salvaje, producir oxígeno, afectar los patrones regionales de lluvias, retener dióxido de carbono presente en la atmósfera, reducir las inundaciones, almacenar agua y controlar la erosión debida al viento.

De acuerdo con lo anterior, y considerando que la preservación del Medio Ambiente es una de las principales consignas de la Ingeniería Moderna, esta fuente de madera no se está considerando en las tecnologías avanzadas para generación eléctrica. Por tal razón no se profundizará en los bosques naturales como fuente de suministro de combustible a gran escala.

2.2 SISTEMAS DEDICADOS DE SUMINISTRO DE MADERA

Un Sistema Dedicado de Suministro de madera es una granja de árboles específicamente sembrada y cultivada para suministrar la materia prima a las industrias que así lo requieran.

Para que la madera proveniente de estos sistemas se convierta en una fuente de energía a gran escala debe competir económicamente con los combustibles fósiles convencionales. Para lograr este efecto, los árboles sembrados deben ser especialmente resistentes a plagas, insectos y enfermedades que se pueden producir fácilmente en los campos normales de siembra. Esta resistencia especial a factores externos no se encuentra de manera natural, de tal manera que se han realizado investigaciones tendientes a mejorar estas características.

Dentro de los resultados de las anteriores investigaciones, se ha detectado los genes responsables del incremento en la altura, resistencia a las enfermedades y plagas, de tal forma que se han mezclado diferentes clases de árboles para producir genéticamente árboles con excelentes cualidades para ser utilizados en sistemas dedicados. De la misma forma se ha podido influir en la forma del árbol, la geometría de las ramas, el tamaño y espaciamiento de las hojas de tal forma que se optimice el aprovechamiento de la energía solar.

Por medio de los anteriores cambios genéticos, se han podido obtener campos de hasta 10 ton. de madera por acre por año, es decir, de cinco a diez veces lo que se obtendría en bosques naturales.

A primera vista, y al hablar de gasificación de madera, se pensaría que los primeros afectados serían los bosques naturales, sin embargo, mediante el uso de sistemas dedicados, los bosques naturales pasan a ser beneficiarios de esta tecnología. La siembra de sistemas dedicados se puede realizar en sitios con un suelo con tendencia a la erosión, que ha sido trabajado en varias ocasiones y que ya no es apto para la agricultura. El hecho de aprovechar estos suelos ayuda a la economía y es un importante aporte desde el punto de vista ambiental.

La producción de madera de acuerdo con planes sostenibles (Sistemas dedicados) significa que la madera se consume y es convertida en CO₂, pero a su vez la madera está siendo sembrada y removiendo este CO₂ de la atmósfera por medio del proceso de fotosíntesis. En consecuencia, el efecto neto sobre el contenido de CO₂ en la atmósfera es cero. Esto está en contraposición con los combustibles fósiles, los cuales aumentan el contenido de CO₂ en la atmósfera lo cual a su vez aumenta el efecto invernadero.

2.3 COMPOSICIÓN DE LA MADERA

Dada la gran diversidad de maderas que se encuentran en el planeta, cuando se realiza un estudio de las características del presente, se emplea para la madera una composición probable. En la TABLA 2-1 presenta esta composición y además a manera comparativa se incluye la del carbón.

TABLA 2-1 - Características comparativas de madera y carbón (% por peso)

Componente	Madera	Carbón
Volátiles	84	30
C	48.8	73.4
H	6.0	4.8
O	44.2	10.5
N	< 0.5	1.4
S	0.014	0.22
Ceniza	0.5 - 1	9.8

Nótese que la madera presenta características mucho más favorables para la gasificación que el carbón. Dentro de estas características, se encuentran :

- Mayor contenido de volátiles
- Bajo contenido de azufre, nitrógeno y ceniza.

Adicionalmente al tener un mayor contenido de volátiles, estos requieren menor temperatura para el proceso de devolatilización (ver Capítulo 3 de este informe) y lo realizan en menor tiempo.

**CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS DEL PROCESO
DE GASIFICACIÓN DE MADERA**

TABLA DE CONTENIDO

3. CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS DEL PROCESO DE GASIFICACIÓN DE MADERA.....	1
3.1 DESCRIPCIÓN DEL PROCESO	1
3.1.1 Devolatilización	2
3.1.2 Gasificación.....	2
3.1.3 Hidrogasificación	2
3.1.4 Oxidación	2
3.1.5 Características del gas obtenido	4
3.1.6 Tipos de gasificadores	4
3.1.6.1 Gasificador de lecho fluidizado	4
3.1.6.2 Gasificador de lecho fijo.....	9
3.1.6.3 Gasificador de Flujo por arrastre.....	11
3.2 CICLO COMBINADO CON GASIFICACIÓN INTEGRADA (IGCC).....	12
3.2.1 Recibo y transporte del combustible	14
3.2.2 Sección de Gasificación.....	14
3.2.3 Enfriamiento del gas	15
3.2.4 Remoción del material particulado	15
3.2.5 Limpieza del gas	15
3.2.6 Compresión de gas	15
3.2.7 Tratamiento de agua de lavado	16
3.2.8 Remoción de Ceniza	16
3.2.9 Turbina de gas	16
3.2.10 Caldera de recuperación de calor	16
3.2.11 Turbina de vapor	16
3.2.12 Sistema de Condensados y enfriamiento.....	16
3.3 FORMAS DE INTEGRAR LA GASIFICACIÓN CON UN CICLO COMBINADO	17
3.3.1 Gasificación con aire a alta presión	17
3.3.2 Gasificación con calentamiento indirecto a baja presión	19
3.3.3 Gasificación con aire a baja presión	21

LISTA DE TABLAS

TABLA 3-1 - Composición típica del gas obtenido.....	4
TABLA 3-2 - Parámetros de diseño y operación del gasificador.....	17
TABLA 3-3 - Composición del gas obtenido	18
TABLA 3-4 - Resumen desempeño del ciclo	18
TABLA 3-5 - Parámetros de diseño y operación del gasificador.....	20
TABLA 3-6 - Composición del gas obtenido	20
TABLA 3-7 - Resumen desempeño del ciclo	20
TABLA 3-8 - Parámetros de diseño y operación del gasificador.....	22
TABLA 3-9 - Composición del gas obtenido	22
TABLA 3-10 - Resumen desempeño del ciclo	22

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 3-1 - Reacciones durante la gasificación.....	3
FIGURA 3-2 - Fluidización	5
FIGURA 3-3 - Lecho Fluidizado	7
FIGURA 3-4 - Enfriamiento en lecho fluidizado circulante	8
FIGURA 3-5 - Lecho fluidizado burbujeante	9
FIGURA 3-6 - Gasificadores de lecho fijo	11
FIGURA 3-7 - Gasificador de flujo por arrastre	12
FIGURA 3-8 - IGCC	13
FIGURA 3-9 - Gasificación con aire a alta presión	19
FIGURA 3-10 - Gasificación con calentamiento indirecto a baja presión.....	21
FIGURA 3-11 - Gasificación con aire a baja presión	23

3. CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS DEL PROCESO DE GASIFICACIÓN DE MADERA

En esta sección se describen las características técnicas del proceso de gasificación de la madera. Una vez la madera ha sido gasificada y se ha obtenido el producto final (gas combustible), este puede ser utilizado en cualquier aplicación convencional que requiera un combustible gaseoso. Estas aplicaciones convencionales del gas no serán descritas ya que se considera que no están relacionados con la tecnología como tal.

No obstante lo anterior, y considerando que: (i) al utilizar este gas en tecnologías convencionales se obtienen eficiencias bajas (del orden de 25% con turbinas de vapor), (ii) durante el proceso de gasificación se generan cantidades apreciables de calor (ver sección 3.2), (iii) este calor puede ser aprovechado para generar vapor, y (iv) existe una tecnología de generación eléctrica que integra estos dos conceptos conocida como Ciclo Combinado con Gasificación Integrada (IGCC1) en la cual la gasificación es parte integral del proceso, se realizará una descripción detallada de esta tecnología.

3.1 DESCRIPCIÓN DEL PROCESO

El término gasificación es utilizado para caracterizar aquellos procesos térmicos que convierten la materia prima sólida o líquida en una mezcla de gases. La gasificación normalmente consiste de los procesos presentados en los numerales 3.1.1 a 3.1.4, sin embargo, en algunas ocasiones y dependiendo de las características del combustible, se pueden omitir uno o varios de ellos.

El proceso de gasificación comienza con la preparación y el secado de la madera. El secado se realiza debido a que la humedad contenida en la madera afecta el poder calorífico del gas que se pueda obtener, es decir, en la medida que se disminuya la humedad contenida en la madera, se aumentará el poder calorífico del gas resultante. Los niveles de humedad requeridos en estos procesos están comprendidos entre el 10 - 20% por peso.

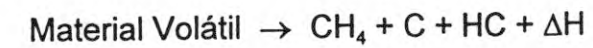
1 Integrated Gasification Combined Cycle

Este proceso de secado de la madera requiere una fuente de calor a baja temperatura. La fuente de calor de los secadores, así como su manejo, se presentarán en las secciones 3.2 y 3.3.

Después de haber secado y triturado la madera, esta se inyecta al gasificador. En las siguientes secciones se presentan las reacciones que se llevan a cabo una vez la madera ha entrado en el gasificador.

3.1.1 Devolatilización

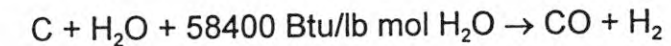
Cuando la madera entra al gasificador es calentada a altas temperaturas y ocurre la siguiente reacción química:



donde: HC indica hidrocarburos mayores que el metano

3.1.2 Gasificación

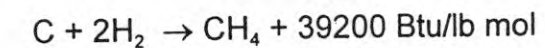
El carbón resultante de la devolatilización reacciona con vapor, produciendo hidrógeno y Monóxido de Carbono:



Como se puede apreciar, esta es una reacción química altamente endotérmica, es decir que se debe suministrar una gran cantidad de calor para sostener la reacción.

3.1.3 Hidrogasificación

El carbón proveniente de la devolatilización reacciona a altas temperaturas con hidrógeno proveniente de la gasificación para producir metano adicional en un proceso exotérmico:

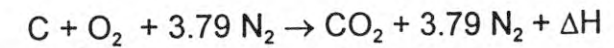
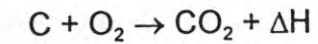


3.1.4 Oxidación

La oxidación, o combustión, puede ser realizada con oxígeno o aire, lo cual da como resultado gases con diferentes poderes caloríficos. El gas obtenido

con oxígeno tiene un poder calorífico mayor que el obtenido con aire. La relación entre los poderes caloríficos es aproximadamente de 3 a 1.

Esta combustión suplente el calor adicional requerido para sostener algunas de las reacciones descritas previamente:



Todas las anteriores reacciones pueden ocurrir simultáneamente a través del gasificador, o cada reacción puede estar localizada en una región específica del reactor o en un compartimiento diferente. Sin embargo, la mayoría de los procesos de gasificación se realizan de tal manera que el calor liberado por la oxidación, hidrogasificación y devolatilización compense el calor requerido por la gasificación y el calor sensible de todos los productos de reacción. En el evento que las reacciones sean realizadas en regiones o compartimientos separados, se requiere algún mecanismo de transferencia de calor entre dichas regiones. La FIGURA 3-1 presenta un esquema de la manera en que ocurren estas reacciones en el gasificador.

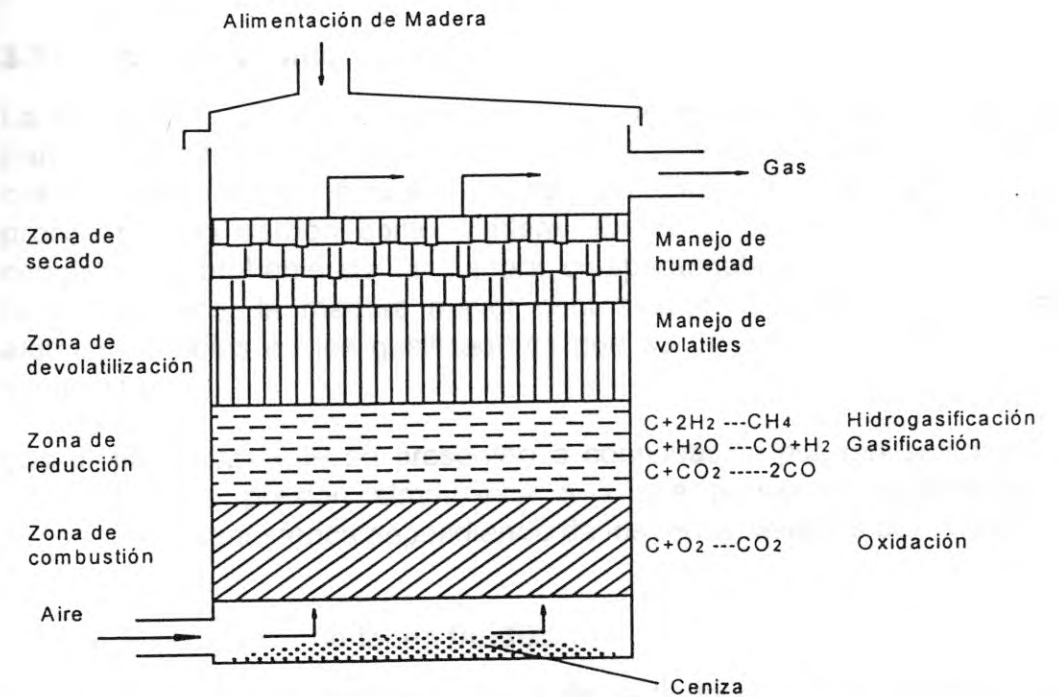


FIGURA 3-1 - Reacciones durante la gasificación

3.1.5 Características del gas obtenido

Las características del gas producido mediante la gasificación de la madera dependen ampliamente de la calidad de la madera inyectada al proceso y del tipo de gasificación utilizada. En la TABLA 3-1 se indica una composición típica de este gas y en la sección 3.2 se presentan características específicas de combustibles considerando diferentes condiciones de proceso.

TABLA 3-1 - Composición típica del gas obtenido

Ítem	Valor	Unidad
CO	22	% Vol
H ₂	13	% Vol
CH ₄	4	% Vol
H ₂ S	Según se requiera	% Vol
CO ₂	12	% Vol
N ₂	42	% Vol
H ₂ O	7	% Vol
Poder Calorífico (LHV)	6500	kJ/Nm ³

3.1.6 Tipos de gasificadores

La tecnología utilizada en la gasificación de madera se ha desarrollado a partir de modificaciones en los equipos utilizados para gasificar carbón, y en casos recientes, los equipos se han diseñado con la capacidad para procesar tanto carbón como madera. En la TABLA 2-1 se presentó la composición probable de la madera comparándola con la del carbón. El hecho de tener la madera mayor contenido de volátiles implica realizar algunos cambios en los gasificadores que se describirán en las secciones siguientes.

Los gasificadores que se presentan a continuación pueden ser diseñados para operar a presión atmosférica o a una presión considerablemente superior a la atmosférica dependiendo de los requerimientos del proceso.

3.1.6.1 Gasificador de lecho fluidizado

Si un fluido pasa a través de un lecho de partículas finas con baja velocidad, se observará que la trayectoria seguida por el fluido comprende los espacios entre las partículas estáticas; esto es lo que se conoce como lecho fijo. Con

un incremento en la velocidad, las partículas componentes del lecho tienden a moverse en una región restringida, expandiendo de esta forma el lecho, que recibe el nombre de lecho expandido.

A cierta velocidad se alcanza un punto en que las partículas son suspendidas totalmente por el fluido; en este punto, las fuerzas de fricción entre las partículas y el fluido se equilibran con el peso de las partículas. Este punto se conoce como el de fluidización mínima.

En un sistema sólido-gas, al incrementar la velocidad por encima del punto de fluidización mínima, se observará burbujeo y acanalamiento. Si se aumenta aún más, la agitación es más violenta y con movimientos más vigorosos del sólido. En resumen, el lecho no se expande más y es llamado lecho fluido. Mientras exista una superficie límite clara y visible, se considera que el lecho está en su fase densa. Al aumentar la velocidad del flujo a valores elevados, la superficie del lecho desaparece, la distancia entre las partículas se hace cada vez mayor y el sólido comienza a ser arrastrado por la corriente del fluido. En este punto se tiene un lecho disperso o la fase no densa o de transporte neumático del sólido.

Los conceptos descritos anteriormente se presentan en la FIGURA 3-2.

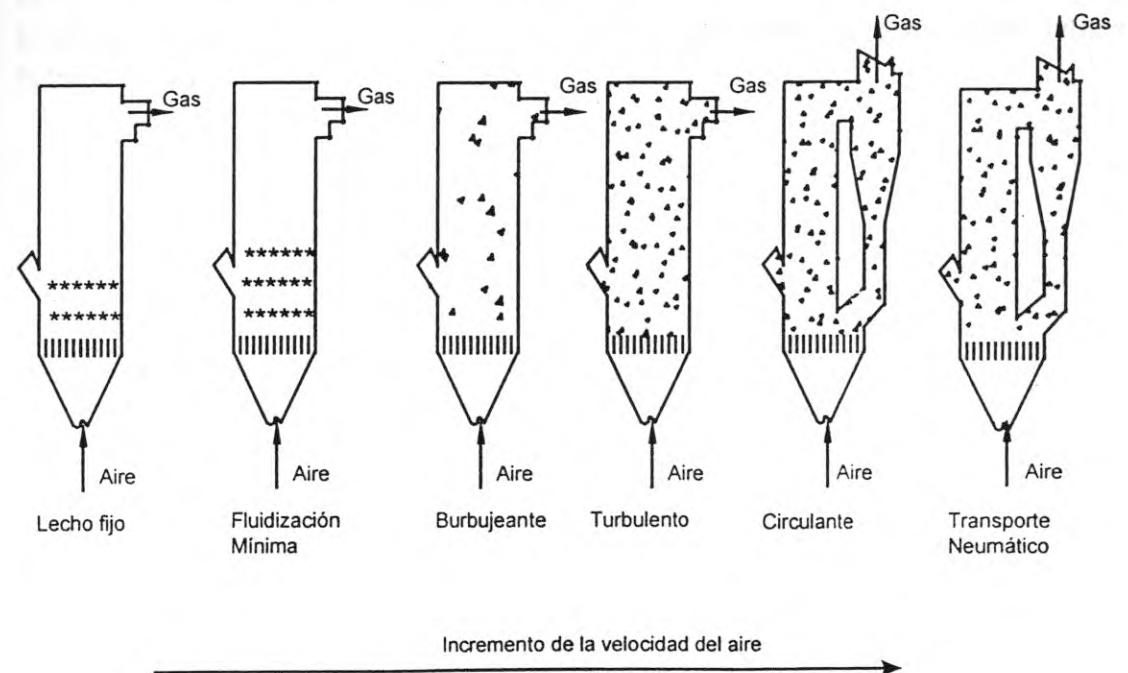


FIGURA 3-2 - Fluidización

Un lecho fluidizado con gas en fase densa, se asemeja a un líquido en ebullición y en muchos casos exhibe un comportamiento parecido al de un líquido. Por ejemplo: (i) la superficie del lecho permanecerá horizontal si el recipiente está inclinado y (ii) si se tienen dos recipientes conectados, el nivel del lecho será el mismo de ambos (vasos comunicantes).

- **Lecho Fluidizado**

La FIGURA 3-3 presenta un diagrama esquemático de un lecho fluidizado. El combustible se alimenta al gasificador, al cual se le ha depositado previamente un material inerte para estabilizar el lecho. Adicionalmente, se inyectan vapor y oxígeno tal y como se mencionó en secciones anteriores. Estos productos se inyectan a una velocidad tal que levante o fluidice las partículas inertes hasta formar un lecho fluidizado. Si en estas condiciones se calienta el lecho a una temperatura por encima de la temperatura de devolatilización del combustible, la reacción de devolatilización empezará a ocurrir. Si la temperatura aumenta por encima de la temperatura de ignición del combustible, se producirá su combustión (oxidación) sin necesidad de alcanzar las elevadas temperaturas de una llama. Este limitante en la temperatura ocurre porque la velocidad de mezcla del combustible con el resto de las partículas del lecho es tan alta, que el calor se evacua del combustible reaccionante rápidamente, evitando el aumento de temperatura, lo cual es benéfico desde el punto de vista de la formación térmica de Óxidos Nitrosos.

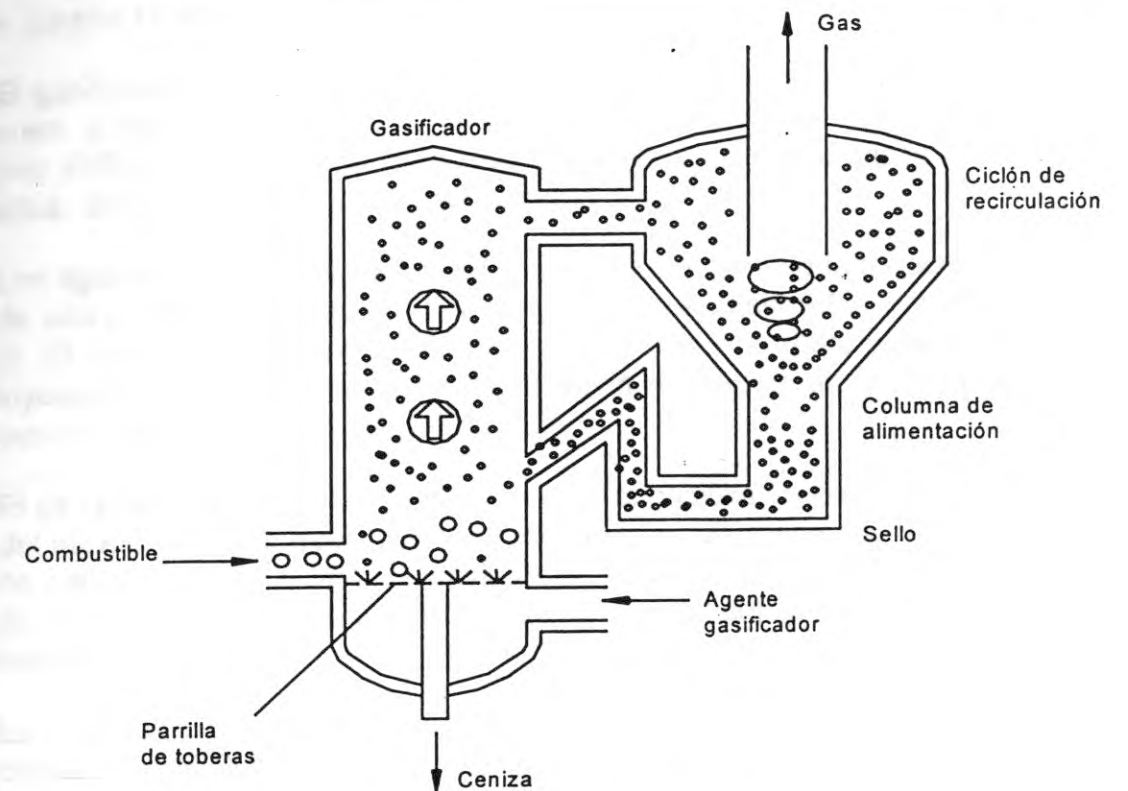


FIGURA 3-3 - Lecho Fluidizado

Evidentemente para asegurar un proceso continuo, se requiere la existencia de un medio enfriador para retirar el calor producido en el gasificador. Esta función normalmente la realiza un intercambiador de calor el cual utiliza este calor para generar vapor.

El mezclado rápido de los sólidos y la alta transmisión de calor gas-sólido, hacen que se alcance en poco tiempo las condiciones isotérmicas a través de todo el lecho, lo cual hace más fácil controlar la operación. Adicionalmente, la transferencia de calor entre un lecho fluido y un objeto sumergido es alta, razón por la cual los intercambiadores de calor dentro del lecho requieren pequeñas superficies de transmisión.

Tradicionalmente se han definido dos tecnologías de lecho fluidizado diferenciados fundamentalmente por la velocidad de las partículas en suspensión. Estas categorías son Lecho Fluidizado circulante y Lecho Fluidizado burbujeante.

• Lecho Fluidizado Circulante

El gasificador de lecho fluidizado circulante opera en un modo comprendido entre el lecho fluidizado burbujeante y el reactor de transporte neumático (ver FIGURA 3-2). La velocidad de los sólidos en estos gasificadores son altas, del orden de 5 m/s, lo cual ocasiona arrastre de ceniza.

Los agentes de la gasificación (aire, oxígeno y vapor) se introducen a través de una parrilla de toberas en la parte inferior del gasificador (ver FIGURA 3-3). El combustible es inyectado al gasificador a una altura superior a la de inyección de los agentes de la gasificación. La temperatura de la reacción puede variar entre 800°C y 1050°C.

El gas producido cargado con ceniza deja el gasificador por la parte superior del mismo y pasa a través de unos ciclones donde se extrae la mayor parte de ceniza volante, la cual es enviada de nuevo al gasificador. La otra parte de la ceniza es extraída a través de la parrilla del gasificador (ceniza de fondo).

La extracción de calor del gasificador se realiza enfriando las paredes y las cenizas (ver FIGURA 3-4).

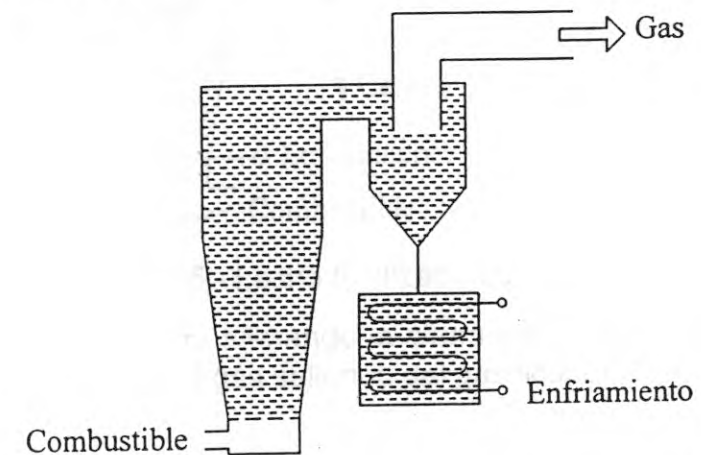


FIGURA 3-4 - Enfriamiento en lecho fluidizado circulante

El control de carga se realiza cambiando la tasa de circulación lo cual permite mantener una temperatura constante del gas a la salida del gasificador.

• Lecho Fluidizado burbujeante

La operación de un lecho fluidizado burbujeante es fundamentalmente igual a la de un lecho fluidizado circulante. Sin embargo, existen algunas diferencias que serán presentadas en esta sección.

La velocidad de las partículas sólidas es menor que la obtenida en un lecho fluidizado circulante, siendo del orden de 1 m/s. Debido a que las velocidades son menores, la transferencia de calor es un poco menor que en el lecho circulante, por tal razón se requiere más área por MW.

La extracción de calor para enfriamiento se realiza a través de las paredes y del lecho (ver FIGURA 3-5)

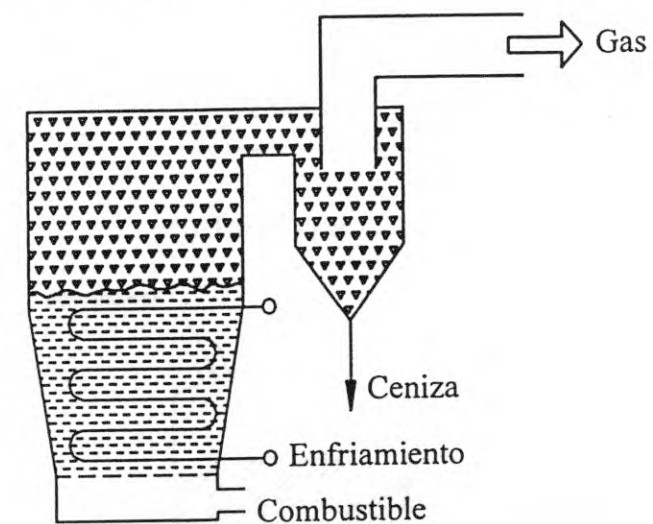


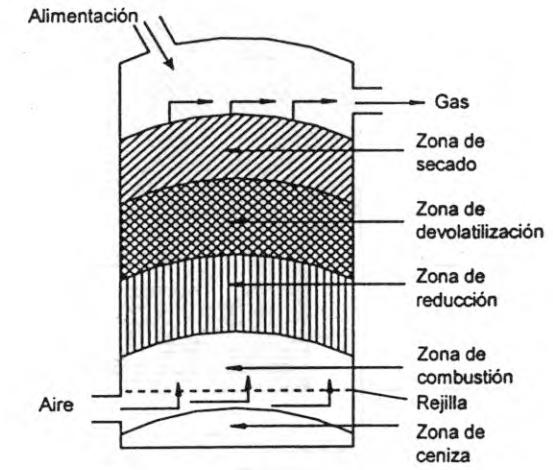
FIGURA 3-5 - Lecho fluidizado burbujeante

El control de carga se realiza alterando la altura del lecho lo cual implica un cambio en la temperatura del gas saliendo del gasificador.

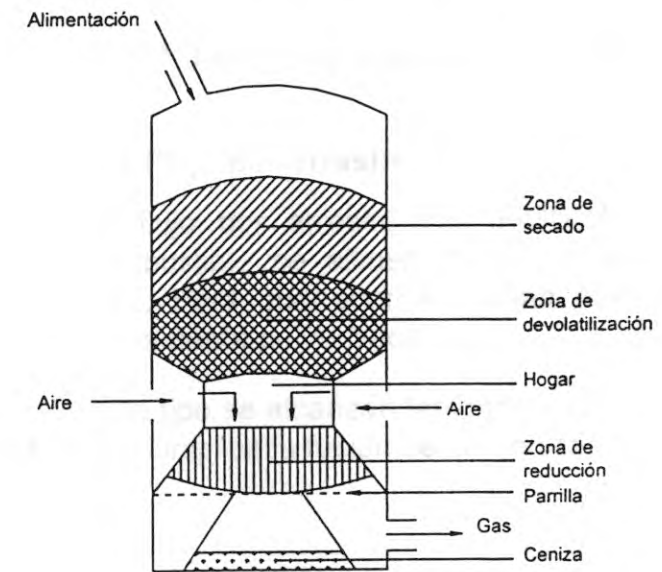
3.1.6.2 Gasificador de lecho fijo

En este tipo de gasificadores, la velocidad de las partículas sólidas es muy baja, de tal forma que no se alcanza a generar un lecho expandido. Básicamente es un lecho estático en la parte inferior del gasificador donde se inician las reacciones químicas requeridas por el proceso.

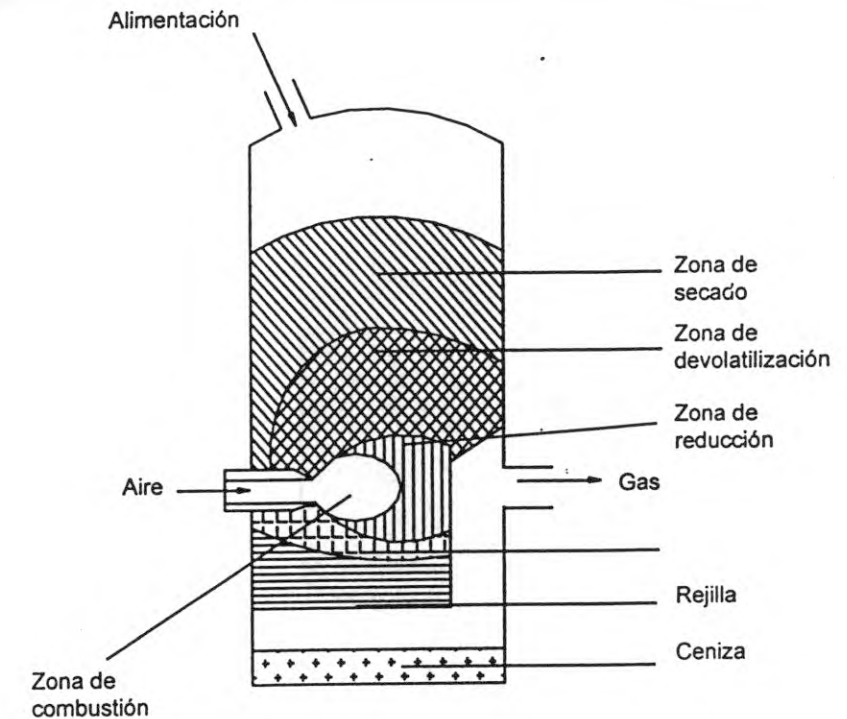
Dependiendo de la dirección del flujo de los agentes gasificadores, existen tres tipos de gasificadores de lecho fijo (ver FIGURA 3-6) : (i) de tiro vertical ascendente, (ii) de tiro vertical descendente y (iii) de tiro transversal.



(i) Tiro Vertical Ascendente



(ii) Tiro vertical descendente



(iii) Tiro transversal

FIGURA 3-6 - Gasificadores de lecho fijo

3.1.6.3 Gasificador de Flujo por arrastre

En el gasificador de flujo por arrastre (ver FIGURA 3-7) los agentes gasificadores y el combustible se alimentan conjuntamente por la parte superior del gasificador. Para que operen de una manera adecuada, el combustible debe ser finamente pulverizado.

En gasificadores de este tipo se alcanzan temperaturas muy altas, del orden de 1300°C o más, lo cual implica la fusión de las cenizas.

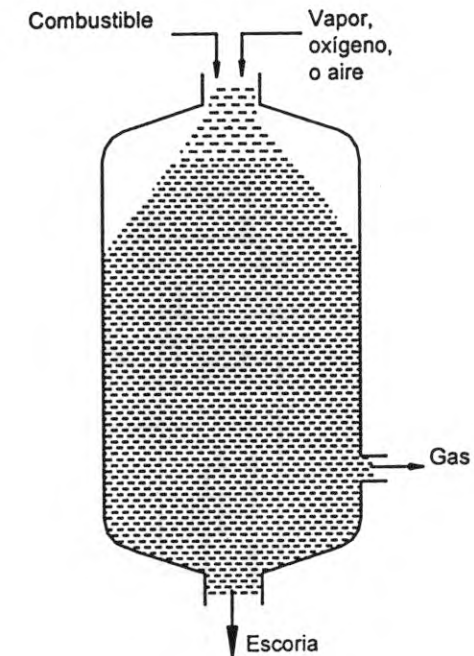
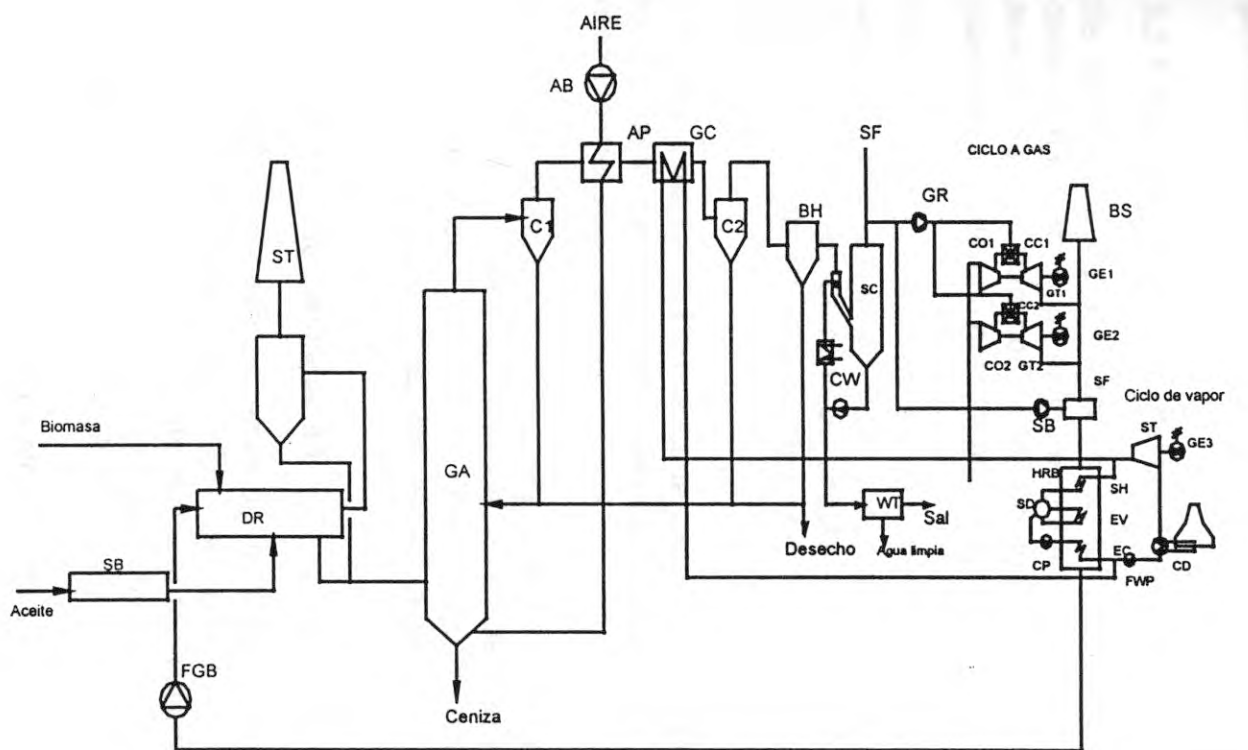


FIGURA 3-7 - Gasificador de flujo por arrastre

3.2 CICLO COMBINADO CON GASIFICACIÓN INTEGRADA (IGCC)

La planta de ciclo combinado con gasificación integrada consiste de un gasificador que convierte la madera en gas combustible y un ciclo combinado de gas y vapor que genera energía eléctrica. Adicionalmente, el ciclo de vapor puede ser adaptado para generar calor de proceso en un ciclo de cogeneración.

La integración del proceso de gasificación con el ciclo combinado se realiza al utilizar el calor removido del enfriador de gases y del gasificador para producir vapor (ver FIGURA 3-8).



Proceso de gasificación	SF Señal de arranque	Ciclo de gas	Ciclo de vapor
GA Gasificador	GR Recompresor de gas	CO1,CO2 Compresor 1 y 2	ST Turbina de vapor
C1,C2 Ciclón 1 y 2	FGB Soplador de gas	CC1,CC2 Cámara de combustión	GE3 Generador 3
AB Soplador de aire	SB Arranque de quemador	GT1,GT2 Turbina de gas 1 y 2	CD Condensador
AP Pre calentador de aire	DR Secador	GE1,GE2 Generador 1 y 2	CT Torre de enfriamiento
WT Tratamiento de agua	ST Chimenea	BS Bypass de la chimenea	HRB Caldera
BH Filtro de mangas	CW Enfriador de agua		SD Domo de vapor
SC Depurador			SB Soplador
GC Enfriador de gas			FWP Bomba de agua de alimentación
			SF Quema suplementaria
			EC Economizador
			SH Supercalentador
			EV Evaporador
			CP Bomba de circulación

FIGURA 3-8 - IGCC

Los numerales 3.2.1 - 3.2.12 presentan las principales secciones de una planta IGCC. Dependiendo del tipo específico de planta, es posible que algunas secciones no requieran ser instaladas. En la sección 3.3 se presentan tres ejemplos de la forma en que se puede integrar un proceso de gasificación de madera a un ciclo combinado.

3.2.1 Recibo y transporte del combustible

Se debe realizar por medio de un tamiz o zaranda y una separación de carácter magnético con el fin de retirar los posibles materiales ferrosos para asegurar que el transporte desde el lugar de recibo hasta el gasificador se pueda realizar de una manera adecuada.

Posteriormente, la madera es alimentada a un secador rotatorio donde es secada hasta los valores de humedad requerida por el proceso. Este secador es de tipo de contacto directo y aprovecha el calor contenido en los gases de combustión los cuales son filtrados antes de ser liberados a la atmósfera.

Una vez la madera ha sido secada y triturada, se presuriza en un sistema de tolvas hasta un valor que depende básicamente del tipo de gasificación utilizado (ver sección 3.3).

La madera presurizada procedente de la tolva se introduce en el gasificador por medio de tornillos de medición, los cuales tienen la función de medir la cantidad de madera alimentada. Posteriormente, esta madera es tomada por un segundo tornillo de inyección, el cual la introduce al gasificador.

3.2.2 Sección de Gasificación

El material consistente de ceniza de la madera es retornado al gasificador a través de un ciclón. La madera seca que está siendo introducida al gasificador se mezcla con este material recirculante en la parte inferior del gasificador y es gasificada a través del lecho para formar gas con un poder calorífico aproximado de 6500 kJ/Nm³.

El aire de fluidización proveniente de la descarga del compresor de la turbina de gas se inyecta al gasificador a través de la parrilla. Con el objeto de remover el calor generado en el gasificador se realiza un enfriamiento que a su vez genera vapor para ser alimentado a la turbina de vapor del ciclo combinado.

El gas producido sale por la parte superior del gasificador y pasa a través de un ciclón para retirar la ceniza y material particulado que pueda llevar.

3.2.3 Enfriamiento del gas

El gas resultante debe ser enfriado con el objeto de que pueda ser admitido en los equipos de limpieza. Usualmente, el enfriamiento se realiza en dos etapas. Durante la primera etapa, el gas es enfriado hasta aproximadamente 600°C en el precalentador de aire.

Durante la segunda etapa, el gas que deja el precalentador de aire pasa a través de un enfriador donde es enfriado hasta aproximadamente 230°C. En este proceso se genera vapor sobrecalentado a una presión del orden de 60 bar.

Durante estos procesos de enfriamiento del gas, se condensan los metales alcalinos y son removidos del gas con el objeto de no permitir que estos metales afecten de manera adversa los álabes de la turbina de gas.

3.2.4 Remoción del material particulado

Después de enfriar el gas, existe un segundo ciclón que retira el material particulado remanente en el gas antes de que sea introducido, de ser requerido, a un filtro de mangas.

3.2.5 Limpieza del gas

El gas que deja los filtros se lava con agua en un sistema multietapas que típicamente incluye: (i) lavado en una atmósfera ácida, (ii) lavado en una atmósfera alcalina y (iii) lavado con agua limpia. Mientras se realizan estos procesos de lavado, el gas es enfriado hasta una temperatura de aproximadamente 40°C.

3.2.6 Compresión de gas

El gas producido se comprime hasta una presión de aproximadamente 30 bar, dependiendo de los requerimientos de presión en el suministro de gas de la turbina de gas. Esta compresión se realiza en un compresor multietapas con interenfriamiento. Una vez comprimido, el gas queda listo para ser utilizado en la turbina de gas.

3.2.7 Tratamiento de agua de lavado

La purga de agua proveniente del sistema de lavado es tratada en una planta de tratamiento de agua con el objeto de darle al agua la calidad requerida para su disposición o utilización.

3.2.8 Remoción de Ceniza

La ceniza resultante de la gasificación de la madera es extraída de la parte inferior del gasificador , enfriada hasta aproximadamente 70°C y descargada para disposición. Esta ceniza puede ser utilizada como fertilizante.

3.2.9 Turbina de gas

Una vez el gas ha sufrido todos los procesos de limpieza y compresión, es alimentado a la turbina de gas, la cual puede ser de diseño convencional, o requerir algunos cambios menores con el objeto de manejar un gas con menor poder calorífico que el convencional.

3.2.10 Caldera de recuperación de calor

Los gases de combustión que dejan la turbina de gas tienen un alto contenido energético que puede ser aprovechado para generación de vapor. Para tal efecto se requiere la instalación de una caldera de recuperación que transfiere el calor contenido en los gases de escape y lo transfiere al agua que alimenta la turbina de vapor.

3.2.11 Turbina de vapor

Todo el vapor generado durante el proceso de gasificación, así como el generado en la caldera de recuperación de calor es alimentado a una turbina de vapor de diseño convencional, la cual genera potencia adicional.

3.2.12 Sistema de Condensados y enfriamiento

El vapor que deja la turbina de vapor una vez ha sido expandido en la misma y cedido su energía es condensado y retornado al ciclo mediante el sistema de condensados y enfriamiento. El enfriamiento puede ser realizado de diversas maneras dependiendo de la disponibilidad de agua en el sitio del proyecto.

3.3 FORMAS DE INTEGRAR LA GASIFICACIÓN CON UN CICLO COMBINADO

En esta sección se presentan algunas alternativas que surgen en el momento de decidir de que forma se puede integrar un sistema de gasificación de madera con una planta de ciclo combinado. Vale la pena resaltar que los datos presentados corresponden a estudios realizados y no a plantas en operación comercial.

En las secciones 3.3.1 a 3.3.3 se presenta únicamente la parte relacionada con la gasificación de la madera. La parte relacionada con el ciclo combinado no se presenta por considerarse que su descripción es similar a la presentada en las secciones 3.2.9 a 3.2.12.

3.3.1 Gasificación con aire a alta presión

El gasificador de alta presión seleccionado para este ejemplo consiste de una unidad de lecho fluidizado presurizado que utiliza aire y vapor como agentes gasificadores. El material inerte introducido al lecho para estabilización del mismo es alúmina. Este material aumenta la calidad de la fluidización, la profundidad del lecho, la capacidad calórica y el tiempo de residencia.

La madera proveniente del sistema de alimentación se introduce cerca del fondo del gasificador por medio de tornillos de inyección. Posteriormente, se introducen aire y una pequeña cantidad de vapor para realizar las reacciones de combustión. La temperatura y presión de operación son respectivamente 830°C y 20 bar.

La TABLA 3-2 resume las características del gasificador y la TABLA 3-3 resume las características del gas obtenido.

TABLA 3-2 - Parámetros de diseño y operación del gasificador

Temperatura de operación	830°C
Presión de operación	20 bar
Consumo de madera seca	811 Ton/día
Contenido de humedad de madera seca	11%
Diámetro interno del gasificador	2.86 m
Relación Aire / madera (peso / peso)	1.07
Relación vapor / madera (peso / peso)	0.32

TABLA 3-3 - Composición del gas obtenido

Componente	Vol. %
H ₂	8.91
CO	6.71
CO ₂	13.45
H ₂ O	39.91
N ₂	24.18
CH ₄	6.51
LHV	4.3 MJ / m ³

El gas producido entra al ciclón primario, el cual le remueve las partículas de carbón y ceniza antes de entrar a la sección en la cual se quema el carbón residual y se aprovecha este calor de combustión para precalentar el aire.

La TABLA 3-4 presenta un resumen del desempeño del ciclo con gasificación de madera con aire a alta presión.

TABLA 3-4 - Resumen desempeño del ciclo

Consumo de madera	19.1 kg/s
Flujo de aire	18.1 kg/s
Flujo de vapor al gasificador	5.4 kg/s
Flujo de gas	47.7 kg/s
Poder calorífico (LHV)	4.3 MJ/ m ³
Relación de compresión de la turbina de gas	14.9
Temperatura de encendido de la turbina de gas	1288°C
Condiciones del vapor	100 Bar / 538°C / 538°
Potencia bruta turbina de gas	93.1 MW
Potencia bruta turbina de vapor	46.6 MW
Consumo interno	8.02 MW
Potencia neta del ciclo	131.7 MW
Eficiencia neta de la planta (HHV)	39.7 %

La FIGURA 3-9 presenta de una manera esquemática el proceso de generación con gasificación de madera con aire a alta presión.

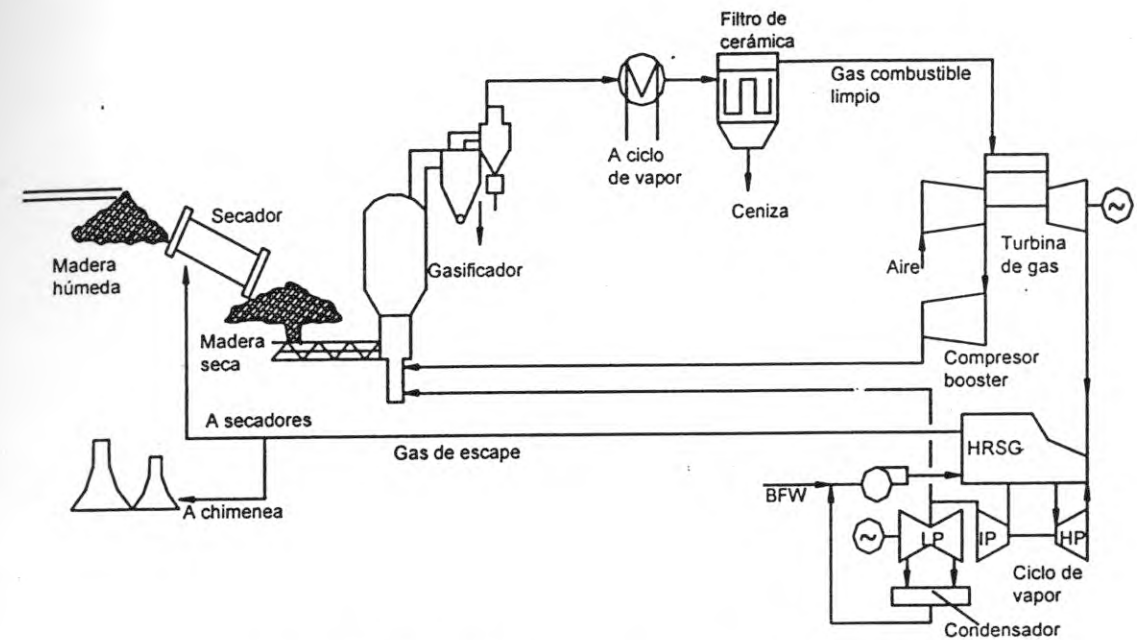


FIGURA 3-9 - Gasificación con aire a alta presión

3.3.2 Gasificación con calentamiento indirecto a baja presión

La principal diferencia entre este ciclo y el anterior radica en que este tipo de gasificación utiliza únicamente vapor para su proceso, es decir, no requiere aire ni oxígeno. En consecuencia de lo anterior, el gas resultante tiene un poder calorífico mayor al obtenido en el caso anterior. El calor requerido para las reacciones endotérmicas es suministrado por circulación de arena caliente entre el combustor de carbón residual (un segundo lecho fluidizado) y el gasificador principal. Además de funcionar como fuente de calor, la arena funciona como material inerte para estabilizar el lecho de flujo de arrastre utilizado. La presión en este caso es sustancialmente menor a la descrita en el caso anterior, razón por la cual se requiere de un compresor de gas que aumente la presión del mismo hasta los valores requeridos por la turbina de gas.

La TABLA 3-5 resume las características del gasificador y la TABLA 3-6 resume las características del gas obtenido.

-
-

)

e
e
r
a
a
)
a
e
a
r
a

o

TABLA 3-5 - Parámetros de diseño y operación del gasificador

Temperatura del gasificador	826°C
Presión del gasificador	1.7 Bar
Consumo de madera seca	1486 Ton/día
Contenido de humedad de madera seca	11%
Diámetro interno del gasificador	2.93 m
Relación Arena / madera (peso / peso)	34.4
Relación vapor / madera (peso / peso)	0.45

TABLA 3-6 - Composición del gas obtenido

Componente	Vol. %
H ₂	21.22
CO	43.17
CO ₂	13.46
CH ₄	15.83
C ₂ H ₄	4.62
LHV	13.2 MJ / m ³

La TABLA 3-7 presenta un resumen del desempeño del ciclo con gasificación de madera con calentamiento indirecto a baja presión.

TABLA 3-7 - Resumen desempeño del ciclo

Consumo de madera	17.2 kg/s
Flujo de aire	0 kg/s
Flujo de vapor al gasificador	7.7 kg/s
Flujo de gas	14.5 kg/s
Poder calorífico (LHV)	13.2 MJ/ m ³
Relación de compresión de la turbina de gas	14.9
Temperatura de encendido de la turbina de gas	1288°C
Condiciones del vapor	100 Bar / 538°C / 538°
Potencia bruta turbina de gas	82.1 MW
Potencia bruta turbina de vapor	55.1 MW
Consumo interno	15.2 MW
Potencia neta del ciclo	122 MW
Eficiencia neta de la planta (HHV)	35.4 %

La FIGURA 3-10 presenta el diagrama general de una posible planta de generación que emplee el proceso de gasificación de madera con aire a alta presión.

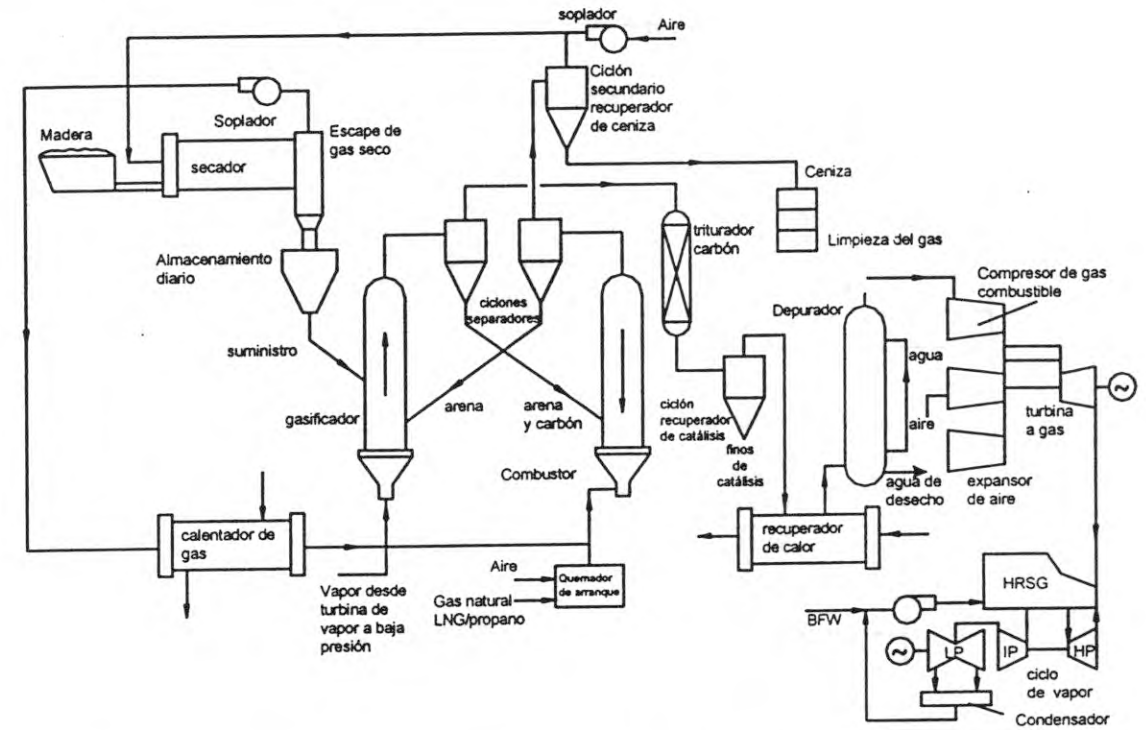


FIGURA 3-10 - Gasificación con calentamiento indirecto a baja presión

3.3.3 Gasificación con aire a baja presión

En gasificadores de este tipo no es práctica usual alimentar vapor como agente gasificador. Sin embargo, el contenido de humedad en la madera alimentada es alto, por lo tanto, se asume que la fuente de vapor es la humedad contenida en la madera, la cual es del orden de 20%. Adicionalmente, estos gasificadores tienen la particularidad de usar altas relaciones de aire/madera, del orden de 2 a 1.

El gasificador es un lecho fluidizado que usa arena como material inerte para estabilizar el lecho.

El aire para gasificación se extrae del compresor de la turbina de gas y se dirige a un expansor de gases que le reduce la presión hasta los valores requeridos por el gasificador. Este expansor genera una potencia de 8.4 MW que sirven para compensar el trabajo requerido por el compresor de gas.

combustible requerido para aumentar la presión del gas hasta los valores requeridos por el combustor de la turbina de gas.

La TABLA 3-8 resume las características del gasificador y la TABLA 3-9 resume las características del gas obtenido.

TABLA 3-8 - Parámetros de diseño y operación del gasificador

Temperatura del gasificador	870°C
Presión del gasificador	1.36 Bar
Consumo de madera seca	1460 Ton/día
Contenido de humedad de madera seca	15.8%
Relación Aire / madera (peso / peso)	2.1
Relación vapor / madera (peso / peso)	0

TABLA 3-9 - Composición del gas obtenido

Componente	Vol. %
H ₂	18.87
CO	23.66
CO ₂	8.29
H ₂ O	4.85
CH ₄	0.11
N ₂	44.22
LHV	4.8 MJ / m ³

La TABLA 3-10 presenta un resumen del desempeño del ciclo con gasificación de madera con aire a baja presión.

TABLA 3-10 - Resumen desempeño del ciclo

Consumo de madera	16.9 kg/s
Flujo de aire	29.7 kg/s
Flujo de vapor al gasificador	0 kg/s
Flujo de gas	43.8 kg/s
Poder calorífico (LHV)	4.8 MJ/ m ³
Relación de compresión de la turbina de gas	14.9
Temperatura de encendido de la turbina de gas	1288°C
Condiciones del vapor	100 Bar / 538°C / 538°
Potencia bruta turbina de gas	72.9 MW
Potencia bruta turbina de vapor	47.6 MW
Consumo interno	15.1 MW
Potencia neta del ciclo	105.4 MW
Eficiencia neta de la planta (HHV)	37.9 %

La FIGURA 3-11 presenta el diagrama general del proceso de generación con gasificación de madera empleando la tecnología de gasificación con aire a baja presión.

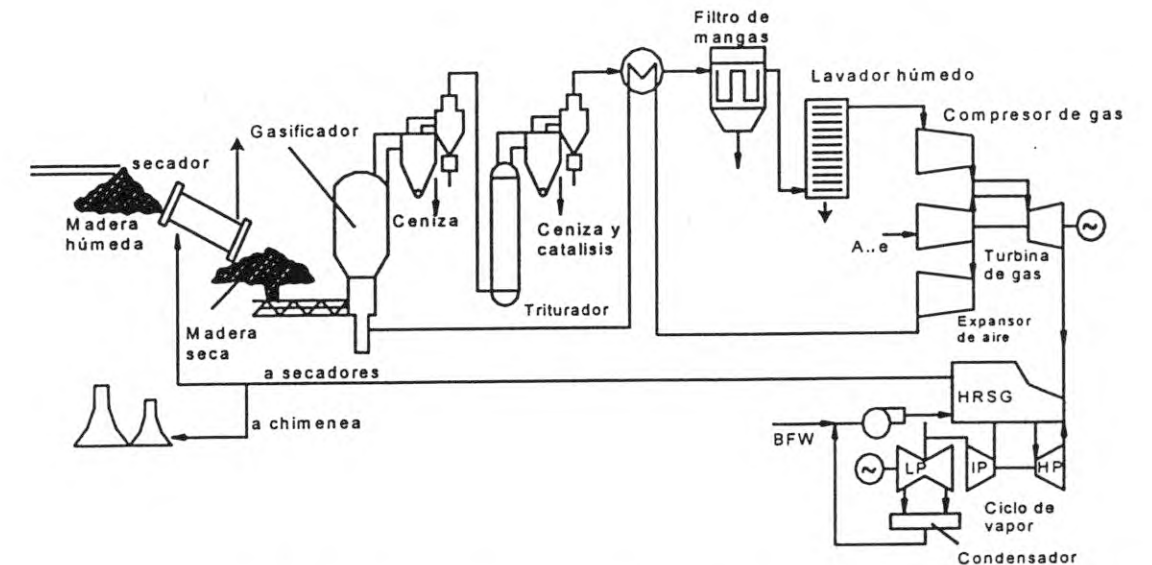


FIGURA 3-11 - Gasificación con aire a baja presión

REFERENCIAS

- "Diseño Unidad Didáctica de Fluidización", Miguel, Rojas José J. -Universidad Nacional - Tesis de grado, 1981
- "Combustión en lecho fluido a presión, Una alternativa para Colombia, limpia, eficiente y compacta" - José Manuel Flores, ABB Carbón S.A, Madrid España, septiembre de 1993
- "Cost and performance Analysis of three Integrated Biomass Gasification Combined Cycle Power Systems", Kevin R. Craig and Margaret K. Mann, National Renewable Energy laboratory
- "CFB Gasification - Power generation from biomass and waste", C. Greil and J. Loeffler, Lurgi Umwelt GmbH, Frankfurt am Main / Germany, Power Gen'97

ESTADO DEL ARTE

TABLA DE CONTENIDO

4.1 PLANTA DE VÄRNAMO	1
4.2 TENDENCIAS	4

LISTA DE TABLAS

TABLA 4-1 - Composición del gas	2
---------------------------------------	---

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 4-1 Gasificador utilizado	3
FIGURA 4-2 Esquema del IGCC - Planta Värnamo.....	4

4. ESTADO DEL ARTE

En esta sección se presenta la planta de Värnamo por ser la primera planta IGCC que utiliza madera como combustible. Adicionalmente, se presentan los planes que se tienen para instalar plantas de este tipo en el futuro.

4.1 PLANTA DE VÄRNAMO

La planta está localizada en Värnamo, Suecia, y la tecnología utilizada está basada en la gasificación de la madera realizada en un gasificador presurizado de lecho fluidizado circulante.

La planta produce alrededor de 6 MW de potencia eléctrica y adicionalmente 9 MW_{th} de energía térmica para calentar un distrito de calentamiento en la ciudad de Värnamo. El combustible alimentado tiene una energía equivalente a 18 MW, lo cual da una eficiencia CHP¹ de 83.33 %. Y una eficiencia eléctrica de 32%.

A marzo de 1997, esta planta había superado las 950 horas de operación a plena carga de la turbina de gas.

• PROCESO

El combustible es secado, utilizando los gases de combustión como fuente de calor, hasta una humedad de 10 - 20%.

La madera secada y triturada, es presurizada por medio de un sistema de tolvas hasta un valor que depende básicamente de la relación de compresión de la turbina de gas, así como de la caída de presión en los sistemas auxiliares que transportan el gas hasta los combustores de la misma. Posteriormente, la madera es alimentada a la parte inferior del gasificador de lecho fluidizado circulante que operará aproximadamente a 1000°C y 20 bar.

El gas resultante pasa a través de los ciclones donde la mayoría de las partículas sólidas son removidas y retornadas a la parte inferior del gasificador. Estas partículas contienen trazas de carbón que es quemado en

¹ CHP: Combined Heat and Power : Eficiencia combinada de calor y potencia

la zona inferior del gasificador para mantener la temperatura requerida en el mismo.

Después de los ciclones, el gas producido es dirigido al enfriador de gas y al filtro de gases. El enfriador de gas es de tipo pirotubular y enfría el gas hasta una temperatura de aproximadamente 400°C antes de que entre al filtro cerámico de material particulado. La ceniza resultante descargada del filtro y de la parte inferior del gasificador es enfriada antes de entrar al sistema de despresurización.

El gasificador funciona con aire como agente gasificador, en consecuencia, aproximadamente el 10% del flujo de aire que sale del compresor es dirigido al gasificador.

El gas generado se utiliza en las cámaras de combustión y se expande en la turbina de gas generando aproximadamente 4 MW de electricidad. Los gases calientes que salen de la turbina son dirigidos a la caldera de recuperación de calor donde se aprovecha su calor para generar vapor a 40 bar y 455°C. Este vapor junto con el vapor generado en el enfriador es dirigido a una turbina de vapor donde se expande y genera al rededor de 2 MW eléctricos. El vapor que sale de la turbina de vapor se condensa y su calor de condensación es aprovechado para calentar un distrito de calentamiento.

La planta fue equipada con una tea que se utiliza durante el arranque de la turbina de gas y en los momentos en que se estén probando combustibles menos conocidos.

La TABLA 4-1 presenta la composición del gas obtenido en esta planta

TABLA 4-1 - Composición del gas

CO	16 - 19%
H ₂	9.5 - 12%
CH ₄	5.8 - 7.5%
CO ₂	14.4 - 17.5%
N ₂	48 - 52%

La FIGURA 4-1 presenta un diagrama del gasificador utilizado y la FIGURA 4-2 presenta un diagrama esquemático de la planta.

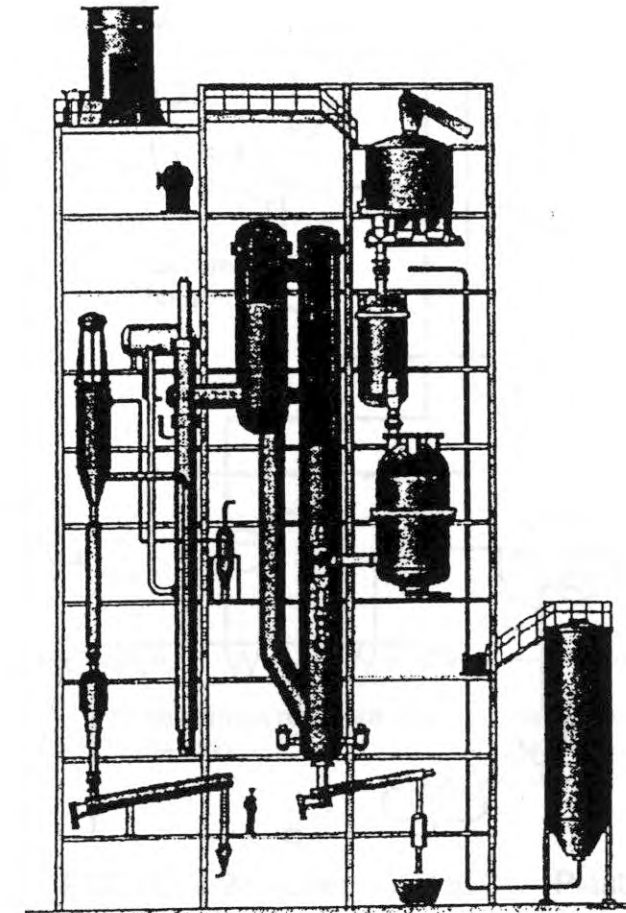


FIGURA 4-1 Gasificador utilizado

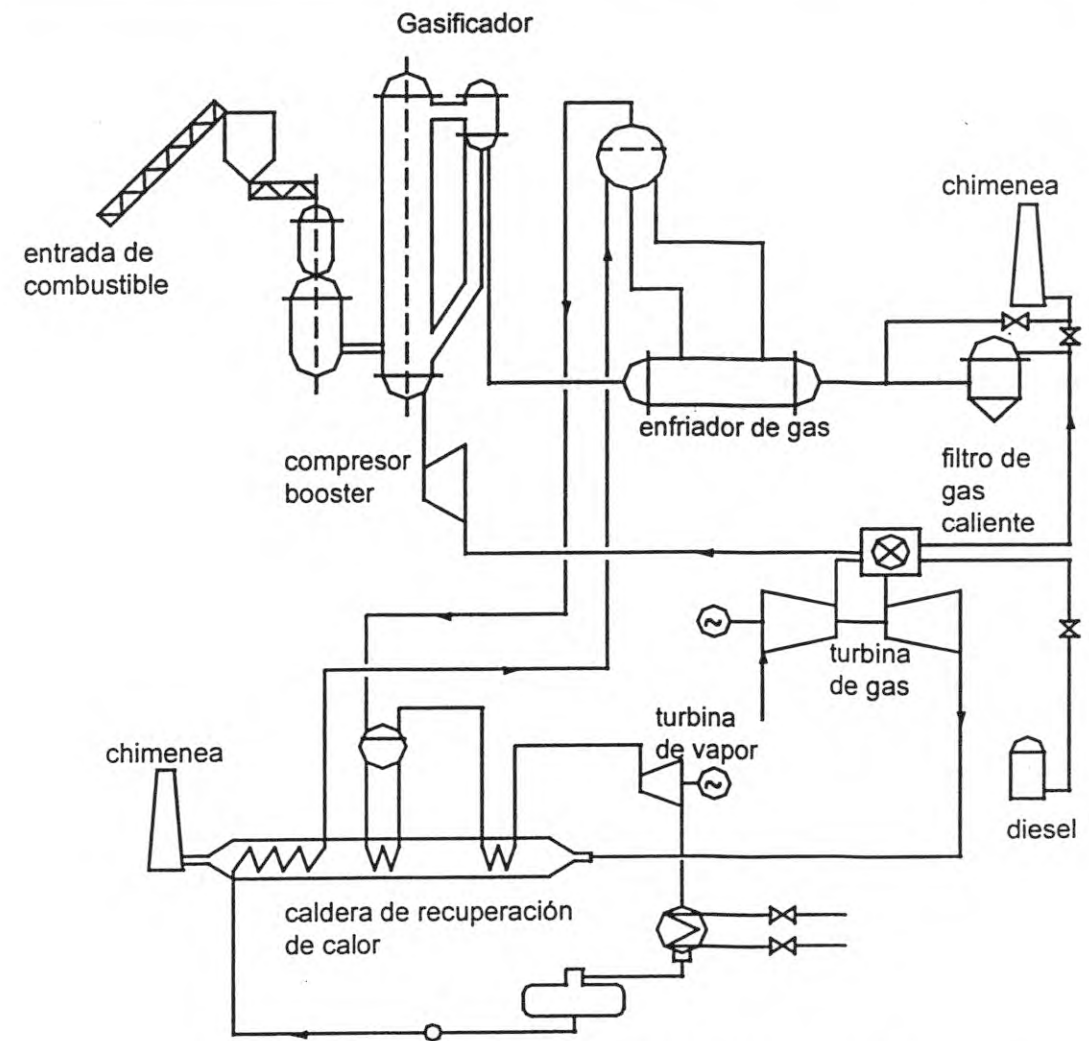


FIGURA 4-2 Esquema del IGCC - Planta Värnamo

4.2 TENDENCIAS

La planta de Värnamo es una planta piloto en este tipo de instalaciones, razón por la cual no está dotada de algunas redundancias y características de diseño requeridas para obtener los mejores valores de desempeño. El objetivo principal de esta unidad era verificar la viabilidad de utilización de la madera en un IGCC. Considerando lo anterior y dado que se han obtenido resultados alentadores en esta planta BiolGCC², las nuevas unidades

² BiolGCC: Ciclo combinado con gasificación integrada, utilizando biomasa como combustible

incorporarán redundancias suficientes y todas las características de diseño requeridas para obtener altos estándares de eficiencia y disponibilidad.

Se espera que las nuevas unidades BioIGCC tengan eficiencias eléctricas netas del orden de 40 - 45%.

REFERENCIAS

- "Status of the biomass IGCC Demonstration plant, Värnamo, Sweden", Krister Stahl, Magnus Neergaard, Per-Axel Nilsson, POWER-GEN'97

ANÁLISIS AMBIENTAL

TABLA DE CONTENIDO

5. ANÁLISIS AMBIENTAL.....	1
5.1 MATRIZ DE INTERACCIONES AMBIENTALES	2
5.2 DESCRIPCIÓN DE INTERACCIÓN AMBIENTAL	3
5.2.1 Componente atmosférico	3
5.2.2 Componente hídrico	4
5.2.3 Componente suelos	5
5.2.4 Componente cobertura vegetal	5
5.2.5 Componente fauna.....	6
5.2.6 Componente socioeconómico	6
5.2.7 Componente paisajístico	7
5.3 FACTORES QUE CAUSAN INCERTIDUMBRE	8
5.4 MEDIDAS DE MANEJO	8
5.5 RIESGOS Y CONTINGENCIAS.....	9
5.6 SÍNTESIS DE BENEFICIO/COSTO AMBIENTAL.....	9

5. ANÁLISIS AMBIENTAL

Este capítulo presenta los resultados del análisis general de los posibles impactos generados por la interacción del proyecto y el medio ambiente en la construcción y operación de una planta de generación a partir de la gasificación de la madera.

El análisis se realizó mediante un estudio general de la tecnología por medio del cual se identificaron las entradas y salidas del sistema en las etapas de, construcción, operación, mantenimiento y desmantelamiento de un potencial proyecto.

Utilizando una matriz de interacción se identificaron los componentes ambientales que podrían verse alterados por el proyecto y los potenciales efectos en cada componente, lo anterior permitió describir los impactos que se pueden desarrollar en los componentes atmosférico, hídrico, suelos, fauna, flora, socioeconómico y paisajístico en las diferentes etapas del proyecto.

Se establecen las posibles medidas de manejo para cada impacto identificando los planes o programas a aplicar para mitigar o prevenir el impacto.

Finalmente, se presentan los riesgos que involucra la tecnología y la síntesis beneficio - costo ambiental, se enuncian las ventajas y desventajas del sistema frente al ambiente, concluyendo el grado del costo ambiental y su dependencia a la definición de aspectos para analizar.

Los resultados del análisis son generales, ya que la determinación del impacto ambiental real está delimitado por los ecosistemas propios a intervenir, las características de localización del proyecto, las restricciones y limitaciones ambientales de las áreas potenciales y el dimensionamiento específico, entre otros. Información que se genera durante las diferentes etapas del desarrollo del proyecto.

5.1 MATRIZ DE INTERACCIONES AMBIENTALES

SISTEMA	COMPONENTE		Construcción	Operación	Mantenimiento
FISICO	ATMOSFERICO	Deterioro de la calidad del aire por emisión de gases de combustión	█	█	
		Deterioro de la calidad del aire por partículas	█	█	█
		Incremento en niveles de ruido	█	█	
	HIDRICO	Contaminación de los cuerpos de agua	█		█
	SUELOS	Erosión del suelo	█	█	
		Contaminación de suelos	█	█	
Alteración de las propiedades físicas del suelo		█	█		
BIOTICO	Cobertura Vegetal	Eliminación de la cobertura vegetal	█	█	
	FAUNA	Alteración del hábitat	█	█	
SOCIOECONOMICO CULTURAL	SOCIO- ECONÓMICO	Modificación del uso actual y potencial de los suelos	█		
		Incremento de población	█		
		Mejoramiento nivel de vida		▨	
		Generación de empleo	▨	█	
	PAISAJE	Modificación del paisaje	█	█	

Convenciones

█ Negativo ▨ Positivo □ Neutro ▤ No determinado

5.2 DESCRIPCIÓN DE INTERACCIÓN AMBIENTAL

5.2.1 Componente atmosférico

5.2.1.1 Deterioro de la calidad del aire por gases

En la etapa de construcción este impacto se produce por la emisión de gases de fuentes de combustión tales como automotores y maquinaria pesada para construcción, que funcionen a gasolina y/o diesel. Aunque este impacto es negativo, con una alta probabilidad de ocurrencia su magnitud es baja pues la cantidad de fuentes móviles utilizados durante la construcción y la duración de las emisiones son bajas.

En la etapa de operación, dependiendo de la calidad de la madera para el proceso el impacto ambiental se puede producir por la emisión de gases tales como monóxido de carbono, dióxido de azufre y óxidos de nitrógeno provenientes principalmente de la operación de las turbinas con gas obtenido de la madera.

La emisión de gases de combustión a la atmósfera se constituye en un impacto ambiental de carácter negativo y cuya magnitud depende de la composición química de los gases que se liberen en los procesos de gasificación de la madera y las características climatológicas y meteorológicas del área que condicionan la dispersión en la atmósfera. El impacto ambiental es prevenible y mitigable, para lo cual se deberán establecer los sistemas de control, medición y monitoreo continuo de la emisión de gases de combustión y su calidad. Se deberán tener en cuenta las normas ambientales y estándares internacionales de emisión para el diseño de los equipos de control, especialmente en cuanto a NO_x y CO .

5.2.1.2 Deterioro de la calidad del aire por partículas

En la fase de construcción de la planta hay un aumento en la concentración de material particulado en el aire causado por las actividades propias de esta fase.

Adicionalmente en la fase de operación de la planta se incrementará la producción de emisiones de partículas, provenientes principalmente de las

actividades de manejo y disposición de cenizas, operación de ciclones, filtros de mangas y las actividades correspondientes al mantenimiento de los equipos de depurado del gas de madera.

El impacto sobre la calidad del aire es negativo, con una probabilidad de ocurrencia alta, prevenible y mitigable mediante la implantación de programas para el manejo transporte y disposición de materiales, escombros de construcción, manejo y disposición de cenizas y mantenimiento de los equipos y maquinaria.

5.2.1.3 Incremento de niveles de ruido

Durante la fase de construcción el nivel de ruido se puede incrementar por la operación de equipos pesados y tráfico vehicular.

En la fase de operación, el nivel de ruido se puede incrementar de manera significativa por las siguientes fuentes: toma y entrada de aire compresor de aire, exhosto de gases de combustión y todas las zonas en donde se tienen elementos de rotación a altas velocidades, vibraciones, transporte de fluidos, entre otras.

El impacto por la generación de ruido es negativo, prevenible y mitigable, mediante el mantenimiento de la maquinaria, el uso de silenciadores, la instalación de barreras amortiguadoras y áreas de aislamiento, de acuerdo con los niveles de ruido aceptados para el uso del suelo de los alrededores.

5.2.2 Componente hídrico

Las actividades de construcción pueden ocasionar la contaminación de cuerpos de agua por la inadecuada disposición de los desechos sólidos, domésticos e industriales y residuos de construcción.

Durante la etapa de operación y mantenimiento de la planta se generan aguas residuales industriales provenientes del proceso de lavado del gas, antes de su uso en las turbinas las cuales deben ser tratadas en una planta conjuntamente con las aguas de escorrentía de los patios de cenizas, antes de su disposición final a un cuerpo de agua.

5.2.3 Componente suelos

5.2.3.1 Erosión del suelo

En la etapa de construcción se realizarán actividades como el descapote, cortes, rellenos y excavaciones que exponen el suelo a la acción de los agentes erosivos (agua y viento) y modifican el régimen hídrico, además de problemas geotécnicos asociados a taludes y zonas de corte y relleno.

Aunque el impacto es negativo y presenta un alto grado de riesgo, este es prevenible y mitigable, para lo cual se deberán diseñar las medidas de manejo para el control de la erosión durante la etapa de construcción y sus seguimiento y monitoreo durante la etapa de construcción y operación, de las plantas tanto en el área industrial como en el área de producción de madera.

5.2.3.2 Contaminación de suelos

Principalmente causada por la disposición de las cenizas de madera, durante la fase de operación, el impacto es negativo, con una probabilidad de ocurrencia media, prevenible y mitigable mediante la implantación de programas de manejo, operación y disposición de residuos tanto sólidos como líquidos.

5.2.4 Componente cobertura vegetal

En la fase de construcción, se retira la cobertura vegetal para iniciar las obras civiles necesarias.

La eliminación de la cobertura vegetal se constituye en un impacto negativo que modifica el régimen hídrico en el área del proyecto.

El impacto es prevenible, mitigable y se puede compensar mediante la racionalización y planeación de las áreas a despejar y al igual que las zonas sensibles que se deben proteger. Se debe realizar un programa de reforestación y de revegetalización en los alrededores de las vías y lote del proyecto, a manera de compensación se pueden seleccionar áreas de conservación y protección en los alrededores del proyecto o cuencas vecinas. La áreas donde se deba realizar remoción de cobertura vegetal y el

sitio de instalación del proyecto dependerá de restricciones ambientales del área a intervenir.

5.2.5 Componente fauna

Con actividades como la construcción, remoción de cobertura vegetal y la operación se incrementa el movimiento de personal y maquinaria, generando ruido y perturbando el estado actual del lugar.

Durante las actividades de construcción y operación se genera un impacto negativo, por la alteración del hábitat y el ahuyentamiento de las especies más sensibles. La magnitud del impacto depende de la diversidad de especies y de su sensibilidad a las actividades desarrolladas.

Se debe mitigar el impacto con un manejo de vegetación en los alrededores del proyecto y vías de acceso, creando microambientes alrededor del proyecto, para la relocalización de la fauna.

5.2.6 Componente socioeconómico

5.2.6.1 Modificaciones del uso actual y potencial de los suelos

La implementación del proyecto en un lugar determinado puede inducir cambios en el uso actual de los suelos y en su potencial productivo por cambios en la destinación, emisión de gases o vertimientos.

Es un impacto negativo que se causará al área del proyecto y en los alrededores, en menor grado, se deben tomar medidas como ubicar al proyecto en áreas de desarrollo industrial y no intervenir áreas de gran potencial agropecuario o turístico.

5.2.6.2 Incremento de población

La ejecución de un proyecto en cualquier lugar genera expectativas sobre la comunidad, estimulando la formación de asentamientos subnormales en las zonas de influencia del proyecto.

A causa de proyectos de esta naturaleza se pueden generar conflictos dentro de la comunidad por lograr algún beneficio particular, causando

molestias en las estructuras sociales existentes. Previo a la iniciación de obras y mediante una revisión histórica del lugar de implantación del proyecto, se puede establecer la fragilidad y sensibilidad de la estructura social frente al proyecto.

El impacto es negativo y para mitigarlo se debe implantar un programa de información y participación comunitaria que busque la integración de la comunidad al proyecto y la optimización de beneficios a la misma, en una dimensión acorde con la magnitud del proyecto.

5.2.6.3 Mejoramiento del nivel de vida

La realización de un proyecto de generación permite que la comunidad mejore su nivel de vida, al incrementar la capacidad de abastecimiento eléctrico de la población, especialmente en áreas no atendidas por el sistema de interconexión nacional. La legislación existente referente a transferencias (Ley 99 de 1993 art 45) fortalece las finanzas municipales del área del proyecto.

Este es un impacto positivo que se puede optimizar mediante la realización de un programa de información y participación comunitaria.

5.2.6.4 Generación de empleo

Se requiere la contratación de mano de obra calificada o semicalificada durante las etapas de construcción y operación.

Aunque este es un impacto positivo puede generar expectativas y sobredimensionarse en la comunidad, trayendo consigo efectos negativos. Es importante clarificar ante la comunidad la dimensión de cada proyecto.

Se debe realizar una concertación con la comunidad, en coordinación con las asociaciones u organismos interesados en la oferta de mano de obra requerida en las diferentes actividades, para permitir su participación y definir con la misma comunidad las políticas de empleo del proyecto.

5.2.7 Componente paisajístico

Las actividades de construcción y operación del proyecto, pueden generar un cambio de uso de la tierra y cambiar su vivencialidad. Se genera un

nuevo escenario dentro del paisaje, con un carácter industrial, modificando morfológicamente la visual.

Las formas y la disposición de esta tecnología son ajenas al contexto, cambiando la imagen y la espacialidad del lugar por la disposición de los elementos que componen la tecnología.

El impacto depende de la localización puntual del proyecto, de la forma en que se mimetice y de la posibilidad de alejar el proyecto de zonas de interés particular para la comunidad.

La medida de manejo, consiste en la generación de espacios que contextualicen con el resto del área, zonas de amortiguamiento visual y de ruido. Además se debe implantar un programa paisajístico donde se tenga en cuenta la vegetación original del lugar para mimetizar la instalación, sin impedir el funcionamiento del sistema.

5.3 FACTORES QUE CAUSAN INCERTIDUMBRE

Para obtener un análisis ambiental detallado se deben identificar y aclarar aquellos aspectos que puedan generar deterioro ambiental, los cuales se encuentran relacionados con las características del área de implantación del proyecto y su dimensionamiento específico. Dentro de estos aspectos, los más importantes a tener en cuenta son los siguientes:

- Identificación de áreas potenciales para el desarrollo del proyecto
- Características de localización que requiere el proyecto
- Restricciones y limitaciones ambientales de las áreas potenciales
- Generación de procesos erosivos, de remoción en masa y deforestación.

5.4 MEDIDAS DE MANEJO

Para mitigar o prevenir los impactos generados por la implantación de la tecnología, se han identificado a nivel general los siguientes programas de manejo ambiental:

- Programa de control de emisión de gases
- Programa de manejo y disposición de cenizas
- Programa de control de ruido

- Programa de manejo, tratamiento y disposición de vertimientos líquidos industriales
- Programa de control, manejo, monitoreo y seguimiento de procesos erosivos y de remoción en masa
- Programa de reforestación, revegetalización y de manejo paisajístico
- Programa de información y participación comunitaria

5.5 RIESGOS Y CONTINGENCIAS

En el sistema de gasificación de la madera se pueden presentar los siguientes riesgos:

- Los riesgos de contaminación de aguas superficiales o suelos
- Generación de procesos erosivos, de remoción en masa y hundimientos
- Incendios o explosiones

Teniendo en cuenta las características de la tecnología, es necesario que cuente con un estudio de riesgos y amenazas a nivel de detalle tanto para la fase de construcción como de operación.

5.6 SÍNTESIS DE BENEFICIO/COSTO AMBIENTAL

Es importante abordar el tema de la deforestación y el cambio climático por la inyección de gases de invernadero a la atmósfera para obtener una visión ambiental de la tecnología.

En los países del llamado Tercer Mundo se dan los mayores índices de deforestación y en los Países Desarrollados el mayor consumo de combustibles fósiles. La vegetación es la encargada de restablecer el balance CO_2/O_2 en la atmósfera por lo cual no sería lógico utilizar la madera para generación eléctrica contribuyendo a aumentar los niveles de CO_2 en la atmósfera, cuando existen importantes reservas mundiales de combustibles fósiles como el carbón y contribuir a la deforestación y efecto de invernadero.

Sin embargo es claro que las plantaciones jóvenes tienen mayor producción de O_2 que las plantaciones forestales adultas, por lo tanto utilizar madera para generación en lugar de carbón un otro combustible fósil se justificaría ambientalmente sí:

- Se hace el desarrollo de nuevas plantaciones exclusivamente para ese uso.
- Se realizan las plantaciones en grandes áreas que aumenten significativamente el área forestal del país.
- Se programe la explotación cíclica de la madera para que se permita el desarrollo de los bosques maduros, antes de la explotación por segunda vez de un área.
- El avance de los frentes de explotación y de nuevas siembras deberá ser de tal forma que permita la relocalización de fauna y recuperación ambiental escalonada o de forma paulatina.
- Verificar el valor del recurso para otros usos como la producción de papel o la construcción contra los beneficios obtenidos por la tecnología de gasificación, de acuerdo con los preceptos de desarrollo sostenible.

De otra parte el mismo proceso industrial deberá contar con los sistemas de control y manejo ambiental acordes con las políticas de desarrollo sostenible y tecnologías limpias.

ANÁLISIS ECONÓMICO

TABLA DE CONTENIDO

6. ANÁLISIS ECONÓMICO.....	1
6.1 OBJETIVO	1
6.2 METODOLOGÍA	1
6.3 EJEMPLO	4
6.4 SENSIBILIDAD	5

LISTA DE TABLAS

TABLA 6-1 - Parámetros técnicos del proyecto	4
TABLA 6-2 - Parámetros económicos del proyecto	4

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 6-1 - Esquema del flujo económico	1
FIGURA 6-2 - Sensibilidad al factor de utilización	5
FIGURA 6-3 - Sensibilidad a la inversión.....	6
FIGURA 6-4 - Sensibilidad al precio del combustible.....	6

6. ANÁLISIS ECONÓMICO

6.1 OBJETIVO

El objetivo del presente capítulo es determinar el costo índice de producción de energía eléctrica, por medio de gasificación de madera y con base en parámetros técnicos, económicos y operativos de proyectos ya ejecutados.

6.2 METODOLOGÍA

El costo índice de producción CIP es un indicador económico que determina el precio mínimo por unidad de energía generada, teniendo en cuenta la inversión, los costos y la rentabilidad mínima del proyecto, para un horizonte predeterminado.

Como primera medida, se determina el flujo económico de inversión y operación del proyecto (FIGURA 6-1) :

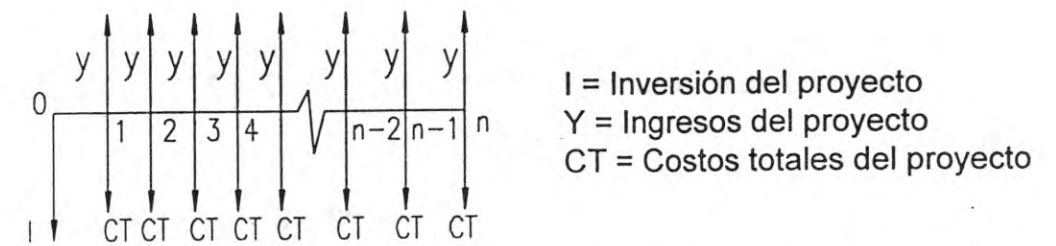


FIGURA 6-1 - Esquema del flujo económico

La energía generada depende de la capacidad instalada y del factor de utilización (horas de generación sobre horas total disponibles en un intervalo de tiempo) de la planta en estudio:

$$E = 8760 * P * F \quad (6-1)$$

Donde: E (kWh/año) = Energía generada
8760 (h) = Número total de horas en un año
P (kW) = Capacidad instalada de la planta
F (%) = Factor de utilización de la planta

La inversión depende de la capacidad instalada y de la inversión por unidad de potencia:

$$I = P * IU \quad (6-2)$$

Donde: P (kW) = Capacidad instalada de la planta
IU (US\$/kW) = Inversión por unidad de potencia

Los costos totales de generación de energía se discriminan en costos fijos y variables: Los costos fijos incluyen personal y seguros, entre otros y los costos variables incluyen operación y mantenimiento O&M de equipos y consumo de combustible (si aplica):

$$C_T = C_F + C_V \quad (6-3)$$

Donde: C_T (US\$/año) = Costos totales del proyecto
 C_F (US\$/año) = Costos fijos del proyecto
 C_V (US\$/año) = Costos variables del proyecto

$$C_V = C_{O\&M} + C_C \quad (6-4)$$

Donde: $C_{O\&M}$ (US\$/año) = Costos de O&M
 C_C (US\$/año) = Costos de combustible

$$C_{O\&M} = E * CU_{O\&M} \quad (6-5)$$

Donde: E (kWh) = Energía generada
 $CU_{O\&M}$ (US\$/kWh) = Costos de O&M por unidad de energía

$$C_C = E * HR * P_C \quad (6-6)$$

Donde: E (kWh) = Energía generada
HR (GJ/kWh) = Consumo específico de combustible
 P_C (US\$/GJ) = Precio del combustible

Los ingresos provenientes de la venta de energía generada dependen de dicha energía y del precio mínimo de venta necesario para recuperar los fondos invertidos en el proyecto:

$$Y = E * CIP \quad (6-7)$$

Donde: Y (US\$/año) = Ingresos del proyecto
E (kWh/año) = Energía generada
CIP (US\$/kWh) = Costo índice de producción

Aplicando el valor presente neto de la inversión, de los ingresos anuales y de los costos anuales del proyecto, se tiene en cuenta el costo del dinero en el tiempo a través del horizonte de evaluación:

$$VPN(Y) = \sum_{j=1}^n \frac{Y_j}{(1+i)^j} = \sum_{j=1}^n \frac{E_j * CIP}{(1+i)^j} = CIP * \sum_{j=1}^n \frac{E_j}{(1+i)^j} \quad (6-8)$$

$$VPN(I + CT) = I + \sum_{j=1}^n \frac{CT_j}{(1+i)^j} \quad (6-9)$$

La factibilidad del proyecto requiere que al menos el valor presente neto de los ingresos cubra el valor presente neto de la inversión y de los costos, es decir que haya igualdad entre las ecuaciones (6-8) y (6-9):

$$VPN(Y) = VPN(I + CT) \Leftrightarrow CIP * \sum_{j=1}^n \frac{E_j}{(1+i)^j} = I + \sum_{j=1}^n \frac{CT_j}{(1+i)^j}$$

De esta igualdad se despeja el CIP y se obtiene el precio mínimo de venta de la energía:

$$CIP = \frac{I + \sum_{j=1}^n \frac{CT_j}{(1+i)^j}}{\sum_{j=1}^n \frac{E_j}{(1+i)^j}} = \frac{\text{Inversion} + \text{VPN(Costos)}}{\text{VPN(Energía)}} \quad (6-10)$$

Resumiendo, el CIP se define como la relación entre la inversión más el valor presente neto de los costos y el valor presente de la energía generada durante el horizonte de evaluación.

Es importante anotar que este CIP sólo sirve como un indicador de referencia, ya que no tiene en cuenta los aspectos financieros y tributarios que serían particulares de cada proyecto.

A partir de un escenario base, se realizará un análisis de sensibilidad de este CIP, frente a variaciones de algunos parámetros técnicos y operativos de los proyectos.

Este análisis no tiene como objetivo cuantificar algunos impactos que traerían la implantación de esta clase de proyectos, al bienestar económico del país y de la comunidad en general: La disminución de los impactos ambientales por reducción de emisiones; el aumento en la capacidad de generación; el ahorro en combustibles fósiles para generación de energía; entre otros.

6.3 EJEMPLO

A continuación se determina el costo índice de producción de energía, para un sistema de generación, por medio de gasificación de madera.

El proyecto en cuestión hace parte de un estudio de factibilidad llevado a cabo por la empresa Bioflow Ltd. La planta tiene una capacidad de 60 MW (TABLA 6-1) una disponibilidad del 85% y es de tipo IGCC (integrated gasification combined cycle), con capacidad para cogenerar.

A precios de 1997, la inversión se valora en 1,700 US\$/kW, el costo fijo por personal en 1,787,040 US\$/año, el costo de operación en 10 US\$/MWh y el precio del combustible (madera) en 2 US\$/GJ (TABLA 6-2). El consumo específico de dicho combustible es de 8000 kJ/kWh.

Con base en esta información técnica y económica, y teniendo en cuenta un factor de utilización del 85%, un horizonte de 15 años y una tasa de descuento del 10%, se determinan los totales de inversión, costo y energía y finalmente el CIP.

TABLA 6-1 - Parámetros técnicos del proyecto

Nombre	Bioflow Ltd.	
Tipo	IGCC	
Combustible	Madera	
Consumo específico de combustible	8000	kJ/kWh
Potencia de planta	60	MW
Factor de utilización	85	%

TABLA 6-2 - Parámetros económicos del proyecto

Horizonte de proyección	15	años
Tasa de descuento	10	%
Inversión unitaria	1,700	US\$/kW
Costo fijo anual	1,787,040	US\$/año
Costo de operación unitario	10	US\$/MWh
Precio de combustible	2	US\$/GJ
Energía generada	3,398,092	MWh
Inversión total	102,000,000	US\$
Costo fijo total	13,592,368	US\$
Costo de operación total	33,980,921	US\$
Costo de combustible total	54,369,473	US\$
CIP	60	US\$/MWh

El CIP, para dicha tecnología de generación arroja un valor de 60 US\$/MWh, lo cual supera el valor promedio actual de la energía eléctrica en el mercado

colombiano, independientemente del esquema de comercialización de una planta de estas características.

6.4 SENSIBILIDAD

Variando independientemente el factor de utilización, la inversión y el precio del combustible, se establece un análisis de sensibilidad del CIP. Frente al factor de utilización, el CIP es inversamente proporcional: Al aumentar en un 10 % este factor, el CIP disminuye en un 4,8 % (FIGURA 6-2):

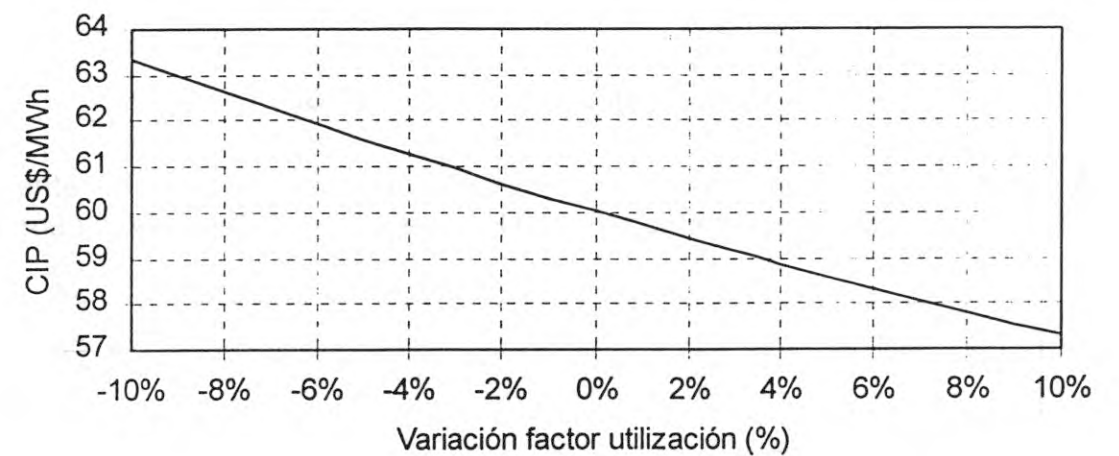


FIGURA 6-2 - Sensibilidad al factor de utilización

Frente a la inversión, el CIP varía proporcionalmente: Al aumentar en un 10 % esta inversión, el CIP aumenta en un 4,8 % (FIGURA 6-3):

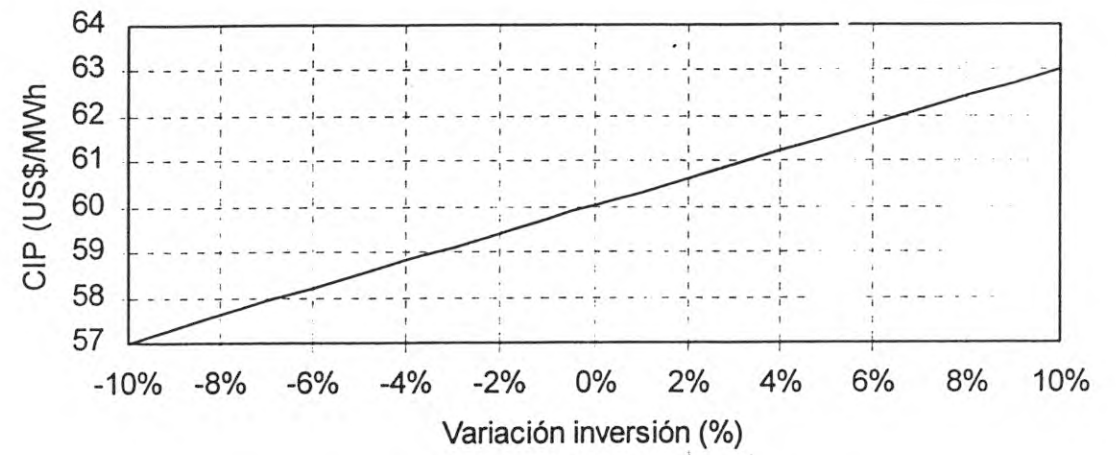


FIGURA 6-3 - Sensibilidad a la inversión

Frente al precio del combustible, el CIP varía proporcionalmente: Al aumentar en un 10 % este precio, el CIP aumenta en un 2,6 % (FIGURA 6-4):

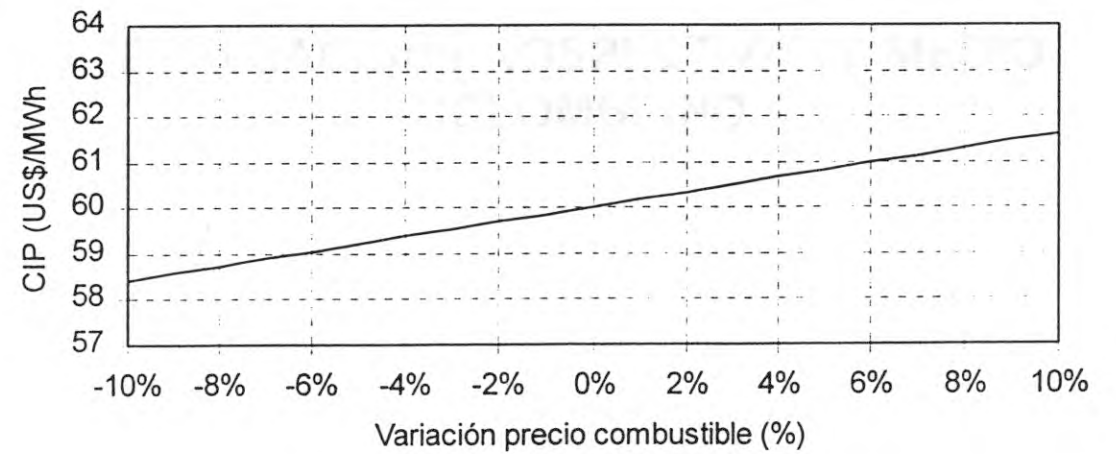


FIGURA 6-4 - Sensibilidad al precio del combustible

Resumiendo, el CIP de esta tecnología varía fundamentalmente con la inversión y el factor de utilización de la planta. Por cada 10 % de variación en algunas de estas variables el CIP cambia en un 5%.

EVALUACIÓN PROSPECTIVA AL MEDIO COLOMBIANO

TABLA DE CONTENIDO

7. EVALUACIÓN PROSPECTIVA AL MEDIO COLOMBIANO	1
7.1 PROSPECCIÓN DE COSTOS.....	1
7.1.1 Costo de transporte y seguro marítimo CIF	1
7.1.2 Costo de arancel CAR	2
7.1.3 Impuesto al valor agregado CIVA	2
7.1.4 Gastos portuarios GP.....	2
7.1.5 Costo de aduana, transporte y seguro terrestre CAT	3
7.1.6 Costo índice de inversión con prospección CII _{PRO}	3
7.1.7 Costo índice de producción con prospección CIP _{PRO}	3
7.2 ASPECTOS AMBIENTALES	4
7.2.1 Normas generales aplicables	4
7.2.2 Normas aplicables para el componente atmosférico	5
7.2.3 Normas aplicables para el componente hídrico	5
7.2.4 Normas aplicables sobre Residuos Sólidos	6
7.2.5 Normas aplicables para el componente fauna y flora	6
7.2.6 Normas aplicables para el componente social.....	7
7.2.7 Trámites para la obtención de la licencia ambiental	7
7.3 VENTAJAS Y DESVENTAJAS DE LA APLICACIÓN DE LA TECNOLOGÍA AL MEDIO COLOMBIANO	8

LISTA DE TABLAS

TABLA 7-1 - Resumen de la prospección de costos.....	4
--	---

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 7-1 - Composición de costos totales.....	1
FIGURA 7-2 - Trámite de obtención de la licencia ambiental	8

7. EVALUACIÓN PROSPECTIVA AL MEDIO COLOMBIANO

7.1 PROSPECCIÓN DE COSTOS

La siguiente prospección de costos de la implantación de un sistema de generación a base de gas obtenido de la madera al medio colombiano, se establece basado en el hecho de que el proyecto en estudio fue ejecutado en el extranjero y se desconocen las condiciones particulares que pudieron haber afectado directa o indirectamente dichos costos.

Dicha prospección se determina sobre la inversión, que para el caso de la generación por medio de gasificación de madera, representa el 49 % de los costos totales (FIGURA 7-1). Este porcentaje se obtuvo a partir de los resultados obtenidos en el capítulo 6.

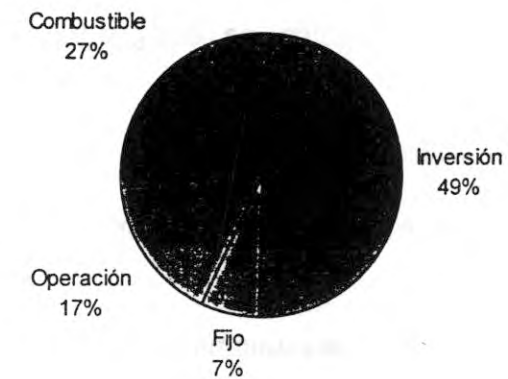


FIGURA 7-1 - Composición de costos totales

El CII_{FOB} (costo índice de inversión en puerto extranjero "free on board") se valora sobre el 49 % del CIP_{BASE} , obtenido en el capítulo 6:

$$CII_{FOB} = 49\% * CIP_{BASE} \quad (7-1)$$

7.1.1 Costo de transporte y seguro marítimo CIF

El CIF corresponde al costo de transporte y seguro marítimo y depende del peso y volumen de los equipos a transportar. Para efecto de este estudio, este costo se estima sobre un 12 % del CII_{FOB} :

$$\text{CIF} = 12\% * \text{CII}_{\text{FOB}} \quad (7-2)$$

Teniendo en cuenta este cargo de transporte y seguro marítimo, se puede deducir el CII sin nacionalizar:

$$\text{CII}_{\text{INTERNACIONAL}} = \text{CII}_{\text{FOB}} + \text{CIF} \quad (7-3)$$

7.1.2 Costo de arancel CAR

El arancel es un cargo que se debe pagar para legalizar la importación y depende del tipo de equipo y su procedencia. Para el caso en estudio, el arancel se estima en un 6.6 %, que corresponde a un valor típico de una planta de generación que utiliza turbinas a vapor¹:

$$\text{CAR} = \text{ARANCEL} * \text{CII}_{\text{INTERNACIONAL}} \quad (7-4)$$

7.1.3 Impuesto al valor agregado CIVA

El impuesto al valor agregado se calcula sobre el 16 % del CII sin nacionalizar más el arancel:

$$\text{CIVA} = \text{IVA} * (95\% * \text{CII}_{\text{INTERNACIONAL}} + \text{CAR}) \quad (7-5)$$

Teniendo en cuenta los cargos por arancel e IVA se puede, se puede deducir el CII nacionalizado:

$$\text{CII}_{\text{NACIONAL}} = \text{CII}_{\text{INTERNACIONAL}} + \text{CAR} + \text{CIVA} \quad (7-6)$$

7.1.4 Gastos portuarios GP

Los gastos portuarios incluyen aquellos gastos que se realizan en el puerto de desembarque, tales como grúas, bodega, etc. Estos se estiman sobre un 2 % del costo CII sin nacionalizar:

$$\text{GP} = 2\% * \text{CII}_{\text{INTERNACIONAL}} \quad (7-7)$$

¹ Plan de expansión de referencia 1996-2010; Ministerio de Minas y Energía, ISA y UPME; Capítulo 8; Evaluación financiera del plan y cálculo de costos a largo plazo.

7.1.5 Costo de aduana, transporte y seguro terrestre CAT

El CAT corresponde a los gastos de aduana y al costo de transporte y seguro terrestre de equipos, desde el puerto colombiano hasta las instalaciones. Este costo se estima sobre un 1 % del CII_{FOB}:

$$CTT = 1\% * CII_{FOB} \quad (7-8)$$

7.1.6 Costo índice de inversión con prospección CII_{PRO}

Reuniendo los cargos anteriormente expuestos, se obtiene el CII_{PRO} en función del CII_{FOB}:

$$CII_{PRO} = (P_{CAT} + (P_{GP} + 1 + 95\% * IVA + AR + IVA * AR)) * (1 + P_{CIF}) * CII_{FOB} \quad (7-9)$$

Donde: CII_{FOB} (US\$/kWh) = Costo índice de inversión en puerto extranjero

CII_{PRO} (US\$/kWh) = Costo índice de inversión con prospección

P_{CIF} (%) = Prospección por transporte y seguro marítimo

AR (%) = Arancel

IVA (%) = Impuesto al valor agregado

P_{GP} (%) = Prospección por gastos portuarios

P_{CAT} (%) = Prospección por aduana, transporte y seguro terrestre

7.1.7 Costo índice de producción con prospección CIP_{PRO}

Teniendo la prospección del costo índice de inversión CII_{PRO} es posible determinar la prospección del costo índice de producción CIP_{PRO}:

$$CIP_{PRO} = CII_{PRO} + (1 - 49\%) CIP_{BASE} \quad (7-10)$$

Donde: CIP_{BASE} (US\$/kWh) = Costo índice de producción base

CII_{PRO} (US\$/kWh) = Costo índice de inversión con prospección

CIP_{PRO} (US\$/kWh) = Costo índice de producción con prospección

Partiendo del CIP_{BASE} de 60 US\$/MWh calculado en el capítulo 6, se obtiene un CIP_{PRO} de 73 US\$/MWh (TABLA 7-1). La prospección sobre la inversión es del 41% y del 21% sobre los costos totales.

TABLA 7-1 - Resumen de la prospección de costos

Prospección por transporte marítimo	12	%
Prospección por arancel	6.6	%
Prospección por IVA	16	%
Prospección por gastos portuarios	2	%
Prospección por aduana y transporte terrestre	1	%
Prospección sobre inversión	41	%
Prospección sobre costos	21	%
CIP _{BASE}	60	US\$/MWh
CIF _{PRO}	73	US\$/MWh

7.2 ASPECTOS AMBIENTALES

La generación de energía eléctrica a partir de la energía obtenida por la gasificación de la madera, en posibles proyectos a ser desarrollados en el país, tendría los mismos problemas y beneficios vistos en el Capítulo 5. Así, las siguientes son las principales normas ambientales que se deben tener en cuenta, de acuerdo con el ordenamiento jurídico del sector :

7.2.1 Normas generales aplicables

- Constitución Política de Colombia 1991
- Ley 99 de Diciembre de 1993 y Decretos reglamentarios, por la cual se crea el Ministerio del Medio Ambiente, se reordena el Sector público encargado de la Gestión y Conservación del Medio Ambiente y los Recursos Naturales Renovables, se organiza el Sistema Nacional Ambiental, SINA y se dictan otras disposiciones.
- Código de Recursos Naturales: Ley 2811 de 1974 y Decretos Reglamentarios, el cual regula el manejo de los recursos naturales renovables, entre otros, la atmósfera, las aguas, la tierra, la fauna, la flora y los recursos energéticos primarios.

- Ley 09 de 1979 del Ministerio de salud y Decretos Reglamentarios, en donde se dictan las medidas sanitarias y se establece el Código Sanitario Nacional.

7.2.2 Normas aplicables para el componente atmosférico

- Decreto 002 de Enero de 1982 del Ministerio de Salud, en el cual se dictan las normas de calidad del aire y los métodos de medición, entre otros de partículas, óxidos de azufre y óxidos de nitrógeno.
- Resolución 08321 de 1983, por la cual se dictan normas para el control, la producción y emisión de ruidos, reglamentaria de la Ley 09 de 1979 del Ministerio de Salud.
- Decreto 948 de Junio de 1995 Ministerio del Medio Ambiente, por el cual se reglamenta parcialmente la Ley 23 de 1973 y la Ley 99 de 1993, en lo relacionado con la prevención y control de la contaminación atmosférica y la protección de la calidad del aire, modificado por el Decreto 2107 del 30 de noviembre de 1995.
- Resolución 898 Agosto de 1995 sobre calidad de combustibles. Ministerio del Medio Ambiente.
- Resolución 0619 de Julio 7 de 1997 del Ministerio del Medio Ambiente Artículo 2 : Las obras, industrias, actividades o servicios que no requieran permiso de emisión atmosférica estarán obligadas a cumplir con las normas de emisión establecidas en el decreto 948 de 1995 y los actos administrativos que lo desarrollen y estarán sujetos al control y seguimiento por parte de las autoridades competentes”.

7.2.3 Normas aplicables para el componente hídrico

- Decreto 1594 de Junio de 1984 del Ministerio de Salud, reglamenta a los usos del agua y vertimientos líquidos.
- Decreto 1541 de Julio de 1978 el cual reglamenta parte del Decreto - Ley 2811 de 1974 referente a las aguas no marítimas y parcialmente la Ley 23 de 1973.

7.2.4 Normas aplicables sobre Residuos Sólidos

- Decreto 2104 de Julio de 1983, en el cual se dictan las normas bajo las cuales el residuo sólido se clasifica, almacena, transporta y se dispone en el sistema sanitario.
- Resolución 541 de diciembre de 1994 en el que se regula el cargue, descargue, transporte, almacenamiento y disposición final de escombros, materiales, elementos concretos y agregados sueltos, de construcción, de demolición y capa orgánica, suelo y subsuelo de excavación.

7.2.5 Normas aplicables para el componente fauna y flora

- Código de Recursos Naturales: Ley 23 de 1973 y Decretos Reglamentarios, el cual regula el manejo de los recursos naturales renovables, entre otros, la atmósfera, las aguas, la tierra, la fauna la flora y los recursos energéticos.
- Decreto 2811 de 1974, que reglamenta la Ley 23 de 1973 en cuanto a la expedición del Código de los Recursos Naturales y de Protección al Medio Ambiente.
- Decreto 877 de 1976, el cual señala las prioridades referentes a los diversos usos del recurso forestal, a sus aprovechamientos y el otorgamiento de permisos y concesiones y dicta otras disposiciones.
- Ley 26 de 1977, mediante la cual se crea el Fondo Financiero Forestal.
- Decreto 1533 de 1978, el cual reglamenta parcialmente la Ley 26 de 1977.
- Decreto 2787 de 1980, el cual reglamenta parcialmente el Decreto - Ley 2811 de 1974, en cuanto a lo referente al aprovechamiento de bosques nacionales y bosques industriales.
- Acuerdo 17 de 1983, el cual delega al INDERENA las funciones de supervisión y control de asistencia técnica en las actividades forestales.
- Ley 37 de 1989, la cual da las bases para estructurar el Plan Nacional de Desarrollo Forestal y se crea el Servicio Forestal.
- Ley 139 de 1994, la cual establece el Certificado de Incentivo Forestal.

- Decreto 1791 de 1996, establece el Régimen de Aprovechamiento Forestal.
- Decreto 900 de 1997, el cual reglamenta el Certificado de Incentivo Forestal para la Conservación del Medio Ambiente.

7.2.6 Normas aplicables para el componente social

- Constitución política Colombiana
- Ley 99 de 1993 y decretos reglamentarios
- Decreto 1715 de 1978 por el cual se reglamenta parcialmente el Código de Recursos naturales, en cuanto a las regulaciones para impedir la alteración o deformación de elementos constitutivos del paisaje.

7.2.7 Trámites para la obtención de la licencia ambiental

Para desarrollar un proyecto de generación de cualquier naturaleza incluida la tecnología de Gasificación de la madera, es necesario realizar una serie de pasos hasta obtener la licencia ambiental. En la FIGURA 7- 1 se presenta un diagrama de flujo la secuencia de pasos a realizar para obtener dicha licencia.

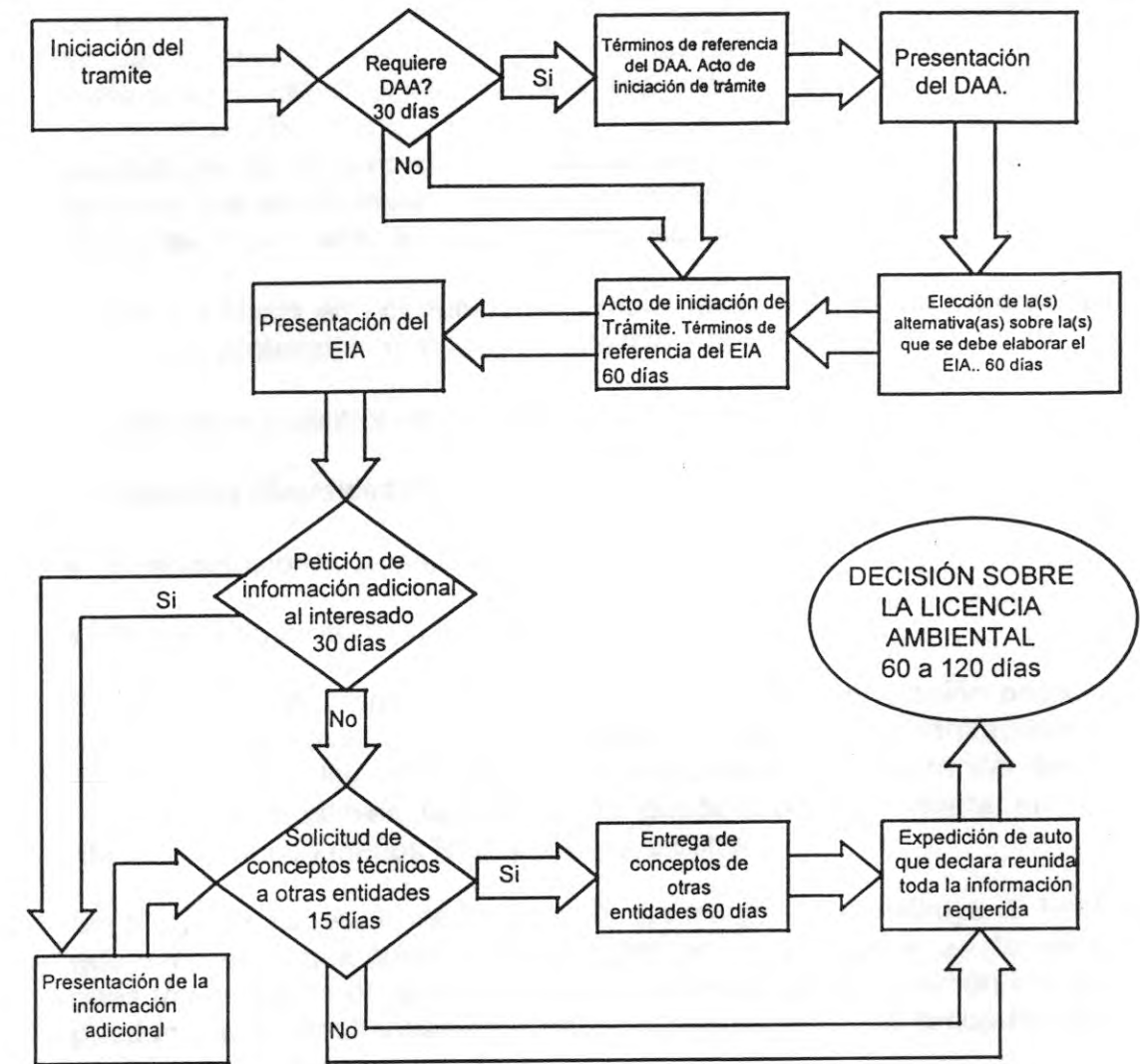


FIGURA 7-2 - Trámite de obtención de la licencia ambiental

7.3 VENTAJAS Y DESVENTAJAS DE LA APLICACIÓN DE LA TECNOLOGÍA AL MEDIO COLOMBIANO

En cuanto a la aplicación de la tecnología de la generación de energía eléctrica empleando la gasificación de la madera en el medio colombiano, se puede considerar que desde el punto de vista operativo y tecnológico no se presentarían mayores dificultades, ya que si bien el concepto global de un IGCC es complejo, está compuesto en su mayoría por sistemas que individualmente son ampliamente conocidos por las industrias colombianas, industrias que no son necesariamente generadoras termoeléctricas.

De acuerdo con lo anterior, se puede considerar que la mayor dificultad que se podría presentar al aplicar esta tecnología radica en cuestionamientos realizados desde el punto de vista ambiental al uso de la madera como combustible. Tal como se menciona en el capítulo 5, la tecnología de gasificación de madera es viable ambientalmente, única y exclusivamente si se hace uso de Sistemas Dedicados de Suministro de Madera, los cuales deben tener en cuenta los siguientes aspectos :

- Hacer énfasis en oportunidades ambientales, tales como : protección del habitat, protección de aguas y protección de suelos.
- Monitoreo y control de desperdicios y emisiones en la planta.
- Valorar la diversidad de especies.
- Consideraciones paisajísticas
- Asegurar la protección de áreas vulnerables.

En lo relacionado con las emisiones derivadas de la operación propia de la planta, la tecnología puede ser considerada como bondadosa, pues comparada con las tecnologías convencionales de generación térmica a base de combustibles fósiles, la de gasificación de madera emite a la atmósfera mucho menos NO_x y SO_2 que estas.

Un punto de especial interés de esta tecnología, lo constituye el hecho de que una planta que opere con gas obtenido de la madera, es despachable, pues los procesos de gasificación de la madera y la generación eléctrica se pueden hacer simultáneamente en cualquier período y el único requisito es contar con combustible (madera).

Gasificación de maderaAENE Consultoria

333.9539 A251g Ej.1

CATALOGADO POR: HELP FILE LTDA

FECHA PEDIDO	PRESTADO A	FECHA DEVUELTO