



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE QUÍMICA

T E S I S

MANCOMUNADA

**DESARROLLO DE LA INGENIERÍA BÁSICA PARA UNA PLANTA DE
PRODUCCIÓN DE BIOCARBÓN A PARTIR DE LA GASIFICACIÓN DE BIOMASA**

**QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE
INGENIEROS QUÍMICOS**

**P R E S E N T A N
DAVID GONZÁLEZ DÉCIGA
LUCIANO RÍOS SOLÍS**



MÉXICO, D.F.

2013



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

JURADO ASIGNADO:

PRESIDENTE: M. EN I. JOSÉ ANTONIO ORTIZ RAMÍREZ

VOCAL: ING. JUAN MARIO MORALES CABRERA

SECRETARIO: ING. JOAQUÍN RODRÍGUEZ TORREBLANCA

1ER. SUPLENTE: M. EN I. EZEQUIEL MILLÁN VELASCO

2DO. SUPLENTE: ING. GRACIELA GUADALUPE DEL CARMEN DÍAZ ARGOMEDO

SITIO DONDE SE DESARROLLÓ EL TEMA:

TORRE DE INGENIERÍA, 5° PISO, CIUDAD UNIVERSITARIA, COYOACÁN, C.P. 04510.

ASESOR DEL TEMA:

JOSÉ ANTONIO ORTIZ RAMÍREZ

SUSTENTANTES:

DAVID GONZÁLEZ DÉCIGA

LUCIANO RÍOS SOLÍS



T E S I S

DESARROLLO DE LA INGENIERÍA BÁSICA PARA UNA
PLANTA DE PRODUCCIÓN DE BIOCARBÓN A PARTIR DE
LA GASIFICACIÓN DE BIOMASA



“La Ingeniería Química es la ciencia que permite al ser humano transformar los sueños en una realidad eficiente y sustentable, a través del ingenio.”

- LRS

ÍNDICE DE CAPÍTULOS

ÍNDICE DE CAPÍTULOS	I
ÍNDICE DE TABLAS	V
ÍNDICE DE ILUSTRACIONES	VI
AGRADECIMIENTOS	VII
DE LUCIANO	VIII
DE DAVID	IX
CAPÍTULO I: GENERALIDADES	1
1.1. INTRODUCCIÓN	2
1.2. ANTECEDENTES	7
1.3. JUSTIFICACIÓN	9
1.4. ALCANCE GENERAL DEL PROYECTO	11
1.5. OBJETIVOS PARTICULARES	12
1.6. EXCLUSIONES DEL PROYECTO	12
CAPÍTULO II: MARCO TEÓRICO	13
2.1. BIOMASA	14
2.1.1. ¿QUÉ ES LA BIOMASA?	14
2.1.2. CARACTERÍSTICAS DE LA BIOMASA	16
2.1.3. JUSTIFICACIÓN DEL USO DE BIOMASA EN PROCESO DE GASIFICACIÓN	20
2.1.4. PROSPECTIVA TECNOLÓGICA A 10 Y 25 AÑOS	21
2.2. BIOENERGÍA	24
2.2.1. ¿QUÉ ES LA BIOENERGÍA Y LOS BIOCOMBUSTIBLES?	24
2.2.2. CARACTERÍSTICAS DE LA BIOENERGÍA	25
2.3. PROCESOS DE CONVERSIÓN TERMOQUÍMICOS	26
2.3.1. COMBUSTIÓN DIRECTA	26
2.3.2. PIRÓLISIS	26
2.3.3. GASIFICACIÓN	27
2.3.4. SELECCIÓN DE PROCESO DE COMBUSTIÓN	28
2.3.5. EMISIONES POR COMBUSTIÓN	29
2.4. TIPOS DE GASIFICADORES	30
2.4.1. GASIFICADORES DE LECHO FIJO O MÓVIL	30
2.4.2. GASIFICADORES DE LECHO FLUIDIZADO	33
2.4.3. SELECCIÓN DE TIPO DE GASIFICADOR	35
2.5. BIOCARBÓN	37
2.5.1. HISTORIA DEL BIOCARBÓN	37
2.5.2. ¿QUÉ ES Y PARA QUÉ SIRVE EL BIOCARBÓN?	38
2.6. PODER CALORÍFICO	40
2.6.1. PODER CALORÍFICO CALORIMÉTRICO (PCC)	41
2.6.2. PODER CALORÍFICO SUPERIOR (PCS)	41

2.6.3.	<i>PODER CALORÍFICO INFERIOR (PCI)</i>	41
2.7.	CICLO RANKINE DE POTENCIA	42
2.7.1.	<i>CICLO RANKINE IDEAL SIMPLE</i>	43
2.7.2.	<i>CICLO RANKINE REAL</i>	44
2.7.3.	<i>TERMOGRAF PARA CICLO RANKINE</i>	46
CAPÍTULO III: BASES DEL PROYECTO		51
3.1.	BASES DE DISEÑO	52
3.1.1.	<i>MATERIALES</i>	52
3.1.2.	<i>LUGAR DE ESTABLECIMIENTO</i>	54
3.1.3.	<i>CAPACIDAD DE LA PLANTA</i>	57
3.1.4.	<i>CONDICIONES DE PROCESO</i>	59
3.1.5.	<i>NORMATIVIDAD APLICABLE</i>	60
3.1.6.	<i>CONVENCIONES</i>	61
3.1.7.	<i>SERVICIOS AUXILIARES</i>	61
3.1.8.	<i>EQUIPOS DE RELEVO</i>	62
3.1.9.	<i>ESTUDIOS ECONÓMICOS</i>	62
3.1.10.	<i>DIAGRAMAS DE BLOQUES</i>	64
3.1.11.	<i>DIAGRAMA DE BLOQUES PARA GASIFICACIÓN DE BIOMASA</i>	65
3.2.	CRITERIOS DE DISEÑO	66
3.2.1.	<i>TURBINA DE VAPOR</i>	66
3.2.2.	<i>GASIFICADOR DOWNDRAFT</i>	68
3.2.3.	<i>CALDERA PIROTUBULAR</i>	71
3.2.4.	<i>FILTRO DE ARENA</i>	71
3.2.5.	<i>RECIPIENTES A PRESIÓN Y ATMOSFÉRICOS</i>	73
3.2.6.	<i>BOMBAS</i>	74
3.2.7.	<i>VELOCIDADES RECOMENDADAS</i>	74
CAPÍTULO IV: DIAGRAMA DE FLUJO DE PROCESO		75
4.1.	DFP: PLANTA DE BIOCARBÓN	76
4.2.	LISTA DE EQUIPOS	77
4.3.	BALANCE DE MATERIA Y ENERGÍA	78
CAPÍTULO V: DESCRIPCIÓN DEL PROCESO		80
5.1.	ÁREA 100: GASIFICACIÓN	81
5.2.	ÁREA 200: FILTRACIÓN Y RECUPERACIÓN DE CALOR	82
5.3.	ÁREA 300: CONDENSACIÓN Y DESGASIFICACIÓN	83
5.4.	ÁREA 400: CICLO RANKINE DE POTENCIA	84
CAPÍTULO VI: MEMORIAS DE CÁLCULO		86
6.1.	GASIFICADOR <i>DOWNDRAFT</i> GF-101 A/B	87
6.2.	PODER CALORÍFICO INFERIOR DE SYNGAS	89

6.3.	CÁLCULO DE AIRE PARA COMBUSTIÓN DE SYNGAS	89
6.4.	CALDERA PIROTUBULAR CA-401	92
6.5.	DESAIREADOR DA-301	94
6.6.	TURBINA DE VAPOR TV-401	95
6.7.	BOMBAS B-301 A/B	96
6.8.	BOMBAS B-401 A/B	97
6.9.	SEPARADOR CICLÓNICO CL-201	98
6.10.	DIÁMETRO DE TUBERÍAS	100
CAPÍTULO VII: HOJAS DE DATOS		101
7.1.	GASIFICADOR <i>DOWNDRAFT</i> GF-101 A/B	102
7.2.	TURBINA DE VAPOR TV-401	104
7.3.	CALDERA PIROTUBULAR CA-401	106
CAPÍTULO VIII: DIAGRAMA DE TUBERÍA E INSTRUMENTACIÓN		108
8.1.	DTI-PBC-001 (ÁREAS 100 Y 200)	109
8.2.	DTI-PBC-002 (ÁREAS 300 Y 400)	110
8.3.	LISTA DE LÍNEAS	111
8.4.	LISTA DE INSTRUMENTOS	112
8.4.1.	<i>INSTRUMENTOS LOCALES ACCESIBLES</i>	112
8.4.2.	<i>INSTRUMENTOS ACCESIBLES CON DISPLAY</i>	113
8.4.3.	<i>INSTRUMENTOS EN LÍNEA</i>	114
CAPÍTULO IX: FILOSOFÍA DE OPERACIÓN Y CONTROL		115
9.1.	FILOSOFÍA DE OPERACIÓN: GENERALIDADES	116
9.2.	ÁREAS 100 Y 200	116
9.3.	ÁREAS 300 Y 400	118
CAPÍTULO X: COSTOS DEL PROYECTO		122
10.1.	ESTUDIO DE MERCADO	123
10.2.	ENTORNO NACIONAL	123
10.3.	COMPETENCIA DE MERCADO	127
10.4.	CONSUMIDORES DE BIOCARBÓN	127
10.5.	FINANCIAMIENTO DEL PROYECTO	128
10.5.1.	<i>CRÉDITO PARA PROYECTOS DE INVERSIÓN</i>	128
10.5.2.	<i>PROGRAMA DE APOYO PARA PROYECTOS SUSTENTABLES</i>	129
10.6.	ANÁLISIS DE LA INVERSIÓN	129
10.6.1.	<i>CRITERIO DE SELECCIÓN DE INVERSIONES</i>	129
A.	VALOR PRESENTE NETO [VPN]	129
B.	RETORNO SOBRE LA INVERSIÓN [ROI]	130
C.	PERIODO DE RECUPERACIÓN DE LA INVERSIÓN [PRI]	130
10.7.	COSTOS DEL PROYECTO	131
10.8.	ANÁLISIS DEL COSTO DEL PROYECTO	134

10.8.1.	<i>CALCULANDO ROI DEL PROYECTO</i>	134
10.8.2.	<i>RESULTADO GRÁFICO DE ROI DEL PROYECTO</i>	134
10.8.3.	<i>CALCULANDO VPN DEL PROYECTO</i>	135
10.8.4.	<i>RESULTADO GRÁFICO DEL VPN DEL PROYECTO.</i>	135
10.8.5.	<i>CALCULANDO PRI DEL PROYECTO</i>	136
10.8.6.	<i>RESULTADO ITERATIVO Y GRÁFICO DEL PRI DEL PROYECTO</i>	136
CAPÍTULO XI: MAQUETA 3D		137
11.1.	ARREGLO GENERAL DE EQUIPOS (<i>LAYOUT</i>)	138
11.2.	MAQUETA 3D	139
CAPÍTULO XII: CONCLUSIONES Y RECOMENTACIONES		143
12.1.	CONCLUSIONES	144
12.2.	RECOMENDACIONES	146
BIBLIOGRAFÍA		148

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1 . Estados típicos de la biomasa (BUN-CA, 2002, pág. 10).	16
Tabla 2 . Composición química de diferentes formas de biomasa (BUN-CA, 2002, pág. 48).....	17
Tabla 3 . Poder calorífico de algunas formas de biomasa (BUN-CA, 2002, pág. 49).	19
Tabla 4 . Tabla de combustibles indirectos (Masera, Aguillón, & Gamino, 2005, pág. 9).	21
Tabla 5 . Costo de la biomasa, inversión de las instalaciones, energía útil y situación de la tecnología (Masera, Aguillón, & Gamino, 2005, pág. 14).	23
Tabla 6. Clasificación de los biocombustibles con base en su proceso tecnológico (Masera Cerutti, 2011, pág. 8).....	24
Tabla 7. Composición del <i>syngas</i> (Proenza Pérez, Cala Aiello, Luz Silveira, & Zanzi, 2006).	28
Tabla 8 . Principales características de los diversos tipos de gasificadores (Castells & Velo, 2012, pág. 436).....	35
Tabla 9 . Modo de contacto dependiendo del tipo de gasificador (Castells & Velo, 2012, pág. 433)....	35
Tabla 10 . Datos de los estados termodinámicos obtenidos de TermoGraft para el Ciclo Rankine Real @600 psig y 825°F con una extracción a 50 psia (elaboración propia).	49
Tabla 11 . Datos de los procesos llevados a cabo en el Ciclo Real Rankine @600psig y 825°F con una extracción a 50 psia, obtenidos de TermoGraf (elaboración propia).	50
Tabla 12. Eficiencia de turbina de vapor según caballaje (Branan, 1976, pág. 31).	66
Tabla 13. Eficiencia de turbinas de vapor pequeñas según caballaje (Branan, 1976, pág. 31).....	66
Tabla 14. Valores estándar para vapor de turbina según ASME-IEEE (Perry, 2005, págs. 29-33).....	67
Tabla 15. Productos según la tecnología de pirólisis usada (Lesme Jaén, 2000).....	70
Tabla 16. Rendimientos de productos según el tipo de pirólisis usada (Lesme Jaén, 2000).....	70
Tabla 17. Criterios para filtros con diferentes lechos de arena (FRESNO Valves, 2008).	72
Tabla 18. Criterios para filtros con diferentes lechos de arena (continuación).	72
Tabla 19. LdE-PBC-Rev_0: Lista de equipos (elaboración propia)	77
Tabla 20 . Cálculos para el poder calorífico de <i>syngas</i> (elaboración propia).....	89
Tabla 21 . Cálculo de flujos parciales por componente de <i>syngas</i> (elaboración propia).	90
Tabla 22 . Balance de reacciones de combustión de <i>syngas</i> (elaboración propia).	90
Tabla 23 . Composición del aire (SMA, 2012).	91
Tabla 24 . Superficie agrícola total según tipo de tecnología aplicada para el manejo de los cultivos o plantaciones por region ecológica (2012). Unidades en hectareas (INEGI, 2012).	125
Tabla 25 . Costo de equipos principales usando factor de actualización de costo CEPSE. Elaboración propia.	131
Tabla 26 . Costo del terreno para 2,000 m ² . Elaboración propia.	132
Tabla 27 . Costos Totales del Proyecto. Elaboración propia.....	132
Tabla 28 . Precio de venta de biocarbón y energía eléctrica excedente . Elaboración propia.....	132
Tabla 29 . Cálculo del Flujo de Efectivo por producción de biocarbón. Elaboración propia.	132
Tabla 30. Cálculo del Flujo de Efectivo por producción de electricidad. Elaboración propia.	133
Tabla 31. Flujo Neto de Efectivo para la planta de biocarbón. Elaboración propia.	133
Tabla 32 . Gastos del proyecto. Elaboración propia.	133
Tabla 33 . Cálculo de ROI del proyecto. Elaboración propia.....	134
Tabla 35 . Cálculo del VPN del proyecto. Elaboración propia.....	135
Tabla 36 . Cálculo del PRI del proyecto. Elaboración propia.	136
Tabla 37 . Cálculo iterativo del PRI del proyecto. Elaboración propia.....	136

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

Ilustración 1. Origen de la biomasa (Sofos Energía, 2010) -----	14
Ilustración 2. Ruta de conversión de biomasa a energía (Maser Cerutti, 2007).-----	15
Ilustración 3 . Poder calorífico de la biomasa forestal en función del contenido de humedad (Oraga, Berset, & Grünhut, 1987, pág. 4.6). -----	18
Ilustración 4 . Valor calorífico en función de la humedad relativa (BUN-CA, 2002, pág. 50). -----	19
Ilustración 5 . Esquema de gasificador en contra-corriente (Oraga, Berset, & Grünhut, 1987, pág. 4.14). -----	31
Ilustración 6 . Esquema de gasificador de corrientes paralelas (Oraga, Berset, & Grünhut, 1987, pág. 4.17). -----	33
Ilustración 7 . Esquema general de gasificador lecho fluidizado (FAO, 1993). -----	34
Ilustración 8. Rendimiento en cultivos con biocarbón y fertilizante común (Woods End Laboratories, 2009). -----	37
Ilustración 9. Beneficios del uso de biocarbón en agricultura (Sierra Alcázar, 2011).-----	40
Ilustración 10. Diagrama T-s para ciclos de vapor de Carnot (Cengel & Boles, 2009, pág. 562). -----	42
Ilustración 11 . Ciclo Rankine ideal simple (Cengel & Boles, 2009, pág. 563).-----	43
Ilustración 12 . a) Desviaciones del ciclo Rankine ideal vs el ciclo real. b) Efecto de las irreversibilidades de la bomba y la turbina en el ciclo Rankine ideal (Cengel & Boles, 2009, pág. 568). -----	45
Ilustración 13. Diagrama T-s del Ciclo Rankine Ideal @600 psig y 825°F generado con TermoGraf (elaboración propia). -----	47
Ilustración 14. Diagrama T-s del Ciclo Rankine Real @600 psig y 825°F generado con TermoGraf (elaboración propia). -----	48
Ilustración 15 . Diagrama T-s del Ciclo Rankine Real @600 psig y 825°F con una extracción de vapor a 50 psia generado con TermoGraf (elaboración propia).-----	49
Ilustración 16 . Diagrama P-h del Ciclo Rankine Real @600psg y 825°F con una extracción de vapor a 50 psia generado con TermoGraf (elaboración propia) -----	50
Ilustración 17 . Ubicaciones posibles para Planta de biocarbón (Google Maps).-----	54
Ilustración 18 . Vista lateral para opción A (Google Maps).-----	54
Ilustración 19 . Vista lateral para opción B (Google Maps).-----	55
Ilustración 20 . Vista del Río Apatlaco, Cuernavaca, Morelos (Google Maps). -----	55
Ilustración 21. Diagrama de bloques para pretratamiento de la biomasa (elaboración propia). -----	64
Ilustración 22. Diagrama de bloques del proceso general de gasificación de biomasa (elaboración propia). -----	65
Ilustración 23. Comportamiento del Cp vs T (Fuentes Hernández & Recio Recio, 2005, pág. 89).-----	69
Ilustración 24. Comportamiento del Calor vs T (Fuentes Hernández & Recio Recio, 2005, pág. 89). ---	69
Ilustración 25. Rendimientos de productos según el tipo de pirólisis usada. -----	70
Ilustración 26 . Superficie agrícola total de las unidades de producción según tipo de tecnología aplicada para el manejo de los cultivos o plantaciones por región ecológica (Porcentaje) (INEGI, 2012). -----	126
Ilustración 27 . Porcentaje de ROI en función de la cantidad de años del proyecto. Elaboración propia. -----	134
Ilustración 28 . VPN en función del número de años del proyecto. Elaboración propia. -----	135
Ilustración 29 . PRI (en MxN) en función del número de años. Elaboración propia -----	136

CAPÍTULO I

GENERALIDADES

1.1. INTRODUCCIÓN

El presente proyecto tiene la finalidad de evaluar económicamente la producción de biocarbón a partir del proceso de gasificación de biomasa agroforestal, para lo cual se generaron diversos documentos, que en lenguaje coloquial de la ingeniería, se conocen como “entregables”, mismos en los que se plasman toda la información del proyecto y conforman la Ingeniería Conceptual e Ingeniería Básica de una planta de gasificación.

La gasificación de biomasa es actualmente uno de los métodos más avanzados y eficientes de producción de biocarbón a partir de una fuente renovable, como lo es la biomasa proveniente de los aserraderos, que además es considerada material de desecho.

El biocarbón tiene la propiedad particular de mejorar la fertilidad de los suelos, y sobre todo de secuestrar el CO₂ que se encuentra en la atmósfera debido a la quema de combustibles fósiles, carbón y madera; con esto se reduce el deterioro ambiental y equilibra el ciclo del carbono a medida que se emplee más esta tecnología.

Durante la obtención del biocarbón con la gasificación, adicionalmente se genera gas de síntesis, mismo que se limpia con el fin de utilizarlo para producir energía eléctrica mediante la expansión de vapor de agua en una turbina en lo que se conoce como ciclo Rankine de potencia, obteniéndose así un ciclo de producción energéticamente autosuficiente.

La ingeniería que representa este proceso de gasificación se muestra en los próximos capítulos con cada entregable, que es el sustento sólido y tangible para lograr el alcance establecido mediante el conocimiento adquirido en la carrera de ingeniería química y fundamentada en diversas fuentes de información especializada.

Los entregables tienen un peso específico muy importante en los proyectos de ingeniería, debido a que son los pilares para fases futuras del desarrollo de una planta de producción, como la ingeniería de detalle, procura, construcción y puesta en marcha de todos los equipos, instrumentos, válvulas, controladores, y todo lo necesario para su correcto funcionamiento. Por esto mismo, los entregables son la columna vertebral de las diferentes etapas de ingeniería, y la base de la transición entre una y otra de estas fases; por lo que es de más decir que toda la información presentada debe ser fiable y con la base más sólida posible.

A continuación se presenta una descripción breve de los entregables generados para cubrir la Ingeniería Básica de este proyecto, con una breve descripción de su contenido que se puede ver aplicado en su respectiva sección.

- **Bases de Diseño.** En este documento se presenta el sustento de todo el proyecto, es decir, se describe la materia prima así como sus condiciones que debe tener para su procesamiento, y los servicios auxiliares que se deben considerar. También se muestran las condiciones meteorológicas del lugar de asentamiento de la planta para

usarlos en futuros cálculos, poniendo a su vez las vías de acceso que se necesitaran para suministro de equipos y/o materias primas.

Además se debe divisar la capacidad de la planta junto con el sobrediseño de los equipos para cubrir temporadas altas de producción, tomando en cuenta las precauciones de seguridad de los equipos que presenten algún riesgo potencial a través de estándares, códigos y normas aplicables, con el fin de evitar desastres y pérdida de vidas.

La información presentada en este entregable es la base para otros documentos que se generarán más adelante.

- **Criterios de Diseño.** Es el documento en el cual se exponen los criterios heurísticos encontrados en varias fuentes de información especializada que sirven para el prediseño de equipos y tuberías. Estos criterios se obtienen generalmente de la experiencia después de probar durante mucho tiempo distintas condiciones tras lo cual se obtiene el mejor resultado de operación.

Los valores son una guía rápida pero muy certera a la hora de tomar decisiones, lo que resulta en comparaciones de las memorias de cálculo que se elaboran teóricamente contra resultados muy próximos a lo que se tiene en plantas operando.

- **Diagrama de Flujo de Proceso (DFP).** Se trata de un dibujo esquemático y generalmente abstracto del proceso, en el cual se representa de manera simbólica el paso de las corrientes de proceso por los equipos (que son apodados con un *tag* de manera sistemática para facilitar futuras referencias), tratando de que sea una representación fiel de la realidad. Este tipo de diagramas contiene los límites de batería, los cuales representan la barrera del trabajo que abarca el alcance del proyecto.

En el DFP se numeran las corrientes cumpliendo dos funciones, la primera es para fácil identificación y la segunda es para poder hacer un balance de materia y energía de todo el proceso contenido dentro de los límites de batería, mismo que se suele mostrar de manera compacta en este diagrama.

- **Lista de Equipos.** Es el entregable que muestra en una tabla todos los equipos involucrados en el proceso, los cuales se pueden extraer del DFP, adicionándole las condiciones de operación y diseño a las que se encontrará sometido cada equipo enlistado.

Aquí se hace referencia al *tag* identificador de cada equipo, dándole una descripción un tanto más detallada. Y como todos los entregables, sirve para dar información resumida de todas las partes que integran el proceso.

- **Balance de Materia y Energía.** Se trata de una tabla resumen de las operaciones de balance realizado en las memorias de cálculo, mostrando en una tabla compacta el número de corriente, el tipo de fluido correspondiente, la fase en la que se encuentra, la composición, el flujo a sus respectivas condiciones de presión y temperatura; algunas propiedades como densidad, entalpía y entropía según se requiera. Esto con la finalidad de ver la transformación de las corrientes al pasar por los diversos equipos, y proporcionar información resumida pero suficiente para entender el proceso.
- **Descripción del Proceso.** En este documento se describe paso a paso el proceso que se sigue en el DFP, con la ayuda del balance de materia y energía para puntualizar algunos detalles en la tecnología utilizada. De esta manera se detalla y explica lo necesario para poder entender el procesamiento de la materia prima a través de los diferentes equipos, describiendo con más detalle la función de cada uno, así como las transformaciones que ocurren dentro de los equipos.

Aquí se hace uso de los *tag* de equipos y la numeración de las corrientes para hacer referencia más específica y evitar confusiones, ya que se requiere ser lo más clara y concisa esta explicación.

- **Memorias de Cálculo.** Se trata de una serie de documentos que contiene todas las operaciones realizadas para prediseñar o diseñar un equipo, basado en modelos específicos para cada tipo de equipo obtenidos de fuentes de información especializada.

Los modelos matemáticos empleados deben ser escogidos para cumplir lo establecido en las bases de diseño y el DFP, así como también utilizar criterios de diseño anteriormente postulados para facilitar los cálculos, aplicando lo correspondiente en cuanto a reglas heurísticas y sobrediseño especificado.

Estos cálculos se realizan de forma más detallada posible, ya que son la base del balance de materia y energía, y por consiguiente el soporte de etapas posteriores de ingeniería.

- **Hojas de Datos de Equipo.** Es el entregable que contiene la especificación técnica del equipo, esto es, la información mínima necesaria de proceso, materiales de construcción, accesorios e instrumentos, junto con un esquema de boquillas con su respectiva especificación para el equipo en cuestión.

Es un documento sumamente técnico, debido a que este entregable se distribuye a vendedores de equipo para su respectiva cotización, por lo que la información contenida debe ser específica, pero a la vez debe contener los datos suficientes para que el proveedor pueda considerar todos los aspectos de nuestro equipo en el costo.

Cabe aclarar que se debe hacer una hoja de datos por cada equipo diferente o equipo paquete que se requiera cotizar, teniendo en cuenta las respectivas revisiones, ya que en cada etapa de ingeniería se va actualizando y complementando con la información obtenida del vendedor y otras disciplinas que colaboran en el proyecto.

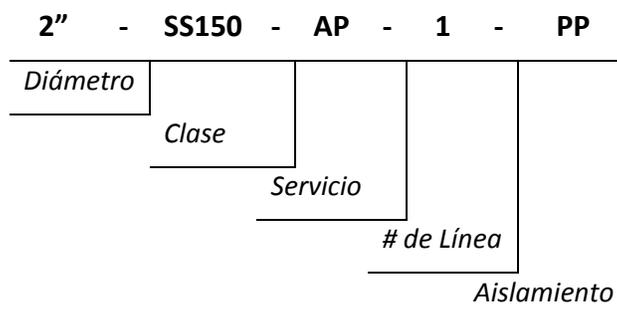
- **Diagrama de Tubería e Instrumentación (DTI).** Al igual que el DFP se trata de un diagrama esquemático del proceso, pero en este caso es más detallado y se le adicionan las válvulas y los instrumentos de control del proceso, ya sea para un control automatizado de la planta y/o control manual, junto con su respectivo sistema de seguridad de los equipos que tienen un riesgo potencial para el proceso o la seguridad del personal. La instrumentación debe ser adecuada para contemplar escenarios de arranque, paro normal y paro de emergencia.

La instrumentación debe ser muy específica, y debe contener señales eléctricas y/o neumáticas a los instrumentos para saber cuáles instrumentos están interconectados. Este tipo de diagramas debe ser una representación fiel a lo que se tiene o se quiere tener instalado en campo, y además se debe codificar el nombre de las líneas a fin de tener una referencia futura a alguna tubería en especial.

- **Lista de Líneas.** Este documento muestra la información de las líneas localizadas en el DTI, por lo que es un entregable complementario de estos diagramas de tubería e instrumentación.

El documento debe contener el *tag* de la línea, su respectivo diámetro, tipo de fluido, condiciones de operación (P, T, flujo y densidad principalmente), tipo de servicio; así como información más técnica como especificación de tubería, aislamiento y clase según la norma establecida en las bases de diseño.

La codificación del *tag* debe resumir todos los datos principales de la tubería, por lo que debe contener el diámetro, clase, servicio, número de identificación (generalmente acorde al número de línea del DFP), tipo de aislamiento y especificación. La codificación de este proyecto es la siguiente:



Este entregable tiene como finalidad, ser una referencia rápida de las tuberías que se tienen en la planta, por lo que también es primordial contar con la información de origen y destino de la tubería para poder localizarla fácilmente.

- **Lista de Instrumentos.** Es una lista extraída de los instrumentos contenidos en el DTI, con su respectiva descripción de cada uno, su *tag*, el tipo al que corresponde según la clasificación establecida y dimensiones principales si es posible. Esta lista es complementada con datos técnicos dados por un especialista en instrumentación que proporciona rango de funcionamiento, operación en caso de falla, *loop* de operación, tipo de señal, etc.
- **Filosofía de Operación y Control.** Se trata de una descripción detallada sobre el funcionamiento del control de la planta con los instrumentos de medición y control, tomando como referencia lo que está representado en el DTI.

Aquí se detalla el funcionamiento de cada equipo con datos específicos de las condiciones que debe tener el proceso, así como la operación de cada instrumento y válvula mostrada en el DTI, además se consideran las acciones que hace cada uno en determinadas situaciones de seguridad y/o control de proceso.

Es importante mencionar que lo que se dice en la filosofía de operación debe estar en completa concordancia con lo mostrado en el diagrama de tubería e instrumentación. Debe contemplar las etapas de arranque normal, operación normal, paro normal y paro de emergencia principalmente.

- **Arreglo General de Equipos (*Layout*).** Es un dibujo esquemático que muestra la ubicación de los equipos comprendidos en la planta desde una vista aérea, generalmente mostrando dimensiones y cotas en las distancias.
- **Modelo 3D de la Planta.** No se trata de un documento físico como tal, sino más bien, es un documento digital para ser visualizado en software especial de modelado tridimensional, pero se considera a este como la culminación de las fases de la ingeniería, debido a que en este modelo se puede ver completamente toda la información generada en las memorias de cálculo, DFP y DTI completamente integrada en un esquema real de cómo quedaría la planta terminada con los equipos, tuberías, válvulas e instrumentos instalados.

El manejo de estos documentos completamente técnicos son de vital importancia en los proyectos de ingeniería, en ellos participan diferentes disciplinas que complementan de manera integral toda la información contenida en los mismos.

1.2. ANTECEDENTES

Las formas más utilizadas de energía renovable son las que provienen del sol y del viento (BUN-CA, 2002, pág. 4). Sin embargo existen otras fuentes que si bien ya se utilizaban desde la antigüedad, como es el caso de la biomasa en forma de leña o carbón vegetal, no es la manera más eficiente ni energéticamente viable para seguir utilizando métodos que son altamente contaminantes y contribuyen severamente al calentamiento global por el desequilibrio que provocan en el medio ambiente, esto debido a que los gases liberados a la atmósfera causan el efecto invernadero.

La biomasa se ha usado por el hombre desde tiempos remotos como la fuente de energía más antigua, y ahora en la actualidad se tienen formas más eficientes de transformarla en energía, sobre todo más amigablemente con el ambiente en comparación a como lo hacían nuestros ancestros.

Desde hace mucho tiempo la biomasa se ha empleado para generar calor a través de la combustión directa de leña y/o carbón vegetal, esto con el fin de poder transferir esta energía térmica al agua para producir vapor, cocinar o simplemente para quitarse el frío quemándolo en chimeneas o fogatas al aire libre sin importar la cantidad de CO y CO₂ producidos durante el proceso, que son una fuente tóxica para las formas de vida con organismos aerobios como es el caso de seres humanos y animales.

Actualmente son pocos los países que están apostando por el uso de la biomasa en procesos de gasificación o pirólisis para generar productos como el biocarbón, bio-aceite o gas de síntesis. El mundo ya se está dando cuenta que los combustibles fósiles se están agotando y además están provocando afectaciones en los ecosistemas y en general al medio ambiente, lo que nos afecta a todas las especies de vida que habitamos el planeta Tierra.

Es por estos motivos que en este proyecto se intenta hacer ver la aplicación del proceso de gasificación de biomasa desarrollando la Ingeniería Básica con su respectiva evaluación económica de una planta de producción de biocarbón mediante esta tecnología que está a la vanguardia, porque nos encontramos en estos tiempos donde se necesitan implementar ideas que provoquen cambios importantes en la industrialización y el uso de energéticos renovables.

Aunado a esto, hoy en día también existe una fuerte demanda en utilizar desechos o residuos con el fin de producir nuevos productos de valor agregado, además de que hay un creciente esfuerzo por evitar el deterioro ambiental que ha sido provocado por el mismo hombre y evitar así el cambio climático.

Un foco de atención se nos presenta al ver que las emisiones totales de México ascienden a 643 millones de toneladas de CO₂ equivalente¹ por año. El uso de la bioenergía contenida en los residuos de industrias como los aserraderos, tiene potencial para contrarrestar gran cantidad de las emisiones de CO₂ (Balderrama Castañeda, Luján Álvarez, & et. al., 2001, pág. 68).

¹ Se le llama CO₂ equivalente porque el CH₄ y el N₂O se calculan en su equivalente de CO₂, según el potencial de calentamiento de estos gases.

Esta información nos muestra que es indispensable tomar medidas acerca de las emisiones producidas en nuestro país, por lo que con el presente proyecto se plantea una solución prometedora para poder utilizar los residuos agroforestales, carbonizándolos mediante un proceso de gasificación en donde se usa una cantidad mínima o nula de oxígeno haciendo la transformación de gran parte del carbono contenido en la biomasa en un gas volátil cargado de energía, obteniendo así el biocarbón y gas de síntesis (*syngas*).

El *syngas* se usa para producir electricidad mediante la implementación de la cogeneración de energía, transformando la energía térmica del vapor de agua que se obtiene con la quema del gas de síntesis en una caldera, en energía mecánica con la ayuda de una turbina, que a su vez está conectada a un alternador para producir la energía eléctrica.

La implementación de este tipo de sistema de cogeneración permite hacer autosustentable la producción de biocarbón, porque se usa parte del gas volátil producido para seguir gasificando más biomasa y más energía eléctrica.

La quema directa de biomasa genera dióxido de carbono ya que en la combustión normal el carbono se une al oxígeno para formar CO_2 , el principal gas invernadero, pero en un horno de gasificación se realiza la incineración de la biomasa con una mínima cantidad de oxígeno, esto hace que se produzca muchísimo menos dióxido de carbono.

Por lo anteriormente mencionado, es preciso tomar cartas sobre el asunto y comenzar a crear más proyectos usando la gasificación como proceso poco contaminante y económicamente factible, ya que en México se tiene una buena oportunidad de aprovechar la biomasa residual de los aserraderos para sacarles provecho económico y ambiental.

Así que si se emplea el conocimiento ancestral de la producción de biocarbón y se aplica la tecnología actual de gasificación se llega al resultado que se pretende realizar con este proyecto de Tesis, que no es otra cosa más que aplicar el proceso de gasificación de biomasa para una planta nueva realizando la Ingeniería Conceptual e Ingeniería Básica poniendo en práctica los conocimientos adquiridos en la carrera de ingeniería química.

1.3. JUSTIFICACIÓN

El proyecto se justifica debido al consumo excesivo que se tiene actualmente de los combustibles fósiles, la contaminación incontrolable que provocan, al costo cada vez más elevado provocado por el agotamiento de los mismos, ha ocasionado que se llegue a un punto en el que el Planeta pide a gritos que los ingenieros y científicos busquen nuevas alternativas en producción de energía limpia; así como también poder obtener productos que aprovechen los recursos renovables que son desechados.

El biocarbón se presenta como una alternativa para tener un mejor planeta, ya que ayudaría a equilibrar el ciclo del carbono que se inicia con el dióxido de carbono en la atmósfera; las plantas mediante la fotosíntesis descomponen este CO₂ en oxígeno que liberan a la atmósfera y en carbono de lo que básicamente están hechas sus hojas, ramas y troncos. Cuando las plantas mueren y caen al suelo, se descomponen regresando el carbono a la atmósfera nuevamente en forma de CO₂ completando el ciclo que se repite una y otra vez en un balance natural.

A partir de que el ser humano empieza a quemar combustibles fósiles, que es carbono que no se encontraba en el aire sino en el suelo, el balance natural se rompe debido al incremento del CO₂ en la atmósfera; así que no basta con dejar de emitir CO₂, sino que hay que capturarlo y devolverlo al suelo, siendo ahí donde interviene el proceso de gasificación de la biomasa, ya que el biocarbón es una solución para controlar el nivel de CO₂ en el ambiente, que es un gas de efecto invernadero, y por esto mismo afecta a las poblaciones en todo el mundo.

El producto obtenido de la gasificación de biomasa se puede utilizar para fijar el carbono atmosférico desde 300 hasta 10,000 años en el suelo mejorando notablemente las propiedades agronómicas, haciendo que la fijación de CO₂ sea mejor en las plantas debido a su buen desarrollo, consiguiendo con esto el retroceso del calentamiento global.

Actualmente en términos de conversión energética de biomasa a electricidad, destaca el desarrollo tecnológico y comercial que ha tenido la gasificación, debido a su flexibilidad y relativamente alta eficiencia con respecto a las tradicionales por combustión (Balderrama Castañeda, Luján Álvarez, & et. al., 2001, pág. 69).

Es por eso que este proyecto tiene la intención de dar una solución factible al uso de los desechos agroforestales para obtener biocarbón, que es un excelente secuestrador de CO₂ en el suelo, lo cual ayuda a fertilizar con una eficiencia mucho mayor que los fertilizantes actuales del mercado.

En México, la tecnología de gasificación se encuentra aún en la primera fase de estudio, con el primer laboratorio en vías de implantación en el Instituto de Ingeniería de la UNAM (Balderrama Castañeda, Luján Álvarez, & et. al., 2001, pág. 69). Lo que hace imperativo que los ingenieros comiencen a realizar proyectos de gasificación de biomasa, en especial para obtener biocarbón, gas de síntesis y/o electricidad, construyendo plantas tecnológicamente adecuadas a estos tiempos de contaminación global.

El rezago tecnológico de México en materia de gasificación se atribuye en gran medida a la dependencia de los combustibles fósiles para satisfacer la demanda de energía. No obstante, en México no existen políticas públicas orientadas hacia el aprovechamiento de la bioenergía, ni un marco jurídico específico o incentivos fiscales particulares (Balderrama Castañeda, Luján Álvarez, & et. al., 2001, pág. 69). Sin embargo esto no debe ser un obstáculo, sino más bien un impulso para el desarrollo de la tecnología de gasificación de biomasa para la generación de biocarbón, ya que hay que hacer ver que los tiempos están cambiando y se necesitan aprobar proyectos económicamente factibles y generando productos de valor agregado a partir de residuos agroforestales.

Los residuos de procesos forestales son una importante fuente de biomasa que actualmente es poco explorada, lo que da una oportunidad de mercado para obtener provecho de los residuos provenientes de la industria aserradora. Se considera que de cada árbol extraído para la producción de madera, sólo se aprovecha comercialmente un porcentaje cercano al 20%, un 40% es dejado en el campo en las ramas y raíces; el otro 40% se deja en el proceso de aserrío en forma de astillas, aserrín y corteza (BUN-CA, 2002, pág. 8). Lo que significa que se puede conseguir la materia prima necesaria para una planta de producción de biocarbón con un bajo costo debido a que los aserraderos consideran que son desechos.

La inversión en este tipo de proyectos es muy beneficiosa, debido a que el biocarbón serviría de sustento en los campos de cultivo para producir más alimentos gracias al poder reparador lo que dará ganancias a agricultores, y además se estará secuestrando el exceso de CO₂ atmosférico en el suelo, ocasionando un beneficio ambiental para todo el mundo.

Aunado a todas las ventajas mencionadas anteriormente, una planta de gasificación con la tecnología desarrollada en este proyecto, puede brindar veneficios de electricidad a comunidades aisladas, donde generalmente se encuentran los aserraderos, y también proporcionarles un fertilizante de calidad excepcional.

1.4. ALCANCE GENERAL DEL PROYECTO

Se desarrollará la Ingeniería Básica para una planta de producción de biocarbón a partir de la gasificación de biomasa proveniente de residuos aserraderos, para lo cual se elaborarán los entregables que la conforman, incluyendo una evaluación económica que cubrirá únicamente el área de la Planta de proceso (excluyendo oficinas, comedor, áreas generales, almacén); considerando un rango de -20 +30% sobre el costo total para dar a conocer la rentabilidad del proyecto.

La lista de entregables a realizar se enuncia a continuación:

- » Bases de Diseño
- » Criterios de Diseño
- » Diagrama de Flujo de Proceso (DFP)
- » Lista de Equipos
- » Balance de Materia y Energía
- » Descripción del Proceso
- » Memorias de Cálculo
 - Gasificador *Downdraft*
 - Caldera Piro-tubular
 - Desaireador
 - Turbina de Vapor
 - Bombas
 - Separador Ciclónico
 - Diámetro de Tuberías
- » Hojas de Datos de Equipo
 - Gasificador *Downdraft*
 - Caldera Piro-tubular
 - Turbina de Vapor
- » Diagrama de Tubería e Instrumentación (DTI)
- » Lista de Líneas
- » Lista de Instrumentos
- » Filosofía de Operación y Control
- » Arreglo General de Equipos (Layout)
- » Modelo 3D de la Planta de proceso

1.5. OBJETIVOS PARTICULARES

- » Generar un sistema de producción de biocarbón mediante gasificación a partir de residuos agroforestales.
- » Evaluar la viabilidad técnico-económica de la tecnología de gasificación de biomasa.
- » Utilizar un ciclo Rankine de potencia para hacer el proceso autosustentable, autogenerando energía eléctrica para el autoconsumo.
- » Desarrollar los entregables comprendidos en la Ingeniería Básica dentro de los límites de batería establecidos.
- » Generar una maqueta 3D a partir de DTI's inteligentes para mostrar una vista preliminar de la planta construida.

1.6. EXCLUSIONES DEL PROYECTO

- » Queda fuera del alcance de esta tesis, todo documento no mencionado en la lista de entregables.
- » El costo de inversión se encuentra en un -20 +30% del costo total, donde no se considera el costo de la Ingeniería de Detalle.
- » El estimado de costos es únicamente para la Planta de Proceso, quedan fuera de los límites de batería la construcción de oficinas, áreas generales, comedor, almacén, servicios auxiliares; esto debido a que sería una consideración en la Ingeniería de Detalle.
- » El modelo tridimensional de la planta, es sólo para el área de la Planta de Proceso.
- » Se excluye la comparación técnica-económica de la tecnología de gasificación usando motores de combustión interna.

C A P Í T U L O I I

M A R C O T E Ó R I C O

2.1. BIOMASA

2.1.1. ¿QUÉ ES LA BIOMASA?

Existen diversas definiciones, pero el más adecuado para este trabajo es que “el término biomasa se define como el conjunto de materia orgánica que conforma un ecosistema presente en los organismos vivos, muertos o segregados por ellos, pero en ningún caso fósil” (González Martínez, 2007, pág. 1). Incluye por tanto, recursos forestales, plantas terrestres y/o acuáticas, subproductos agrícolas, ganaderos, urbanos e industriales; lo que la hace la materia prima adecuada para producir energía limpia y renovable.

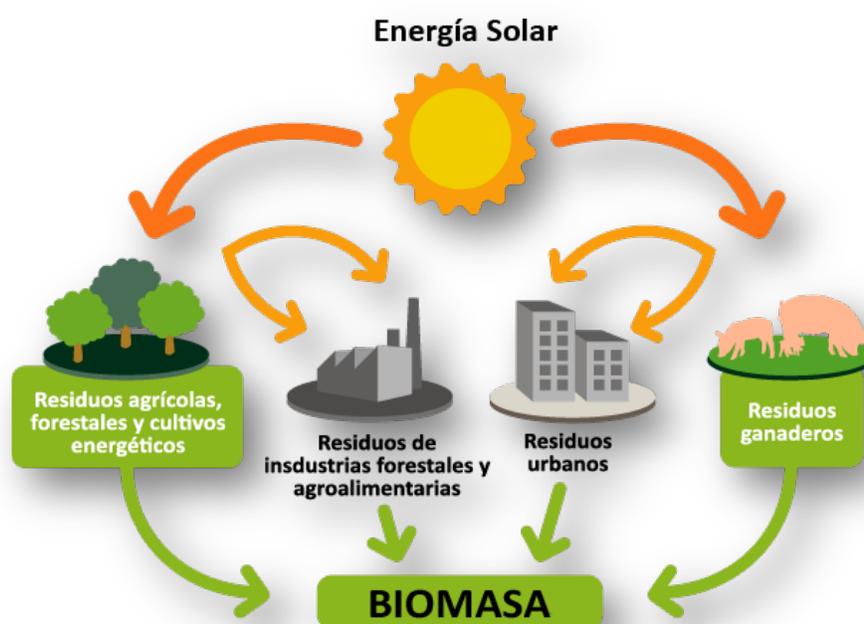


Ilustración 1. Origen de la biomasa (Sofos Energía, 2010)

Parte de la biomasa se divide principalmente en:

- a) **Natural.** Producida por los elementos de ecosistemas naturales.
- b) **Residual.** Esta subdividida en:
 - i. **Residuos forestales**
 - ii. **Residuos agrícolas leñosos**
 - iii. **Residuos agrícolas herbáceos**
 - iv. **Residuos de industrias forestales**
 - v. **Residuos de industrias agrícolas**
 - vi. **Residuos biodegradables**

Los recursos forestales, se componen de:

- a) **Combustibles de madera directos.** Provenientes de bosques naturales o plantaciones.
- b) **Combustibles de madera indirectos.** Provenientes de la industria de aserrío.

Dada esta división, en el presente proyecto se usa como biomasa a los materiales secundarios de los aserraderos como materia prima de un proceso termoquímico, aprovechando un recurso renovable de manera eficiente para producir biocarbón y energía eléctrica.

A continuación se presenta una imagen donde se pueden ver los diversos procesos en los que se usa biomasa para producir algún tipo de energía renovable. El proceso de interés para este proyecto, es la gasificación.

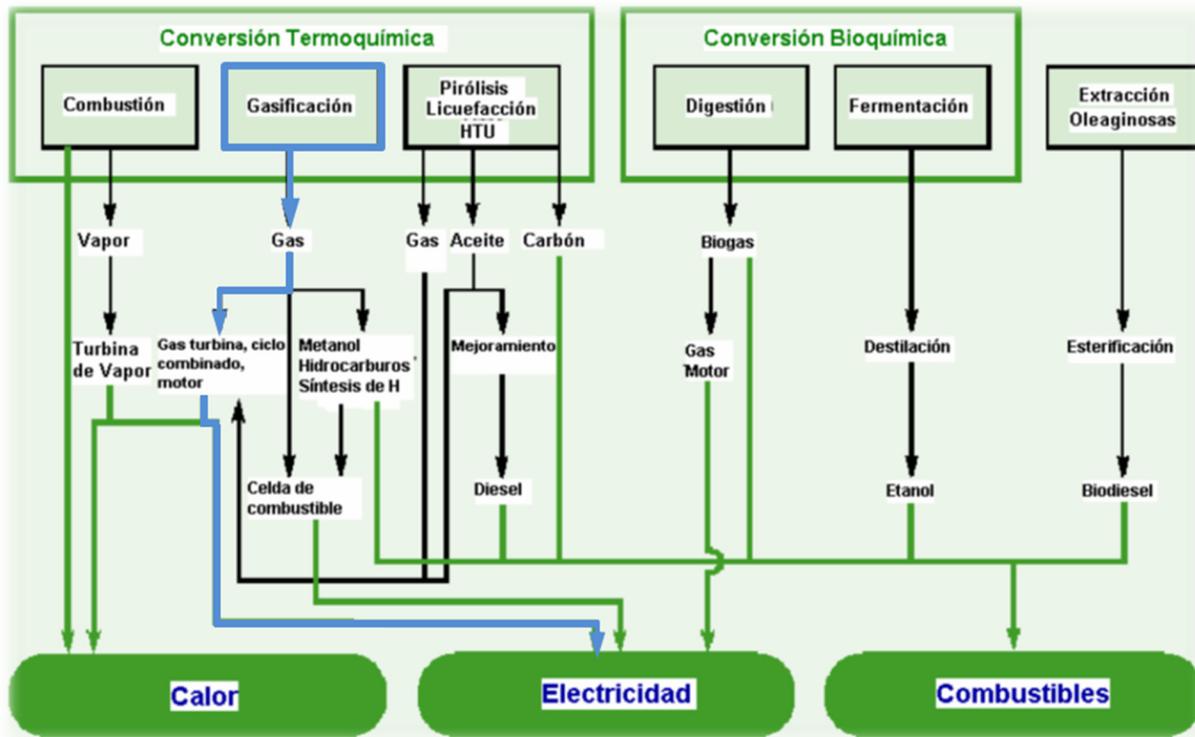


Ilustración 2. Ruta de conversión de biomasa a energía (Masera Cerutti, 2007).

A nivel internacional, la energía obtenida de la biomasa representa el 10% del consumo total de energía y el 77% de las energías renovables. Se estima que para el año 2035 podría contribuir con cerca del 25% de la energía requerida en el mundo (Masera Cerutti, 2011, pág. 5).

El consumo de energía proveniente de la biomasa de madera y bagazo de caña de azúcar es del 3.6% (Alarcon Herrera, 2009). Lo que es poco comparado con el potencial que se puede obtener al usar la biomasa como fuente de energía. Según la Red Mexicana de Bioenergía (REMBIO), México tiene los recursos bioenergéticos para producir sustentablemente el equivalente al 46% de la oferta interna bruta de energía primaria.

La baja producción de energía a partir de biomasa es debido a la falta de conocimiento y educación que se tienen sobre el uso de este tipo de energías renovables, pero en la situación actual

dónde el petróleo es cada vez más caro, se tiene la oportunidad ideal para aprovechar la biomasa en todo su potencial.

Por lo anterior mencionado, actualmente existe un creciente interés a nivel mundial por utilizar los materiales secundarios que son considerados desechos, y transformarlos de manera limpia y eficiente en productos de valor agregado.

2.1.2. CARACTERÍSTICAS DE LA BIOMASA

Un factor muy importante para evaluar la factibilidad técnica y económica de un proceso de conversión de biomasa en energía, se hace necesario considerar algunos parámetros de caracterización, porque estos determinan el proceso de conversión más adecuado y permiten realizar proyecciones de los beneficios económicos y ambientales que se esperan. A continuación se mencionarán los parámetros que son de vital importancia sopesar.

El proceso que interesa para este proyecto es de tipo termoquímico, por lo que nos enfocaremos en los residuos forestales provenientes principalmente de los aserraderos.

- **Tipo de biomasa.** El estado físico de los recursos biomásicos determinan el proceso de conversión energética que puede aplicarse a cada tipo en particular. Por ejemplo, los residuos forestales son ideales para procesos de combustión directa o procesos termoquímicos; los residuos animales se usan principalmente en procesos bioquímicos (BUN-CA, 2002, pág. 9). A continuación se presenta la Tabla 1 con los estados típicos de la biomasa, así como algunas características físicas.

Tabla 1 . Estados típicos de la biomasa (BUN-CA, 2002, pág. 10).

Recursos de biomasa	Tipo de residuo	Características físicas
Residuos forestales	Restos de aserrío: corteza, aserrín, astillas. Restos de ebanistería: aserrín, trozos, astillas. Restos de plantaciones: ramas, corteza, raíces.	Polvo, sólido, HR ² >50% Polvo sólido, HR 30 - 45% Sólido, HR > 55%
Residuos agropecuarios	Cáscara y pulpa de frutas y vegetales. Cáscara y polvo de granos secos (arroz, café). Estiércol. Residuos de cosechas: tallos y hojas, cáscaras, maleza, pastura.	Sólido, alto contenido humedad Polvo, HR < 25% Sólido, alto contenido humedad Sólido HR >55%
Residuos industriales	Pulpa y cáscara de frutas y vegetales. Residuos de procesamiento de carnes. Aguas de lavado y precocido de carnes y vegetales. Grasas y aceites vegetales.	Sólido, humedad moderada Sólido, alto contenido humedad Líquido Líquido, grasoso
Residuos urbanos	Aguas negras. Desechos domésticos orgánicos (cáscara de vegetales). Basura orgánica (madera).	Líquido Sólido, alto contenido humedad Sólido alto contenido humedad

- **Composición química.** Las características químicas determinan el tipo de producto(s) a obtener. Por ejemplo, los desechos animales producen altas cantidades de metano; los residuos forestales pueden producir el denominado gas de síntesis o *syngas*, que es una mezcla rica en monóxido de carbono (CO). Todas las formas de biomasa consisten en una parte orgánica, una inorgánica y agua; en los procesos termoquímicos se quema lo orgánico, lo inorgánico forma la ceniza o residuo sólido que queda después de la combustión. En la Tabla 2 se muestran composiciones químicas según la fuente de biomasa.
- **Características físicas.** Las características físicas influyen en el proceso de pre-tratamiento para la biomasa antes de proceder con la conversión energética.
- **Humedad.** El contenido de humedad es la relación de la masa de agua contenida por kilogramo de materia seca (humedad absoluta) o también se define como la cantidad de agua presente en la biomasa, expresada como porcentaje en peso (humedad relativa). Se tiene como criterio que para los procesos de conversión energética de biomasa, su humedad debe ser inferior al 30% (BUN-CA, 2002, pág. 10); en caso de ser superior, se debe considerar el secado en el pre-tratamiento.

Tabla 2 . Composición química de diferentes formas de biomasa (BUN-CA, 2002, pág. 48).

Tipo de biomasa	Porcentaje del peso (sin humedad)						
	C	H	N	O	S	Cl	Ceniza
Madera							
Sauce	47,66	5,2	0,3	44,70	0,03	0,01	1,45
Madera suave	52,10	6,10	0,20	39,90	-	-	1,70
Corteza de madera dura	50,35	5,83	0,11	39,62	0,07	0,03	3,99
Madera dura	50,48	6,04	0,17	42,43	0,08	0,02	0,78
Eucalipto	50,43	6,01	0,17	41,53	0,08	0,02	1,76
Roble	49,89	5,98	0,21	42,57	0,05	0,01	1,29
Corteza de pino	52,30	5,80	0,29	38,76	0,03	0,01	2,90
Aserrín pino	52,49	6,24	0,15	40,45	0,03	0,04	0,60
Sub-productos agrícolas							
Brizna de trigo	39,07	4,77	0,58	50,17	0,08	0,37	4,96
Caña de azúcar	44,80	5,35	0,38	39,55	0,01	0,12	9,79
Bagazo de caña	46,95	5,47	0,38	39,55	0,01	0,12	9,79
Paja de arroz	39,65	4,88	0,92	35,77	0,12	0,50	18,16
Cascarilla de arroz	38,68	5,14	0,41	37,45	0,05	0,12	18,15
Paja de maíz	46,91	5,47	0,56	42,78	0,04	0,25	3,99
Olote de maíz	47,79	5,64	0,44	44,71	0,01	0,21	1,2
Fibra de coco	50,29	5,05	0,45	39,63	39,63	0,28	4,14
Carbón mineral	71,70	4,70	1,3	8,30	0,64	0,060	20,70

- **Porcentaje de cenizas.** El porcentaje de cenizas indica la cantidad de materia sólida no combustible por kilogramo de material. En los procesos termoquímicos es

importante ya que puede ser un subproducto de valor agregado o formar parte del producto final.

- **Poder calorífico.** Es la energía disponible en la biomasa por unidad de masa, dicho parámetro es afectado por el contenido de humedad en la materia prima utilizada debido a que un alto nivel de humedad reduce la eficiencia de la combustión. Porque parte del calor que se debe emplear en el proceso debe ser para la evaporación de esa agua contenida en la biomasa. En la Ilustración 3 se puede apreciar el efecto de la humedad sobre el poder calorífico en la biomasa, y en la Tabla 3 se presenta una lista con valores caloríficos promedio según el tipo de biomasa. También en la Ilustración 4 se puede obtener el valor calorífico en función de la humedad relativa.

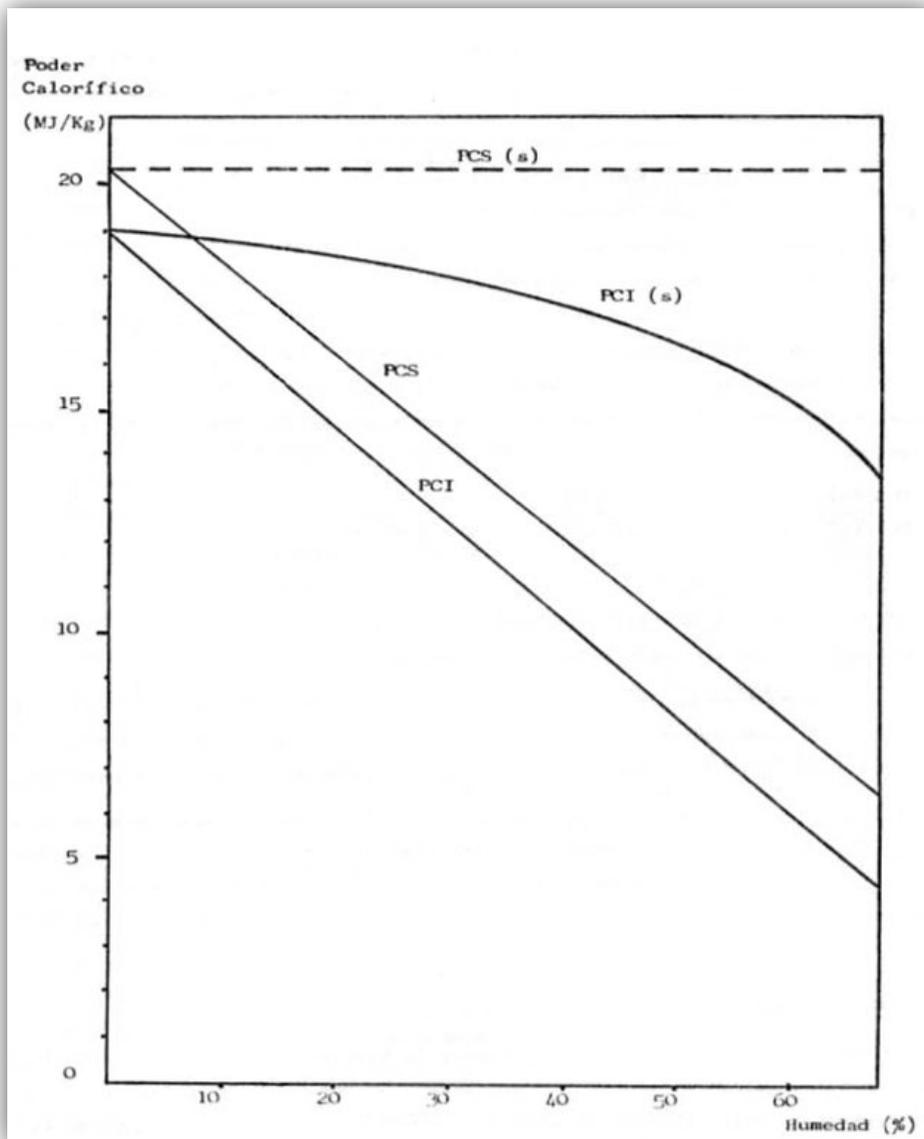


Ilustración 3 . Poder calorífico de la biomasa forestal en función del contenido de humedad (Oraga, Berset, & Grünhut, 1987, pág. 4.6).

- **Densidad aparente.** Es el peso por unidad de volumen del material en el estado físico que se presenta, bajo condiciones de presión y temperatura específicas. Los combustibles con alta densidad aparente favorecen la relación de energía por unidad de volumen, requiriéndose equipos más pequeños y aumentando los periodos entre las cargas (BUN-CA, 2002, pág. 11).

Tabla 3 . Poder calorífico de algunas formas de biomasa (BUN-CA, 2002, pág. 49).

Tipo de Biomasa	Valor calorífico bruto (MJ/kg)
Madera	
Astilla de madera	20,89
Corteza de pino	20,95
Desechos industriales de madera	19,00
Sub-productos agrícolas	
Paja de trigo	18,94
Caña	18,06
Bagazo	18,09
Cáscara de coco	18,60
Olote de maíz	17,72
Paga de arroz	15,61
Cascarilla de arroz	15,58
Aserrín	19,34

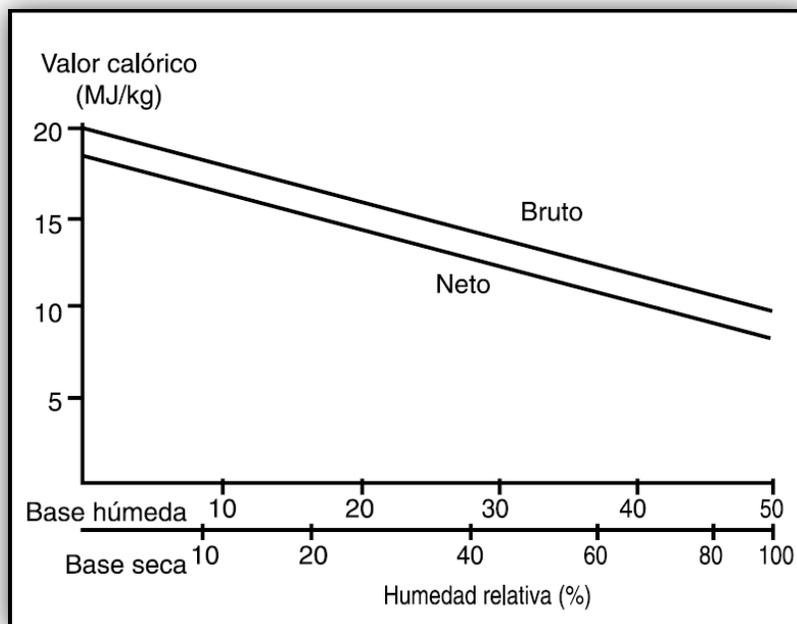


Ilustración 4 . Valor calorífico en función de la humedad relativa (BUN-CA, 2002, pág. 50).

2.1.3. JUSTIFICACIÓN DEL USO DE BIOMASA EN PROCESO DE GASIFICACIÓN

En la actualidad se calcula que en nuestro país la bioenergía representa el 8% del total de la energía consumida. Es una fuente importante de energía renovable que puede generar múltiples beneficios en los estados y municipios del país, si se aumenta su utilización.

Las estimaciones hechas indican que se pueden tener potenciales aprovechables de entre $1,519 \times 10^{18}$ y $3,034 \times 10^{18}$ J/año en combustibles leñosos y 886×10^{15} J/año por los subproductos agrícolas y agroindustriales. Estas estimaciones muestran el gran potencial biomásico de México y que abre un enorme campo de oportunidades tecnológicas, económicas y políticas para el mejor aprovechamiento de dichos recursos (Masera, Aguillón, & Gamino, 2005, pág. 5).

En México, los residuos bioenergéticos potenciales representan entre 54 y 81% de la oferta interna bruta de energía primaria y 10 veces su uso actual. La cantidad de subproductos de la extracción forestal y la industria maderera con potencial energético se estiman en aproximadamente 3,6 millones de toneladas (peso seco)/año aproximadamente. (Masera Cerutti, 2006).

Los residuos sólidos generados durante el proceso de transformación de la madera corresponden principalmente a aserrín verde, corteza, despuntes de madera y viruta. Se estima que para el caso de aserraderos entre el 0.05-0.15% por cada tonelada son residuos (Guía para el control y prevención de la contaminación industrial: Rubro aserraderos y procesos de madera, 2000, pág. 25).

En la mayoría de los aserraderos (desde pequeños a medianos) no existe un manejo adecuado de los residuos que se producen, y los disponen al aire libre donde generalmente no son utilizados, por lo que se está perdiendo su potencial energético que podría ser aprovechado mediante nuevas tecnologías en procesos de producción de productos de valor agregado y/o energía eléctrica de manera eficiente y de manera amigable con el medio ambiente.

Para este proyecto en particular se evaluó la factibilidad de generar energía eléctrica como un subproducto y biocarbón como producto principal, este último que es un mejorador de suelos generado a partir del uso de sub-productos de la extracción forestal, que corresponden a los desechos maderables que se generan durante las prácticas de extracción de la madera comercial (en rollo) y de sub-productos de la industria maderera, es decir, productos indirectos de la madera que corresponden a los desechos que se generan principalmente en los aserraderos.

Actualmente se calcula que el volumen total aprovechable de residuos forestales se estima en 72 PJ/año, de estos últimos 31 PJ/año corresponden a subproductos de la extracción forestal y 41 PJ/año de subproductos de la industria forestal. Tomando en cuenta los combustibles directos e indirectos de la madera, podemos concluir que el potencial energético total de los combustibles leñosos es de 1,519 a 3,034 PJ/año (Masera, Aguillón, & Gamino, 2005, pág. 7).

Tabla 4 . Tabla de combustibles indirectos (Masera, Aguillón, & Gamino, 2005, pág. 9).

Categorías	Año	Volumen de la Producción Forestal maderable o de la producción maderera aserrada ^(a) [m ³ r] ²	Coefficiente de generación de residuos ^(b) [Coeficiente]	Existencias de residuos con potencial energético [tMS/año] ³	Equivalente de energía primaria [PJ/año]
Subproductos de la extracción forestal	2001	8,124,571	0.5	2,031,143	41
Subproductos de la industria maderera	2001/ 1998	6,134,051	0.5	1,533,513	31
				TOTAL	72

Notas: (a) El volumen de la producción forestal maderable (sub-productos de la extracción forestal) se obtuvo del Anuario Estadístico de la Producción Agrícola (SAGARPA-SIAP 2003). El volumen de la producción maderera aserrada se obtuvo mediante la proporción de la producción forestal total que se destina a la industria del aserrío (construcción, muebles, chapa y triplay, empaques, electricidad y telefonía, y ferrocarriles). Esta Proporción se obtuvo del Anuario Estadístico de los Estados Unidos Mexicanos (INEGI 1998). La información se presenta en metros cúbicos en rollo (m³r). (b) Los coeficientes de generación de residuos corresponden: b1) la fracción de la extracción forestal que no tiene una utilidad comercial distinta del uso energético y b2) la fracción de la madera que se pierde como residuos de los aserraderos. (c) Se utilizó un contenido energético promedio de 20 Giga Joules por tonelada.

2.1.4. PROSPECTIVA TECNOLÓGICA A 10 Y 25 AÑOS

La tecnología de gasificación tiene un porvenir prometedor tanto en la utilización de biomasa, de desechos agrícolas y agroindustriales, desechos municipales. En 10 años, nuevas centrales de generación serán construidas a gran escala (600 MW_e) y serán comercialmente rentables. La generación de otros productos diferentes a los eléctricos y térmicos será una realidad, es decir, se podrán producir combustibles líquidos tales como etanol y biodiesel, así como productos con gran valor económico entre los que se encuentran el amoníaco y el hidrógeno. El desarrollo de membranas especiales para separar oxígeno del aire, así como el desarrollo de nuevos diseños de turbinas de gas reducirá el actual costo de generación eléctrica en los gasificadores y aumentará hasta en 80% la eficiencia global de las instalaciones (Masera, Aguillón, & Gamino, 2005, pág. 12).

² m³r: metros cúbicos en rollo.

³ tMS: Toneladas de madera seca.

En la Tabla 5 se puede apreciar claramente los costos e inversión de las instalaciones y energía aprovechable de plantas de gasificación.

Actualmente se estima que en 10 años se impulse el desarrollo de gasificadores de pequeña escala sobre todo en países en vías de desarrollo, se mejore la tecnología de motores de combustión interna con el fin aumentar la eficiencia global (hasta 40%), además se espera que los gasificadores a pequeña escala se puedan adaptar a bombas, molinos, tractores, pequeños barcos, etc. (Masera, Aguillón, & Gamino, 2005).

Al presente, hay varias investigaciones que tienden a unir la tecnología de gasificación con las celdas de combustible que trabajan con hidrógeno, desarrollos que pretenden la generación de energía eléctrica sin ningún componente mecánico, lo que traería un aumento importante en la eficiencia global de los sistemas (hasta 70%) y por consiguiente habrá una reducción de los costos de generación (Masera, Aguillón, & Gamino, 2005, pág. 12).

Tabla 5 . Costo de la biomasa, inversión de las instalaciones, energía útil y situación de la tecnología (Masera, Aguillón, & Gamino, 2005, pág. 14).

Proceso de conversión	Tipo de combustible	Combustibles (\$/ton)	Tecnología	Escala	Costos de inversión (US\$)	Costo unitario (US\$/MW)	Productos obtenidos	Costo producto (US\$/MWh)	Situación actual	
COMBUSTIÓN	Residuos forestales:		Mediana escala:	Eléctricas						
	Leña	67.2		0.5-5 MW	1,296,000 - 7,875,000	2,952,000 - 1,575,000	Energía eléctrica	41.8	Hasta Febrero del 2005, no existen casos de plantas en México (1).	
	Aserrín	33	Calderas pirotubulares Calderas acuaturbulares Calderas de lecho fluidizado Quemadores de pilas Quemadores de cición Quemares de astillas Quemadores de pellets	5-12 MW	7,875,000 - 15,480,000	1,575,000 - 1,290,000	Energía eléctrica	ND		
				12-25 MW	15,480,000 - 27,750,000	1,290,000 - 1,110,000	Energía eléctrica	ND		
				≤ 25 MW	≤ 27,750,000					
				Térmicas						
				450 MW	875,194	1,944,875	Energía eléctrica	ND	Ya existen de manera comercial (2).	
				600 MW	994,194	1,656,990	Energía eléctrica	ND		
				700 MW	1,123,490	1,497,986	Energía eléctrica	4.9		
				Pequeña escala:	Térmicas					Existen experiencias en el país
GASIFICACIÓN	Residuos forestales:		Estufas domésticas	3-5 KW	30-70	NA	Energía eléctrica	NA	Existen experiencias en el país	
	Leña	67.2	Hornos de ladrillos cerámicos	5-15 KW	1,000-3,000	NA	Energía eléctrica	NA		
	Aserrín	33	Gran y mediana escala:							
			Gasificador de tiro invertido	1.4 MW	1,993,750	1,424,107	Energía eléctrica	39	No existen casos en el país, aunque si a escala mundial (3). Aislado a escala mundial, existen aplicaciones exitosas en Suecia (4)	
			Gasificador de tiro invertido	44 MW	52,800,000	1,200,000	Energía eléctrica	ND		
			Pequeña escala:							
			Gasificadores para camiones	0.04 MW	11,020	275,500	Combustible gas	ND		
			Gasificador de tiro invertido	0.032 MW	32,000.00	1,000,000	Energía eléctrica	171		
	Residuos forestales:		Hornos para pirólisis con:	164 MW	142,000,000	865,854	Combustible gas	ND		
	Leña	67.2	Sistema de Torrax o	77 MW	88,000,000	1,142,857	Combustible gas	ND	No existen casos de aplicación en el país, a escala mundial aún se encuentran en Desarrollo (5).	
Aserrín	33	Sistema de Landgar	46 MW	53,000,000	1,152,174	Combustible gas	ND			
		Sistema hidrógeno	6.4 MW	3,950,000	617,188	Hidrógeno	108		En investigación y desarrollo (6).	

2.2. BIOENERGÍA

2.2.1. ¿QUÉ ES LA BIOENERGÍA Y LOS BIOCOMBUSTIBLES?

La bioenergía es la energía obtenida de la biomasa a través de procesos biológicos o termoquímicos que generan biocombustibles.

Los biocombustibles obtenidos se procesan para transformarlos en electricidad, calor o energía mecánica o una mezcla de estas. Estos combustibles se pueden clasificar en (Maserà Cerutti, 2011, pág. 7):

- » **Biocombustibles sólidos.** Están representados por leña, carbón vegetal, residuos agrícolas, residuos forestales en forma de pellets, briquetas o trozos irregulares; que se pueden quemar directamente o tener un proceso previo de gasificación o pirólisis, para producir calor y/o electricidad, según se requiera.
- » **Biocombustibles líquidos.** Están representados por el bioetanol y biodiesel, que se obtienen de cultivos energéticos como caña de azúcar y oleaginosas o aceite vegetal usado.
- » **Biocombustibles gaseosos.** Están representados por el gas de síntesis mejor conocido como *syngas*, biogás y biometano que son obtenidos de los residuos municipales y estiércol.

Existen otras maneras de clasificar a los biocombustibles, en la siguiente tabla se presenta una forma de clasificación dependiendo del proceso utilizado para su obtención.

Tabla 6. Clasificación de los biocombustibles con base en su proceso tecnológico (Maserà Cerutti, 2011, pág. 8)

Bioenergéticos	Sólidos	Líquidos	Gaseosos
1ª generación	Leña, carbón vegetal, bagazo, pellets	Bioetanol, biodiesel, licor negro	Biogás, gas de síntesis
2ª generación	Biochar, torrefactos, torpellets	Etanol celulósico, syndiésel, aceite de pirólisis	
3ª generación	—	Diésel de algas, etanol de algas	Biohidrógeno

En este proyecto es de especial interés el biocombustible gaseoso, en particular el *syngas* que se obtiene de los recursos secundarios agroforestales, usándolo para transformarlo en energía eléctrica con el fin de tener una planta de biocarbón autosustentable.

2.2.2. CARACTERÍSTICAS DE LA BIOENERGÍA

Según la REMBIO (Maser Cerutti, La bioenergía en México, 2011), la bioenergía presenta varias características que la hacen muy atractiva, y con ellas se da una idea de la magnitud de su potencial y versatilidad; dichas características son mencionadas a continuación.

- » **Es almacenable.** La energía de la biomasa está almacenada en la materia orgánica, por lo mismo no presenta intermitencia como la energía solar o eólica.
- » **Permite satisfacer la mayor parte de los usos finales.** Es la única energía renovable que puede competir con los combustibles fósiles, debido a que permite generar calor, fuerza motriz, electricidad mediante los biocombustibles producidos.
- » **Es ubicua.** La biomasa se puede encontrar o cultivar en casi todas partes, y está disponible en forma concentrada como subproducto de procesos agroindustriales, residuos de actividades humanas.
- » **Es escalable.** Se pueden tener sistemas de aprovechamiento de biomasa y producción de bioenergía menores a 1 kW hasta mayores a 300,000 kW; lo que permite una amplia versatilidad para el suministro energético a escalas locales y mayores.
- » **Crea sinergias positivas.** Esto es debido a la interacción estrecha que existe entre el sector agrícola-forestal que produce la biomasa, el sector industrial que la transforma y los sectores que la utilizan; lo que produce empleos locales.
- » **Es descentralizada.** Se puede producir bioenergía en pequeñas y medianas empresas y facilitar así el desarrollo local en zonas rurales.

2.3. PROCESOS DE CONVERSIÓN TERMOQUÍMICOS

2.3.1. COMBUSTIÓN DIRECTA

Esta forma de extraer energía de la biomasa es la más antigua, económica y por tanto común que existe, ya que sólo se requiere de biomasa y una caldera para la combustión y se usa principalmente para producir calor que se utiliza en cocción de alimentos, calefacción, secado y si la energía térmica es transferida en una caldera se produce de vapor.

Este proceso tradicional, es muy ineficientes debido a que la energía liberada se desperdicia y pueden causar contaminación cuando no se realizan bajo condiciones controladas (BUN-CA, 2002, pág. 12). El rango de eficiencia estimada de conversión es de 15-38% para la generación de electricidad y del 70% para la generación de energía térmica (Centro de Energías Renovables, 2000).

La combustión directa produce grandes cantidades de CO y CO₂ que rompen el equilibrio natural del ciclo del carbono, ya que en lugar de secuestrar el dióxido de carbono, lo que hace es liberarlo a la atmósfera.

2.3.2. PIRÓLISIS

El proceso de pirólisis consiste en la descomposición térmica de macromoléculas en ausencia de oxígeno para la obtención de productos de menos peso molecular como líquidos, gases, carbón residual (Miranda Guardiola & Segovia Martínez, 2006, pág. 9).

Se puede decir que la pirólisis es un proceso de carbonización de biomasa, la diferencia radica en que la descomposición termoquímica se hace con una nula presencia de oxígeno y a temperaturas cercanas a 500 °C, obteniéndose un gas pobre, líquido aceitoso (*bio-oil*) y cenizas (biocarbón).

El problema de la pirólisis con biomasa, es que al realizarse a temperaturas relativamente bajas (comparando con la gasificación), se produce una parte líquida que dependiendo del tipo de biomasa procesado, puede contener alquitranes, los cuales son una fuente extremadamente contaminante para el medio ambiente, y son difíciles de separar y aprovechar.

Aunque la descomposición térmica de la materia orgánica es muy compleja, se pueden distinguir a lo largo del proceso varias etapas (Míguez Tabarés & Porteiro Fresco, 2007, págs. 9-19):

- » Hasta los 120 °C se produce una pérdida de agua y de otros productos volátiles (deshidratación de la materia orgánica).
- » A los 275 °C se efectúa la desoxigenación y desulfuración, por lo que se efectúa la disociación molecular de agua y dióxido de carbono, y comienza la liberación de sulfuro de hidrógeno.
- » Entre los 340 °C empieza la rotura de enlaces en compuestos alifáticos, por lo que se da la liberación de metano y otros compuestos alifáticos ligeros.

- » Hasta los 380 °C comienza la etapa de carbonización (concentración de carbón en los residuos).
- » A los 400 °C se efectúa la rotura de los enlaces C-N y C-O.
- » Entre los 400 y 600 °C se lleva a cabo la descomposición de los materiales bituminosos; generándose aceites y alquitranes como productos secundarios de la pirólisis.
- » A los 600 °C se efectúa el *cracking* del material bituminoso, generándose hidrocarburos gaseosos de cadena corta e hidrocarburos aromáticos.
- » Por arriba de los 600 °C se generan los compuestos aromáticos volátiles.

Generalmente, los productos de reacción que se obtienen de la pirólisis se pueden clasificar en tres grandes grupos (Matera, Aguillón, & Gamino, 2005):

- » **Combustible gas:** El gas está principalmente formado por monóxido de carbono (CO), metano (CH₄) e hidrógeno (H), mezclados con gran cantidad de dióxido de carbono (CO₂); su poder calorífico es de 8-15 MJ/m³ (el del gas natural es de 34.8 MJ/m³).
- » **Combustible líquido:** Es el combustible o aceite que resulta de condensar los vapores de la pirólisis, contiene cantidades sustanciales de hidrocarburos aromáticos; su poder calorífico es del orden de 25 MJ/kg. Generalmente, la fracción líquida está constituida por metanol, fenol, acetona, acetaldehído, ácido fórmico metilfurfural, etanol, y aceites ligeros.
- » **Residuos sólidos carbonosos:** Está constituida por carbones y alquitranes, así como cenizas. El carbón vegetal resultante tiene un bajo contenido de azufre, lo que lo hace muy apreciado desde el punto de vista ambiental, con un poder calorífico de 25-30 MJ/kg. El carbón vegetal como combustible sólido presenta la ventaja, frente a la biomasa que le dio origen, de tener un poder calorífico mayor. Sin embargo, la pirólisis significa una pérdida importante de la energía contenida en la biomasa utilizada como materia prima. Su uso se justifica cuando el proceso industrial en el cual se emplea lo requiere como condición imprescindible, como por ejemplo en la siderurgia, o cuando debe distribuirse o transportarse.

2.3.3. GASIFICACIÓN

“Se denomina gasificación de biomasa a un conjunto de reacciones termoquímicas, que se produce en un ambiente pobre de oxígeno, y que da como resultado la transformación de un sólido en una serie de gases susceptibles de ser utilizados en una caldera, en una turbina o en un motor, tras ser debidamente acondicionados” (IDAE, 2007, pág. 5). La gasificación es un tipo de pirólisis en la que se utiliza una cantidad menor a la estequiométrica de agente gasificante a mayores temperaturas, por lo que también se le suele llamar pirólisis rápida.

En términos más sencillos, la gasificación se basa en la descomposición térmica de la biomasa en una atmósfera pobre de oxígeno (Grupo Guascor, 2009).

El proceso de gasificación descompone la celulosa que conforma principalmente la biomasa empleada en hidrocarburos más ligeros, monóxido de carbono, hidrógeno; esta mezcla de gases se conoce como gas de síntesis o *syngas*. A continuación se muestra una composición promedio del *syngas* que se usó posteriormente para realizar los cálculos necesarios en el balance de materia y energía.

Tabla 7. Composición del *syngas* (Proenza Pérez, Cala Aiello, Luz Silveira, & Zanzi, 2006).

Componente	Fracción Xi
N ₂	0.521
CO ₂	0.135
CO	0.163
H ₂	0.125
CH ₄	0.044
C ₂ H ₄	0.006
C ₂ H ₆	0.006
	1.000

Durante el proceso de gasificación se usa un gas o mezcla de ellos que funciona como agente gasificante, lo que proporciona calor y oxígeno para iniciar toda la serie de complejas reacciones que se dan a cabo durante la transformación. El agente oxidante utilizado determina el nivel de poder calorífico que poseerá el *syngas*, se puede usar oxígeno, vapor de agua, hidrógeno o aire; pero debido a razones de economía y practicidad, generalmente se usa aire ambiente precalentado con el que se obtiene un poder calorífico decente que se puede usar para generar electricidad.

La gasificación actualmente permite usar cualquier tipo de biomasa en el proceso, sin embargo es conveniente que la materia prima utilizada tenga propiedades determinadas como densidad, tamaño y humedad; con lo que se consigue homogenizar la transformación de la biomasa durante periodos de tiempo iguales.

2.3.4. SELECCIÓN DE PROCESO DE COMBUSTIÓN

Para este proyecto se seleccionó el proceso gasificación porque esta tecnología tiene ciertas ventajas que a continuación se menciona.

- » Se genera un combustible relativamente libre de impurezas, por lo que causa menores problemas de contaminación a la hora de quemarse.
- » El gas producido es más versátil y se puede usar para los mismos propósitos que el gas natural, es decir, se puede usar en turbinas de gas, motores de combustión interna o quemar en una caldera para producir vapor que se puede usar para calentamiento en el proceso, secado o generación de energía eléctrica.
- » Bajo el esquema de gasificación los alquitranes se *crackean* debido a las altas temperaturas a las que se lleva a cabo la pirólisis.

- » Se pueden seleccionar de entre varios agentes gasificantes como oxígeno, aire o vapor de agua, según el resultado que se quiera obtener.
- » La elevada temperatura que se utiliza para gasificar la biomasa no representa problema alguno, porque el mismo *syngas* puede ser usado como combustible, haciendo este proceso autosuficiente.

2.3.5. EMISIONES POR COMBUSTIÓN

La composición de biomasa está conformada principalmente por carbono y oxígeno, aunque adicionalmente puede contener algo de hidrógeno, nitrógeno, azufre, ceniza y cierta cantidad de agua dependiendo de la humedad.

Cuando ésta se quema, se efectúa una reacción química que combina su carbono con oxígeno del ambiente, formándose dióxido de carbono (CO_2) y combinando el hidrógeno con oxígeno para formar vapor de agua (BUN-CA, 2002, pág. 17). Esto es la reacción típica de combustión y se puede dar de dos formas:

- » **Combustión completa.** La biomasa se quema en su totalidad, así que el carbón presente se transforma en CO_2 que las plantas y árboles aprovechan y lo capturan nuevamente reflejándose en su crecimiento. Esto quiere decir que no se agrega dióxido de carbono a la atmósfera, y por tanto se mantiene el equilibrio puesto que sólo se está transfiriendo de manera cíclica.
- » **Combustión incompleta.** La biomasa no se quema totalmente y por tanto se forma CO , hidrocarburos como el metano, N_2O y algunos otros compuestos no deseados; dichos materiales contaminantes causan daños a la salud, además de que se trata de gases de efecto invernadero que afectan el equilibrio del medio ambiente.

Una de las principales causas que impiden una combustión incompleta es una entrada de aire deficiente, es decir, que no entre suficiente aire, y por ende oxígeno, para transformar todo el carbono en CO_2 . Las razones principales de que esto ocurra son por un mal diseño en la ventilación del equipo o por sobrecarga de combustibles (en este caso biomasa).

En la gasificación al controlar el flujo de aire en el reactor, se tiene el dominio preciso sobre la combustión, evitando así la emisión excesiva de agentes contaminantes a la salud y medio ambiente. Además de fijar el CO_2 en el biocarbón, que al utilizarlo como fertilizante se tiene un efecto de secuestro de CO_2 en el suelo, lo que ayuda a restablecer el equilibrio del dióxido de carbono en la atmósfera.

2.4. TIPOS DE GASIFICADORES

Los gasificadores se clasifican de acuerdo al movimiento del sólido en el mismo, por lo que cuando las partículas sólidas permanecen en contacto al pasar a través del reactor se les denomina que son de lecho móvil o fijo; pero cuando las partículas se mueven con cierta libertad en el volumen del lecho, son denominados reactores de lecho fluidizado.

A continuación se presenta la clasificación de los gasificadores, así como algunas de sus principales características.

2.4.1. GASIFICADORES DE LECHO FIJO O MÓVIL

Estos gasificadores se encuentran en el rango de pequeña a mediana potencia (50 kW a 10 MW), dichos reactores son los más desarrollados. Dentro de estos se pueden visualizar dos tipos, dependiendo del movimiento relativo del sólido y el agente gasificante (Oraga, Berset, & Grünhut, 1987, págs. 4.13-4.16):

A. Contra-corriente o *updraft*. El agente gasificante es introducido en la base del gasificador, a través de un dispositivo denominado grilla, cuyas funciones son: sostener el lecho de sólidos, distribuir adecuadamente el agente gasificante y permitir la separación de las cenizas. El combustible es introducido por la parte superior a través de un sistema de válvulas (doble campana rotativa) de tal manera de evitar el contacto entre medio ambiente y la atmósfera del equipo. El gas producido es extraído a través de un tubo ubicado en el lateral de la parte superior del reactor.

En estado estacionario, el contacto entre el agente gasificante y la biomasa genera altas temperaturas en la zona próxima a la grilla, por lo que el calentamiento no debe ser excesivo a fin de evitar la fusión de las cenizas ($< 1300\text{ }^{\circ}\text{C}$). Esto generalmente se puede lograr regulando el flujo de aire para una dada rejilla, ocasionando la desventaja inherente de limitar la capacidad de generación de gas, por lo que es preferible inyectar vapor de agua para lograr un control más efectivo de la temperatura en la zona de combustión, debido a que éste reacciona endotérmicamente con el biocarbón obtenido, favoreciendo además la formación de CO e H₂, proporcionando así un mayor poder calorífico al gas generado.

Los productos de la combustión son reducidos en la zona inmediatamente superior, cuya temperatura promedio no debe ser inferior a 700°C, puesto que ninguna de las reacciones involucradas, responsables de la formación del gas combustible, se ven termodinámicamente favorecidas por debajo de dicha temperatura.

La corriente gaseosa ascendente entrega parte de su calor sensible en las zonas superiores del lecho. Los trozos de madera que allí se encuentran, absorben dicho valor elevando así su temperatura hasta alcanzar la de pirólisis (250-400 °C).

La corriente gaseosa arrastra alquitranes, vapor de agua y partículas sólidas. Esta mezcla se puede quemar directamente en el hogar de una caldera u horno si la temperatura de esta corriente se mantiene por encima de la temperatura de rocío de los compuestos condensables.

Este tipo de gasificador puede tolerar hasta un 50% de humedad en la biomasa, generando un gas con un poder calorífico superior de 4,400 a 5,600 kJ/m³ (15 °C y 1 atm) considerando el gas limpio. En el caso que se consideren los alquitranes, el poder calorífico de la mezcla asciende a 7,400 kJ/m³ (15°C y 1 atm).

Normalmente, estos equipos operan en el rango de 1.05 a 2.0 kg aire/kg biomasa (base seca), y eficiencias térmicas del 70-75 % considerando sólo el gas limpio o cercanas al 80% si se considera también a los alquitranes. En la Ilustración 5 un esquema de este tipo de gasificador *updraft*.

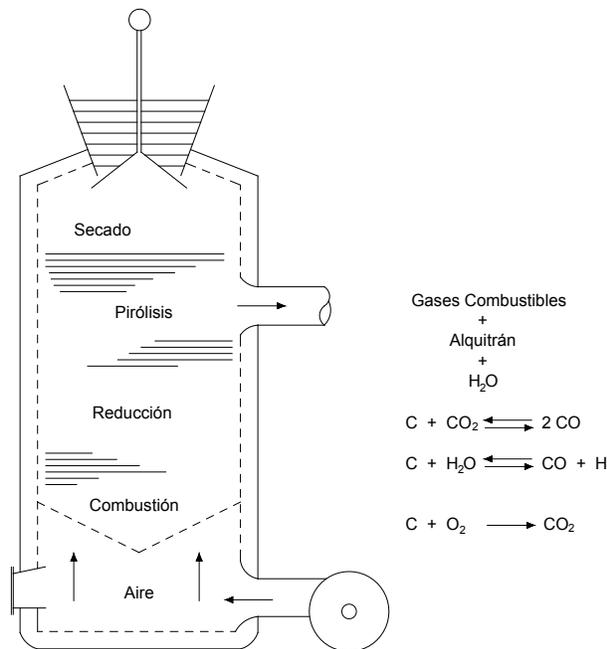


Ilustración 5 . Esquema de gasificador en contra-corriente (Oraga, Berset, & Grünhut, 1987, pág. 4.14).

B. Corrientes paralelas o *downdraft*. En este tipo de gasificadores, el aire es introducido radialmente a una cierta altura del lecho. La biomasa es alimentada por la parte superior a través de un dispositivo similar al reactor en contra-corriente.

En estado estacionario se forman cuatro zonas en el lecho, El agente gasificante entra primero en la zona de oxidación u hogar del reactor (en el medio del gasificador), donde predominan las reacciones de combustión. Una fracción del calor generado se transfiere por conducción hacia las zonas superiores del lecho provocando con esto la pirólisis y el secado de la biomasa. Los gases provenientes del hogar, atraviesan la zona de reducción donde el CO₂ es convertido en CO.

Los gases pirolíticos atraviesan el hogar, donde debido a las altas temperaturas existentes (1100 °C) los alquitranes se *crackean* en compuestos más volátiles.

Las cenizas que provienen de la zona de reducción, descienden para atravesar la grilla y se depositan en la base del gasificador. En general, la grilla es del tipo rotativa de platos excéntricos escalonados; en equipos pequeños es accionada manualmente. Su movimiento permite la evacuación de las cenizas y a uniformar el lecho de sólidos en las proximidades de la misma.

La temperatura en la zona de combustión debe mantenerse por debajo del punto de ablandamiento de cenizas (1250-1300 °C) a fin de evitar aglomeración del material del lecho. Normalmente dicha temperatura se controla al regular el flujo de aire.

Este tipo de reactor no puede tolerar contenidos de humedad en la biomasa superiores al 30% (base húmeda). Esto es consecuencia directa de la configuración del lecho, el cual requiere que todos los gases generados en la parte superior del mismo atraviesen la zona de combustión. Un elevado contenido de humedad en el combustible resulta en un incremento en la cantidad de calor para su evaporación, y por tanto un mayor consumo de combustible para alcanzar las temperaturas requeridas en las zonas de combustión y reducción. Esto trae a la par una notable disminución de la eficiencia de conversión con el agravante de aumenta el contenido de alquitrán en los gases producidos.

Los gasificadores de corrientes paralelas con inyección de aire, operando en las condiciones apropiadas, producen un gas con poder calorífico superior entre 4,500 a 7,000 kJ/m³ (gas limpio a 15°C y 1 atm) y con pequeñas cantidades de alquitranes y sólidos en suspensión (alrededor de 0.1 g/m³). Sin embargo, el acondicionamiento y limpieza posterior del gas es imprescindible a fin de disminuir su temperatura y eliminar los vestigios de impurezas que lo contaminan.

Este tipo de reactores operan con cargas térmicas superiores a las de los gasificadores en contra-corriente, debido a que la estructura del lecho reduce los problemas de arrastre de sólidos por la corriente gaseosa; sin embargo, para una dada rejilla se observa un rango menor en la operación (relación carga máxima/carga mínima=3), es decir, que la relación aire/combustible debe mantenerse prácticamente invariable.

A continuación se muestra un esquema del gasificador *downdraft* en la Ilustración 6.

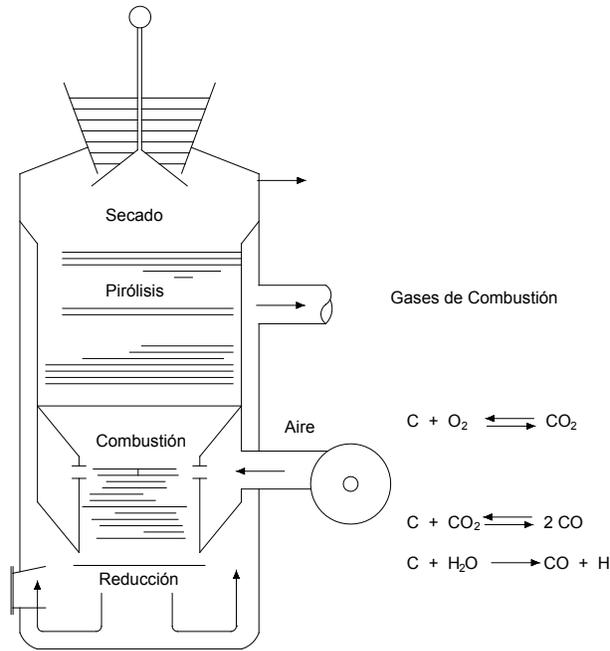


Ilustración 6 . Esquema de gasificador de corrientes paralelas (Oraga, Berset, & Grünhut, 1987, pág. 4.17).

2.4.2. GASIFICADORES DE LECHO FLUIDIZADO

Un reactor de gasificación de lecho fluidizado consiste de un lecho de pequeñas partículas de material inerte (arena, ceniza, piedra caliza) y de combustible, las cuales son mantenidas en suspensión (fluidizado) por una corriente gaseosa ascendente de flujo y composición controlados, inyectada en la base del reactor a través de un distribuidor.

En estas condiciones, el lecho de partículas está continuamente sujeto a una vigorosa agitación e intenso mezclado, lo cual resulta en elevadas velocidades de transferencia de calor y materia. Esta característica propia del fenómeno de fluidización, permite operar a temperaturas uniformes en el lecho y generalmente más bajas que las encontradas en los reactores de lecho fijo, eliminando de esta manera los inconvenientes derivados de la existencia de “puntos calientes” en el reactor.

Los gasificadores existentes operan normalmente con una humedad en la biomasa entre 25-40 % y temperaturas de lecho de 800-900 °C; produciendo un gas con un PCS de 4,800-5,600 kJ/m³ (gas limpio a 15°C y 1 atm).

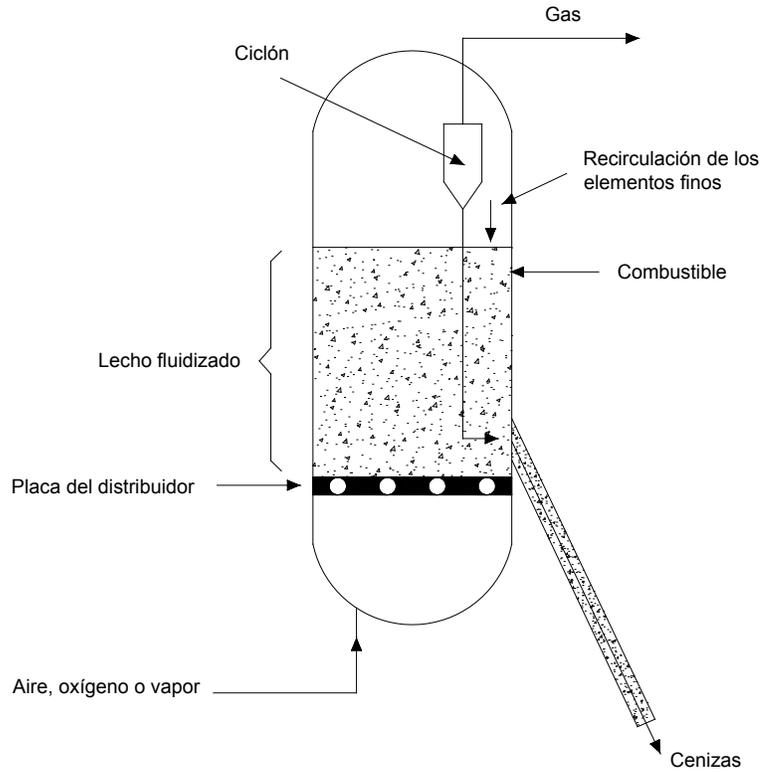


Ilustración 7 . Esquema general de gasificador lecho fluidizado (FAO, 1993).

Nota: *La descripción de los gasificadores fue tomada y adaptada de (Oraga, Berset, & Grünhut, 1987, págs. 4.13-4.19)*

2.4.3. SELECCIÓN DE TIPO DE GASIFICADOR

Tabla 8 . Principales características de los diversos tipos de gasificadores (Castells & Velo, 2012, pág. 436).

	Temperatura °C		Alquitrán	Partículas	Capacidad	MWe	
	Reacción	Gas Salida			Max. (T/h)	Min	Max
Lecho Fijo							
<i>Dowdraft</i>	1000	800	Muy Bajo	Moderado	0.5	0.1	1
<i>Updraft</i>	1000	250	Muy Alto	Moderado	10	1	10
Lecho Fluidizado							
Reactor Único	850	800	Normal	Alto	10	1	20
Rápido	850	850	Bajo	Muy Alto	20	2	50
Lecho Circulante	850	850	Bajo	Muy Alto	20	2	100
Lecho Arrastrado	1000	1000	Bajo	Muy Alto	20	5	100
Reactores Gemelos	800	700	Alto	Alto	10	2	50
Otros							
Horno Rotatorio	800	800	Alto	Alto	10	2	30
Reactor Ciclón	900	900	Bajo	Muy Alto	5	1	10

Tabla 9 . Modo de contacto dependiendo del tipo de gasificador (Castells & Velo, 2012, pág. 433).

Tipo	Modo de Contacto
Gasificador de Lecho Fijo (<i>Dowdraft</i>)	El sólido y el gas circulan en la misma dirección, que es descendente.
Gasificador de Lecho Fijo (<i>Updraft</i>)	El sólido y el gas circulan en dirección contraria. El sólido circula en dirección descendente y el gas circula en dirección ascendente.
Gasificador de Lecho Fluidizado (Burbujeante)	La velocidad del gas es relativamente baja. Los sólidos inertes son arrastrados, separados y recirculados al reactor.

<p>Gasificador de Lecho Fluidizado (Circulante)</p>	<p>Ocurre separación de sólidos en la corriente gaseosa. Los sólidos inertes son arrastrados y separados de la corriente gaseosa; la alta velocidad del gas genera elevadas velocidades de transformación.</p>
<p>Gasificador de Lecho Fluidizado (Arrastrado)</p>	<p>La velocidad del gas es alta. Normalmente no existen sólidos inertes, la alta velocidad del gas genera elevadas velocidades de transformación.</p>
<p>Gasificadores paralelos o dobles</p>	<p>La gasificación se produce con vapor en el primer reactor y el carbón producido es transportado hacia el segundo reactor, donde ocurre la combustión para calentar el medio fluidizante de recirculación.</p>
<p>Gasificadores rotatorios</p>	<p>No proporcionan un buen contacto sólido-gas.</p>

2.5. BIOCARBÓN

2.5.1. HISTORIA DEL BIOCARBÓN

Desde tiempos remotos, el hombre ha usado la energía de la biomasa más comúnmente por medio de la combustión directa, es decir, quemándola en hogueras a cielo abierto, ya sea en hornos, cocinas artesanales o incluso en calderas; convirtiéndola en calor para satisfacer las necesidades de calefacción, cocción de alimentos, producción de vapor y generación de electricidad.

El biocarbón se ha usado por unos 3.000 años. No es nada nuevo. Hoy se le considera un facilitador de servicios ambientales y se tiene como biocombustible para generar electricidad (Bonilla Durán, 2007). Dependiendo del proceso utilizado se pueden obtener productos sólidos (biocarbón), líquidos (bio-aceite), gaseosos (gas de síntesis o *syngas*) o bien una combinación; en especial el bio-aceite y el *syngas* se pueden utilizar como combustibles para generar energía eléctrica, mientras que el biocarbón se usa principalmente para mejorar la fertilidad del suelo.

El uso del biocarbón como fertilizante se data unos 1,500 años atrás, cuando las tribus del Amazonas usaban biocarbón producido a partir de huesos de animales y la corteza de árboles (Bonilla Durán, 2007). Estos pueblos tribales mezclaban sus tierras de cultivo con el biocarbón obteniendo así lo que le llaman “*terra preta*” (tierra negra en español).



Ilustración 8. Rendimiento en cultivos con biocarbón y fertilizante común (Woods End Laboratories, 2009).

Actualmente los científicos han hecho pruebas con las que confirman que estos suelos del Amazonas son de los mejores y más fértiles de la Tierra debido al uso de biocarbón como fertilizante, porque los suelos tratados con biocarbón demuestran que tiene una mayor absorción de agua y nutrientes, lo que da como resultado un mayor rendimiento en cultivos.

Hoy en día los procesos pueden producir biocarbón a través de la combustión controlada de la biomasa con una cantidad mínima de oxígeno, lo que se traduce en una mayor eficiencia y una baja emisión de CO₂, obteniendo adicionalmente electricidad limpia, por lo que estos nuevos procesos son autosuficientes y amigables con el ambiente.

2.5.2. ¿QUÉ ES Y PARA QUÉ SIRVE EL BIOCARBÓN?

El biocarbón es un material sólido obtenido de la carbonización de la biomasa (IBI, 2007). De este modo se le da el nombre de biocarbón, al carbón vegetal preparado para uso agrícola mediante una descomposición termoquímica en ausencia de oxígeno (o usando una mínima proporción del agente gasificante) llamada gasificación.

El biocarbón es un mejorador de tierras que se distingue de muchos otros porque produce un aumento en la fertilidad de la tierra duradero por cientos o miles de años (Sierra Alcázar, 2011).

El biocarbón está diseñado para uso agrícola y tiene ventajas ecológicas que potencialmente pueden tener un efecto significativo en la reducción de la contaminación ambiental y por tanto en la suspensión o reversión del cambio climático (Sierra Alcázar, 2011). Su estructura porosa aumentan la masa de microorganismos del suelo que a su vez proveen de nutrientes y protección a las plantas, lo que lo hace un fertilizante sin comparación alguna.

A pesar de que el biocarbón no es un fertilizante como tal, sino más bien un complejo de compuestos orgánicos en una matriz de carbón estabilizada que ayuda a balancear la acidez del suelo, aumentar la retención de humedad y mejorar la disponibilidad de nutrientes en el suelo (Benjamin & Soto, 2009). Esto es gracias a su principal propiedad: su alta porosidad.

Se ha visto que el biocarbón tiene la capacidad de mejorar la fertilidad del suelo, una capacidad que supera a la composta, el estiércol animal y demás productos para mejorar la fertilidad del suelo; además de que tiene un efecto reparador en suelos afectados, siendo una solución al problema de regeneración y fertilización de suelos áridos.

Se tiene como muestra que en Camerún, África, se han obtenido rendimientos mayores del 200% en muchos terrenos aplicando biocarbón, que aumenta el tamaño de plantas y sus raíces (Sierra Alcázar, 2011).

A continuación se presenta una lista con las principales bondades que caracterizan al biocarbón, y que ofrecen al ser aplicadas a la agricultura como uso de fertilizante (Sierra Alcázar, 2011):

- » Aumenta la fertilidad de la tierra.
- » Elimina la necesidad de fertilizantes.
- » Disminuye los requerimientos de agua.
- » Aumenta la resistencia de las plantas durante las heladas.
- » Absorbe pesticidas y los transforma, evitando que pasen a la planta.
- » Protege de virus, bacterias y hongos patógenos a las plantas.

- » Aumenta la velocidad de crecimiento de las plantas.
- » Aumenta la cantidad y calidad de la cosecha en tamaño, cantidad y densidad de nutrientes.
- » Su efecto es continuo y acumulativo por cientos o miles de años. Los efectos fisicoquímicos son inmediatos, los biológicos se desarrollan más lento, en el orden de meses; sin embargo, son duraderos.
- » Aumenta la biomasa y la respiración de microorganismos del suelo.
- » Incrementa la cantidad de hongos micorriza⁴ en el suelo.
- » Promueve la formación de nutrientes para las plantas provenientes del aire y del suelo.
- » Mejora la capacidad de retención de cationes del suelo.
- » Con el tiempo aumenta la capacidad de intercambio catiónico del suelo.
- » Mejora la retención de nutrientes del suelo.
- » Aumenta la disponibilidad de N, K, P, Mg, Co, Fe, Ca, Mo y B a las plantas. Algunos de estos elementos son necesarios para la fijación de N del aire por bacterias Rhizobium⁵.
- » Multiplica la capacidad de extracción de nutrientes de las raíces de las plantas.
- » Detiene la contaminación de las plantas y frutos por pesticidas en el suelo.
- » Mejora la estructura de todo tipo de suelos.
- » Aumenta el pH de suelos ácidos, tiene efecto regulador.
- » Reduce la toxicidad por aluminio.
- » Aumenta la disponibilidad de aire, agua y nutrientes a las raíces.
- » Repara suelos dañados por uso excesivo de fertilizantes químicos, o la erosión, aumentando la fertilidad de suelos áridos.

Además el biocarbón ofrece una serie de beneficios ecológicos, que los fertilizantes comunes no pueden ofrecer. En seguida se presenta una lista con estos diferentes agregados ambientales.

- » Fija el carbono proveniente del aire, de una manera estable y duradera, por cientos o miles de años, reduciendo así los niveles de CO₂ que provocan el efecto invernadero y el cambio climático mundial.
- » Disminuye la emisión de NO₂ del suelo en aproximadamente un 50%.
- » Suprime la emanación de metano del suelo.
- » Absorbe sales y fertilizantes en solución, reduciendo el deslavado que contamina a los mantos acuíferos, ríos y lagunas.

⁴ Micorriza se refiere a la interacción estrecha entre un hongo y las raíces, con lo que la planta recibe del hongo principalmente nutrientes, minerales y agua; y el hongo obtiene de la planta hidratos de carbono y vitaminas que es incapaz de sintetizar por sí mismo (Fuente: <http://www.izt.uam.mx/cosmosecm/micorrizas.html>).

⁵ Género de bacterias encontradas en el perfil de los suelos, que se encargan de fijar el nitrógeno atmosférico.

- » Absorbe pesticidas y los transforma por acción biológica, evitando así que se filtren a los acuíferos (o a las plantas).
- » Absorbe organismos patógenos y evita la contaminación de acuíferos (o las plantas).

Con esto se puede concluir que el biocarbón, puede ofrecer grandes beneficios a los fertilizantes comerciales, obteniendo resultados en los cultivos visiblemente superiores, y además es ambientalmente amigable y autosustentable su producción utilizando el proceso que se presenta en este proyecto; lo que convierte al biocarbón como un fertilizante insuperable.



Ilustración 9. Beneficios del uso de biocarbón en agricultura (Sierra Alcázar, 2011).

2.6. PODER CALORÍFICO

El poder calorífico de un combustible es la medida de la máxima cantidad de energía que puede ser extraída mediante la combustión de una cierta cantidad de combustible en una dada condición (Oraga, Berset, & Grünhut, 1987, pág. 4.4). El poder calorífico se divide en tres definiciones, que a continuación se explicaran en la sección siguiente.

Para calcular el poder calorífico, se puede hacer usando el poder de combustión estándar, obtenido de tablas provenientes del capítulo de combustión de *API Technical Data Book*, para las especies del combustible multiplicándolos por su fracción peso, y después dividido entre el peso promedio del combustible para obtener unidades de MJ/kg ó BTU/lb según se requiera. Esto se expresa de la siguiente manera.

$$PC = \frac{\sum_{i=1}^{i=n} w_i PC_i}{W_{prom}} \quad [2.1]$$

Donde:

PC: Poder Calorífico del combustible a condiciones estándar (Puede ser PCI o PCS dependiendo si se considera el vapor de agua generado), BTU/lb de combustible.

w_i = Fracción masa de la especie i .

PC_i = Poder de combustión estándar (API, 1997, págs. 14.5-14.8), BTU/lb.

w_{prom} = Peso molecular promedio del combustible, lb.

$$w_{prom} = \sum_{i=1}^{i=n} w_i \quad [2.2]$$

2.6.1. PODER CALORÍFICO CALORIMÉTRICO (PCC)

El poder calorífico calorimétrico o PCC representa la cantidad de calor generado cuando el combustible es quemado en una bomba calorimétrica en condiciones isotérmicas o adiabáticas. La combustión tiene lugar a volumen constante y los productos de la mismas se enfrían a la temperatura inicial, es decir la del combustible y del agente oxidante antes de la iniciación del proceso (Oraga, Berset, & Grünhut, 1987, pág. 4.4).

2.6.2. PODER CALORÍFICO SUPERIOR (PCS)

El poder calorífico superior o PCS representa la cantidad de calor durante la combustión a presión atmosférica y los productos de la misma son enfriados a la temperatura ambiente (en condiciones estándar a 25°C) (Oraga, Berset, & Grünhut, 1987, pág. 4.4). El poder calorífico superior se puede obtener del poder calorífico calorimétrico, corrigiéndolo por:

- La presión en la bomba calorimétrica (normalmente para combustibles sólidos y líquidos, el valor de la corrección es menor que el error de la determinación).
- El calor generado por formación de los óxidos de nitrógeno y azufre.

2.6.3. PODER CALORÍFICO INFERIOR (PCI)

El poder calorífico inferior o PCI representa la cantidad de calor generada cuando toda el agua proveniente de la oxidación del hidrógeno del combustible se encuentra en forma de vapor al final del proceso. El poder calorífico inferior se obtiene a partir del PCS sustrayéndole la cantidad de calor generada por condensación del vapor de agua a la temperatura de referencia (a condiciones estándar 25°C) (Oraga, Berset, & Grünhut, 1987, pág. 4.4).

La diferencia entre el PCS y PCI es el calor latente de condensación del vapor de agua a la temperatura de referencia.

2.7. CICLO RANKINE DE POTENCIA

El ciclo Rankine es el resultado después de mejorar los aspectos imprácticos asociados con el ciclo de Carnot, debido a que este último no es un modelo apropiado para los ciclos de potencia al utilizar vapor como fluido de trabajo.

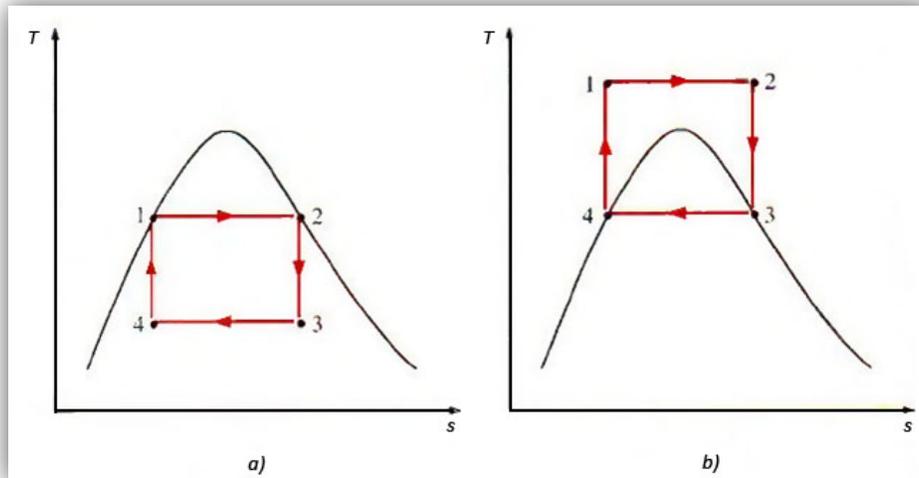


Ilustración 10. Diagrama T-s para ciclos de vapor de Carnot (Cengel & Boles, 2009, pág. 562).

Como se puede apreciar, el ciclo de Carnot es excesivamente ideal, y sólo se considera el trabajo con vapor saturado, lo que limita la temperatura máxima que puede usarse en el ciclo, impidiendo rebasar el punto crítico que en el caso del agua es de 374°C; provocando una disminución muy marcada en la eficiencia térmica del ciclo.

Otro aspecto que no contempla el Ciclo de Carnot y se ve muy claramente en la Ilustración 10 (a), es que al realizar la expansión isentrópica del vapor (proceso 2-3), se tiene un vapor con un alto contenido de humedad, lo que implicaría unos problemas severos en los álabes de la turbina que expanden el fluido transformándolo en energía mecánica al hacer girar el eje del equipo. La humedad en el vapor semejaría balines de acero que chocan a los álabes que se encuentran girando velocidades sónicas en algunos casos, ocasionado un deterioro en la turbina de vapor.

Una alternativa que elimina los problemas principales, sería el ciclo mostrado en la Ilustración 10 (b), pero esto implica nuevas dificultades, como la compresión isentrópica a presiones extremadamente altas y una transferencia isotérmica de calor a presiones variables.

Debido a estos y algunos otros inconvenientes, el ingeniero y físico escocés William John Macquorn Rankine desarrolló un ciclo que lleva su nombre, el cual no incluye ninguna irreversibilidad interna, dicho ciclo se muestra en la sección siguiente.

2.7.1. CICLO RANKINE IDEAL SIMPLE

Este ciclo es la base para un ciclo de potencia con una turbina de vapor, la cual expande el vapor generalmente de agua (aunque se puede utilizar vapor de otros fluidos) al pasar por sus álabes que van aumentando gradualmente su apertura para lograrlo.

La representación de éste ciclo se puede ver en la Ilustración 11, junto con el diagrama T-s, para ver más claramente los procesos que se describen a continuación.

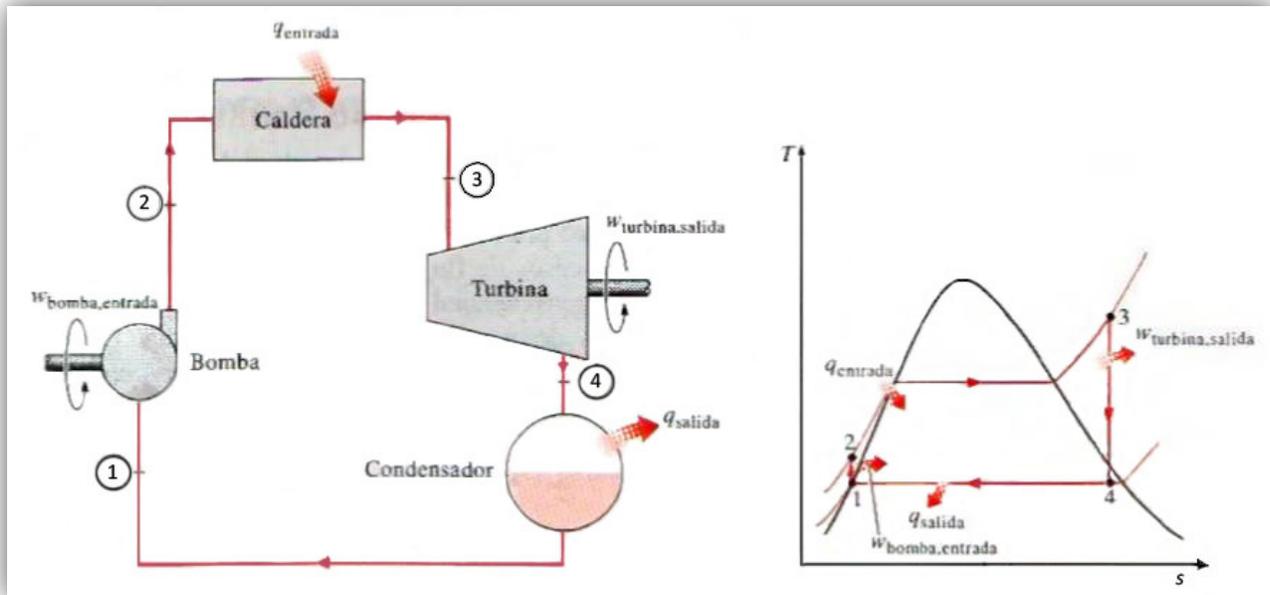


Ilustración 11 . Ciclo Rankine ideal simple (Cengel & Boles, 2009, pág. 563).

- 1-2 Compresión isentrópica en una bomba.
- 2-3 Adición de calor a presión constante en una caldera.
- 3-4 Expansión isentrópica en una turbina de vapor.
- 4-1 Rechazo de calor a presión constante en un condensador.

En el diagrama T-s se puede notar el uso de vapor sobrecalentado en el estado 3, que reduce drásticamente el contenido de humedad después de que el vapor se expande en la turbina para llegar al estado 4. Esto resulta más práctico que usar el ciclo de Carnot, porque reduce los problemas de erosión en el equipo de expansión.

La descripción a groso modo de este ciclo, se puede resumir en que el agua en estado líquido saturado (estado 1) entra a la bomba para presurizar el fluido hasta la presión de operación de la caldera (estado 2). El agua a presión se envía a la entrada de la caldera; dicho equipo es básicamente un intercambiador de calor grande, donde los gases de combustión provenientes de la quema del combustible transfieren su calor al agua a presión y temperatura constantes para producir vapor saturado en primera instancia, mismo que pasa por el sobrecalentador que aumenta la temperatura a presión constante obteniéndose así el vapor sobrecalentado (estado 4).

El vapor sobrecalentado se manda a la turbina de vapor para expandirse isentrópicamente al pasar por las hileras de álabes (estado 4), haciendo girar el eje de la turbina produciendo con esto trabajo mecánico que puede transformarse en energía eléctrica mediante un alternador conectado al eje del equipo expensor de vapor.

Al llevarse a cabo la expansión del vapor, la presión y temperatura del fluido disminuyen hasta llegar a condiciones de vacío generalmente, que es cuando el vapor comienza a condensar, por lo que se introduce a un condensador, que no es otra cosa más que un intercambiador de calor que usa un fluido como medio de enfriamiento para llegar nuevamente al punto de líquido saturado a presión y temperatura constante (estado 1), cerrando el ciclo al enviar el condensado a la bomba.

En el diagrama T-s de la Ilustración 11, el área bajo la curva representa la transferencia de calor para procesos internamente reversibles; el área bajo la curva para el proceso 2-3 representa el calor transferido hacia el agua en la caldera y el área bajo la curva del proceso 4-1 representa el calor rechazado en el condensador. La diferencia entre estas dos (el área encerrada por el ciclo) es el trabajo neto producido durante el ciclo (Cengel & Boles, 2009, pág. 564).

2.7.2. CICLO RANKINE REAL

Las irreversibilidades producto de las leyes de la termodinámica, hacen que el ciclo Rankine ideal difiera del ciclo real. Además de que existen algunas desviaciones ocasionadas principalmente por las pérdidas de calor del vapor hacia los alrededores cuando el fluido recorre los equipos del ciclo y las tuberías, sobre todo cuando carecen de aislamiento, y la fricción del fluido que provoca caídas de presión en la caldera, el condensador y en las tuberías.

Para corregir estas desviaciones, lo que se hace es que la bomba debe presurizar un tanto más el fluido para vencer las caídas de presión presentadas; para las pérdidas de calor se deben aislar muy bien las tuberías (y aun así existe fuga de calor), por lo que también se debe transferir más calor al vapor en la caldera para así compensar los escapes de energía térmica.

En la Ilustración 12 (a) se muestran las desviaciones provocadas por las pérdidas de calor y por la fricción como se explicó anteriormente, y en la Ilustración 12 (b) se ven los efectos de las irreversibilidades que se aplican por los principios de la termodinámica.

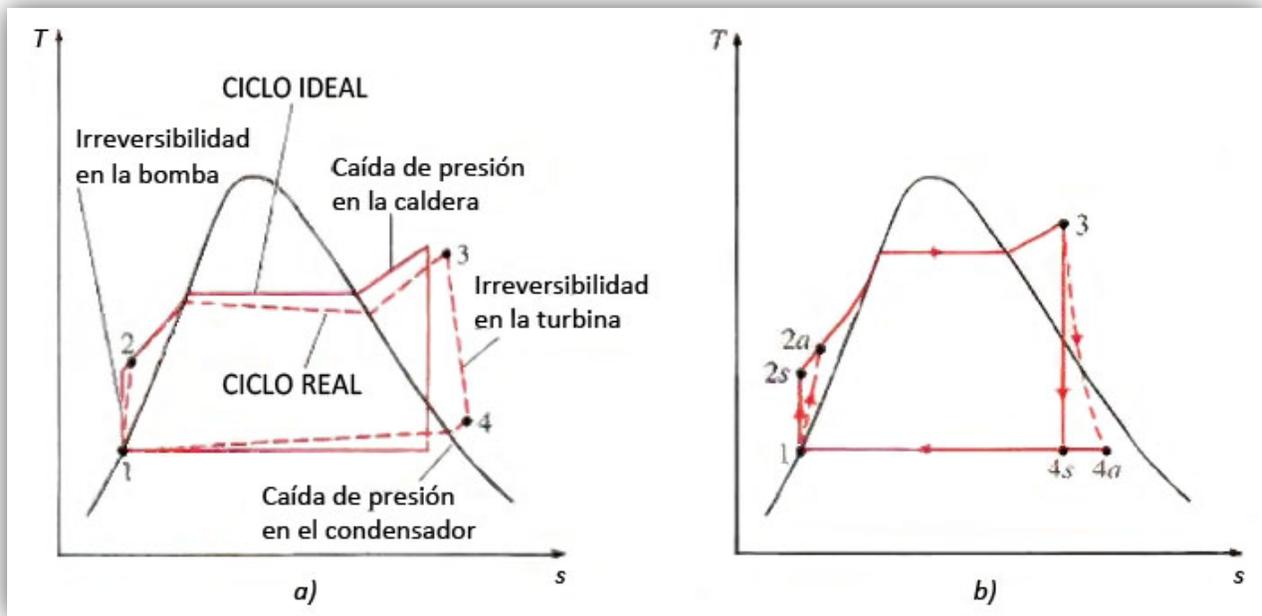


Ilustración 12 . a) Desviaciones del ciclo Rankine ideal vs el ciclo real. b) Efecto de las irreversibilidades de la bomba y la turbina en el ciclo Rankine ideal (Cengel & Boles, 2009, pág. 568).

Las irreversibilidades se pueden corregir al usar eficiencias, claro esta que deben ser menores al 100%, para obtener las desviaciones a las que nos limita la termodinámica. A continuación se presentan las ecuaciones para tener la irreversibilidad usando una eficiencia isentrópica para el caso de la turbina de vapor.

La eficiencia isentrópica se puede definir en términos de trabajo de la siguiente manera:

$$\eta = \frac{W_r}{W_i} \quad [2.1]$$

Donde:

η = La eficiencia isentrópica, en fracción.

W_r = Trabajo real.

W_i = Trabajo ideal.

Dicha eficiencia también se puede traducir en términos de entalpías.

$$\eta = \frac{\Delta h_r}{\Delta h_i} = \frac{h_{3i} - h_{4r}}{h_{3i} - h_{4i}} \quad [2.2]$$

Donde:

Δh_i = Cambio de entalpía ideal.

Δh_r = Cambio de entalpía real.

h_i = Entalpía ideal en determinado estado.

h_r = Entalpía real en determinado estado.

Haciendo un cambio de signos para facilitar el posterior despeje de la entalpía real en el estado 4.

$$-\eta = \frac{h_{4r} - h_{3i}}{h_{4i} - h_{3i}} \quad [2.3]$$

$$\boxed{h_{4r} = h_{3i} - \eta(h_{4i} - h_{3i})} \quad [2.4]$$

2.7.3. TERMOGRAF PARA CICLO RANKINE

Actualmente existen herramientas muy poderosas que facilitan el estudio de casos mediante simulaciones, que bien pueden ser del proceso o como en este caso que se trata de la simulación del comportamiento termodinámico mediante graficas ya sea P-v, P-h, h-s, T-v, P-T, P-s, T-h, h-v, s-v, pero sobre todo en ciclos Rankine diagramas T-s.

El simulador termodinámico tiene el nombre de TermoGraf (Turégano, Velasco, & Gómez, 2012), y es una excelente herramienta para el cálculo de estados, procesos y ciclos, comprendiendo a mayor profundidad el comportamiento de algunos fluidos durante los procesos de transformación y transferencia de energía. El programa usa correlaciones termodinámicas de tal manera que al especificar dos variables generalmente (o las necesarias para agotar los grados de libertad según el proceso utilizado) se obtiene el cálculo completo del estado o del proceso de manera instantánea, con lo que se pueden conseguir datos de presión, temperatura, Entalpía, entropía y volumen; lo que hace que sea un programa práctico para el uso en los cálculos de ingeniería.

Para el ciclo Rankine hecho con el simulador termodinámico TermoGraf para este proyecto, se consideró el uso de vapor sobrecalentado a 600 psig y 825 °F, con lo que se partió para la construcción manual del ciclo, tomando en cuenta los cuatro procesos descritos en el ciclo Rankine ideal simple y su posterior corrección para convertirlo en un ciclo real, más apegado a lo que ocurre en realidad.

La representación se hace en un diagrama T-s, como se hace usualmente para este tipo de ciclos de potencia, porque es más fácil ver los estados por los que pasa el fluido a través del ciclo en este tipo de diagramas.

A continuación se muestra en la Ilustración 13 el ciclo Rankine ideal, con el que se partió para obtener un ciclo real que puede usarse en el proceso de cogeneración de este proyecto de gasificación de biomasa, la numeración de los estados es acorde al número de corriente según el DFP y el balance de materia y energía (Ver Capítulo IV).

Para corregir la idealidad del ciclo, se consideró una eficiencia isentrópica para la turbina de vapor de $\eta=0.75$, y una caída de presión del estado 14 al 15 (sobrecalentamiento del vapor hasta su estado final en el intercambiador IC-201 con una corriente de syngas) de 0.72 psi en correspondencia con el balance de materia y energía.

El diagrama T-s mostrando estas correcciones, dan como resultado el ciclo Rankine real para nuestro sistema de producción de vapor y cogeneración, mismo que se presenta a continuación en la Ilustración 14; al considerar una expansión real del vapor se ve claramente que el nivel de humedad se tiene menor al 10%, acorde a los criterios de diseño.

Adicionalmente a las correcciones de idealidad, se debe considerar una extracción de vapor sobrecalentado destinado a alimentar al desaireador DA-301 para desgasificar la corriente de condensado y evitar problemas de corrosión en la caldera.

La extracción de vapor se hace a 50 psia de presión, donde el programa TermoGraf nos calcula la temperatura, Entalpía y entropía del estado termodinámico, que en el diagrama se representa con el número 27.

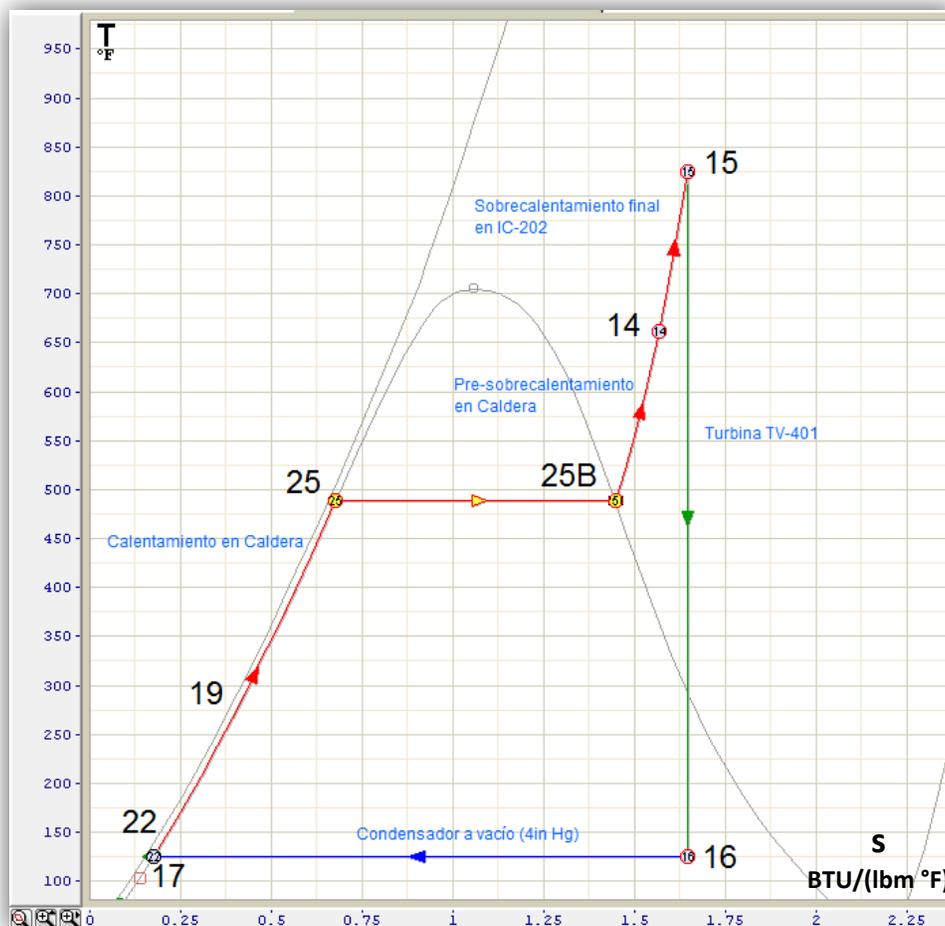


Ilustración 13. Diagrama T-s del Ciclo Rankine Ideal @600 psig y 825°F generado con TermoGraf (elaboración propia).

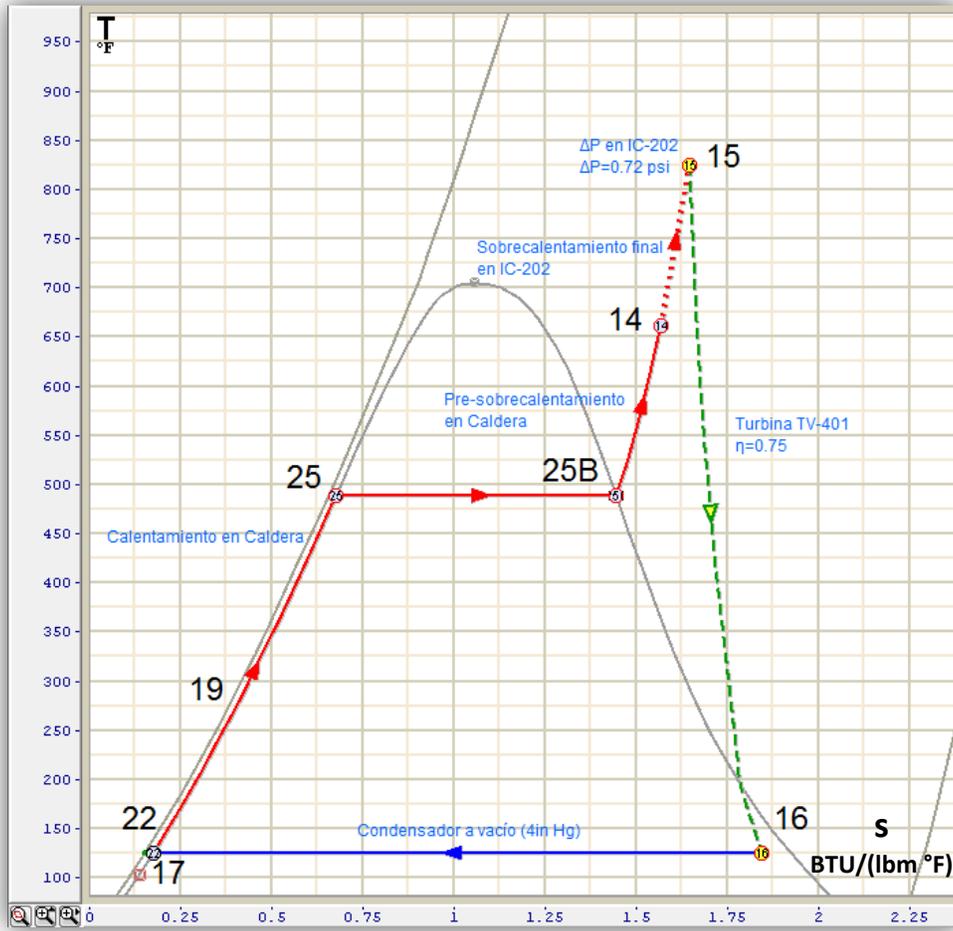


Ilustración 14. Diagrama T-s del Ciclo Rankine Real @600 psig y 825°F generado con TermoGraf (elaboración propia).

A continuación en la Ilustración 15 se muestra el diagrama T-s tomando en cuenta la extracción de vapor, dónde se desobrecalienta en el desaireador por contacto directo con el condensado y además se condensa llegando a su estado de líquido saturado (estado 19).

El diagrama T-s de la Ilustración 15 es el ciclo Rankine real que se utilizó para los cálculos en las respectivas memorias de cálculo de los equipos, para ello se obtuvieron los datos termodinámicos de cada estado con el programa TermoGraf, mismo que están representados en la Tabla 10 en unidades del sistema inglés por comodidad para realizar algunas operaciones.

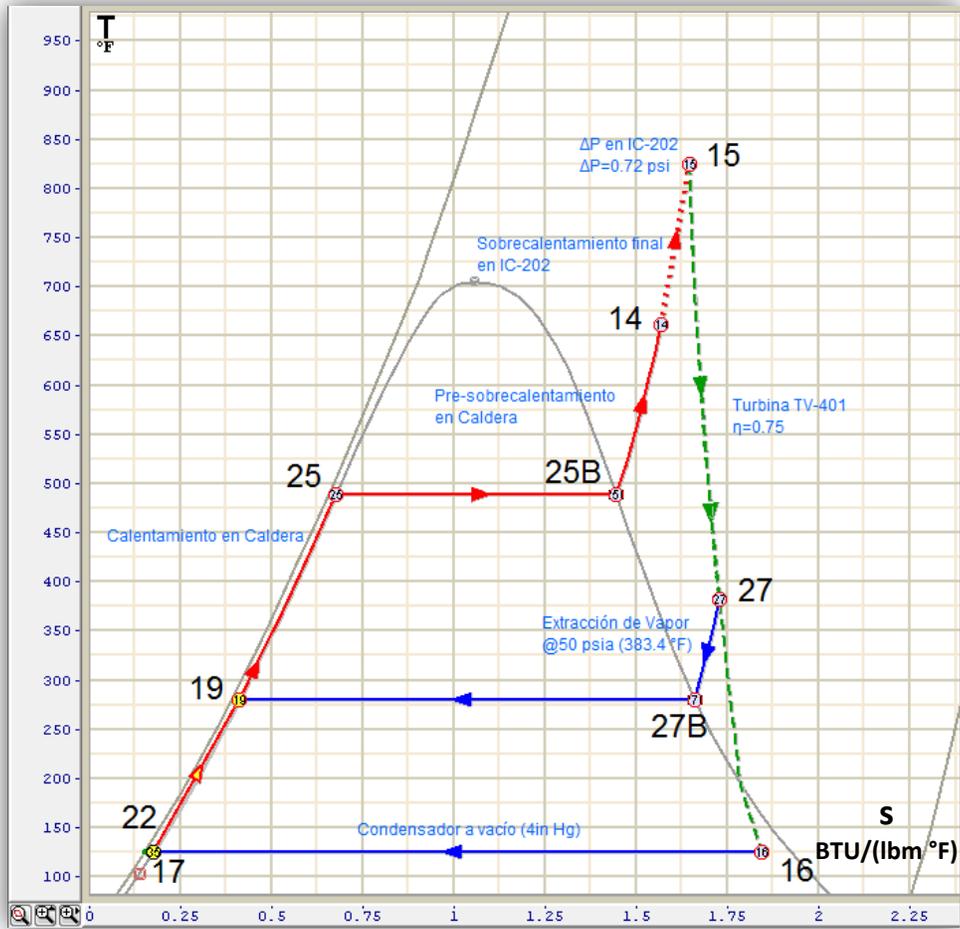


Ilustración 15 . Diagrama T-s del Ciclo Rankine Real @600 psig y 825°F con una extracción de vapor a 50 psia generado con TermoGraf (elaboración propia).

Tabla 10 . Datos de los estados termodinámicos obtenidos de TermoGraft para el Ciclo Rankine Real @600 psig y 825°F con una extracción a 50 psia (elaboración propia).

	P [psia]	v [ft ³ /lb]	T [°F]	u [BTU/lb]	h [BTU/lb]	s [BTU/lb °F]	x
Estado 14	615.4	0.998	661.70	1212.89	1326.49	1.5636	---
Estado 15	614.7	1.188	825.00	1285.36	1420.48	1.6420	---
Estado 16	2.0	168.657	125.31	1007.93	1069.26	1.8422	0.95
Estado 17	2.0	0.016	125.31	93.49	93.50	0.1741	0.00
Estado 19	50.0	0.017	280.95	249.94	250.10	0.4112	0.00
Estado 22	615.4	0.016	125.90	93.49	95.34	0.1741	---
Estado 25	615.4	0.020	488.99	472.70	475.00	0.6759	0.00
Estado 25B	615.4	0.750	488.99	1117.92	1203.34	1.4436	1.00
Estado 27	50.0	9.851	383.40	1135.22	1226.37	1.7249	---
Estado 27B	50.0	8.517	280.95	1095.21	1174.02	1.6587	1.00
Estado 35	50.0	0.016	125.35	93.49	93.64	0.1741	---

Adicionalmente se extrajo del programa mencionado anteriormente los datos de cambio de energía interna y entalpía para cada proceso, estos datos se muestran seguidamente en la Tabla 11.

Tabla 11 . Datos de los procesos llevados a cabo en el Ciclo Real Rankine @600psig y 825°F con una extracción a 50 psia, obtenidos de TermoGraf (elaboración propia).

	ΔU [BTU/lb]	ΔH [BTU/lb]
Proceso 14-15	72.47	93.99
Proceso 15-16	-277.43	-351.22
Proceso 15-27	-150.14	-194.12
Proceso 16-17	-914.44	-975.76
Proceso 17-22	0.00	1.84
Proceso 17-22	0.00	0.14
Proceso 22-25	379.21	379.66
Proceso 25-25B	645.22	728.33
Proceso 25B-14	94.97	123.16
Proceso 27-27B	-40.01	-52.35
Proceso 27B-19	-845.28	-923.92

Finalmente se muestra un diagrama P-h del ciclo Rankine real, donde se aprecia claramente la falta de practicidad de este tipo de diagramas para este tipo de ciclos, ya que la escala de presión se tendría que ampliar el intervalo, pero aun así es complicado seguir los procesos termodinámicos del ciclo por la proximidad de las líneas; cosa que no ocurre en el diagrama T-s.

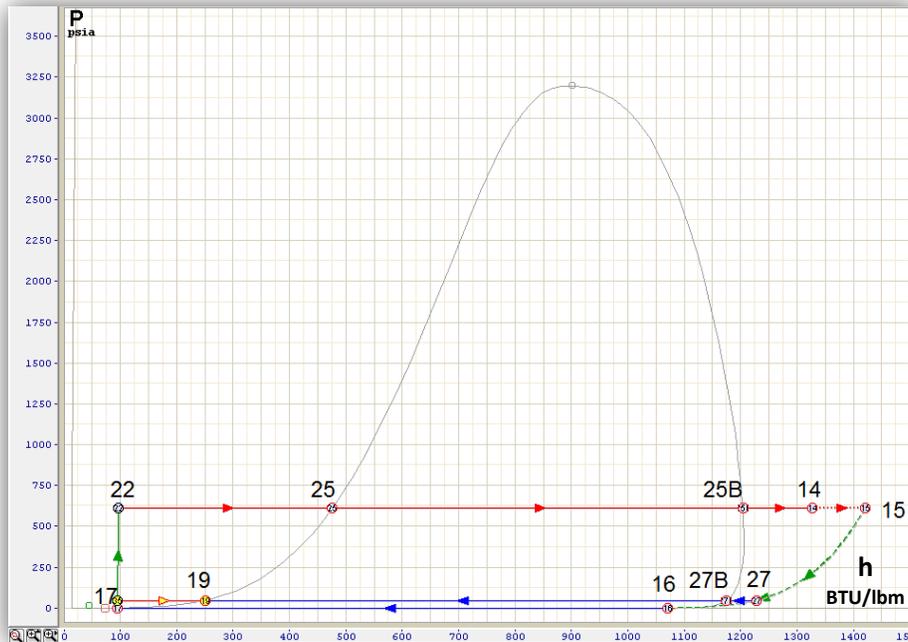


Ilustración 16 . Diagrama P-h del Ciclo Rankine Real @600psig y 825°F con una extracción de vapor a 50 psia generado con TermoGraf (elaboración propia)

C A P Í T U L O I I I

B A S E S D E L P R O Y E C T O

3.1. BASES DE DISEÑO

El dimensionamiento de equipos deberá seguir los lineamientos expuestos en estas bases de diseño, puesto que la información tiene la función de proporcionar el sustento del proyecto.

3.1.1. MATERIALES

3.1.1.1. MATERIAS PRIMAS

	Nombre	Cómo se Recibe	Frecuencia de Recibo	Lote Recibido
1	Biomasa	Residuos Agroforestales (2-12 mm)	3000 kg/día aprox.	1 lote por día

NOTA: Entiéndase biomasa por desechos forestales, orgánicos, animales y de cultivos.

3.1.1.2. MATERIAS DE PROCESO

	Nombre
1	Gas de Síntesis (Syngas)
2	Vapor de Agua

3.1.1.3. SERVICIOS AUXILIARES

	Nombre
1	Aire ambiente (Gasificador)
2	Agua Desmineralizada (Caldera)
3	Agua de Enfriamiento del Río Apatlaco (Cuernavaca)
4	Gas natural (Arranques)
5	Electricidad (Arranque y suministro de emergencia)

3.1.1.4. PRODUCTOS Y SUBPRODUCTOS

	Nombre	Cómo se Envía	Frecuencia Envió	Lote de Envió
1	Biocarbón	Sacos (10, 20 y 50 Kg)	Según el cliente	Según el cliente
2	Electricidad	Cable subterráneo	Autoconsumo	Autoconsumo

3.1.1.5. CARACTERÍSTICAS DE PRODUCTOS

A. Syngas

Características	%
Cantidad producida [% peso]	43.9-46
Composición [% volumen] *	%
CO ₂	52.1
CO	13.5
N ₂	16.3

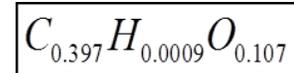
H2	12.5
CH4	4.4
C2H4	0.6
C2H6	0.6
Poder calorífico [MJ/Nm ³]	4-6

* Datos obtenidos de: (Proenza Pérez, Cala Aiello, Luz Silveira, & Zanzi, 2006, pág. 56)

B. Biocarbón

Características	%
Cantidad producida (% en peso)	29.3-39.0
Composición (% peso)	%
Carbón	84.99
Hidrógeno	2.82
Oxígeno	12.11
Nitrógeno	0.08
Cenizas	0.5-5

Formula Empírica *



*Libre de Ceniza

3.1.1.6. LÍMITES DE PUREZA

Concepto	Propiedades
Materias Primas:	Humedad 10-30%
Productos:	Biocarbón Humedad (6-12%)
Gas de Síntesis	Partículas < 50 mg/Nm ³ y un contenido de alquitranes < 100 mg/Nm ³

3.1.1.7. PROPIEDADES COMUNES

	Nombre	Densidad (Kg/m ³)	Temp. [°C]	Gravedad Específica
1	Biomasa	300-450 (edo. Sólido)	Temp. Ambiente	----
2	Gas Natural	NA	15.5	0.6 (aire 1.0)
3	Aire Amb.	4.4	25	1

3.1.1.8. PROPIEDADES ESPECIALES

	Nombre		Temp. [°C]	T Autoignición [°C]
1	Gas Natural	Punto Flash	-220	650

3.1.2. LUGAR DE ESTABLECIMIENTO

3.1.2.1. DATOS DE UBICACIÓN

- A. Población: **Temixco**
- B. Estado: **Morelos**
- C. Municipio: **Cuernavaca**



Ilustración 17 . Ubicaciones posibles para Planta de biocarbón (Google Maps).



Ilustración 18 . Vista lateral para opción A (Google Maps).



Ilustración 19 . Vista lateral para opción B (Google Maps).



Ilustración 20 . Vista del Río Apatlaco, Cuernavaca, Morelos (Google Maps).

3.1.2.2. DATOS GENERALES

- A. Elevación sobre el nivel del Mar: **1511 m**
 B. Presión Atmosférica: **0.83 atm**
 C. Zona Sísmica: **B**
 D. Estudio de Mecánica de Suelos: **No**

3.1.2.3. ELECTRICIDAD

Energía Eléctrica Comprada:		Si			
120	Volts	15	Amperes	Mono	Fases
240	Volts	30	Amperes	Bifásica	Fases
Energía Eléctrica Generada:		Si			
240	Volts	30	Amperes	Bifásica	Fases

3.1.2.4. DATOS METEOROLÓGICOS

A. Temperatura

Prom. Anual 2010	24.7	°C	Máxima	30.9	°C	Mínima	16	°C
Prom. Mensual	21.7	°C	Máxima	30	°C	Mínima	14.6	°C
T. Bulbo Húmedo	15.1	°C	Año 2000					

B. Humedad

Prom. Anual	43	%	Año 2011
Prom. Mensual	59	%	Agosto 2011
Precipitación Pluvial (min)	16.26	mm	

C. Precipitación Total Acumulada (últimos 4 años)

2007	874.55	mm	2008	1081.76	mm
2009	996.69	mm	2010	850.13	mm
Máxima Registrada	1631.66	mm	en el año	2004	

NOTA: Datos tomados de: http://www.tutiempo.net/clima/Cuernavaca_Mor/767260.htm

D. Vientos

Prom. Anual	2.6	Km/h	Año 2010
Prom. Mensual	2.4	Km/h	Agosto 2011

3.1.2.6. VÍAS DE ACCESO Y COMUNICACIÓN

A. Carreteras:	Carretera Federal 95 de Cuota, Chilpancingo-Cuernavaca
B. Ferrocarriles:	No
C. Aeropuerto más Cercano:	Aeropuerto Internacional Gral. Mariano Escobedo
D. Puerto Marítimo más Cercano:	Veracruz, Veracruz
E. Teléfonos:	Si

3.1.2.7. JURISDICCIÓN

A. Estado:	Morelos
B. Municipio:	Cuernavaca
C. Regulador:	Municipal, Estatal, Federal

3.1.3. CAPACIDAD DE LA PLANTA

3.1.3.1. GENERAL

Operación	<u>24</u>	h/día
Operación	<u>6</u>	días/sem
Turnos	<u>2</u>	
Días Festivos No Laborables	<u>14</u>	días/año
Operación Anual	<u>299</u>	días/año
Interrupción por Mantenimiento	<u>80</u>	h/año
Operación	<u>7,098</u>	h/año

3.1.3.2. PRODUCCIÓN ANUAL

Dentro de Especificación (SI)	<u>227</u>	Ton/año
Dentro de Especificación (IN)	<u>500,835</u>	lb/año
Reciclo Fuera de Especificación (SI)	<u>NA</u>	Kg/año
Reciclo Fuera de Especificación (IN)	<u>0</u>	lb/año
Producción Anual Total (SI)	<u>227</u>	Ton/año
Producción Anual Total (IN)	<u>500,835</u>	lb/año

3.1.3.3. PRODUCCIÓN DE BIOCARBÓN

Capacidad por Hora (SI)	<u>32.0</u>	kg/h
Capacidad por Hora (IN)	<u>71</u>	lb/h

Capacidad Diaria (SI)	<u>768</u>	Kg/día
Capacidad Diaria (IN)	<u>1,693</u>	lb/día
Capacidad Anual	<u>5,451</u>	Ton/año

3.1.3.4. PRODUCCIÓN DE DISEÑO DE BIOCARBÓN

Capacidad Diaria (SI)	<u>883</u>	Kg/día
Capacidad Diaria (IN)	<u>1,947</u>	lb/día
Capacidad Anual	<u>261</u>	Ton/año

3.1.3.5. PROCESAMIENTO DE BIOMASA (PORCENTAJES)

Mínima	<u>50</u>	%
Normal	<u>100</u>	%
Diseño	<u>115</u>	%
Sobrediseño	<u>125</u>	%

3.1.3.6. PROCESAMIENTO DE BIOMASA (CANTIDAD)

Mínima	<u>150</u>	Kg/h
Normal	<u>300</u>	Kg/h
Diseño	<u>345</u>	Kg/h
Sobrediseño	<u>375</u>	Kg/h

3.1.3.7. TIPO DE CICLO

Tipo de Proceso Discontinuo - Continuo

3.1.3.8. SOBREDISEÑO DE EQUIPOS

Equipos 150 %

3.1.3.9. SOBREDISEÑO PARA CONTROL

Bombas, Tuberías y Válvulas	<u>Req</u>	%
Cambiadores de Calor	<u>Req</u>	%
Válvulas de Control	<u>Req</u>	%
Manómetros	<u>200</u>	%
Termómetros	<u>200</u>	%

NOTA: Los equipos requeridos, serán para equipos principales del proceso

3.1.3.10. SOBREDISEÑO PARA EL FUTURO

Caldera	<u>150</u>	%
Compresores	<u>150</u>	%

3.1.3.11. CORROSIÓN

Tolerancia de Corrosión	<u>1/16" a 1/8" por contacto acuoso</u>
-------------------------	-----------------------------------------

3.1.4. CONDICIONES DE PROCESO

3.1.4.1. TEMPERATURA Y PRESIÓN

	Área de Proceso	Temp. Diseño [°C]	Presión Diseño [atm]
1	Horno Gasificación	800-1200	1-3
2	Caldera	363	63
3	Gen. de Electricidad	DP	DP

3.1.4.2. MATERIALES DE CONSTRUCCIÓN ESPECIALES

Horno Gasificación <i>Downdraft</i>	<u>Acero inox. AISI 304</u>
Caldera Piro tubular	<u>Por Fabricante</u>
Turbina	<u>Por Fabricante</u>
Filtro de <i>Syngas</i>	<u>Por Fabricante</u>

3.1.4.3. PRECAUCIONES ESPECIALES DE SEGURIDAD

A. Horno de Gasificación *Downdraft*

Trabaja a altas temperaturas, hay riesgo de explosión. Considerar control de temperatura y utilización de aislantes. Trabaja a altas presiones (Especial control en la presión), Posibles vibraciones y sonidos fuertes. Maneja material flamable (*syngas*).

B. Turbina de Vapor

Control en la Velocidad, por vibraciones y ondas de choque. Protecciones con válvulas de escape por sobre-velocidad. Prevenir el bajo nivel de aceite. Monitorización especial de la temperatura, y monitorización en expansiones en carcasa o rotor.

C. Caldera Piro tubular

El equipo trabaja a alta presión y temperatura, por lo que se debe tener especial cuidado en estas variables, de manera que se tenga el control de las mismas además de dispositivos de seguridad para protección del personal.

3.1.4.4. CONTENCIONES O SUMIDEROS

A. Horno de Gasificación Downdraft

Requiere: Si, de doble contención.

B. Turbina de Vapor

Requiere: Si, de doble contención.

C. Caldera Piro-tubular

Requiere: Se definirá posteriormente.

3.1.4.5. INFORMACIÓN ADICIONAL

Poner principal atención al gasificador ya que es el equipo principal del proceso y del cual depende la producción, además de que puede ser peligroso.

3.1.5. NORMATIVIDAD APLICABLE

La ingeniería básica y de detalle deberá basarse en la siguiente normatividad, que será usada el diseño integral del proyecto.

A. Tuberías	ASME, NRF 32
B. Tanques Atmosféricos	API
C. Recipientes a Presión	ASME
D. Sistema Contra incendios	API 500
E. Bombas	ANSI, ASTM
F. Cambiadores de Calor	TEMA
G. Eléctrico	CFE EM-BT104 Y 204
H. Turbinas de Vapor	ASME-IEEE
I. Horno de Pirólisis	API 560 y AISI 304
J. Caldera	ASME, API
K. Electricidad generada	ANSI
L. Ambientales	NOM
M. Diagramas de Simbología	ISA
N. Espec. De Tuberías	NRFP-039

3.1.6. CONVENCIONES

Idioma de Documentos	Español
Tamaño de Dibujos	22 x 24 in
Escala de Dibujos no menor a:	¼ in = 1ft
Sistema de Unidades	Internacional / Ingles
A. Presión	atm / psia
B. Temperatura	°C / °F
C. Flujo Másico	kg/h / lb/h
D. Flujo Volumétrico	m ³ /h / ft ³ /h
E. Energía	kW / hp
F. Poder Calorífico	kJ/kg / BTU/lb
G. Densidad	kg/m ³ / lb/ft ³
H. Entalpía	kJ/kg / BTU/lb
I. Entropía	kJ/kg °C / BTU/lb °F

3.1.7. SERVICIOS AUXILIARES

Los servicios auxiliares necesarios en la producción se especifican a continuación.

3.1.7.1. VAPOR

Sobrecalentado 600 psig Temp 825 °F

3.1.7.2. AGUA

Cruda	<u>Si, Río Apatlaco.</u>	Gasto	<u>DP</u>	gal/h
Tratada	<u>NO</u>	Gasto	<u>NA</u>	gal/h
Presión	<u>Atmosf. Psia</u>	Temp	<u>Ambiente</u>	°F
Enfriamiento	<u>Agua de Río</u>	Gasto	<u>DP</u>	gal/h
Presión	<u>Atmosf. Psia</u>	Temp	<u>77</u>	°F
	Fact. Ensuciamiento <u>DP</u>		<u>h ft² °F/BTU</u>	
Desmin.	<u>Si, para Caldera</u>	Gasto	<u>Req</u>	gal/h
Potable	<u>Municipio</u>	Gasto	<u>Req</u>	gal/h
Contra Inc.	<u>Tanque de Alm.</u>	Gasto	<u>DP</u>	gal/h
	Presión <u>Atmosf. Psia</u>	Temp	<u>Amb.</u>	°F

3.1.7.3. AIRE DE INSTRUMENTOS

Línea Principal Requerido	<u>NO, va a ser señal electrónica</u>
Presión <u>N.A</u> psia	Gasto <u>N.A</u> gal/h
Instrumentos Requerido	<u>NO, va a ser señal electrónica</u>
Presión <u>N.A</u> psia	Gasto <u>N.A</u> gal/h

3.1.7.4. AIRE DE PLANTA

Presión Req psia Req gal/h

3.1.7.5. COMBUSTIBLES

Gas (Tipo) Natural Gasto Req gal/h
 Poder calorífico 35.42 MJ/m³ Presión Disp kg/cm²

3.1.7.6. TELÉFONO

Compañía TELMEX
 Diseño A prueba de Explosión con acometida subterránea

3.1.8. EQUIPOS DE RELEVO

Equipos de proceso Bombas y Filtros
 Instrumentos Gasificador, Caldera, Turbinas y Filtro: P, T y Flujo
 Eléctrico NA

3.1.9. ESTUDIOS ECONÓMICOS

3.1.9.1. ESTUDIO DE MERCADO

Se analizarán varios factores, como entorno nacional, competencia, demanda del producto, y consumidores.

3.1.9.2. FINANCIAMIENTO

Se van a estudiar varias propuestas de financiamiento para ver cuál es la más conveniente.

3.1.9.3. ESTIMADO DE COSTOS

Se realizará un estimado de costo del proyecto en un rango de -20 + 30% sobre el costo total, el cual deberá incluir costo del terreno, equipos con instalación, instrumentación y control, pero únicamente para el área de la planta de proceso. Esto quiere decir que no se incluirá la construcción de oficinas, área común, comedor, almacén, enfermería, etc.

3.1.9.4. ROI

Basado en comparar el beneficio o la utilidad obtenida en relación a la inversión realizada.

3.1.9.5. VPN

Determinar si la inversión puede incrementar o reducir el valor de la misma.

3.1.9.6. PERIODO DE RECUPERACIÓN (PRI)

Medir el plazo de tiempo que se requiere para que los flujos netos de efectivo de una inversión recuperen su costo o inversión inicial.

Notación:

(SI)	Se maneja unidades del Sistema Internacional
(IN)	Se manejan unidades Inglesas
NA	No Aplica
DP	Determinado Posteriormente
Req	Requerido
Disp	Disponible

3.1.10. DIAGRAMAS DE BLOQUES

3.1.10.1. PRETRATAMIENTO DE BIOMASA

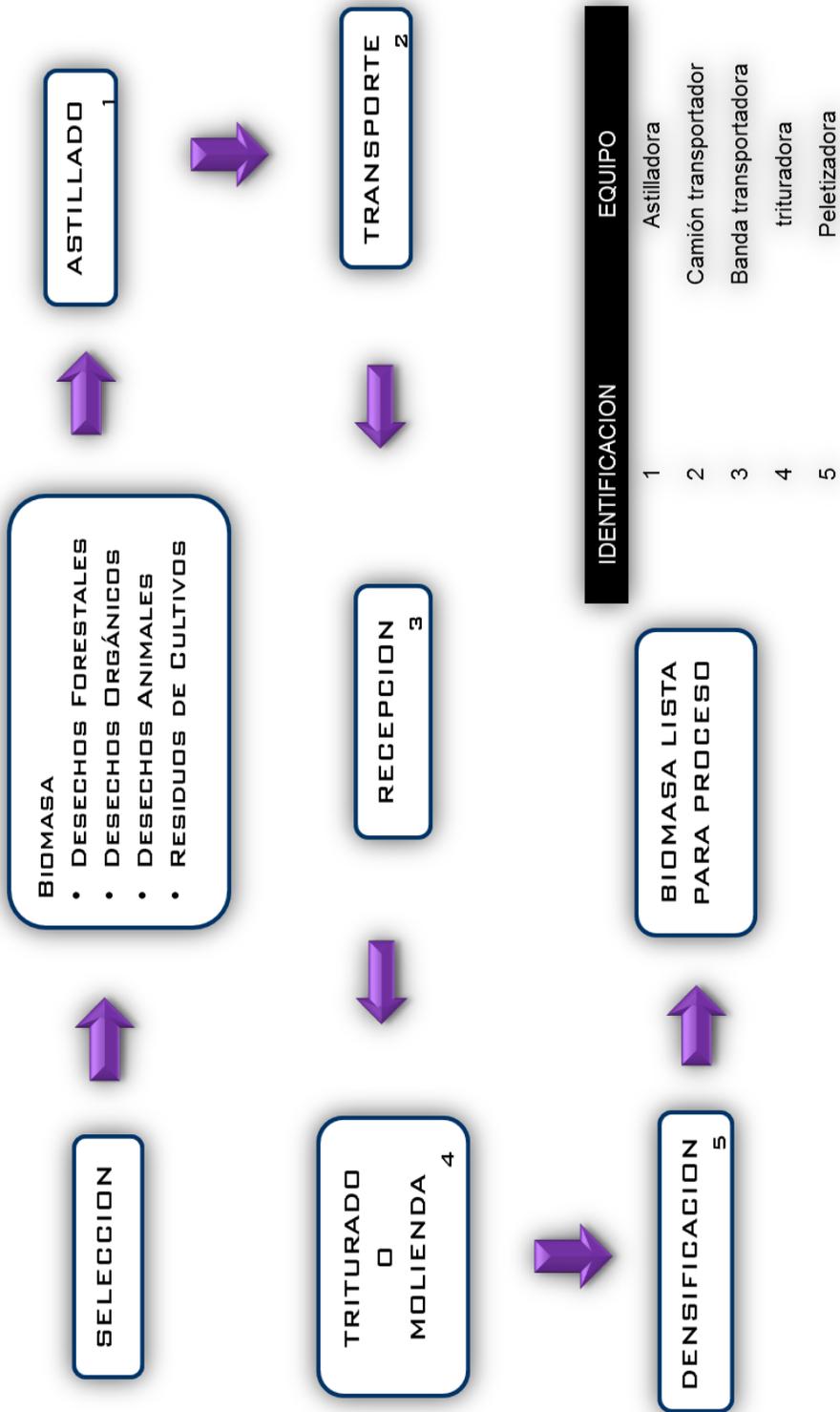


Ilustración 21. Diagrama de bloques para pretratamiento de la biomasa (elaboración propia).

3.1.11. DIAGRAMA DE BLOQUES PARA GASIFICACIÓN DE BIOMASA

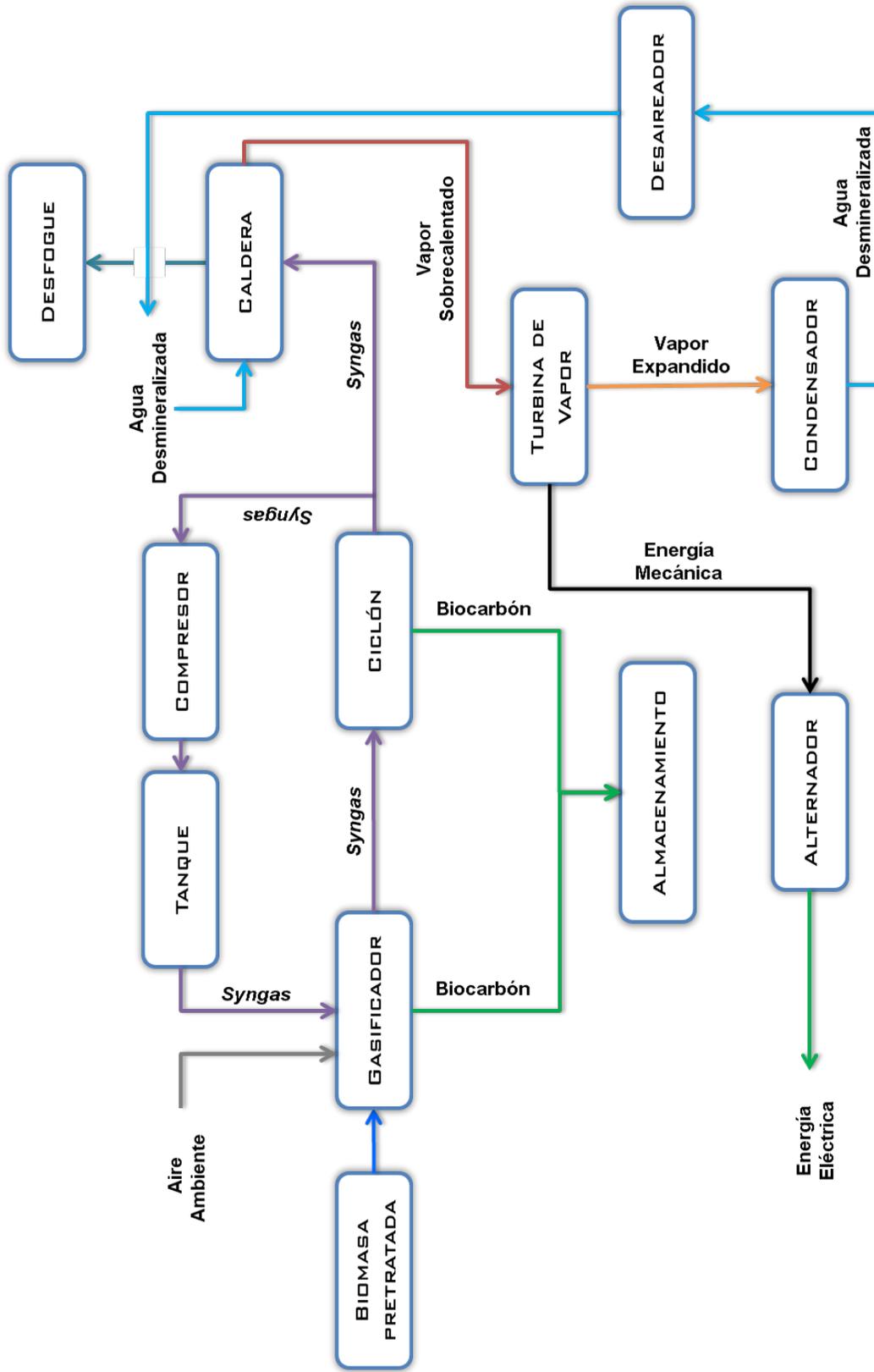


Ilustración 22. Diagrama de bloques del proceso general de gasificación de biomasa (elaboración propia).

3.2. CRITERIOS DE DISEÑO

3.2.1. TURBINA DE VAPOR

3.2.1.1. EFICIENCIA

- La descarga húmeda de la turbina debe ser menor al 10%, de esta manera los problemas de corrosión no son serios.
- La eficiencia de la turbina para su diseño adecuado anda entre 60 y 70%.
- El sobrecalentamiento del vapor aumenta la eficiencia del ciclo, pero también aumentan los costos.
- Las plantas eléctricas raramente operan a condiciones arriba de 10 000 kPa y temperaturas arriba de 600°C.
- La eficiencia térmica aumenta a medida que la presión y la temperatura del condensador se reducen.
- Registro de disponibilidad del 90-95% en 10 años.
- Eficiencia adiabática según la potencia de la turbina:

Tabla 12. Eficiencia de turbina de vapor según caballaje (Branan, 1976, pág. 31).

Caballos de Fuerza [hp]	Eficiencia [%]
500-1,000	50
1,000-1,500	55
1,500-2,000	60
2,000-3,000	65
3,000-5,000	70
5,000-más	75

- Para turbinas pequeñas a 3600 rpm:

Tabla 13. Eficiencia de turbinas de vapor pequeñas según caballaje (Branan, 1976, pág. 31).

Caballos de Fuerza [hp]	Eficiencia [%]
1-10	15
10-50	20
50-300	25
300-350	30
350-500	40

3.2.1.2. CONDENSADOR

- La temperatura del condensador debe ser superior a la temperatura del medio de enfriamiento, que es agua a condiciones locales de clima y geografía.
- La presión del condensador debe ser tan baja como lo permitan las condiciones de clima y geografía. Y debe ser una presión menor a la atmosférica, lo que no tiene mayor problema porque el ciclo Rankin es un ciclo cerrado.
- La presión en el condensador no puede ser menor a la presión de saturación correspondiente a la temperatura del medio de enfriamiento.
- Para compensar caídas de presión en el vapor generado en la caldera, el agua debe bombearse a una presión mayor que la que tiene el ciclo ideal, lo que implica una bomba más grande.
- La temperatura permisible en entrada de la turbina es aproximadamente 620 °C (1150 °F), por materiales de la turbina.

3.2.1.3. SOBREALENTAMIENTO DE VAPOR

- Los valores estándar de vapor para turbinas según la ASME e IEEE:

Tabla 14. Valores estándar para vapor de turbina según ASME-IEEE (Perry, 2005, págs. 29-33).

Presión [psig]	Temperatura [°F]
400	750
600	825
850	900
1250	1000

- El límite superior de temperatura de vapor en la turbina es de 1000°F sin tener que usar materiales especiales. Los costos iniciales y de mantenimiento sobrepasan a los beneficios en rendimiento para temperaturas por encima de 1000 a 1050 °F.

3.2.1.4. CONTROL Y SEGURIDAD

- Aquellas porciones de álabe que giran fuera del alcance de las toberas provocan fricción y pérdidas.
- Los requisitos para un servo control tienen 3 niveles:
 - a) Válvula Equilibrada Simple. Controlada con una fuerza menor a 889.5 N (1000 lbf)
 - b) Válvula de Asiento Único tipo Venturi. Equilibrada anda entre 3558.4 N (800lbf)-4448N (1000lbf)
 - c) Engranaje de válvula elevada de Lavas. Servos hidráulicos (aceite) 8-10 in.
- Se puede elegir un servo neumático para cargas pequeñas en el control de velocidad.

- Para cargas pesadas de velocidad se usa cámara de vapor con elevador de barra.
- Como especificación estándar, la sobre-velocidad en caso de pérdida de carga, no debe pasar el 9-10% del valor total.
- Tener columnas de apoyo muy delgadas puede contribuir al problema de resonancia.
- Monitorear la vibración, porque es síntoma de que algo anda mal.
- Problemas más comunes en las turbinas de vapor:
 - i. Vibraciones
 - ii. Variación de válvulas agarrotadas
 - iii. Fuga en las juntas
 - iv. Deformaciones por temperatura
 - v. Erosión de los álabes
 - vi. Pérdidas de potencia
 - vii. Problemas de engranajes.

3.2.2. GASIFICADOR *DOWNDRAFT*

3.2.2.1. CARACTERÍSTICAS GENERALES

- La biomasa a tratar tendrá una densidad de 400 kg/m^3 en promedio y con una humedad de entre 10% y 50% en base húmeda.
- El equipo se diseña para trabajar en forma continua con capacidad para 300 kg de biomasa por hora durante 12 horas al día. El valor de este volumen se determina a partir de la masa a tratar y la densidad de la biomasa.
- Para garantizar el valor más alto de transferencia de calor por convección (gases del proceso), y por consecuencia mayor rapidez en el proceso de gasificación, el equipo debe tener una relación diámetro/altura que garantice que el cilindro sea más alto que ancho.

$$h_{\text{cilindro}} = 2d_{\text{cilindro}} \quad [3.1]$$

3.2.2.2. CAUDAL DE AIRE MÍNIMO DE COMBUSTIÓN

- La cantidad mínima de oxígeno necesario para que teóricamente tenga lugar la gasificación es aproximadamente 1/3 del aire estequiométrico de combustión. Para determinar este valor primeramente debe precisarse que el reactor se diseña para que trabaje con una eficiencia del 80 %.
- Para determinar el calor necesario a fin de que la biomasa gasifique, se utilizarán las siguientes gráficas donde se ve el comportamiento de la capacidad calorífica y del calor absorbido por la biomasa a medida que aumenta la temperatura dentro del reactor.

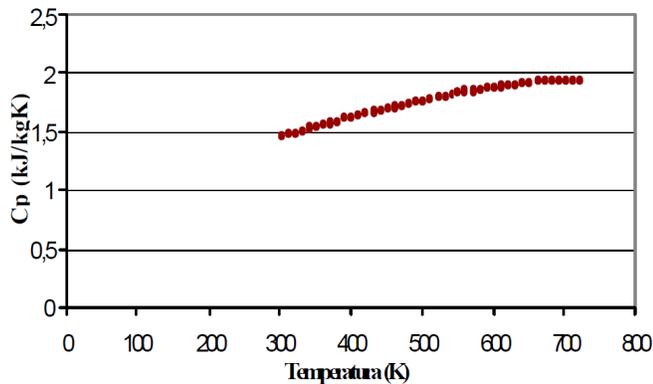


Ilustración 23. Comportamiento del Cp vs T (Fuentes Hernández & Recio Recio, 2005, pág. 89).

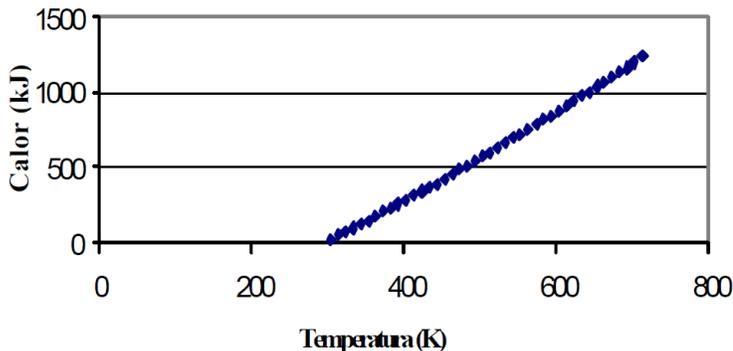
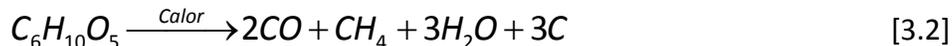


Ilustración 24. Comportamiento del Calor vs T (Fuentes Hernández & Recio Recio, 2005, pág. 89).

- En caso de que saliera del intervalo de temperatura realizar una regla de 3 para realizar el nuevo cálculo.
- El oxígeno real se calcula a partir del factor F (ver Memoria de Cálculo correspondiente), multiplicando este por el oxígeno mínimo estequiométrico.

3.2.2.3. REACCIONES DE GASIFICACIÓN

- Reacción de Gasificación (Lesme Jaén, 2000):



- Reacciones de Oxidación (Lesme Jaén, 2000):



3.2.2.4. CONDICIONES DE OPERACIÓN

- El reactor estará diseñado para trabajar entre los siguientes intervalos de temperatura dependiendo del proceso a utilizar y del producto deseado.

Tabla 15. Productos según la tecnología de pirólisis usada (Lesme Jaén, 2000).

Tecnologías de pirólisis	Temperatura máxima [°C]	Producto Principal
Carbonización	300-500	Biocarbón.
Lenta	400-600	Bioaceite, biocarbón, syngas.
Rápida	450-600	Biocarbón, syngas.
Gasificación	700-900	Biocarbón, syngas.

- El reactor *downdraft* estará diseñado para trabajar a presión atmosférica y un tanto más.
- La presión de trabajo (P) es la máxima presión interior o exterior que surge, produciéndose normalmente el proceso de trabajo, se determina mediante la ecuación de gas ideal $PV=NRT$; esta presión será también la presión de salida del gas de síntesis. La temperatura de salida se supondrá que es la misma del lecho del reactor.
- La velocidad de entrada de aire para oxidar el gas estará entre los 0.5 y 2 m/s, esta velocidad garantizará que se genere un lecho dentro del reactor.
- Los rendimientos del reactor para cada producto dependiendo del proceso utilizado se tomarán de la siguiente tabla.

Tabla 16. Rendimientos de productos según el tipo de pirólisis usada (Lesme Jaén, 2000).

Tipo de Pirólisis	Bioaceite [% m]	Biocarbón [% m]	Gas [% m]
Rápida	75	12	13
Lenta	20	25	55
Gasificación	5	20	75

Ilustración 25. Rendimientos de productos según el tipo de pirólisis usada.

3.2.3. CALDERA PIROTUBULAR

3.2.3.1. GENERALES

- Utilizan agua desmineralizada en la alimentación para evitar acumulación de residuos, logrando que la eficiencia del equipo se mantenga y el mantenimiento disminuya al mínimo.
- Generalmente son de forma cilíndrica y tienen una cámara de combustión con una relación mínima entre la longitud y el diámetro de 3:1.
- El rendimiento térmico de este tipo de caldera generalmente es cerca de 73-77%.
- Menor costo inicial debido a la simplicidad de su diseño, son pequeñas y eficientes.
- Menores exigencias de pureza en el agua de alimentación.
- Mayor tiempo para subir presión y entrar en funcionamiento.

3.2.3.2. CÁMARA DE AGUA

- El nivel de agua se fija en su fabricación, de tal manera que sobrepase en unos 15 cm por lo menos a los tubos o conductos de humo superiores. Según la razón que existe entre la capacidad de la cámara de agua y la superficie de calefacción, se distinguen calderas de gran volumen, mediano y pequeño volumen de agua.

3.2.3.3. CÁMARA DE VAPOR

- Debe ser separado del agua en suspensión. Cuanto más variable sea el consumo de vapor, tanto mayor debe ser el volumen de esta cámara, de manera que aumente también la distancia entre el nivel del agua y la toma de vapor.

3.2.4. FILTRO DE ARENA

3.2.4.1. GENERALES

- La temperatura de entrada al filtro debe ser la temperatura de salida del reactor. Para evitar la condensación de los productos líquidos, evitando el choque de los vapores producidos en las superficies internas de las viviendas del filtro.
- 70-90 % Reducción de tamaño de partícula.
- 50-97 % Reducción de alquitrán.
- Velocidad superficial de 0,1 m/s
- Tasa de flujo de gas de 60 Nm³/h
- Elevado rendimiento de depuración para tamaños de partículas comprendidos entre 0.01 y 1 µm.
- Mantenimiento cada 200 horas de operación.
- La limpieza requiere mucha precaución ya que el aserrín es extremadamente tóxico.

Tabla 17. Criterios para filtros con diferentes lechos de arena (FRESNO Valves, 2008).

Características	Filtro rápido con lecho mixto. (Arena- antracita)				Filtro rápido con lecho de arena				Filtro lento con lecho de arena			
Carga superficial de filtración Velocidad de filtración	m ³ /m ² /día	235	350	235	m ³ /m ² /día	87.5	117.5	157	m ³ /m ² /día	7	9.33	14
	lt/seg/m ²	2.72	4.05	6.83	lt/seg/m ²	1.01	1.36	2.03	lt/seg/m ²	0.081	0.108	0.162
	cm/seg	0.272	0.405	0.683	cm/seg	0.101	0.136	0.203	cm/seg	0.0081	0.0108	0.0162
Profundidad del lecho filtrante	30*45 cm de grava 45*60 cm de antracita. 15*30 cm de arena.				30*45 cm de grava. 60*75 cm de arena.				30 cm de grava. 90*110 cm de arena.			
Drenaje	Falsos fondos o similares.				Tuberías metálicas perforadas o placas porosas, falsos fondos, etc.				Tuberías perforadas de gres o cemento.			

Tabla 18. Criterios para filtros con diferentes lechos de arena (continuación).

Características	Filtro rápido con lecho mixto. (Arena- antracita)	Filtro rápido con lecho de arena	Filtro lento con lecho de arena
Lavado	Invertiendo el flujo con agua proveniente de un tanque elevado o una bomba. Velocidad de lavado: 0.60, 1.00 m/min o 0.60=1.00 m ³ /m ² /min	Invertiendo el flujo a presión con agua proveniente de un tanque de lavado o una bomba. Velocidad de lavado: 0.80-1.20 m/min o 0.80=1.2 m ³ /m ² /min	Raspando la superficie de la arena.
Pérdida de carga	De 20 cm hasta 2.70 m máximo.	De 30 m hasta 2.70 m máximo.	De 16 hasta 1.20 m máximo.
Tiempo entre limpiezas	12-48 horas.	24-48-72 horas.	20-30-60 días.
Penetración de floc.	Profunda.	5 cm superiores (mayor cantidad).	Superficial.
Cantidad de agua usada en el lavado	1-3% de agua filtrada.	1-6% de agua filtrada.	0.2-0.6% del agua filtrada.
Tratamiento previo del agua	Coagulación, floculación y sedimentación.	Coagulación, floculación y sedimentación	Ninguno o aireación (rara vez floculación y sedimentación)
Costo de construcción	Más abajo que el de los filtros rápidos de arena.	Más bajo que el de los filtros lentos.	Alto.
Costo de operación	Igual al de los filtros rápidos de arena.	Más alto que el de los filtros lentos.	Bajo
Área ocupada por los filtros	1/2 a 1/5 de la de los filtros rápidos de arena.		Más grande que la de los filtros rápidos de arena (Aprox. 12 veces mayor).

3.2.5. RECIPIENTES A PRESIÓN Y ATMOSFÉRICOS

3.2.5.1. GENERALES

- Los separadores líquido-líquido en general son horizontales y los separadores líquido-vapor son verticales.
- La relación óptima de longitud a diámetro es de 3, pero se aceptan valores entre 2 a 5.
- El tiempo de residencia para reflujos totales hasta la mitad por líquidos es de 5 min si el destilado se alimenta a otra torre.
- En tanques que alimentan a hornos el tiempo de residencia es de 30 min.
- Los separadores líquido-líquidos son diseñados con velocidades de asentamiento entre 2 y 3 minutos.
- Si el diámetro de gota es menor a 100 micras, entonces se deben usar placas corrugadas o alguna otra técnica para incitar la coalescencia de las gotas, tales como arena o fibras especiales.
- Si el número de Reynolds es menor a 5000 en separadores líquido-líquido existirá arrastre y la separación será menos eficiente.

3.2.5.2. TANQUES DE ALMACENAMIENTO

- Para tanques de menos de 1000 galones se recomienda de tipo vertical, para tanques entre 1000 y 10 000 galones se utilizan tanques horizontales.
- El volumen libre del tanques es de 15% para los de 500 galones o menos y del 10% para tanques de mayor capacidad.

3.2.5.3. RECIPIENTES A PRESIÓN

- Se diseña entre temperaturas de -20 a 650 °F y 50 °F (acero al carbón) arriba de la temperatura máxima de operación.
- Se diseñan con una presión mayor en 10% o de 10-25 psi, mayor que la presión de operación.
- Las presiones de diseño de recipientes que operan entre 0-10 psi y 60-100 °F son de 40 psia.
- Para operaciones al vacío, la presión de diseño es de 15 psia y de vacío total.
- El mínimo espesor de pared para rigidez es de 0.25" para 42" de diámetro del tanque, 0.32" para 40 a 60" de diámetro de tanque y 0.38" para diámetros de tanque mayores a 60".
- Los esfuerzos permitidos son una cuarta parte de los mínimos esfuerzos permisibles del material. Dicho valor depende de la temperatura.

3.2.6. BOMBAS

Las bombas que se utilizarán se sobrediseñarán para un flujo por lo menos del 25% del flujo normal.

- El NPSH especificado deberá ser de 5 a 10 ft arriba del requerido.
- La velocidad recomendada en las tuberías para líquidos es de 6-12 ft/s.
- La cédula 40 es la más usada en los servicios industriales aunque existen otras que están a la disposición.
- Las bombas centrífugas son usadas con una sola etapa en servicios de 15 a 5,000 gpm y 2,500 ft de columna hidrostática como máximo, con multietapas utilizadas en servicios de 20 a 11,000 gpm y 5,500 ft de columna como máximo.
- La eficiencia de la bomba deberá ser aproximadamente de 45% si maneja 100 gpm, 70% a 500 gpm y 80% a 1,000 gpm.
- Las bombas axiales son usadas para fluidos de 20 a 10,000 gpm con 40 ft de columna hidrostática y con eficiencias entre 65 y 85%. Las bombas rotatorias son usadas para manejar fluidos de 1 a 5,000 gpm y 50,000 ft de columna hidrostática con eficiencias entre 50% y 80%. Las bombas reciprocantes son usadas para servicios de 10 a 10,000 gpm como 100,000 ft de columna hidrostática.
- La velocidad recomendada de descarga de bombas es $(5+d/3)$ ft/s (1 a 2 psi DP/100).
- La línea de succión deberá tener un diámetro nominal mayor que la descarga.

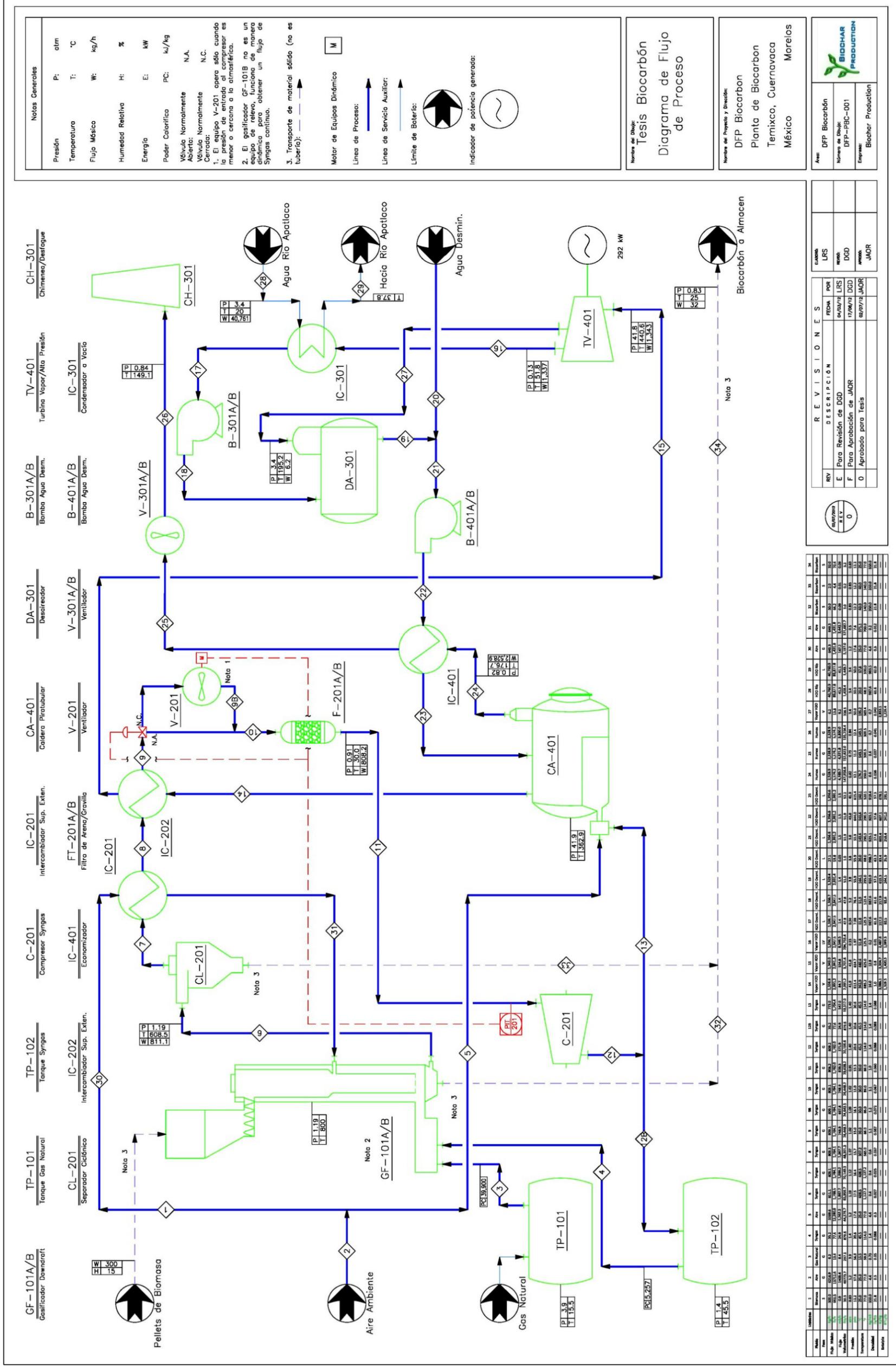
3.2.7. VELOCIDADES RECOMENDADAS

Las velocidades recomendadas para el prediseño de tuberías se usarán como referencia fiable los criterios expresados libro titulado “Soluciones Prácticas para el Ingeniero Químico”. Específicamente la sección uno, que se refiere a “Diseño de Equipos” en las tablas de velocidades recomendadas (Branan, Soluciones Prácticas para el Ingeniero Químico, 2006, págs. 5-7).

CAPÍTULO IV

DIAGRAMA DE FLUJO DE PROCESO

4.1. DFP: PLANTA DE BIOCARBÓN



4.2. LISTA DE EQUIPOS

Tabla 19. LdE-PBC-Rev_0: Lista de equipos (elaboración propia)

Área	Tag	Descripción	Presión Normal [atm]	Presión Diseño [atm]	Temp. Normal [°C]	Temp. Diseño [°C]
100	GF-101A/B	Gasificador <i>Downdraft</i>	1.2	1.8	800	1200
100	TP-101	Tanque Gas Natural	3.9	5.8	15.5	23.3
100	TP-102	Tanque <i>Syngas</i>	1.4	2.1	45.5	68.3
200	C-201	Compresor <i>Syngas</i>	1.4	2.1	45.5	68.3
200	CL-201	Separador Ciclónico	1.2	1.8	608.5	912.7
200	F-201A/B	Filtro de Arena	1.0	1.5	30.0	45.0
200	IC-201	Intercambiador C & T con Sup. Exten.	Tub: 1.12 / Cor: 1.2	Tub: 1.7 / Cor: 1.8	Tub: 608.5 / Cor: 371.1	Tub: 912.7 / Cor: 556.7
200	IC-202	Intercambiador C & T con Sup. Exten.	Tub: 1.07 / Cor: 41.9	Tub: 1.7 / Cor: 62.8	Tub: 307.2 / Cor: 440.6	Tub: 460.8 / Cor: 660.8
200	V-201	Ventilador <i>Syngas</i>	1.09	1.6	30.0	45.0
300	B-301A/B	Bomba Agua Desmineralizada	5.2	7.8	51.9	77.8
300	CH-301	Chimenea/Desfogue	0.84	1.3	149.1	223.7
300	DA-301	Desaireador/Desgacificador	3.4	5.1	195.2	292.8
300	IC-301	Condensador a Vacío	Tub: 3.4 / Cor: 0.5	Tub: 5.1 / Cor: 0.8	Tub: 37.8 / Cor: 51.8	Tub: 56.7 / Cor: 77.8
300	V-301A/B	Ventilador Desfogue	0.8	1.3	149.1	223.7
400	B-401A/B	Bomba Agua Desmineralizada	43.8	65.7	143.6	215.4
400	CA-401	Caldera Piro-tubular	41.9	62.8	362.9	544.3
400	IC-401	Economizador	Tub: 0.82 / Cor: 43.8	Tub: 1.23 / Cor: 65.7	Tub: 176.7 / Cor: 160.1	Tub: 265 / Cor: 240.1
400	TV-401	Turbina de Vapor/Alta Presión	41.8	62.7	440.6	660.8

4.3. BALANCE DE MATERIA Y ENERGÍA

	Unidades	1	2	3	4	5	6	7	8	9	9B
Fluido		Biomasa	Aire	Gas Natural	Syngas	Aire	Syngas	Syngas	Syngas	Syngas	Syngas
Fase		S	G	G	G	G	G	G	G	G	G
Flujo Másico	Kg/h	300.0	6,218.9	6.2	35.2	5,569.6	811.1	809.1	809.1	809.1	809.1
	lb/h	661.5	13712.6	13.6	77.6	12,280.9	1,788.5	1,784.1	1,784.1	1,784.1	1,784.1
Flujo Volumetrico	m ³ /h	0.9	1409.4	8.4	24.9	1,262.3	1,867.7	1,986.2	1,367.7	748.9	697.8
	ft ³ /h	30.3	49773.7	297.2	879.6	44,576.7	65,956.7	70,140.3	48,301.3	26,448.2	24,643.5
Presión	atm	0.83	1.2	3.9	1.4	1.2	1.19	1.12	1.07	1.02	1.09
	psia	12.2	17.6	56.9	20.6	17.6	17.5	16.4	15.7	15.0	16.1
Temperatura	°C	25.0	25.0	15.5	45.5	25.0	608.5	608.5	307.2	30.0	30.0
	°F	77.0	77.0	59.9	114.0	77.0	1,127.2	1,127.2	585.0	86.0	86.0
Densidad	Kg/m ³	350.0	4.4	0.73	1.4	4.4	0.4	0.4	0.6	1.1	1.2
	lb/ft ³	21.8	0.3	0.05	0.088	0.3	0.027	0.025	0.037	0.067	0.072
Entalpia	KJ/Kg	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----
	BTU/lb	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----

	Unidades	10	11	12	12B	13	14	15	16	17	18
Fluido		Syngas	Syngas	Syngas	Syngas	Syngas	Vapor H2O	Vapor H2O	Vapor H2O	H2O Desmi.	H2O Desmi.
Fase		G	G	G	G	G	V	V	LV	L	L
Flujo Másico	Kg/h	809.1	808.2	808.2	35.2	773.0	1,356.6	1,343.0	1,336.7	1,336.7	1,336.7
	lb/h	1,784.1	1,782.0	1,782.0	77.6	1,704.4	2,991.2	2,961.3	2,947.5	2,947.5	2,947.5
Flujo Volumetrico	m ³ /h	748.9	839.3	571.9	24.9	547.0	84.7	104.8	8,346.5	1.4	1.4
	ft ³ /h	26,448.2	29,638.2	20,196.6	879.6	19,317.0	2,991.2	3,701.6	294,753.4	47.8	47.8
Presión	atm	1.02	0.91	1.40	1.40	1.40	41.9	41.8	0.13	0.54	5.2
	psia	15.0	13.3	20.6	20.6	20.6	615.4	614.7	1.97	7.98	76.4
Temperatura	°C	30.0	30.0	45.5	45.5	45.5	362.9	440.6	51.8	51.8	51.9
	°F	86.0	86.0	114.0	114.0	114.0	685.2	825.0	125.3	125.3	125.4
Densidad	Kg/m ³	1.1	1.0	1.4	1.4	1.4	16.0	12.8	0.2	987.6	987.6
	lb/ft ³	0.067	0.060	0.088	0.088	0.088	1.0	0.8	0.01	61.6	61.6
Entalpia	KJ/Kg	-----	-----	-----	-----	-----	3,086.1	3,304.7	2,487.6	217.5	217.9
	BTU/lb	-----	-----	-----	-----	-----	1,326.5	1,420.5	1,069.3	93.5	93.6

	Unidades	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28
Fluido		H2O Desmi.	Humos	Humos	Humos	Vapor H2O	H2O Río				
Fase		L	L	L	L	L	G	G	G	V	L
Flujo Másico	Kg/h	1,329.4	27.1	1,356.6	1,356.6	1,356.6	2,528.9	2,528.9	2,528.9	6.2	40,760.9
	lb/h	2,931.4	59.8	2,991.2	2,991.2	2,991.2	5,576.2	5,576.2	5,576.2	13.8	89,877.8
Flujo Volumetrico	m ³ /h	1.4	0.03	1.5	1.5	1.5	4,189.7	4,321.8	3,830.0	9.2	41.3
	ft ³ /h	51.0	1.0	51.9	51.9	52.2	147,956.6	152,623.0	135,256.4	326.1	1,458.4
Presión	atm	3.8	3.8	3.8	43.8	41.9	0.82	0.75	0.84	3.4	3.4
	psia	55.9	55.9	55.9	644.0	615.4	12.1	11.0	12.4	50.0	50.0
Temperatura	°C	146.1	20.0	143.6	143.6	160.1	176.7	149.1	149.1	195.2	20.0
	°F	295.0	68.0	290.5	290.5	320.1	350.0	300.5	300.5	383.4	68.0
Densidad	Kg/m ³	920.9	998.7	923.1	923.1	918.4	0.6	0.6	0.7	0.7	987.6
	lb/ft ³	57.5	62.3	57.6	57.6	57.3	0.038	0.037	0.041	0.042	61.6
Entalpia	KJ/Kg	615.3	83.4	603.4	607.1	678.1	-----	-----	-----	2,853.1	-----
	BTU/lb	264.5	35.9	259.4	261.0	291.5	-----	-----	-----	1,226.4	-----

CAPÍTULO IV: DIAGRAMA DE FLUJO DE PROCESO

	Unidades	29	30	31	32	33	34
Fluido		H2O Río	Aire	Aire	Biocarbon	Biocarbon	Biocarbon
Fase		L	G	G	S	S	S
Flujo Másico	Kg/h	40,760.9	649.3	649.3	30.0	2.0	32.0
	lb/h	89,877.8	1,431.8	1,431.8	66.2	4.4	70.6
Flujo Volumetrico	m ³ /h	41.1	147.2	3,445.7	0.09	0.01	0.09
	ft ³ /h	1,449.7	5,197.0	121,682.7	3.0	0.2	3.2
Presión	atm	3.4	1.2	0.5	0.83	0.83	0.83
	psia	50.0	17.6	7.6	12.2	12.2	12.2
Temperatura	°C	37.8	25.0	371.1	60.0	60.0	25.0
	°F	100.0	77.0	700.0	140.0	140.0	77.0
Densidad	Kg/m ³	993.5	4.4	0.2	350.0	350.0	350.0
	lb/ft ³	62.0	0.3	0.012	21.8	21.8	21.8
Entalpia	KJ/Kg	-----	-----	-----	-----	-----	-----
	BTU/lb	-----	-----	-----	-----	-----	-----

NOTACIÓN:

S Solido
L Liquido
LV Liquido/Vapor
V Vapor
G Gas

C A P Í T U L O V

D E S C R I P C I Ó N D E P R O C E S O

5.1. ÁREA 100: GASIFICACIÓN

El proceso de gasificación comienza precalentando el gasificador *downdraft* de corrientes paralelas GF-101A durante 45 minutos con la ayuda de un quemador que viene integrado en la parte inferior de cada gasificador. Transcurrido este tiempo, el equipo llega a una temperatura aproximada de 800 °C. Dicho quemador es alimentado con gas natural suministrado del tanque TP-101 sólo al arrancar la planta, y en su operación normal los quemadores funcionarán con una fracción de gas de síntesis (*syngas*) proveniente de la misma gasificación, el cual estará almacenado en el tanque TP-102.

Una vez que se alcanza la temperatura necesaria en el GA-101A, se desvía el suministro de combustible al gasificador GA-101B (puesto que las reacciones proporcionan el calor necesario para culminar la gasificación), con lo que se comienza a precalentar este otro gasificador. Los gasificadores funcionan de manera intermitente, relevándose consecutivamente cada hora con el fin de obtener un flujo de *syngas* continuo para tener una generación de vapor y energía eléctrica ininterrumpida en turnos de 12 horas al día.

Después que se tiene la temperatura requerida, se procede a poner en marcha el proceso de gasificación alimentando un flujo de 300 kg/h de biomasa seca (10-30% de humedad) a una tolva con la que cuenta cada gasificador; dicha tolva dispone de dos compuertas, una en la entrada y otra a la salida de la misma, que al ser accionadas operan de tal forma que primero se abre la compuerta superior y posteriormente a su cierre se abre la compuerta inferior. Después de pasar por la segunda compuerta, la biomasa se suministra mediante un tornillo sin fin hasta su entrada a cada gasificador en la parte superior del gasificador.

Una vez que la biomasa en forma de *pellets* cilíndricos entra al lecho del gasificador de corrientes paralelas, donde pasan por cuatro zonas en el lecho del gasificador a fin de producir biocarbón y generar *syngas*.

- **Zona de secado.** La biomasa al ingresar a la primer sección, pierde completamente la humedad debido a la temperatura, por lo que es importante que la biomasa que entra tenga el menor contenido de humedad posible para aprovechar eficientemente el uso del calor en el gasificador.
- **Zona de pirólisis.** En la segunda sección, se lleva a cabo la descomposición termoquímica de la biomasa, transformándola en productos en su mayoría gaseosos y cenizas que conforman al biocarbón, no sin antes pasar por las dos secciones restantes de oxidación y reducción.
- **Zona de oxidación.** Los productos derivados de la pirólisis pasan por esta sección, también llamada hogar, donde predominan las reacciones de combustión; aquí una fracción del calor generado por las reacciones exotérmicas es transferido por conducción a las primeras zonas del gasificador. En esta zona también se alimenta un flujo menor a la cantidad estequiométrica de aire caliente a una temperatura de 371 °C, que es inyectada en la garganta del gasificador ubicada en la parte media del equipo; el agente gasificante provoca un flujo en paralelo que homogeniza el proceso

de gasificación sobre la biomasa, lo que da una producción muy baja de alquitranes, que debido a las altas temperaturas particulares de esta sección, estas sustancias indeseables se craquean a compuestos más volátiles.

- **Zona de reducción.** Los compuestos oxidados por la combustión controlada de la biomasa se reducen, en especial la mayoría del CO_2 es reducido a CO . Por lo que de esta zona se obtiene el *syngas* que sale por la parte inferior a una temperatura aproximada de $600\text{ }^\circ\text{C}$ y presión un poco superior que la atmosférica, teniendo un Poder Calorífico Inferior (PCI) aproximado de $5,000\text{ kJ/kg}$.

Mientras los materiales volátiles siguen su curso en el proceso, las cenizas (o biocarbón) derivado de la pirólisis, descienden y atraviesan la rejilla hasta depositarse en la parte inferior del gasificador. La rejilla es de tipo rotativa de platos excéntricos escalonados, lo que permite la evacuación del biocarbón de manera automatizada hacia la sección de almacenamiento del producto principal en el equipo, ubicada en el fondo.

Después el biocarbón es removido cada hora mediante una compuerta en la parte inferior del gasificador, que se va almacenando después de pasar por la rejilla ubicada al final de la zona de reducción, para después almacenarlo en un depósito especial para su posterior comercialización.

Finalmente el *syngas* sale en la parte inferior del gasificador *downdraft* para continuar su proceso de limpieza en el área consecutiva, y así poder aprovecharlo posteriormente en la caldera con el fin de obtener vapor de agua que se encargará de movilizar los álabes de una turbina para producir energía eléctrica en la etapa final del proceso.

5.2. ÁREA 200: FILTRACIÓN Y RECUPERACIÓN DE CALOR

El *syngas* al salir del gasificador lleva cenizas de biocarbón por efecto del lecho paralelo y de la pirólisis de la biomasa, así que se pasa por el ciclón de alta eficiencia CL-201 con el fin de coleccionar las trazas para que no se acumulen cenizas en los equipos consecuentes y afecten su correcto funcionamiento. Estos elementos sólidos al ser recuperados se llevan al mismo depósito de biocarbón y se mezclan para formar parte del producto principal (biocarbón).

Después de quitar las partículas sólidas al pasar por el ciclón, el *syngas* queda listo para entrar al intercambiador de calor IC-201, que es el primer paso en la recuperación de calor. En este equipo el gas de síntesis intercambia calor con una corriente de aire tomado del ambiente, aumentando la temperatura del agente gasificante hasta la temperatura de ingreso al gasificador ($371\text{ }^\circ\text{C}$). El aire va por la coraza, mientras que el gas de síntesis por los tubos en contracorriente.

Posteriormente el *syngas* entra a la segunda etapa de recuperación de calor en el intercambiador de calor IC-202, donde cede calor a una corriente de vapor pre-sobrecalentado proveniente de la caldera CA-401 para sobrecalentarlo hasta una temperatura de $441\text{ }^\circ\text{C}$; con esto se provoca una disminución en la temperatura del gas de síntesis hasta una temperatura próxima a la de condensación de los alquitranes gaseosos que no lograron ser craqueados en el lecho del gasificador

downdraft. El vapor va por la coraza del intercambiador y el gas de síntesis por los tubos en contracorriente.

Los intercambiadores de calor IC-201 e IC-202 son de tipo coraza y tubos con superficies extendidas.

Debido a que los alquitranes que lleva el flujo de *syngas* están a punto de condensar, se introduce en el filtro de arena o gravilla F-201A, o en su defecto al F-201B por cuestiones de mantenimiento del filtro principal, para sustraer dichas sustancias indeseables y poder ingresar el flujo limpio de gas pobre al compresor centrífugo C-201 y llevarlo hasta una presión casi del doble de la presión barométrica.

El ventilador V-201 actúa como equipo de emergencia, que sólo funciona cuando la presión a la entrada del compresor C-201 está próxima a la atmosférica por efectos de caída de presión excesiva debida a taponeo en tuberías, equipos y/o filtros; se toma esta medida con el fin de evitar que el compresor trabaje a vacío, ya que esto puede dañar seriamente dicho equipo.

Seguidamente del paso por el compresor, se almacena la fracción necesaria para la gasificación en el tanque TP-102, mismo que sirve como combustible de los gasificadores en su funcionamiento normal para producir más *syngas* de manera cíclica. El resto del gas de síntesis presurizado es destinado al hogar de la caldera CA-401, donde es consumido para producir vapor de alta presión que se utiliza en una etapa posterior para generar energía eléctrica.

5.3. ÁREA 300: CONDENSACIÓN Y DESGASIFICACIÓN

Para generar el vapor de alta presión, se condensa el vapor proveniente de la turbina de vapor TV-401, que es expulsado a 4 inHg (0.3 atm) y 125 °C hacia el condensador IC-301, donde se rompe el vacío llegando a presión atmosférica; dicho condensador es un intercambiador de calor de coraza y tubos, donde el vapor va por dentro de los tubos e intercambia calor con una corriente de agua de enfriamiento extraída del río Apatlaco a condiciones ambientales. La descarga de agua de enfriamiento caliente del condensador se regresa al río, por lo que no debe exceder de los 40 °C para no afectar la biodiversidad de la zona.

Una vez que se intercambia el calor latente que contiene el vapor y pasa a su estado líquido, el condensado se impulsa a través de las bombas B-301A/B para ingresarlo en el desaireador DA-301. El agua de abastecimiento entra al desaireador a través de una boquilla auto limpiable, la cual pulveriza el agua en la sección de calentamiento primario y ventilación de gases concentrados, que se encuentra llena de vapor. Aquí el agua se calienta hasta alcanzar una temperatura de 2-3 grados abajo de la temperatura de vapor y la mayoría de los gases se desprenden.

El agua se recibe entonces en un colector, de ahí el agua fluye hacia la válvula atomizadora, donde choca con el flujo de vapor de baja presión sobrecalentado a 195 °C que se extrae de la turbina TV-401 a alta velocidad; esto hace que se separe en partículas muy pequeñas y al mismo tiempo las

caliente, formando una niebla fina a una temperatura igual a la de saturación del vapor. La mezcla golpea una mampara deflectora que separa el vapor y el agua, donde el agua caliente ya libre de gases cae al tanque de almacenamiento y se cierra el ciclo.

El vapor y los gases no condensables viajan hacia el domo del desaireador, y se encuentran con el agua fría de entrada al cruzar por la sección de calentamiento primario y ventilación de gases concentrados. Los gases desprendidos son descargados a la atmósfera a través de la válvula de venteo termostática que se abre cuando la temperatura de los gases está unos grados por debajo de la temperatura de saturación del vapor.

Seguidamente de que el desaireador extrae los gases que están disueltos por la previa expansión en la turbina de vapor TV-401, manteniendo en 2 cm^3 de O_2 por litro de agua, debido a que arriba de este valor, el O_2 es altamente corrosivo. Es por esto que la corriente de agua desmineralizada se desgasifica para evitar principalmente el desgaste en la caldera. Adicionalmente, el mismo DA-301 sirve para precalentar la corriente de alimentación de la caldera, lo que se traduce en un ahorro de combustible, que implica una mayor producción de vapor sobrecalentado para la turbina.

5.4. ÁREA 400: CICLO RANKINE DE POTENCIA

Después de desairear el agua de alimentación para la caldera CA-401, se manda a la succión de la bomba B-401A/B, no sin antes agregar la reposición de agua desmineralizada a temperatura ambiente, porque se pierde vapor debido a fugas en las uniones de tubería, recuperando así el flujo inicial a la entrada de la caldera. Como ambas corrientes se mezclan en la tubería, el flujo de agua desmineralizada precalentada en el desaireador DA-301 cede una pequeña fracción de su calor al agua de reposición; es por esto que después de mezclar ambas corrientes, el flujo que ingresa a la bomba disminuye a $144 \text{ }^\circ\text{C}$.

El paso por la bomba B-401A/B eleva la presión hasta 43.8 atm , un tanto más elevada que la presión requerida para la expansión en la turbina para superar las pérdidas por fricción en tubería y el paso por los equipos. La corriente de agua desmineralizada se ingresa por la coraza al intercambiador de calor IC-401 que funge como un economizador, porque recupera el calor proveniente de los gases de combustión de la caldera que pasan por los tubos de dicho equipo, llevando la temperatura del agua hasta $160 \text{ }^\circ\text{C}$ para introducirla finalmente en la caldera.

La caldera pirotubular CA-401 utiliza como combustible *syngas* mezclado con la cantidad de aire ambiente estequiométrico más un 15% excedente, para ser quemado en el hogar de dicho equipo. Los gases de combustión son transportados por los tubos de la caldera que se encuentran sumergidos y completamente inundados en agua desmineralizada dentro de la envolvente.

La combustión de *syngas* proporciona alrededor de 3 MMBTU/h que generan aproximadamente $1,360 \text{ kg/h}$ de vapor pre-sobrecalentado a $350 \text{ }^\circ\text{C}$. Para generar esta cantidad de vapor, primero el agua presurizada que proviene de la bomba B-401A/B (previamente precalentada

por el economizador IC-401) se calienta hasta llegar a una temperatura en el punto de líquido saturado a punto de ebullición; posteriormente se intercambia calor latente para vaporizar a presión y temperatura constante. En este punto comienza a burbujear el agua contenida en el cuerpo de la caldera, para que finalmente se lleve a un pre-sobrecalentamiento a las condiciones antes mencionadas. Los vapores generados se concentran en el domo de la caldera, de donde se extraen para el proceso de generación de potencia.

Los humos calientes provenientes de la generación de vapor son expulsados por la parte superior de la caldera hacia el economizador IC-401, para ser enfriados a 177 °C dentro de los tubos de este intercambiador; el calor cedido calienta el agua de alimentación de la caldera que pasa por la coraza del economizador en contracorriente, con el fin de recuperar la mayor cantidad de calor para tener un ahorro de combustible.

Después de que los gases se enfrían, son succionados por el ventilador V-301A/B para posteriormente impulsarlos hasta la chimenea de desfogue CH-301, donde la temperatura de los gases de combustión disminuye para poder ser expulsados en condiciones seguras y ambientalmente aceptables.

Por otro lado, el vapor que sale del domo de la caldera CA-401 se lleva a su punto final de sobrecalentamiento en el cambiador IC-202, en donde se aprovecha el calor restante del syngas para transferirlo y sobrecalentar el vapor proveniente del equipo generador de vapor. Teniendo el flujo de vapor a las condiciones requeridas de presión y temperatura, entran a la turbina de vapor TV-401 para pasar por los álabes que lo van expandiendo y transfiriendo su energía, convirtiéndola en un trabajo mecánico, que hace girar el eje de la turbina que está conectado a un alternador para poder producir 292 kW por cada hora de funcionamiento de la planta.

Antes de que se expanda completamente todo el flujo de vapor que ingresa a la turbina, se extrae una fracción de vapor sobrecalentado a condiciones requeridas por el DA-301. Éste vapor intercambia calor por contacto directo con el vapor condensado dentro del desaireador, es decir, que se desobrecalienta gracias al contacto con el condensado e intercambia todo su calor latente al desgasificar y precalentar el agua desmineralizada de alimentación de la caldera, cerrando así el ciclo Rankine de generación de potencia.

La energía eléctrica de corriente alterna se genera a 460 Volts, 2 fases y 60 Hertz en un alternador, la cual se emplea para autoconsumo de la planta en los equipos que requieren un suministro eléctrico, con el fin de disminuir al mínimo el consumo de electricidad en la planta de producción de biocarbón.

CAPÍTULO VI

MEMORIAS DE CÁLCULO

6.1. GASIFICADOR *DOWNDRAFT* GF-101 A/B

BIOCHAR PRODUCTION



Elaboro: DGD
 Reviso: LRS
 Aprobó: JAOR

Documento: MdC_Gasificador Downdraft_Rev
 Fecha: 14-junio-2012
 REV: 0

MEMORIA DE CÁLCULO
[GASIFICADOR *DOWNDRAFT*]
GF-101 A/B

Calculo del Tamaño del Gasificador *DOWNDRAFT*

Capacidad de tratamiento 300 Kg/h
 Densidad Biomasa 350 Kg/m³

Volumen del Reactor

$$V_{\text{Gasificador}} = A_{\text{Cilindro}} * h_{\text{Cilindro}}$$

$$A_{\text{Cilindro}} = \frac{d^2 * \pi}{4}$$

$$h_{\text{Cilindro}} = 1.5d_{\text{Cilindro}}$$

V	0.86	m ³
A	3.14	m ²
h	3.00	m
d	2.00	m

$$V_{\text{Gasificador}} = \frac{m_{\text{Biomasa}}}{\rho_{\text{Biomasa}}}$$

Diametro (d)	Altura (h)	Area	Volumen
0.1	0.15	0.007854	0.0011781
0.2	0.3	0.031416	0.0094248
0.3	0.45	0.070686	0.0318087
0.4	0.6	0.125664	0.0753984
0.5	0.75	0.19635	0.1472625
0.6	0.9	0.282744	0.2544696
0.7	1.05	0.384846	0.4040883
0.8	1.2	0.502656	0.6031872
0.9	1.35	0.636174	0.8588349
1	1.5	0.7854	1.1781
1.1	1.65	0.950334	1.5680511
1.2	1.8	1.130976	2.0357568
1.3	1.95	1.327326	2.5882857
1.4	2.1	1.539384	3.2327064
1.5	2.25	1.76715	3.9760875
1.6	2.4	2.010624	4.8254976
1.7	2.55	2.269806	5.7880053
1.8	2.7	2.544696	6.8706792
1.9	2.85	2.835294	8.0805879
2	3	3.1416	9.4248

BIOCHAR PRODUCTION



Dimensiones Reales

Cuerpo Cilindrico

$$h_{Real\ Cilindro} = 1.2 * h_{Cilindro}$$

$$d_{Real\ del\ Cilindro} = d_{Cilindro}$$

h Real	3.6	m
d Real	2.0	m

Longitud Total del Reactor

h Real	4.1	m
d Real	2.0	m

Se considera una seccion similar para el area de combustion

Calculo de la Presion de Trabajo del reactor

$$P_{Cal} = P_{atm} + P_{hidrostatica}$$

$$P_{hidrostatica} = \rho_{Biomasa} * h_{Biomasa} * g$$

Ph	5150.3	Pa
Ph	0.1	atm

g	9.81	m/s ²
---	------	------------------

Pcal	1.2	atm
Pcal	121590	Pa
Pcal	121.59	Kpa

Caída de Presion en el Gasificador

La literatura nos marca que en los Gasificadores Downdraft, las caídas de presion son aproximadamente de

$$\Delta P(\text{Gasificador}) = 0.97898 \text{ Kpa}$$

$$P_{Salida} = P_{Entrada} - \Delta P$$

Psalida	120.61102	Kpa
Psalida	1.19	atm

Volumen de Gas producido unicamente a partir de la Biomasa

MASA

M (Gas de Biomasa)	180	Kg/h
M (aire)	541.1	Kg/h
Total de Syngas	811.1	Kg/h

VOLUMEN

V(Gas de Biomasa)	218.8	m ³ /h
V aire	449.2	m ³ /h
Total de Syngas	668.0	m ³ /h
Total de Syngas	11.1	m ³ /min

Calculo utilizado para calcular el tamaño del reactor

6.2. PODER CALORÍFICO INFERIOR DE SYNGAS

Para calcular el PCI que se puede obtener del gas pobre (*syngas*), se cuenta con la composición promedio del combustible presentada en las bases de diseño (3.1.1.4. Productos y Subproductos), el peso molecular de las especies que conforman el combustible en cuestión y el calor de combustión estándar a 25°C. Con estos datos se hace uso de la ecuación [2.2] para obtener la fracción peso y después se calcula el poder calorífico de cada especie al multiplicar la fracción peso por el calor de combustión estándar. En la Tabla 20 se representan los cálculos.

Tabla 20 . Cálculos para el poder calorífico de syngas (elaboración propia).

Ci	Fracción Xi	PMi * [lb/lbmol]	wi [lb]	Calor de Combustión Estándar ** [BTU/lb] @ 77°F	Poder Calorífico [BTU/lb]
N ₂	0.521	28.007	14.59	----	----
CO ₂	0.135	44.010	5.94	----	----
CO	0.163	28.010	4.57	4,344	19852.08
H ₂	0.125	2.016	0.25	60,782	15195.5
CH ₄	0.044	16.043	0.71	23,860	16940.6
C ₂ H ₄	0.006	28.054	0.17	21,622	3675.74
C ₂ H ₆	0.006	30.070	0.18	22,304	4014.72
	1.000	w _{prom} =	26.410		PC _{prom} = 59678.64

* Los pesos moleculares fueron obtenidos de: (Recio Miñarro, 2003)

** Valores tomados de: (API, 1997, págs. 14.5-14.8)

Finalmente se hace uso de la ecuación [2.1], lo que da como resultado en unidades inglesas y del Sistema Internacional:

PCI <i>syngas</i>	2260 BTU/lb <i>syngas</i>
PCI <i>syngas</i>	5257 kJ/kg <i>syngas</i>

Estos 2260 BTU/lb de *syngas* (5257 kJ/kg de *syngas*) representan la cantidad de energía que puede ser extraída al quemar el combustible proveniente de la gasificación de biomasa; dicha energía es la que se aprovecha en la caldera pirotubular para producir vapor de agua a condiciones de 685.2 °F (362.9 °C) y 615.4 psia (41.9 atm).

6.3. CÁLCULO DE AIRE PARA COMBUSTIÓN DE SYNGAS

El aire necesario para quemar el gas de síntesis en la caldera se obtiene por un balance estequiométrico de las reacciones de oxidación-combustión de los componentes de este gas empleado como combustible, las reacciones principales se ponen a continuación.





Considerando el flujo másico de 1710.9 lb/h (776.1 kg/h) de *syngas*, se puede obtener el flujo parcial de cada componente al multiplicar por su respectiva fracción mol, el resultado se muestra en la Tabla 21.

Tabla 21 . Cálculo de flujos parciales por componente de syngas (elaboración propia).

Ci	Fracción Xi	Wi [lb/h]
N ₂	0.521	891.4
CO ₂	0.135	231.0
CO	0.163	278.9
H ₂	0.125	213.9
CH ₄	0.044	75.3
C ₂ H ₄	0.006	10.3
C ₂ H ₆	0.006	10.3
	1.000	

Con estos flujos se puede hacer el balance de materia utilizando las cinco reacciones antes mencionadas, obteniendo así la cantidad estequiométrica de oxígeno requerida para la combustión. El balance se representa a continuación en la Tabla 22.

Tabla 22 . Blance de reacciones de combustión de syngas (elaboración propia).

2	CO	+	1	O ₂	-->	2	CO ₂	
lb/h	278.9			159.3			438.2	
2	H ₂	+	1	O ₂	-->	2	H ₂ O	
lb/h	213.9			1697.3			1911.2	
1	CH ₄	+	2	O ₂	-->	1	CO ₂	+ 2 H ₂ O
lb/h	75.3			300.3		206.5		169.1
1	C ₂ H ₄	+	3	O ₂	-->	2	CO ₂	+ 2 H ₂ O
lb/h	10.3			35.1		32.2		13.2
1	C ₂ H ₆	+	3.5	O ₂	-->	2	CO ₂	+ 3 H ₂ O
lb/h	10.3			38.2		30.0		18.5
lb/h	588.5	+		2230.3	-->	706.9	+	2111.9
N ₂ [lb/h]	891.4					N ₂ [lb/h]	891.4	
CO ₂ [lb/h]	231.0					CO ₂ [lb/h]	231.0	
	1710.9			2230.3		1829.3		2111.9
	lb/h	+		lb/h	=	lb/h	+	lb/h
				3941.2 lb/h				3941.2 lb/h

Con el flujo másico de oxígeno en 2,230.3 lb/h se puede obtener el flujo de aire, considerando que el aire que respiramos está compuesto principalmente de nitrógeno (N₂), oxígeno (O₂), dióxido de carbono (CO₂) y otros gases (conformados por: He, Ne, Xe, Kr, y Rn, además de cantidades mínimas de metano, polvo, polen, cenizas volcánicas y vapor de agua). La proporción se muestra a continuación en la Tabla 23.

Tabla 23 . Composición del aire (SMA, 2012).

Componente	Fracción volumen
N ₂	0.7808
O ₂	0.2095
CO ₂	0.0003
Otros Gases	0.0094

La cantidad de aire se consigue al dividir la cantidad de O₂ calculada entre la fracción de O₂ contenida en el aire, con lo que se obtiene que el flujo de aire estequiométrico para la combustión de syngas es de 10,645.8 lb/h (4,828.8 kg/h). Para que haya una combustión completa se debe agregar 15.4% de exceso, dando un flujo total de 12,281 lb/h (5,570.6 kg/h).

6.4. CALDERA PIROTUBULAR CA-401

BIOCHAR PRODUCTION



Elaboro: LRS
 Reviso: DGD
 Aprobó: JAOR

Documento: MdC_Caldera_REV
 Fecha: 15-abril-2012
 REV: 0

MEMORIA DE CÁLCULO

[CALDERA PIROTUBULAR]

CA-401

DATOS DE SYNGAS

wg	<u>775.9</u>	Kg/h	wg	<u>1711</u>	lb/h
PCI	<u>2260</u>	BTU/lb	PCI Gas Nat	<u>39900</u>	KJ/Kg
PCI	<u>5257</u>	KJ/Kg	PCI Syngas	<u>5257</u>	KJ/Kg
P	<u>1.19</u>	atm	Fraccion	<u>7.59</u>	
T	<u>608.5</u>	°C	GN gasif	<u>6.2</u>	Kg/h
p	<u>1.234</u>	Kg/m3	t calentamiento	<u>0.75</u>	h

CÁLCULO DE CALOR

qcal	<u>0.80</u>	<-- Calculado en PCI-Syngas	GN gasif TOTAL	<u>4.64</u>	Kg/h
			Syngas gasif	<u>35.20</u>	Kg/h

Qabs	<u>3104522</u>	BTU/h	Caida de Presion IC-202	<u>0.72</u>	psi
			Caida de Presion en Tubería	<u>0.08</u>	psi

CÁLCULO DEL CALENTADOR

Agua calentada del Desaireador			Agua Caliente			
w25	<u>2991</u>	lb/h	temp prom	W25b	<u>2991</u>	lb/h
T25	<u>295</u>	°F	392.0	T25b	<u>488.994</u>	°F
T25	<u>146.1</u>	°C		T25b	<u>253.9</u>	°C
P25	<u>615.4</u>	psia		P25b	<u>615.42</u>	psia
Cp prom	<u>1.1</u>	BTU/lb °F				
		Qcal	638308			BTU/h

Flujo vapor	<u>2991.2</u>	lb/h	Flujo vapor	<u>1356.6</u>	Kg/h
-------------	---------------	------	-------------	---------------	------

CÁLCULO DE VAPOR SATURADO

Agua Caliente			Vapor Saturado		
w25b	<u>2991</u>	lb/h	w25c	<u>2991</u>	lb/h
T25b	<u>488.994</u>	°F	T25c	<u>489.0</u>	°F
T25b	<u>253.9</u>	°C	T25c	<u>253.9</u>	°C
P25b	<u>615.42</u>	psia	P25c	<u>615.42</u>	psia
H25b	<u>475.003</u>	BTU/lb	H25c	<u>1203.34</u>	BTU/lb
		Qvap	2178621		BTU/h

BIOCHAR PRODUCTION



CÁLCULO DE PRE-SOBRECALENTAMIENTO

Vapor Saturado				Vapor sobrecalentado		
w24c	2991	lb/h	temp prom	w13	2991	lb/h
T24c	489.0	°F	587.1	T13	685.2	°F
T24c	253.9	°C		T13	362.9	°C
P24c	615.4	psia		P13	615.4	psia
Cp prom	0.49	BTU/lb °F				
		Qrec	287593			BTU/h

CÁLCULO DE CALOR TOTAL CALDERA

Qcal	638308	BTU/h				
Qvap	2178621	BTU/h				
Qpre-sobrecal	287593	BTU/h				
Qtot	3104522	BTU/h	=	Qabs	3104522	BTU/h
		F.O	0			

COLORES DE CELDA:

- Dato Termograf
- Variable ajustada con Solver
- Funcion Objetivo
- Dato de KERN
- Referencia a otro libro de excel

6.5. DESAIREADOR DA-301

BIOCHAR PRODUCTION



Elaboro: LRS
 Reviso: DGD
 Aprobó: JAOR

Documento: MdC_Caldera_REV
 Fecha: 15-abril-2012
 REV: 0

MEMORIA DE CÁLCULO [DESAIREADORR]

DA-301

$$P = P^{\circ} \cdot \exp[-mgh/kT]$$

P = presión atmosférica a una altura h
 P^o = presión atmosférica a nivel del mar
 m^o = masa de las moléculas de aire
 k = constante de Boltzmann
 T = temperatura
 g = gravedad

Cuando se hace el producto de todas las constantes que figuran en el exponente:

Balance por contacto directo entre vapor sobrecalentado y agua de caldera

$$w_{H_2O} C_p (T - T_{ref}) = w_{vap} C_p (T_{scal} - T_{sat}) + w_{vap} (H_2 - H_1)$$

$$w_{H_2O} C_p (T - T_{ref}) = w_{vap} [C_p (T_{scal} - T_{sat}) + (H_2 - H_1)]$$

$$w_{vap} = \frac{w_{H_2O} C_p (T - T_{ref})}{[C_p (T_{scal} - T_{sat}) + (H_2 - H_1)]}$$

$$w_{vap} = \frac{Q_{H_2O}}{[C_p (T_{scal} - T_{sat}) + (H_2 - H_1)]}$$

Altura	1511	m
P atm	629	mmHg
P atm	12.17	psia

CÁLCULO DE VAPOR PARA DESAIREADOR (DESGASIFICADOR)

Vapor Condensado		
w H2O	2948	lb/h
P	50	psia
T1	290	°F
T2	295	°F
Cp prom A-B	1	BTU/lb °F

<- Fig. 2 Kern. Pp-909

Extracción de Vapor de Turbina TV-401		
w vap	13.8	lb/h
P A-B	50	psia
TA	383.404	°F
TB	280.95	°F
Cp prom A-B	0.46	BTU/lb °F

<- Fig. 3 Kern. Pp-910

Q H2O	13382	BTU/h
-------	-------	-------

Q A-B	649	BTU/h
-------	-----	-------

COLORES DE CELDA:

- Dato Termograf
- Variable ajustada con Solver
- Funcion Objetivo
- Dato de KERN

Referencia a otro libro de excel

P B-C	50	psia
H B	1174.02	BTU/lb
H C	250.096	BTU/lb

Q B-C	12732	BTU/h
-------	-------	-------

Q Vap Ext.	13382	BTU/h
------------	-------	-------

Vap Desa.	0.47	%
-----------	------	---

F.O	0
-----	---

6.6. TURBINA DE VAPOR TV-401

BIOCHAR PRODUCTION



Elaboro: LRS
 Reviso: DGD
 Aprobó: JAOR

Documento: MdC_Turbinas_REV
 Fecha: 30-junio-2012
 REV: 0

MEMORIA DE CÁLCULO [TURBINA DE VAPOR] TV-401

CONDICIONES DE ENTRADA			CONDICIONES EXTRACCIÓN		
w_{15}	2961.3	lb/h	w_{27}	13.8	lb/h
P_{15} man	600	psig	P_{27} abs	50	psia
P_{15} abs	614.7	psia	P_{27} man	35.3	psig
T_{15}	825	°F	T_{27} real	383.404	°F
h_{15}	1420.48	BTU/lb	h_{27} ideal	1161.66	BTU/lb
			h_{27} real	1226.37	BTU/lb
Δh ideal	258.82	BTU/lb	CONDICIONES DE SALIDA		
Δh real	194.12	BTU/lb	w_{16}	2947.53	lb/h
TSR	9.8	lb/hp h	P_{16} abs	1.965	psia
TSR	13.2	lb/kW h	P_{16} man	-12.735	psig
η	0.75		T_{16} real	125.305	°F
Potencia 1	219	hp	h_{16} ideal	952.189	BTU/lb
Potencia 2	176	hp	h_{16} real	1069.26	BTU/lb
Potencia	395	hp			

rpm	D eje [in]	CBV [lb/hp h]	Perdida [hp]	P Tot [hp]
3000	14	13.65	1.8	217
	18	13.77	3.5	215
4000	14	13.71	2.7	216
	18	13.97	6.9	212
3000	14	16.84	1.8	175
	18	17.04	3.5	173
4000	14	16.94	2.7	174
	18	17.34	6.9	170

TURBINA SELECCIONADA

rpm	D eje [in]	CBV [lb/hp h]	Perdida [hp]	P Tot [hp]
3000-4000	14	13.63	1.8	217
		13.69	2.7	216
		16.84	1.8	175
		16.94	2.7	174
				392
Energía	292	KW		

6.8. BOMBAS B-401 A/B

BIOCHAR PRODUCTION



Elaboro: LRS
Reviso: DGD
Aprobó: JAOR

MEMORIA DE CÁLCULO
BOMBA
B-301 A/B

Documento: MdC_Bombas
Fecha: 15-julio-2012
REV: 0

DATOS GENERALES

Servicio	Bombeo de Alimentación a Caldera	
Fluido	Agua Desmineralizada	
# Corriente DFP	21-22	
P barométrica	12.2	psia

PROPIEDADES DEL FLUIDO

Temperatura de Bombeo	°F	290.46
p abs. @ Temp. Bombeo	lb/ft ³	57.601
μ @ Temp. Bombeo	cp	0.2
Flujo Normal @ Temp. Bombeo	GPM	6.4742
Sobrecapacidad	%	30
Flujo Nominal @ Temp. Bombeo	GPM	8.4

CÁLCULO DE LA DESCARGA

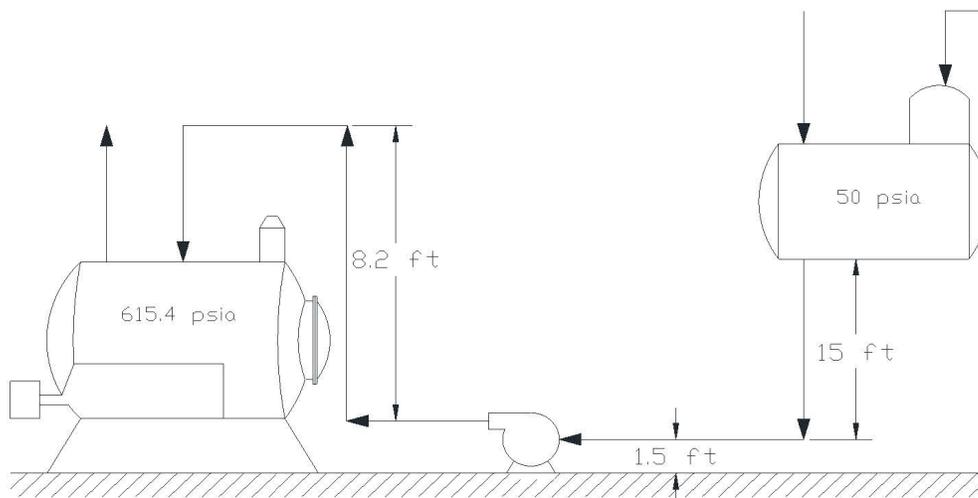
Perdidas de Presión en:		
Tubería y Accesorios	psi	1.41
Medidor de Flujo	psi	4.35
Valvula de control	psi	14.5
Cambiador IC-401	psi	5
	psi	
Subtotal 1	psia	25.3

CÁLCULO DE LA SUCCIÓN

Presión Fuente (DA-301)	psig	37.8
Presión Fuente (DA-301)	psia	50.0
Altura Desaireador DA-301	ft	16.5
Altura Bomba	ft	1.5
Carga Estática Líquido	ft	15.0
Carga Estática Líquido	psia	6.0
	Subtotal	psia 56.0
Perdidas de Presion en Tubería	psi	0.07
Succión Bomba	psia	55.9
Presión Vapor @ T bomb.	psia	52.4
NPSH Disponible	psi	3.5
NPSH Disponible	ft	8.8

Presion Terminal (CA-401)	psig	603.2
Presion Terminal (CA-401)	psia	615.4
Altura de Tubería	ft	9.7
Altura de la Bomba	ft	1.5
Carga Estática Líquido	ft	8.2
Carga Estática Líquido	psia	3.3
Descarga Bomba	psia	644.0
Succión Bomba	psia	55.9
Presion Diferencial	psi	588
Cabeza de la Bomba	ft	1470
Potencia de la Bomba	HP	3.84

ESQUEMA



6.9. SEPARADOR CICLÓNICO CL-201

BIOCHAR PRODUCTION



Características de los ciclones de alta eficiencia.

Dimensión	Nomenclatura	Tipo de Ciclón	
		Stairmand	Swift
Diametro del Ciclón	Dc/Dc	1	1
Altura de Entrada	a/Dc	0.5	0.44
Ancho de Entrada	b/Dc	0.2	0.21
Altura de Salida	S/Dc	0.5	0.5
Diametro de Salida	DS/Dc	0.5	0.4
Altura parte cilíndrica	h/Dc	1.5	1.4
Altura parte cónica	z/Dc	2.5	2.5
Altura Total de Ciclón	H/Dc	4	3.9
Diametro de salida de partículas	B/Dc	0.375	0.4
Factor de Configuración	G	551.22	698.65
Número de cabezas de velocidad	NH	6.4	9.24
Número de vortices	N	5.5	6

Memoria de Cálculo [Separador Ciclonico] [CL-201]

Elaboró: DGD
Revisó: LRS
Aprobó JAOR

Documento: MdC_Ciclón_Rev
Fecha: 16-junio-2012
Rev: 0

Fuente: Echeverry L. C. A, Cyclones Optimal Design, Medellín, 2006.

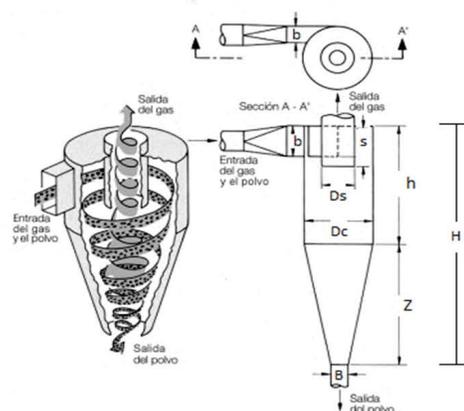
Esquema General

Características

Q	668.0	m ³ /h
V	10	m/s

$$Dc = \sqrt{\frac{Q}{3600 \cdot V(0.5)(0.2)}}$$

Dc	0.431
----	-------



Dimensión	Nomenclatura	Stairmand	Dimencion	Unidad (m)	Unidad (cm)	Unidad (pul)
Diametro del Ciclón	Dc/Dc	1				
Altura de Entrada	a/Dc	0.5	a	0.215	21.539	8.480
Ancho de Entrada	b/Dc	0.2	b	0.086	8.615	3.392
Altura de Salida	S/Dc	0.5	S	0.215	21.539	8.480
Diametro de Salida	DS/Dc	0.5	DS	0.215	21.539	8.480
Altura parte cilíndrica	h/Dc	1.5	h	0.646	64.616	25.439
Altura parte cónica	z/Dc	2.5	z	1.077	107.694	42.399
Altura Total de Ciclón	H/Dc	4	H	1.723	172.310	67.839
Diametro de salida de partículas	B/Dc	0.375	B	0.162	16.154	6.360
Factor de Configuración	G	551.22	G			
Número de cabezas de velocidad	NH	6.4	NH			
Número de vortices	N	5.5	N			

MdC_Ciclón_Rev_0

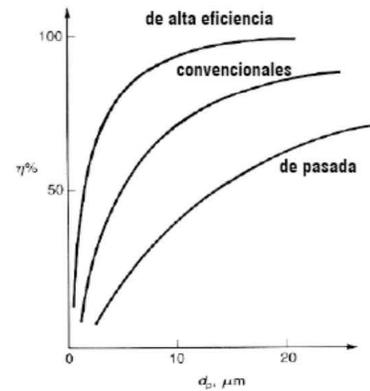
1 DE 2 PÁGINAS

BIOCHAR PRODUCTION



Tamaño de Partículas

Tamaño	Eficiencia	% Contenido	% de remocion
5µm	98	20.50%	20.09
10µm	99.9	45%	44.96
60µm	99.99	34.50%	34.50
Eficiencia Total			99.54



Caida de Presion en el Ciclon

$$\Delta P = 21.16 \left(\frac{A_e}{A_s} \right)^{1.21} \frac{\rho_{Syngas} V^2}{2g}$$

ρSyngas	1.234	Kg/m ³
---------	-------	-------------------

Ae	0.278	m ²
----	-------	----------------

$$A_e = B * H$$

ΔP	242.58	mmH ₂ O
ΔP	0.023	atm

As	0.169	m ²
----	-------	----------------

Presion a la salida del Ciclon

$$A_s = \frac{\pi D_s^2}{4}$$

Psalida	1.19	atm
Psalida	1.166532	atm

Flujo a la Entrada del Ciclon

MASA

M (Gas de Biomasa)	270	Kg/h
M (aire)	541.11	Kg/h
Total de Syngas	811.11	Kg/h

VOLUMEN

V(Gas de Biomasa)	218.8	m ³ /h
V aire	449.2	m ³ /h
Total de Syngas	668.0	m ³ /h

Flujo a la Salida del Ciclon

MASA

M (Gas de Biomasa)	268	Kg/h
M (aire)	541.11	Kg/h
Total de Syngas	809.11	Kg/h

VOLUMEN

V(Gas de Biomasa)	217.2	m ³ /h
V aire	449.2	m ³ /h
Total de Syngas	666.4	m ³ /h

Cantidad retirada de Biocarbon	2	Kg/h
--------------------------------	---	------

6.10. DIÁMETRO DE TUBERÍAS



BIOCHAR PRODUCTION

Elaboro: LRS
 Revisor: DGD
 Aprobó: JAOR

Documento: MidC_Tuberías
 Fecha: 24-Junio-2012
 REV: 0

MEMORIA DE CÁLCULO CÁLCULO DE DIÁMETROS DE TUBERÍAS VELOCIDADES RECOMENDADAS

# línea	Fluido	Estado	P op. [psia]	T op. [°F]	w [lb/h]	ρ [lb/ft³]	Q [ft³/min]	v rec. [ft/min]	At (int.) [in²]	D int. [in]	D nom calculado [in]	Cedula	D comercial [in]
2	Aire	G	17.6	77.0	13,712.6	0.276	829.6	4,000	29.86	6.17	6	40	6
3	Gas Natural	G	56.9	59.9	13.6	0.046	5.0	6,000	0.12	0.39	1/4	40	1
4	Syngas	G	20.6	114.0	77.6	0.088	14.7	3,900	0.54	0.83	3/4	40	1
5	Aire	G	17.6	77.0	12,280.9	0.276	742.9	4,000	26.75	5.84	4	40	4
6	Syngas	G	17.5	1127.2	1,788.5	0.027	1,099.3	3,900	40.59	7.19	6	40S	6
7	Syngas	G	16.4	1127.2	1,784.1	0.025	1,169.0	3,900	43.16	7.41	6	40S	6
8	Syngas	G	15.7	585.0	1,784.1	0.037	805.0	3,900	29.72	6.15	6	40S	6
9	Syngas	G	15.0	86.0	1,784.1	0.067	440.8	3,900	16.28	4.55	4	40	4
9B	Syngas	G	16.1	86.0	1,784.1	0.072	410.7	3,900	15.17	4.39	4	40	4
10	Syngas	G	15.0	86.0	1,784.1	0.067	440.8	3,900	16.28	4.55	4	40	4
11	Syngas	G	13.3	86.0	1,782.0	0.060	494.0	3,900	18.24	4.82	4	40	4
12	Syngas	G	20.6	114.0	1,782.0	0.088	336.6	3,900	12.43	3.98	4	40	4
12B	Syngas	G	20.6	114.0	77.6	0.088	14.7	3,900	0.54	0.83	3/4	40	1
13	Syngas	G	20.6	114.0	1,704.4	0.088	321.9	3,900	11.89	3.89	3	40	3
14	Vapor H2O	V	615.4	685.2	2,991.2	1.000	49.9	9,000	0.80	1.01	1	80	1
15	Vapor H2O	V	614.7	825.0	2,961.3	0.800	61.7	9,000	0.99	1.12	1	80	1
16	Vapor H2O	LV	2.0	125.3	2,947.5	0.01	4,912.6	15,000	47.16	7.75	6	40	6
17	H2O Desmi.	L	8.0	125.3	2,947.5	61.63	0.8	300	0.38	0.70	1/2	40S	1 1/2
18	H2O Desmi.	L	76.4	125.4	2,947.5	61.63	0.8	300	0.38	0.70	1/2	40S	1
19	H2O Desmi.	L	55.9	295.0	2,931.4	57.46	0.85	300	0.41	0.72	1/2	40	1 1/2
20	H2O Desmi.	L	55.9	68.0	59.8	62.32	0.02	7	0.33	0.65	1/2	40	1
21	H2O Desmi.	L	55.9	290.5	2,991.2	57.60	0.9	300	0.42	0.73	1/2	40	1 1/2
22	H2O Desmi.	L	644.0	290.5	2,991.2	57.60	0.9	300	0.42	0.73	1/2	80	1
23	H2O Desmi.	L	615.4	320.1	2,991.2	57.307	0.9	300	0.42	0.73	1/2	80	1
24	Humos	G	12.1	350.0	5,576.2	0.038	2,465.9	2,000	177.55	15.04	14	40S	14
25	Humos	G	11.0	300.5	5,576.2	0.037	2,543.7	2,000	183.15	15.27	16	40S	16
26	Humos	G	12.4	300.5	5,576.2	0.041	2,254.3	2,000	162.31	14.38	14	40S	14
27	Vapor H2O	V	50.0	383.4	13.8	0.04	5.4	6,000	0.13	0.41	1/4	40	1
28	H2O Río	L	50.0	68.0	89,877.8	61.63	24.3	400	8.75	3.34	3	40	3
29	H2O Río	L	50.0	100.0	89,877.8	61.996	24.2	400	8.70	3.33	3	40	3
30	Aire	G	17.6	77.0	1,431.8	0.276	86.6	6,000	2.08	1.63	1 1/2	40	1 1/2
31	Aire	G	7.6	700.0	1,431.8	0.01	2,028.0	6,000	48.67	7.87	6	40	6

C A P Í T U L O V I I

H O J A S D E D A T O S



HOJA DE DATOS
[GASIFICADOR DOWNDRAFT]
HD-PBC-GF-101 A/B

No. PROYECTO: Tesis Biocarbón
DOCUMENTO: HdD_Gasificador
FECHA: 01.08.2012
HOJA 2 DE 2 REV 0

Servicio Gasificación de Biomasa Tag: GF-101A Y GF-101B

ACCESORIOS DEL EQUIPO

- Controlador Indicador de Flama
- Controlador Indicador de Temperatura
- Alarma por Falla de Flama
- Tolva de Alimentación de Pellets de Biomasa
- Controlador Indicador de Nivel
- Controlador Indicador de Presión
- Alarma e Interruptor por Alta Presión
- Transmisor Indicador de Flujo
- Válvulas de Cierre para Sensores de Paro
- Tablero Local de Instrumentos
- Placa Base Autosoportado
- Quemador
- Piloto
- Suministro de Aire (Soplador)
- Indicadores de Presión y Temperatura en Tablero
 - Entrada de Aire
 - Salida de Syngas
- Tratamiento Químico
- Tornillo sin fin
- Rejilla rotativa
- Platos Excéntricos Platos Concéntricos
- Platos Lineales Platos Escalonados

PLACA DE MONTAJE

- Tipo Placa Base Solera
 Suministrado por: Proveedor de Gasificador
 Otro _____

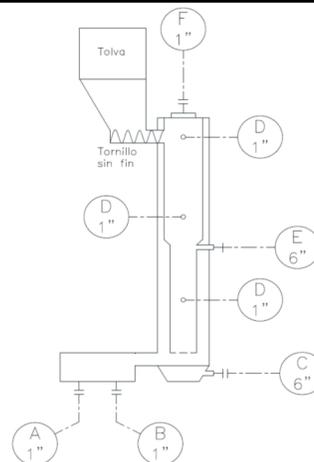
MATERIALES (continuación)

- Aislamiento (1)
- Material (1)
- Metodo de Aplicación (1)
- Espesor (1) in

CONEXIONES / BOQUILLAS

	Diam.	Rango	Cara	Cantidad	Descripción
A	1"	#150	(1)	1	Alimentación GN
B	1"	#150	(1)	1	Alimentación Syngas
C	6"	#150	(1)	1	Salida de Syngas
D	1"	#150	(1)	3	Ind. Temperatura
E	6"	#150	(1)	2	Alimentación Aire
F	1"	#150	(1)	1	Ind. de Presión

ESQUEMA



PESOS E INFORMACIÓN DE EMBARQUE

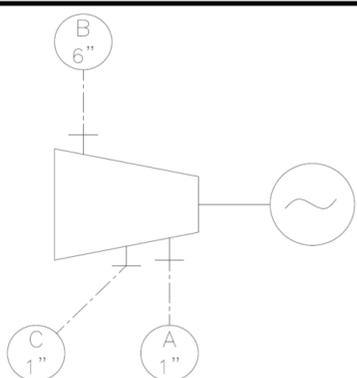
- Quemador (1) lb
- Accesorios e Instrumentos (1) lb
- Placa Base (1) lb
- Miscelanea (1) lb
- Embarque Doméstico Embarque Exportación

NOTAS

1. A ser definido por el proveedor.
2. Todos los datos deben ser revisados por el proveedor.
3. Estándares Mexicanos y Americanos
4. A ser confirmado por el proveedor.
5. Paquete instrumentado (funcionamiento automático)

0	01.08.12	Aprobado para Cotización	DGD	LRS	JAOR
B	30.07.12	Para Revisión y Aprobación de JAOR	DGD	LRS	JAOR
A	24.07.12	Para Revisión de DGD	DGD	LRS	JAOR
REV	FECHA	DESCRIPCIÓN	PREPARO	REVISO	APROBO

C:\Users\Ghost Hack\Documents\A\Dropbox\Tesis Biochar Production\7- Hojas de Datos\HdD - Gasificador - REV 0 - P.2 DE 2

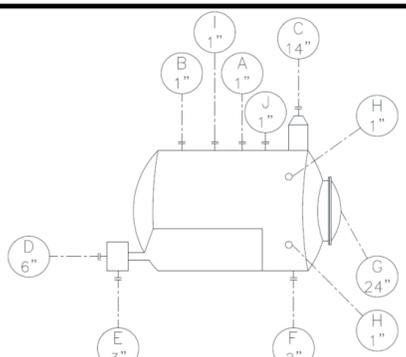
	<h2 style="margin:0;">HOJA DE DATOS</h2> <p style="margin:0;">[TURBINA DE VAPOR] HD-PBC-TV-401</p>	No. PROYECTO: Tesis Biocarbón DOCUMENTO: HdD_Turbina FECHA: 24.07.2012 HOJA 2 DE 2 REV 0																								
Servicio <u>Generación de Potencia</u>		Tag: <u>TV-401</u>																								
<p>ACCESORIOS DEL EQUIPO</p> <input checked="" type="checkbox"/> Detectores de vibración <input checked="" type="checkbox"/> Detectores de Posición <input checked="" type="checkbox"/> Sensores de Temperatura de rodamiento <input checked="" type="checkbox"/> Calzas <input type="checkbox"/> Rompedor de Vacío (1) <input type="checkbox"/> Sistema de Sello de Vapor Automático (1) <input checked="" type="checkbox"/> Válvula Centinela <input checked="" type="checkbox"/> Válvula de Alivio Térmico <input checked="" type="checkbox"/> Válvula de Cierre para Sensores de Paro <input checked="" type="checkbox"/> Tablero Local de Instrumentos <input type="checkbox"/> Placa Base <input checked="" type="checkbox"/> Autosoportado <input checked="" type="checkbox"/> Indicador de Llenado de Líquido <input checked="" type="checkbox"/> Sistema de Lubricación <input checked="" type="checkbox"/> Tipo Consola <input type="checkbox"/> Montado Placa Base <input checked="" type="checkbox"/> Indicadores de Presión en Tablero <input checked="" type="checkbox"/> Estrang. De Vapor <input checked="" type="checkbox"/> Primera Etapa <input checked="" type="checkbox"/> Anillo de Toberas <input checked="" type="checkbox"/> Agotado	<p>MATERIALES (continuación)</p> <input type="checkbox"/> Recubrimiento de la Flecha Bajo el Empaque (1) Material _____ (1) Metodo de Aplicación _____ (1) Espesor (1) _____ in																									
<p>REQUERIMIENTOS DE INGENIERIA</p> <input checked="" type="checkbox"/> Suministro de Datos para Análisis Torcional/Lateral <input checked="" type="checkbox"/> Datos para Margenes de Separación <input checked="" type="checkbox"/> Analisis de Vibración Torcional <input checked="" type="checkbox"/> Chequeo de Desbalance Residual <input checked="" type="checkbox"/> Plano Mecánico		<p>CONTROL DEL VAPOR</p> Cambio de Velocidad <input type="checkbox"/> Manual <input type="checkbox"/> Neumatico <input checked="" type="checkbox"/> Eléctrico																								
<p>PLACA DE MONTAJE</p> Tipo <input checked="" type="checkbox"/> Placa Base <input type="checkbox"/> Solera Suministrado por: <input checked="" type="checkbox"/> Proveedor de Trubina <input type="checkbox"/> Otro		<p>CONEXIONES / BOQUILLAS</p> <table border="1" style="width:100%; border-collapse: collapse; text-align: center;"> <thead> <tr> <th></th> <th>Diam.</th> <th>Rango</th> <th>Cara</th> <th>Cantidad</th> <th>Descripción</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>A</td> <td>1"</td> <td>#600</td> <td>(1)</td> <td>1</td> <td>Entrada de Vapor</td> </tr> <tr> <td>B</td> <td>6"</td> <td>#150</td> <td>(1)</td> <td>1</td> <td>Vapor Expandido</td> </tr> <tr> <td>C</td> <td>1"</td> <td>#150</td> <td>(1)</td> <td>1</td> <td>Extracción de Vapor</td> </tr> </tbody> </table>		Diam.	Rango	Cara	Cantidad	Descripción	A	1"	#600	(1)	1	Entrada de Vapor	B	6"	#150	(1)	1	Vapor Expandido	C	1"	#150	(1)	1	Extracción de Vapor
	Diam.	Rango	Cara	Cantidad	Descripción																					
A	1"	#600	(1)	1	Entrada de Vapor																					
B	6"	#150	(1)	1	Vapor Expandido																					
C	1"	#150	(1)	1	Extracción de Vapor																					
<p>PESOS E INFORMACIÓN DE EMBARQUE</p> Turbina _____ (1) lb Rotor _____ (1) lb Carcaza Sup. De la Turbina _____ (1) lb Válvula de Disparo _____ (1) lb Placa Base _____ (1) lb Miscelanea _____ (1) lb <input checked="" type="checkbox"/> Embarque Doméstico <input type="checkbox"/> Embarque Exportación		<p>ESQUEMA</p> 																								
<p>NOTAS</p> 1. A ser definido por el vendedor. 2. Todos los datos deben ser revisados por el vendedor. 3. Estándares Mexicanos y Americanos 4. A ser confirmado por el vendedor																										
<table border="1" style="width:100%; border-collapse: collapse;"> <tr> <td style="width:10%;">0</td> <td style="width:15%;">01.07.12</td> <td style="width:40%;">Aprobado para Cotización</td> <td style="width:10%;">LRS</td> <td style="width:10%;">DGD</td> <td style="width:15%;">JAOR</td> </tr> <tr> <td>B</td> <td>30.07.12</td> <td>Para Revisión y Aprobación de JAOR</td> <td>LRS</td> <td>DGD</td> <td>JAOR</td> </tr> <tr> <td>A</td> <td>20.07.12</td> <td>Para Revisión de DGD</td> <td>LRS</td> <td>DGD</td> <td>JAOR</td> </tr> <tr> <td>REV</td> <td>FECHA</td> <td>DESCRIPCIÓN</td> <td>PREPARO</td> <td>REVISO</td> <td>APROBO</td> </tr> </table>		0	01.07.12	Aprobado para Cotización	LRS	DGD	JAOR	B	30.07.12	Para Revisión y Aprobación de JAOR	LRS	DGD	JAOR	A	20.07.12	Para Revisión de DGD	LRS	DGD	JAOR	REV	FECHA	DESCRIPCIÓN	PREPARO	REVISO	APROBO	
0	01.07.12	Aprobado para Cotización	LRS	DGD	JAOR																					
B	30.07.12	Para Revisión y Aprobación de JAOR	LRS	DGD	JAOR																					
A	20.07.12	Para Revisión de DGD	LRS	DGD	JAOR																					
REV	FECHA	DESCRIPCIÓN	PREPARO	REVISO	APROBO																					

C:\Users\Ghost_Hack\Documents\Dropbox\Tesis Biochar Production\7- Hojas de Datos\HdD_Turbina_REV_0_P

7.3. CALDERA PIROTUBULAR CA-401

	<h2 style="margin:0;">HOJA DE DATOS</h2> <p style="margin:0;">[CALDERA PIROTUBULAR] HD-PBC-CA-401</p>	No. PROYECTO: Tesis Biocarbón DOCUMENTO: HdD_Caldera FECHA: 24.07.2012 HOJA 1 DE 2 REV 0																								
Cliente: Biochar Production Sitio: Temixco, Cuernavaca, Morelos Servicio: Generación de Vapor de Alta Fabricante: (1)	Tag: CA-401 Modelo: (1) No. Serie: (1) Cantidad: 1 (uno)																									
CONDICIONES DE OPERACIÓN Y DISEÑO																										
ALIMENTACIÓN	COMBUSTIBLE																									
Fluido: Agua Desmineralizada Diseño Flujo: 2,991 lb/h 3,888 lb/h Presión: 615.4 psia 923 psia Temp.: 295 °F 443 °F	Tipo de Combustible <input type="checkbox"/> Líquido <input checked="" type="checkbox"/> Gas Fluido: Syngas Diseño Flujo: 1,711 lb/h 2,224 lb/h Presión: 20.6 psia 31 psia Temp.: 114.0 °F 171 °F PCI: 2,260 BTU/lb																									
CARACTERÍSTICAS DE VAPOR																										
Tipo: Sobrecalentado Diseño Presión: 615.4 psia 923 psia Temp.: 685 °F 1,028 °F	Composición: <table border="1" style="width:100%; border-collapse: collapse;"> <tr><td>N₂</td><td>0.521</td></tr> <tr><td>CO₂</td><td>0.135</td></tr> <tr><td>CO</td><td>0.163</td></tr> <tr><td>H₂</td><td>0.125</td></tr> <tr><td>CH₄</td><td>0.044</td></tr> <tr><td>C₂₊</td><td>0.012</td></tr> </table>		N ₂	0.521	CO ₂	0.135	CO	0.163	H ₂	0.125	CH ₄	0.044	C ₂₊	0.012												
N ₂	0.521																									
CO ₂	0.135																									
CO	0.163																									
H ₂	0.125																									
CH ₄	0.044																									
C ₂₊	0.012																									
DATOS GENERALES																										
Carga Térmica: 3,104,522 BTU/h Eficiencia: 80 (4) % Perdidas por Radiación: (1) BTU/lb Superficie de lado de Tubos: (1) ft ² Superficie de lado de Agua: (1) ft ² Dimensiones (Ancho / Largo / Alto): (1) / (1) / (1) ft Combustible para piloto: (1) lb/h																										
CONSTRUCCIÓN																										
Posición <input checked="" type="checkbox"/> Horizontal <input type="checkbox"/> Vertical Diametro/Longitud: (1) / (1) ft Base: (1) x (1) ft No. de Pasos de Gases: (1) Capacidad @Normal: (1) lb Capacidad @Lleno Agua: (1) lb Diametro del Hogar: (1) in Volumen del Hogar: (1) ft ³ Espacio para Vapor: (1) ft ³	DATOS DE SERVICIO Temp. Ambiente Min. 57 °F Max. 95 °F Presion Barométrica: 12.2 psia Condiciones Inusuales <input type="checkbox"/> Polvo <input type="checkbox"/> Salinidad <input type="checkbox"/> Corrosivo <input type="checkbox"/> Otra Ninguna Humedad relativa: 43.00 % Servicio <input checked="" type="checkbox"/> Continuo <input type="checkbox"/> En espera Localización <input type="checkbox"/> Interior <input checked="" type="checkbox"/> Exterior <input checked="" type="checkbox"/> C/Techo <input type="checkbox"/> S/Techo																									
MATERIALES																										
<table border="1" style="width:100%; border-collapse: collapse;"> <thead> <tr> <th>Diseño de Carcaza</th> <th>Entrada</th> <th>Salida</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Max. Presión Perm. psig</td> <td>910</td> <td>910</td> </tr> <tr> <td>Max. Temp. Perm. °F</td> <td>450</td> <td>1,030</td> </tr> <tr> <td>Prueba Hidrostática psig</td> <td>(1)</td> <td>(1)</td> </tr> </tbody> </table>	Diseño de Carcaza	Entrada	Salida	Max. Presión Perm. psig	910	910	Max. Temp. Perm. °F	450	1,030	Prueba Hidrostática psig	(1)	(1)	Cuerpo: SS-316 (4) Grado (1) Baffles: SS-316 (4) Grado (1) Refractario: SS-316 (4) Grado (1) Quemador: SS-316 (4) Grado (1) Chimenea: SS-316 (4) Grado (1) Tubos: SS-316 (4) Grado (1)													
Diseño de Carcaza	Entrada	Salida																								
Max. Presión Perm. psig	910	910																								
Max. Temp. Perm. °F	450	1,030																								
Prueba Hidrostática psig	(1)	(1)																								
<table border="1" style="width:100%; border-collapse: collapse;"> <thead> <tr> <th>REV</th> <th>FECHA</th> <th>DESCRIPCIÓN</th> <th>PREPARO</th> <th>REVISO</th> <th>APROBO</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>0</td> <td>01.07.12</td> <td>Aprobado para Cotización</td> <td>LRS</td> <td>DGD</td> <td>JAOR</td> </tr> <tr> <td>B</td> <td>30.07.12</td> <td>Para Revisión y Aprobación de JAOR</td> <td>LRS</td> <td>DGD</td> <td>JAOR</td> </tr> <tr> <td>A</td> <td>24.07.12</td> <td>Para Revisión de DGD</td> <td>LRS</td> <td>DGD</td> <td>JAOR</td> </tr> </tbody> </table>	REV	FECHA	DESCRIPCIÓN	PREPARO	REVISO	APROBO	0	01.07.12	Aprobado para Cotización	LRS	DGD	JAOR	B	30.07.12	Para Revisión y Aprobación de JAOR	LRS	DGD	JAOR	A	24.07.12	Para Revisión de DGD	LRS	DGD	JAOR		
REV	FECHA	DESCRIPCIÓN	PREPARO	REVISO	APROBO																					
0	01.07.12	Aprobado para Cotización	LRS	DGD	JAOR																					
B	30.07.12	Para Revisión y Aprobación de JAOR	LRS	DGD	JAOR																					
A	24.07.12	Para Revisión de DGD	LRS	DGD	JAOR																					

C:\Users\Ghost-Hack\Documents\A\Dropbox\Testis Biochar Production\7-Hojas de Datos\HdD_Caldera_REV_0 - P.1 DE 2

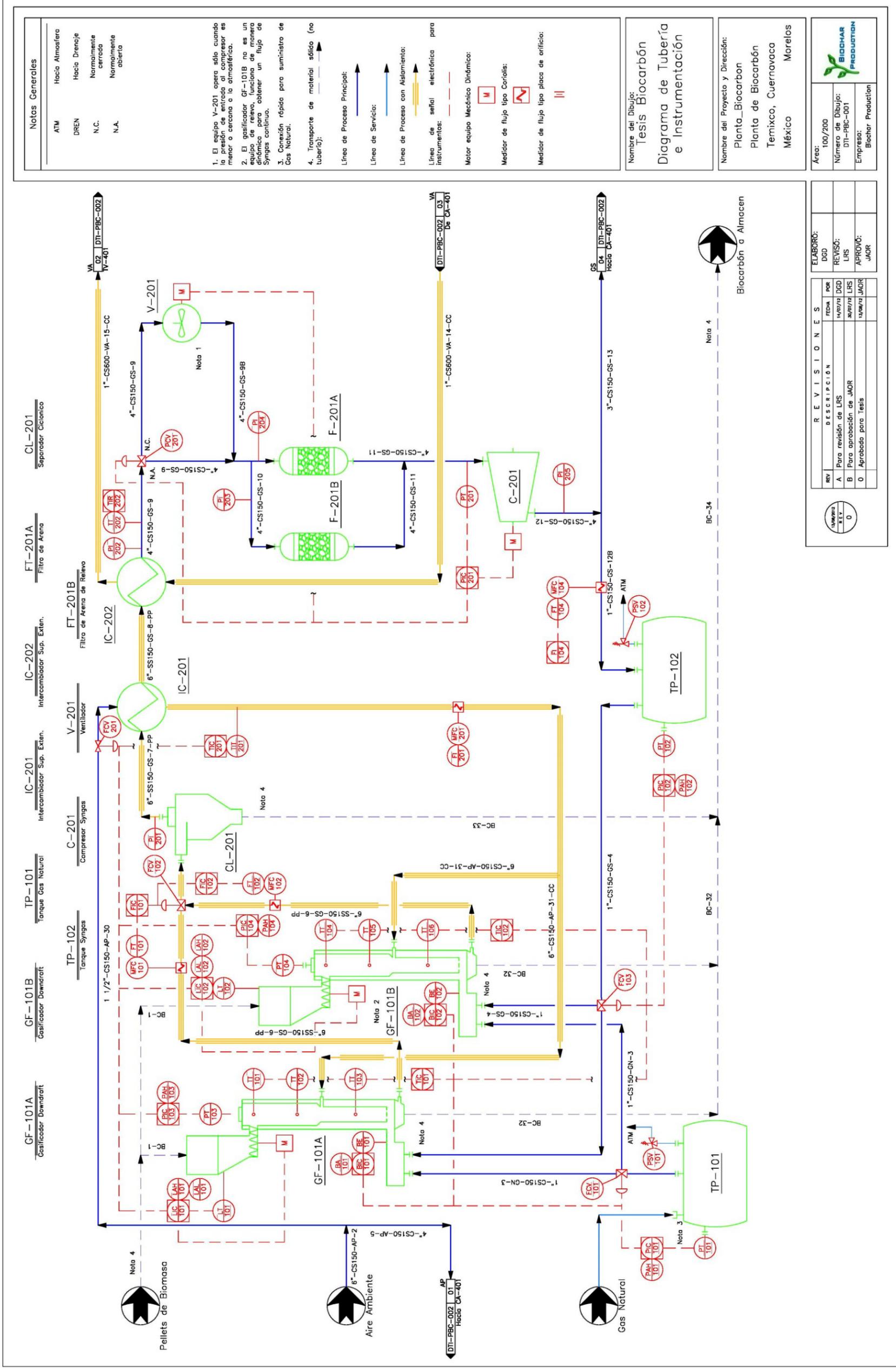
	<h2 style="margin:0;">HOJA DE DATOS</h2> <p style="margin:0;">[CALDERA PIROTUBULAR]</p> <p style="margin:0;">HD-PBC-CA-401</p>	No. PROYECTO: Tesis Biocarbón DOCUMENTO: HdD_Caldera FECHA: 24.07.2012 HOJA 2 DE 2 REV 0																																																																	
Servicio <u>Generación de Vapor de Alta</u>		Tag: <u>CA-401</u>																																																																	
ACCESORIOS DEL EQUIPO <input type="checkbox"/> Manometro Vapor <input checked="" type="checkbox"/> Termometro en base de Chimenea <input checked="" type="checkbox"/> Válvula de Seguridad <input checked="" type="checkbox"/> Relevo de Presión <input checked="" type="checkbox"/> Mirilla y Control de Nivel (con interruptores) <input type="checkbox"/> Controlador Presión de Vapor (1) <input checked="" type="checkbox"/> Alarma e Interruptor por Alta Presión <input checked="" type="checkbox"/> Medidor tipo Coriolis para el Vapor <input checked="" type="checkbox"/> Válvulas de Cierre para Sensores de Paro <input checked="" type="checkbox"/> Tablero Local de Instrumentos <input type="checkbox"/> Placa Base <input checked="" type="checkbox"/> Autosoportado <input checked="" type="checkbox"/> Quemador <input checked="" type="checkbox"/> Piloto <input checked="" type="checkbox"/> Suministro de Aire (Soplador) <input checked="" type="checkbox"/> Indicadores de Presión y Temperatura en Tablero <input checked="" type="checkbox"/> Entrada de Agua <input checked="" type="checkbox"/> Caldera <input checked="" type="checkbox"/> Salida de Vapor <input type="checkbox"/> Chimenea <input type="checkbox"/> Tratamiento Químico <input type="checkbox"/> Sistema de Dosificación de Químicos (1) <input type="checkbox"/> Bombas de Alimentación <input type="checkbox"/> Tanque de Condensado <input checked="" type="checkbox"/> Indicador de Flama (con alarma) <input checked="" type="checkbox"/> Alarma por Alto/Bajo Nivel	MATERIALES (continuación) <input checked="" type="checkbox"/> Aislamiento (1) Material _____ (1) Metodo de Aplicación _____ (1) Espesor (1) _____ in CONEXIONES / BOQUILLAS <table border="1" style="width:100%; border-collapse: collapse; margin-top: 5px;"> <thead> <tr> <th></th> <th>Diam.</th> <th>Rango</th> <th>Cara</th> <th>Cantidad</th> <th>Descripción</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>A</td> <td>1"</td> <td>#600</td> <td>(1)</td> <td>1</td> <td>Alimentación Agua</td> </tr> <tr> <td>B</td> <td>1"</td> <td>#600</td> <td>(1)</td> <td>1</td> <td>Vapor Alta Presión</td> </tr> <tr> <td>C</td> <td>14"</td> <td>#150</td> <td>(1)</td> <td>1</td> <td>Chimenea</td> </tr> <tr> <td>D</td> <td>6"</td> <td>#150</td> <td>(1)</td> <td>1</td> <td>Aire Quemador</td> </tr> <tr> <td>E</td> <td>3"</td> <td>#150</td> <td>(1)</td> <td>1</td> <td>Entrada Combustible</td> </tr> <tr> <td>F</td> <td>2"</td> <td>#150</td> <td>(1)</td> <td>1</td> <td>Drenaje</td> </tr> <tr> <td>G</td> <td>24"</td> <td>#150</td> <td>(1)</td> <td>1</td> <td>Entrada Hombre</td> </tr> <tr> <td>H</td> <td>1"</td> <td>#150</td> <td>(1)</td> <td>2</td> <td>Ind. de Nivel</td> </tr> <tr> <td>I</td> <td>1"</td> <td>#600</td> <td>(1)</td> <td>1</td> <td>Ind. de Presión</td> </tr> <tr> <td>J</td> <td>1" (4)</td> <td>#600</td> <td>(1)</td> <td>1</td> <td>PSV</td> </tr> </tbody> </table> ESQUEMA 		Diam.	Rango	Cara	Cantidad	Descripción	A	1"	#600	(1)	1	Alimentación Agua	B	1"	#600	(1)	1	Vapor Alta Presión	C	14"	#150	(1)	1	Chimenea	D	6"	#150	(1)	1	Aire Quemador	E	3"	#150	(1)	1	Entrada Combustible	F	2"	#150	(1)	1	Drenaje	G	24"	#150	(1)	1	Entrada Hombre	H	1"	#150	(1)	2	Ind. de Nivel	I	1"	#600	(1)	1	Ind. de Presión	J	1" (4)	#600	(1)	1	PSV
	Diam.	Rango	Cara	Cantidad	Descripción																																																														
A	1"	#600	(1)	1	Alimentación Agua																																																														
B	1"	#600	(1)	1	Vapor Alta Presión																																																														
C	14"	#150	(1)	1	Chimenea																																																														
D	6"	#150	(1)	1	Aire Quemador																																																														
E	3"	#150	(1)	1	Entrada Combustible																																																														
F	2"	#150	(1)	1	Drenaje																																																														
G	24"	#150	(1)	1	Entrada Hombre																																																														
H	1"	#150	(1)	2	Ind. de Nivel																																																														
I	1"	#600	(1)	1	Ind. de Presión																																																														
J	1" (4)	#600	(1)	1	PSV																																																														
PLACA DE MONTAJE Tipo <input checked="" type="checkbox"/> Placa Base <input type="checkbox"/> Solera Suministrado por: <input checked="" type="checkbox"/> Proveedor de Caldera <input type="checkbox"/> Otro _____	PESOS E INFORMACIÓN DE EMBARQUE Caldera _____ (1) _____ lb Quemador _____ (1) _____ lb Accesorios e Instrumentos _____ (1) _____ lb Placa Base _____ (1) _____ lb Miscelanea _____ (1) _____ lb <input checked="" type="checkbox"/> Embarque Doméstico <input type="checkbox"/> Embarque Exportación	NOTAS 1. A ser definido por el vendedor. 2. Todos los datos deben ser revisados por el vendedor. 3. Estándares Mexicanos y Americanos 4. A ser confirmado por el vendedor 5. Paquete instrumentado (funcionamiento automático)																																																																	
<table border="1" style="width:100%; border-collapse: collapse;"> <tr> <td style="width:10%;">0</td> <td style="width:15%;">01.07.12</td> <td style="width:45%;">Aprobado para Cotización</td> <td style="width:10%;">LRS</td> <td style="width:10%;">DGD</td> <td style="width:10%;">JAOR</td> </tr> <tr> <td>B</td> <td>30.07.12</td> <td>Para Revisión y Aprobación de JAOR</td> <td>LRS</td> <td>DGD</td> <td>JAOR</td> </tr> <tr> <td>A</td> <td>24.07.12</td> <td>Para Revisión de DGD</td> <td>LRS</td> <td>DGD</td> <td>JAOR</td> </tr> <tr> <td>REV</td> <td>FECHA</td> <td>DESCRIPCIÓN</td> <td>PREPARO</td> <td>REVISO</td> <td>APROBO</td> </tr> </table>	0	01.07.12	Aprobado para Cotización	LRS	DGD	JAOR	B	30.07.12	Para Revisión y Aprobación de JAOR	LRS	DGD	JAOR	A	24.07.12	Para Revisión de DGD	LRS	DGD	JAOR	REV	FECHA	DESCRIPCIÓN	PREPARO	REVISO	APROBO																																											
0	01.07.12	Aprobado para Cotización	LRS	DGD	JAOR																																																														
B	30.07.12	Para Revisión y Aprobación de JAOR	LRS	DGD	JAOR																																																														
A	24.07.12	Para Revisión de DGD	LRS	DGD	JAOR																																																														
REV	FECHA	DESCRIPCIÓN	PREPARO	REVISO	APROBO																																																														

C:\Users\Ghost\Documents\Dropbox\Tesis Biochar Production\7- Hojas de Datos\HdD_Caldera_REV_0_P2 DE 2

CAPÍTULO VIII

DIAGRAMA DE TUBERÍA E INSTRUMENTACIÓN

8.1. DTI-PBC-001 (ÁREAS 100 Y 200)



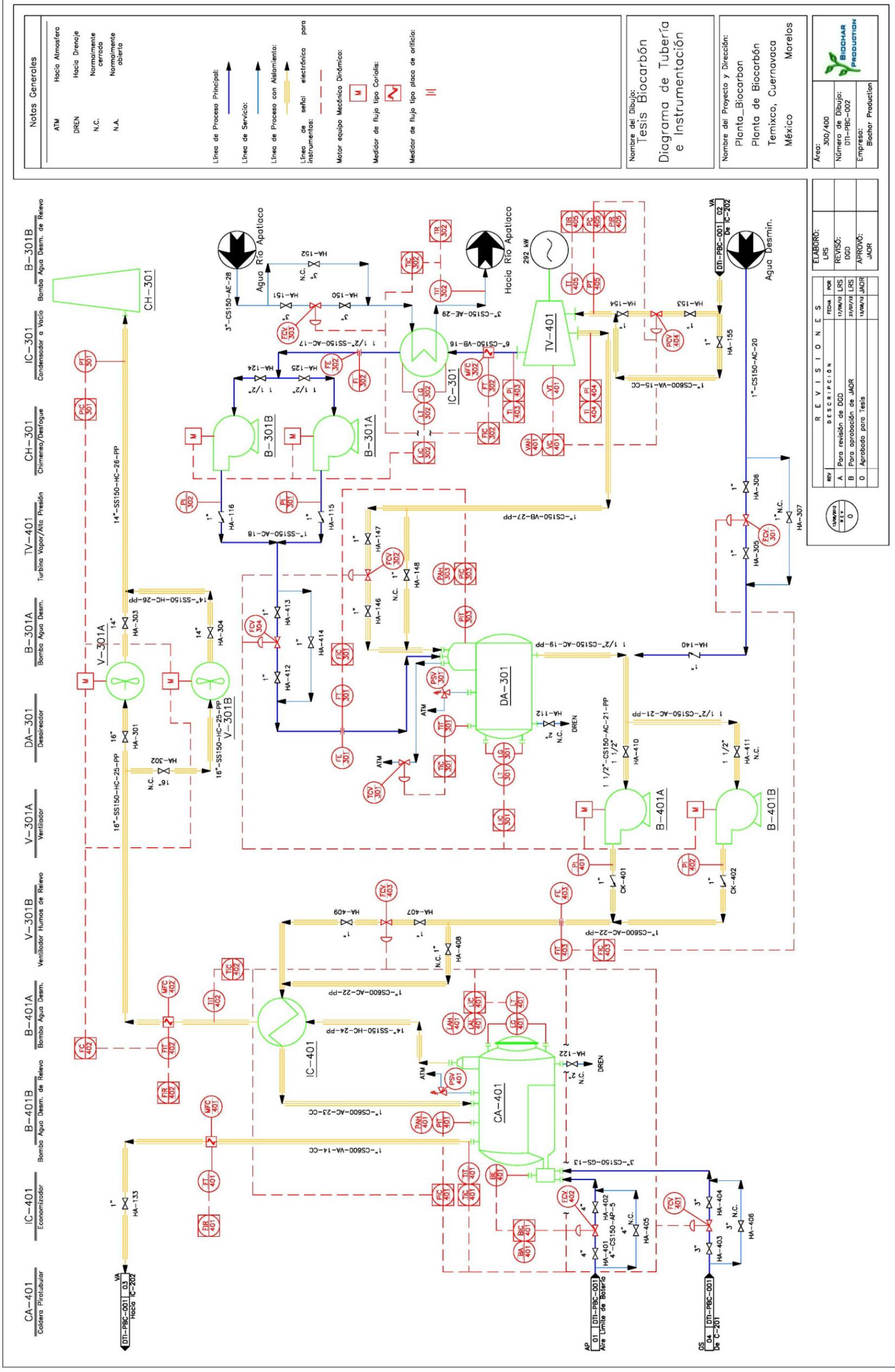
Nombre del Dibujo:
Tesis Biocarbón
Diagrama de Tubería
e Instrumentación

Nombre del Proyecto y Dirección:
Planta_Biocarbon
Planta de Biocarbón
Temixco, Cuernavaca
México
Morelos

Área:	100/200
Número de Dibujo:	DTI-PBC-001
Empresa:	Biochar Production

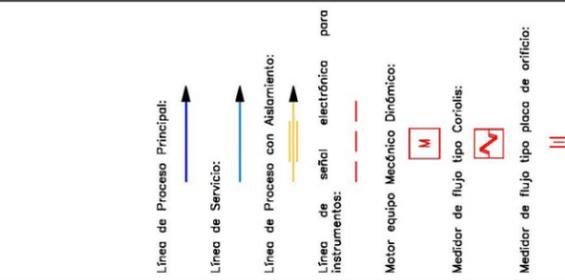
REVISIÓN		ELABORÓ:	
REV	DESCRIPCIÓN	FECHA	POR
A	Para revisión de LRS	14/07/14	DGD
B	Para aprobación de JAOR	20/07/14	LRS
D	Aprobado para Tesis	13/08/14	JAOR

8.2. DTI-PBC-002 (ÁREAS 300 Y 400)



Notas Generales

ATM	Hacia Atmosfera
DREN	Hacia Drenaje
N.C.	Normalmente cerrada
N.A.	Normalmente abierta



Nombre del Dibujo:
Tesis Biocarbón
 Diagrama de Tubería e Instrumentación

Nombre del Proyecto y Dirección:
 Planta_Biocarbon
 Planta de Biocarbón
 Temixco, Cuernavaca
 México
 Morelos

Área:	300/400
Número de Dibujo:	DTI-PBC-002
Empresa:	Biochar Production

REVISIONES

REV	DESCRIPCIÓN	FECHA	POR
A	Para revisión de DGD	17/04/21	LRS
B	Para aprobación de JAOR	27/02/21	LRS
0	Aprobado para Tesis	13/06/21	JAOR

ELABORÓ:

LRS

REVISÓ:

DGD

APROVÓ:

JAOR

8.3. LISTA DE LÍNEAS

BIOCHAR PRODUCTION



Elaboro: LRS
Reviso: DGD
Aprobó: JAOR

LISTA DE LÍNEAS
(DTI-PBC-001 Y DTI-PBC-002)

Documento: LdL_Lista de Líneas
Fecha: 24-Junio-2012
REV: 0

# línea	Tag	D comercial [in]	Fluido	Estado	De...	Hacia...	P op. [psia]	T op. [°F]	w [lb/h]	P [lb/ft ²]	Servicio	Clase	Tipo de Aislamiento	Especificación
2	6"-CS150-AP-2	6	Aire	G	Límite de Batería	4"-CS150-AP-5 y 1 1/2"-CS150-AP-30	17.6	77.0	13,712.6	0.276	AP	CS #150	SA	T-A02T1
3	1"-CS150-GN-3	1	Gas Natural	G	TP-101	GF-101A/B	56.9	59.9	13.6	0.046	GN	CS #150	SA	T-D01T1
4	1"-CS150-GS-4	1	Syngas	G	TP-102	GF-101A/B	20.6	114.0	77.6	0.088	GS	CS #150	SA	T-D01T1
5	4"-CS150-AP-5	4	Aire	G	6"-CS150-AP-2	CA-401	17.6	77.0	12,280.9	0.276	AP	CS #150	SA	T-A02T1
6	6"-SS150-GS-6-PP	6	Syngas	G	GF-101A/B	CL-201	17.5	1127.2	1,788.5	0.027	GS	SS #150	PP	T-D04T3
7	6"-SS150-GS-7-PP	6	Syngas	G	CL-201	IC-201	16.4	1127.2	1,784.1	0.025	GS	SS #150	PP	T-D04T3
8	6"-CS150-GS-8-PP	6	Syngas	G	IC-201	IC-202	15.7	585.0	1,784.1	0.037	GS	SS #150	PP	T-D04T3
9	4"-CS150-GS-9	4	Syngas	G	IC-202	4"-CS150-GS-10	15.0	86.0	1,784.1	0.067	GS	CS #150	SA	T-D01T1
9B	4"-CS150-GS-9B	4	Syngas	G	V-201	4"-CS150-GS-10	16.1	86.0	1,784.1	0.072	GS	CS #150	SA	T-D01T1
10	4"-CS150-GS-10	4	Syngas	G	4"-CS150-GS-9/B	FT-201A/B	15.0	86.0	1,784.1	0.067	GS	CS #150	SA	T-D01T1
11	4"-CS150-GS-11	4	Syngas	G	FT-201A/B	C-201	13.3	86.0	1,782.0	0.060	GS	CS #150	SA	T-D01T1
12	4"-CS150-GS-12	4	Syngas	G	C-201	1"-CS150-GS-12B y 3"-CS150-GS-13	20.6	114.0	1,782.0	0.088	GS	CS #150	SA	T-D01T1
12B	1"-CS150-GS-12B	1	Syngas	G	4"-CS150-GS-12	TP-102	20.6	114.0	77.6	0.088	GS	CS #150	SA	T-D01T1
13	3"-CS150-GS-13	3	Syngas	G	4"-CS150-GS-12	CA-401	20.6	114.0	1,704.4	0.088	GS	CS #150	SA	T-D01T1
14	1"-CS600-VA-14-CC	1	Vapor H2O	V	CA-401	IC-202	615.4	685.2	2,991.2	1.000	VA	CS #600	CC	T-F01T1
15	1"-CS600-VA-15-CC	1	Vapor H2O	V	IC-202	TV-401	614.7	825.0	2,961.3	0.800	VA	CS #600	CC	T-F01T1
16	6"-CS150-VB-16	6	Vapor H2O	V	TV-401	IC-301	2.0	125.3	2,947.5	0.01	VB	CS #150	SA	T-F01T1
17	1 1/2"-SS150-AC-17	1 1/2	H2O Desmi.	L	IC-301	B-301A/B	8.0	125.3	2,947.5	61.63	AC	SS #150	SA	T-A09T3
18	1"-SS150-AC-18	1	H2O Desmi.	L	B-301A/B	DA-301	76.4	125.4	2,947.5	61.63	AC	SS #150	SA	T-A09T3
19	1 1/2"-CS150-AC-19-PP	1 1/2	H2O Desmi.	L	DA-301	1 1/2"-CS150-AC-21-PP	55.9	295.0	2,931.4	57.46	AC	CS #150	PP	T-D04T1
20	1"-CS150-AC-20	1	H2O Desmi.	L	Límite de Batería	1 1/2"-CS150-AC-21-PP	55.9	68.0	59.8	62.32	AC	CS #150	SA	T-A01T1
21	1 1/2"-CS150-AC-21-PP	1 1/2	H2O Desmi.	L	1 1/2"-CS150-AC-19-PP y 1"-CS150-AC-20	B-401A/B	55.9	290.5	2,991.2	57.60	AC	CS #150	PP	T-D04T1
22	1"-CS600-AC-22-PP	1	H2O Desmi.	L	B-401A/B	IC-401	644.0	290.5	2,991.2	57.60	AC	CS #600	PP	T-D04T1
23	1"-CS600-AC-23-CC	1	H2O Desmi.	L	IC-401	CA-401	615.4	370.1	2,991.2	57.307	AC	CS #600	CC	T-D04T1
24	14"-SS150-HC-24-PP	14	Humos	G	CA-401	IC-401	12.1	350.0	5,576.2	0.038	HC	SS #150	PP	T-A09T3
25	16"-SS150-HC-25-PP	16	Humos	G	IC-401	V-301A/B	11.0	300.5	5,576.2	0.037	HC	SS #150	PP	T-A09T3
26	14"-SS150-HC-26-PP	14	Humos	G	V-301A/B	GH-301	12.4	300.5	5,576.2	0.041	HC	SS #150	PP	T-A09T3
27	1"-CS150-VB-27-PP	1	Vapor H2O	V	TV-401	DA-301	50.0	383.4	13.8	0.04	VB	CS #150	PP	T-F01T1
28	3"-CS150-AE-28	3	H2O Rio	L	Límite de Batería	IC-301	50.0	68.0	89,877.8	61.63	AE	CS #150	SA	T-D01T1
29	3"-CS150-AE-29	3	H2O Rio	L	IC-301	Límite de Batería	50.0	100.0	89,877.8	61.996	AE	CS #150	SA	T-D01T1
30	1 1/2"-CS150-AP-30	1 1/2	Aire	G	6"-CS150-AP-2	IC-201	17.6	77.0	1,431.8	0.276	AP	CS #150	SA	T-A02T1
31	6"-CS150-AP-31-CC	6	Aire	G	IC-201	GF-101A/B	7.6	700.0	1,431.8	0.01	AP	CS #150	CC	T-A02T1

Servicios	
AE	Agua de Enfriamiento
AC	Agua de Caldera (Desmineralizada)
AP	Aire de Proceso
CV	Condensado de Vapor
BC	Biocarbón
GN	Gas Natural
GS	Gas de Síntesis
HC	Humos de Chimenea
VA	Vapor de Alta Presión
VB	Vapor de Baja Presión

Tipo de Aislamiento	
CC	Conservación de Color
CF	Conservación de Frio
PP	Protección de Personal
SA	Sin Aislamiento

Especificación / Material	
T-A09T1	AC, ASTM A 106 Gr. B, sin costura (S/C) ASME B36.10
T-D01T1	AC, ASTM A 106 Gr. B, sin costura (S/C) ASME B36.10
T-F01T1	AC, ASTM A 106 Gr. B, sin costura (S/C) ASME B36.10
T-A01T1	AC, ASTM A 106 Gr. B, sin costura (S/C) ASME B36.10
T-D04T3	SS, ASTM A-132 Tipo 321H con tratamiento termico a 1095°C mínimo sin costura ASME B36.19M
T-A09T3	SS, ASTM A-132 Tipo 321 sin costura ASME B36.19M

8.4. LISTA DE INSTRUMENTOS

8.4.1. INSTRUMENTOS LOCALES ACCESIBLES

#	Número de DTI	Área	Tipo	Tag	#	Número de DTI	Área	Tipo	Tag
1	DTI-PBC-001	100	BA	100-BA-101	36	DTI-PBC-001	200	TT	200-TT-202
2	DTI-PBC-001	100	BA	100-BA-102	37	DTI-PBC-002	300	FI	300-FI-302
3	DTI-PBC-001	100	BE	100-BE-101	38	DTI-PBC-002	300	FT	300-FT-301
4	DTI-PBC-001	100	BE	100-BE-102	39	DTI-PBC-002	300	FT	300-FT-302
5	DTI-PBC-001	100	FT	100-FT-101	40	DTI-PBC-002	300	LG	300-LG-301
6	DTI-PBC-001	100	FT	100-FT-102	41	DTI-PBC-002	300	LG	300-LG-302
7	DTI-PBC-001	100	FT	100-FT-104	42	DTI-PBC-002	300	LT	300-LT-301
8	DTI-PBC-001	100	LAH	100-LAH-101	43	DTI-PBC-002	300	LT	300-LT-302
9	DTI-PBC-001	100	LAH	100-LAH-102	44	DTI-PBC-002	300	PAH	300-PAH-303
10	DTI-PBC-001	100	LAL	100-LAL-101	45	DTI-PBC-002	300	PIT	300-PIT-303
11	DTI-PBC-001	100	LAL	100-LAL-102	46	DTI-PBC-002	300	PT	300-PT-301
12	DTI-PBC-001	100	LT	100-LT-101	47	DTI-PBC-002	300	TIT	300-TIT-301
13	DTI-PBC-001	100	LT	100-LT-102	48	DTI-PBC-002	300	TIT	300-TIT-302
14	DTI-PBC-001	100	PAH	100-PAH-101	49	DTI-PBC-002	400	BA	400-BA-401
15	DTI-PBC-001	100	PAH	100-PAH-102	50	DTI-PBC-002	400	BE	400-BE-401
16	DTI-PBC-001	100	PAH	100-PAH-103	51	DTI-PBC-002	400	FIT	400-FIT-402
17	DTI-PBC-001	100	PAH	100-PAH-104	52	DTI-PBC-002	400	FIT	400-FIT-403
18	DTI-PBC-001	100	PT	100-PT-101	53	DTI-PBC-002	400	FT	400-FT-401
19	DTI-PBC-001	100	PT	100-PT-102	54	DTI-PBC-002	400	LAH	400-LAH-401
20	DTI-PBC-001	100	PT	100-PT-103	55	DTI-PBC-002	400	LAL	400-LAL-401
21	DTI-PBC-001	100	PT	100-PT-104	56	DTI-PBC-002	400	LG	400-LG-401
22	DTI-PBC-001	100	TT	100-TT-101	57	DTI-PBC-002	400	LT	400-LT-401
23	DTI-PBC-001	100	TT	100-TT-102	58	DTI-PBC-002	400	PAH	400-PAH-401
24	DTI-PBC-001	100	TT	100-TT-103	59	DTI-PBC-002	400	PI	400-PI-301
25	DTI-PBC-001	100	TT	100-TT-104	60	DTI-PBC-002	400	PI	400-PI-302
26	DTI-PBC-001	100	TT	100-TT-105	61	DTI-PBC-002	400	PI	400-PI-401
27	DTI-PBC-001	100	TT	100-TT-106	62	DTI-PBC-002	400	PI	400-PI-402
28	DTI-PBC-001	200	FI	200-FI-201	63	DTI-PBC-002	400	PIT	400-PIT-401
29	DTI-PBC-001	200	PI	200-PI-201	64	DTI-PBC-002	400	PT	400-PT-405
30	DTI-PBC-001	200	PI	200-PI-202	65	DTI-PBC-002	400	TIT	400-TIT-401
31	DTI-PBC-001	200	PI	200-PI-203	66	DTI-PBC-002	400	TIT	400-TIT-402
32	DTI-PBC-001	200	PI	200-PI-204	67	DTI-PBC-002	400	TT	400-TT-405
33	DTI-PBC-001	200	PI	200-PI-205	68	DTI-PBC-002	400	VAH	400-VAH-401
34	DTI-PBC-001	200	PT	200-PT-201	69	DTI-PBC-002	400	VT	400-VT-401
35	DTI-PBC-001	200	TIT	200-TIT-201					

8.4.2. INSTRUMENTOS ACCESIBLES CON *DISPLAY*

#	Número de DTI	Área	Tipo	Tag
1	DTI-PBC-001	100	BIC	100-BIC-102
2	DTI-PBC-001	100	BIC	100-BIC-101
3	DTI-PBC-001	100	FI	100-FI-104
4	DTI-PBC-001	100	FIC	100-FIC-101
5	DTI-PBC-001	100	FIC	100-FIT-102
6	DTI-PBC-001	100	LIC	100-LIC-101
7	DTI-PBC-001	100	LIC	100-LIC-102
8	DTI-PBC-001	100	PIC	100-PIC-102
9	DTI-PBC-001	100	PIC	100-PIC-101
10	DTI-PBC-001	100	PIC	100-PIC-103
11	DTI-PBC-001	100	PIC	100-PIC-104
12	DTI-PBC-001	100	TIC	100-TIC-102
13	DTI-PBC-001	100	TIC	100-TIC-101
14	DTI-PBC-001	200	PIC	200-PIC-201
15	DTI-PBC-001	200	TIC	200-TIC-201
16	DTI-PBC-001	200	TIR	200-TIR-202
17	DTI-PBC-002	300	FIC	300-FIC-301
18	DTI-PBC-002	300	FIC	300-FIC-302
19	DTI-PBC-002	300	LIC	300-LIC-301
20	DTI-PBC-002	300	PIC	300-PIC-301
21	DTI-PBC-002	300	TIC	300-TIC-302
22	DTI-PBC-002	300	TIC	300-TIC-301
23	DTI-PBC-002	300	TR	300-TR-302
24	DTI-PBC-002	400	BIC	400-BIC-401
25	DTI-PBC-002	400	FC	400-FC-402
26	DTI-PBC-002	400	FIC	400-FIC-403
27	DTI-PBC-002	400	FIR	400-FIR-401
28	DTI-PBC-002	400	FIR	400-FIR-402
29	DTI-PBC-002	400	LIC	400-LIC-302
30	DTI-PBC-002	400	LIC	400-LIC-401
31	DTI-PBC-002	400	PC	400-PC-405
32	DTI-PBC-002	400	PI	400-PI-404
33	DTI-PBC-002	400	PI	400-PI-403
34	DTI-PBC-002	400	PIC	400-PIC-401
35	DTI-PBC-002	400	PIC	400-PIC-303
36	DTI-PBC-002	400	PIR	400-PIR-405
37	DTI-PBC-002	400	TI	400-TI-404
38	DTI-PBC-002	400	TI	400-TI-403
39	DTI-PBC-002	400	TIC	400-TIC-402
40	DTI-PBC-002	400	TIC	400-TIC-401
41	DTI-PBC-002	400	TIR	400-TIR-405
42	DTI-PBC-002	400	VC	400-VC-401

8.4.3. INSTRUMENTOS EN LÍNEA

#	Numero de DTI	Área	Tipo	Tag	Descripción
1	DTI-PBC-001	100	FCV	100-FCV-101	Válvula de Control de Flujo
2	DTI-PBC-001	100	FCV	100-FCV-102	Válvula de Control de Flujo
3	DTI-PBC-001	100	FCV	100-FCV-103	Válvula de Control de Flujo
4	DTI-PBC-001	100	MFC	100-MFC-101	Medidor de Flujo Coriolis
5	DTI-PBC-001	100	MFC	100-MFC-102	Medidor de Flujo Coriolis
6	DTI-PBC-001	100	MFC	100-MFC-201	Medidor de Flujo Coriolis
7	DTI-PBC-001	100	MFC	100-MFC-104	Medidor de Flujo Coriolis
8	DTI-PBC-001	100	PSV	100-PSV-102	Válvula de Presión de Seguridad
9	DTI-PBC-001	100	PSV	100-PSV-101	Válvula de Presión de Seguridad
10	DTI-PBC-001	200	FCV	200-FCV-201	Válvula de Control de Flujo
11	DTI-PBC-001	200	PCV	200-PCV-201	Válvula de Control de Presión
12	DTI-PBC-002	300	FCV	300-FCV-304	Válvula de Control de Flujo
13	DTI-PBC-002	300	FCV	300-FCV-302	Válvula de Control de Flujo
14	DTI-PBC-002	300	FCV	300-FCV-303	Válvula de Control de Flujo
15	DTI-PBC-002	300	FCV	300-FCV-301	Válvula de Control de Flujo
16	DTI-PBC-002	300	FE	300-FE-301	Placa de Orificio
17	DTI-PBC-002	300	FE	300-FE-302	Placa de Orificio
18	DTI-PBC-002	300	MFC	300-MFC-302	Medidor de Flujo Coriolis
19	DTI-PBC-002	300	PSV	300-PSV-301	Válvula de Presión de Seguridad
20	DTI-PBC-002	300	TCV	300-TCV-301	Válvula Termo-reguladora
21	DTI-PBC-002	400	FCV	400-FCV-403	Válvula de Control de Flujo
22	DTI-PBC-002	400	FCV	400-FCV-401	Válvula de Control de Flujo
23	DTI-PBC-002	400	FCV	400-FCV-402	Válvula de Control de Flujo
24	DTI-PBC-002	400	FE	400-FE-403	Placa de Orificio
25	DTI-PBC-002	400	MFC	400-MFC-401	Medidor de Flujo Coriolis
26	DTI-PBC-002	400	MFC	400-MFC-402	Medidor de Flujo Coriolis
27	DTI-PBC-002	400	PCV	400-PCV-404	Válvula de Control de Presión
28	DTI-PBC-002	400	PSV	400-PSV-401	Válvula de Presión de Seguridad

CAPÍTULO IX

FILOSOFÍA DE OPERACIÓN Y CONTROL

9.1. FILOSOFÍA DE OPERACIÓN: GENERALIDADES

La instrumentación está puesta de forma básica para un control dinámico y automático, por lo que las señales deben ser computadas en un cuarto de control que desarrollarán en la siguiente fase del proyecto, es decir, pertenecen a la Ingeniería de Detalle.

Las señales de los instrumentos y transmisores hacia los dispositivos de medición y control son electrónicas de 2-4 mA (a ser confirmados en la Ingeniería de Detalle).

Los medidores de flujo para líquidos serán tipo placa de orificio para medir flujo volumétrico, y para gas o vapor serán de tipo Coriolis para medir el flujo másico.

9.2. ÁREAS 100 Y 200

Al arrancar la planta, el tanque de almacenamiento de gas natural TP-101 suministrará el combustible necesario para precalentar los gasificadores *Downdraft* GF-101 A/B hasta los 800°C aproximadamente; primero al GF-101A durante 45 minutos y después se desvía el combustible al GF-101B, alternándose sucesivamente. Dicho recipiente tiene un transmisor de presión PT-101 que manda una señal al indicador-controlador de presión PIC-101 que a su vez cuenta con una alarma por alta presión PAH-101 que se activa en caso de tener presiones peligrosas; en caso de que esto ocurra, el PCI-101 envía una señal de cierre a la válvula FCV-101 y la válvula de seguridad PSV-101 se encargaría de aliviar la sobrepresión.

El quemador de cada gasificador cuenta con un detector de flama BE-101/102 respectivamente, conectados cada uno a su propio indicador-controlador de flama BI-101/102, y a su alarma por falla de flama BA-101/102 según corresponde; esto con el objetivo de evitar fugas de combustible. Si la flama se extinguiera, la alarma alertaría al personal y además el controlador mandaría una señal para cerrar las válvulas FCV-101 y FCV-103 las cuales controlan el flujo del combustible que se está usando; al arrancar se usa gas natural y en operación normal se utiliza una fracción de *syngas* producido por el efecto de la gasificación.

Adicionalmente cada gasificador cuenta con tres transmisores de temperatura (TT-101/106), los cuales ayudan a monitorear la temperatura en las diferentes zonas del gasificador; cada trío de transmisores manda una señal a su respectivo indicador-controlador de temperatura TIC-101/102. Cuando el reactor alcanza la temperatura requerida, el indicador-controlador del equipo en turno envía una señal de desvío de flujo a la válvula de control FCV-101 o FCV-103 (dependiendo de si se está usando gas natural o *syngas*) para que cierre el suministro de combustible al quemador en uso.

Es importante mencionar que las válvulas controladoras de flujo FCV-101, FCV-102 y FCV-103 son de tres vías, debido a que el flujo de combustible debe desviarse intermitentemente entre uno y otro equipo para que de esta manera se releven los gasificadores cada hora, logrando que el flujo de *syngas* se vuelva continuo.

En el momento en que se está precalentando el gasificador, se va llenando su respectiva tolva con pellets de biomasa de forma manual con la ayuda de una excavadora. Cada tolva cuenta con un transmisor de nivel LT-101/102 que comunican a sus respectivos indicadores-controladores de nivel LIC-101/102 y a sus alarmas por alto y bajo nivel (LAH-101/102 y LAL-101/102 respectivamente), esto con el objetivo de avisar en caso de que la tolva se esté sobrellenando o cuando necesite ser recargada con más biomasa.

Cuanto la tolva esté en su el nivel requerido y se haya alcanzado la temperatura necesaria en el reactor, el indicador-controlador de nivel envía una señal al motor del tornillo sin fin integrado a cada gasificador con la finalidad de que éste comience a alimentar la biomasa al interior del gasificador. En caso de que no se tenga el nivel necesario de biomasa, el LIC-101/102 manda una señal de cierre a la válvula FCV-201 para detener el flujo de aire hacia el gasificador, y también una señal de paro al motor del tornillo sin fin.

Cada gasificador *Downdraft* cuenta con un transmisor de presión PT-103/104 que tiene montado su respectivo indicador-controlador de presión PIC-103/104, así como una alarma por alta presión PAH-103/104. La alarma se encenderá en caso de que la presión interna del gasificador se eleve a niveles peligrosos, en cuyo caso el PIC-103/104 ejercerá un control sobre la válvula de control FCV-201 que regula la entrada del agente gasificante al reactor; al cerrar dicha válvula se suspenderá el suministro de aire, evitando que siga aumentando la presión, al mismo tiempo que se envía una señal de paro al motor del alimentador de biomasa.

La válvula de control de flujo FCV-201 ubicada a la entrada del intercambiador de calor IC-201, estará calibrada según la alimentación de biomasa que se tenga, es decir, la válvula será capaz de suministrar un caudal de 1.8m^3 de aire por cada kilogramo de biomasa.

La línea de salida de aire caliente (línea 31) cuenta con un indicador-transmisor de temperatura TIT-201 que tiene montado el indicador-controlador de temperatura TIC-201, con la finalidad de conocer la temperatura de entrada del aire del gasificador proveniente del intercambiador de calor IC-201. Dicha línea también cuenta con un medidor de flujo másico tipo Coriolis MFC-201 conectado a un indicador de flujo local para mostrar al operador la cantidad de aire que se está suministrando al gasificador.

La línea de salida de syngas de cada gasificador cuenta con un medidor de flujo tipo Coriolis MFC-101/102 que tienen montado cada uno su transmisor de flujo FT-101/102 cada cual manda su señal al indicador-controlador de flujo FIC-101/102 con el fin de medir el flujo másico de *syngas*; en caso de no haber flujo en una de las líneas que transportan el *syngas* a la entrada del ciclón CL-201, el FIC-101/102 manda una señal a la válvula de control de tres vías FCV-102 con la finalidad de cerrar la línea del gasificador que no está produciendo gas de síntesis.

El ciclón de alta eficiencia cuenta con un indicador de presión local PI-201 para conocer la presión a la salida del mismo. De igual modo se cuenta con un indicador de presión local PI-202 para conocer la presión a la salida del segundo intercambiador de calor IC-202, así como un transmisor de

temperatura TT-202 con su indicador-registrador de temperatura TIR-202 para tener un registro estadístico de la temperatura del gas de síntesis después del paso por los intercambiadores de calor.

En los filtros F-201 A/B, cada uno cuenta con un indicador de presión local PI-203/204 respectivamente para conocer la presión en caso de que el ventilador V-201 se encuentre en funcionamiento.

A la entrada del compresor C-201 se tiene un transmisor de presión PT-201 conectado a un indicador-controlador de presión PIC-201, que al detectar una presión menor o cercana a la atmosférica manda una señal de encendido al motor del ventilador V-201 con el fin de aumentar la presión y evitar que el compresor trabaje a vacío. Adicionalmente el PIC-201 gobierna la válvula de control de presión PCV-201, que es una válvula de tres vías que desvía el flujo hacia el ventilador cuando la presión no es adecuada a la entrada del compresor.

A la salida del compresor se cuenta con un indicador local de presión PI-205 para poder verificar que la presión es adecuada para alimentar el tanque de almacenamiento de *syngas* TP-102 y al quemador de la caldera CA-401. A la entrada del tanque de almacenamiento hay un medidor de flujo tipo Coriolis MFC-104 que cuenta con su transmisor de flujo FT-104 para mandar una señal al indicador de flujo FI-104 montado en un panel accesible al operador.

El tanque TP-102 tiene un transmisor de presión PT-102 conectado a un indicador-controlador de presión PIC-102 que manda una señal a la alarma por alta presión PAH-102, que se activa cuando se trabaje a presiones peligrosas, en cuyo caso la válvula de alivio de presión PSV-102 se encargaría de disminuirla a niveles seguros. Adicionalmente el PIC-102 puede cerrar o desviar el flujo de *syngas* con la válvula de control de tres vías FCV-103 según se necesite.

9.3. ÁREAS 300 Y 400

Para echar a andar la caldera piro-tubular CA-401, se debe llenar con agua desmineralizada proveniente de la corriente 20, que en funcionamiento normal dicha corriente es sólo para reposición porque la alimentación normal proviene del desaireador DA-301. Una vez que se han inundado los tubos y el transmisor de nivel LT-401 manda la señal al indicador-controlador de nivel LIC-401 de que se encuentra en su nivel óptimo, se dispara una señal que abre las válvulas de control de flujo FCV-401 y FCV-402 ubicadas en las líneas 13 (*Syngas*) y 5 (Aire Ambiente) respectivamente, para que ingrese la mezcla de combustible y comburente al hogar de la caldera.

El LIC-401 tiene a su vez una alarma por alto nivel (LAH-401) y otra de bajo nivel (LAL-401), mismas que se activan para alertar al operador cuando el nivel de líquido alcanza niveles peligrosos. En ambos casos, el controlador manda una señal a la válvula de control de flujo FCV-403 de apertura o cierre para mantener el nivel de agua desmineralizada adecuado y así poder producir un flujo de vapor continuo. En caso que entre una mayor cantidad de agua por la línea de alimentación debido al control de temperatura en los humos, las válvulas FCV-401 y FCV-402 se manipulan automáticamente de tal forma que ingresa la cantidad de combustible y aire suficientes para el nivel de agua en la

caldera. Adicionalmente la caldera también cuenta con un indicador de nivel visual LG-401 para el operador.

La cámara de combustión de la caldera tiene el detector de flama BE-401 que manda una señal al indicador-controlador de flama BIC-401 que cuenta con una alarma por fallo de la misma (BA-401), para que cuando no exista flama mande una señal de cierre total a las válvulas FCV-401, FCV-402 y FCV-403.

La caldera también tiene un indicador transmisor de presión PIT-401 que manda una señal al indicador-controlador de presión PIC-401 ubicado en el domo del equipo generador de vapor con su alarma por alta presión (PAH-401), para que en caso de que se alcancen presiones peligrosas, se mande una señal de cierre total a las válvulas FCV-401, FCV-402 y FCV-403 con el fin de no ingresar combustible, aire ni alimentación de agua desmineralizada; de esta forma la válvula de seguridad PSV-401 se encargará de reducir la presión de manera segura.

La línea 14 de vapor pre-sobrecalentado que sale por la parte superior de la caldera cuenta con el indicador-transmisor de temperatura TIT-401 que comunica al indicador-controlador de temperatura TIC-401; este último se encarga de mandar una señal a las válvulas FCV-401 y FCV-402 que dominan los flujos de combustible y aire para mantener una temperatura de 363 °C. Esta misma tubería incluye un medidor de flujo tipo Coriolis MFC-401, el cual lleva montado el transmisor de flujo FT-401 que manda una señal al indicador-registrador de flujo FIR-401 con el fin de tener un control estadístico de la variable.

Los gases de combustión que salen del economizador IC-401, cuentan con el indicador-transmisor de temperatura TIT-402, el cual comunica al indicador-controlador de temperatura TIC-402 que actúe sobre la válvula FCV-403 para que en caso de salir a una temperatura mayor a 149 °C, se abra para ingresar un mayor flujo de agua de alimentación al intercambiador, con el fin de mantener dicha temperatura. En esta misma línea está colocado un medidor de flujo tipo Coriolis MFC-402, de donde obtiene la señal el indicador transmisor de flujo FIT-402, misma que es enviada hacia el medidor-registrador de flujo másico FIR-402 para tener estadísticas sobre los gases de combustión enviados a la atmósfera; además otra señal es para el controlador de flujo FC-402, que en caso de no haber flujo apaga automáticamente el ventilador V-301A/B.

En la entrada de la chimenea CH-301 se encuentra el transmisor de presión PT-301 que envía una señal al indicador-controlador de presión PIC-301 que ejerce dominio sobre los motores de los ventiladores V-301A/B, para poder expulsar los gases de combustión a una presión superior a la atmosférica.

La alimentación de la caldera estando en operación normal proviene en su mayoría del vapor expandido en la turbina de vapor TV-401, que es condensado en el intercambiador de calor IC-301. El condensado se extrae por gravedad del condensador que cuenta con el indicador de nivel visual LG-302 junto con el transmisor de nivel LT-302, que envía una señal al indicador-controlador de nivel LIC-302 para apagar las bombas B-301A/B en caso de que el condensado acumulado en el tanque receptor integrado al condensador, no tenga una columna adecuada de líquido.

El vapor a vacío que entra al condensador, posee el medidor de flujo Coriolis MFC-302 junto con el transmisor de flujo FT-302, que envía una señal al indicador-controlador FIC-302 para controlar la válvula FCV-303, que se encarga de gobernar el flujo de entrada de agua de enfriamiento originaria del Río Apatlaco a condiciones ambientales, consiguiendo con esto que ingrese la cantidad adecuada de agua fría para que condense todo el vapor a temperatura constante.

Debido a que el agua de enfriamiento se devuelve al Río Apatlaco, se debe tener un control estricto sobre la temperatura, por lo que la corriente de regreso al río cuenta con el indicador transmisor de temperatura TIT-302, que manda una señal al registrador de temperatura TR-302 para tener un control estadístico; adicionalmente el transmisor comunica al indicador-controlador de temperatura TIC-302 que domina la apertura en la válvula de control de flujo FCV-303 para que ingrese la cantidad necesaria de agua de enfriamiento con el fin de agotar el calor latente del vapor, y así la descarga al río no supere los 40 °C por cuidado de la vida acuática del río.

La salida de condensado tiene un medidor de flujo de placa de orificio FE-302 conectado al indicador local de flujo FI-302, para monitorear el flujo que ingresa a las bombas B-301A/B; estas bombas que alimentan al desaireador DA-301 cuentan con un indicador local de presión a la descarga de las mismas (PI-301 y PI-302 respectivamente) para verificar que el fluido se bombee a la presión a la que se encuentra la extracción de vapor sobrecalentado de la turbina TV-401.

La descarga de las bombas BA-301A/B tiene la válvula de control de flujo FCV-304, que es gobernada por el indicador-controlador de nivel LIC-301 que posee el desaireador DA-301 para abrir o cerrar la válvula a fin de mantener el flujo adecuado que debe ingresar al proceso de desgasificación; la señal es enviada por el transmisor de nivel LT-301 que adicionalmente cuenta con el indicador visual de nivel LG-301 para el operador en campo.

La línea de alimentación de agua gasificada también cuenta con un medidor de flujo de placa de orificio FE-301 que tiene montado el transmisor de flujo FT-301 para enviar una señal al indicador-controlador de flujo FIC-301 que domina la válvula de control FCV-302. Dicha válvula se encarga del flujo de vapor sobrecalentado en la línea 27, que sirve para calentar y poder crear una neblina fina de partículas de vapor y agua gasificada a una temperatura igual a la de saturación del vapor, con lo que se desprenden la mayoría de los gases disueltos, quedando una cantidad menor de 2 cm³ de O₂ por litro; finalmente se deposita en el fondo del desaireador el agua desgasificada. Así que, la FCV-302 dependiendo del flujo de agua oxigenada abre o cierra el flujo de vapor sobrecalentado, con el fin de suministrar la cantidad adecuada de calor que se requiere.

El vapor sobrecalentado que se usa para el desaireador es originario de una extracción en la turbina TV-401, el cual se debe encontrar a 3.4 atm y 195 °C, para lo que se tiene un indicador de presión PI-404 y un indicador de temperatura TI-404 en la corriente 27, en un panel accesible al operador para monitorear la presión y temperatura en campo.

El desaireador también cuenta con la válvula de alivio de presión PSV-301 en el domo del mismo para evitar niveles peligrosos, adicionalmente se tiene el indicador transmisor de presión PIT-303 que envía una señal al indicador-controlador de presión PIC-303 (junto con una alarma por alto

nivel de presión PAH-303), que controla la válvula FCV-302 para que en niveles altos de presión deje de ingresar vapor, y la válvula de alivio de presión se encargue de liberar la presión de manera segura.

Para la salida de los gases no condensables que fueron extraídos en el desaireador, se dispone de la válvula termorreguladora TCV-301 que está controlada por la señal proveniente del indicador controlador de temperatura TIC-301, dicho controlador obtiene la señal del transmisor de temperatura TIT-301 ubicado en la parte superior del DA-301. La válvula se abre cuando la temperatura de los gases llega 1.6 grados por debajo de la temperatura de saturación del vapor, de esta manera se liberan de manera segura a la atmósfera.

La corriente de alimentación de la caldera proveniente del desaireador DA-301 es impulsada por las bombas B-401A/B, mismas que elevan la presión hasta 43.8 atm, así que cada bomba cuenta con un indicador local de presión a la descarga (PI-401 y PI-402 respectivamente). Adicionalmente en la línea de descarga se cuenta con un elemento de flujo FE-403 que tiene montado el indicador transmisor de flujo FIT-403 para mandar una señal al indicador-controlador de flujo FIC-403, el cual abre o cierra la válvula de no retorno FCV-301 ubicada en la línea de reposición de agua desmineralizada para suministrar y reponer la cantidad exacta de flujo y así mantener la alimentación en 1357 kg/h.

Finalmente el vapor sobrecalentado proveniente del intercambiador de calor IC-202, entra a la turbina de vapor TV-401 para expandirse, a la entrada se cuenta con un indicador-transmisor de presión y otro de temperatura (PIT-405 y TIT-405), que mandan su señal a un indicador-registrador de presión y otro de temperatura (PIR-405 y TIR-405 respectivamente) para monitorear dichas variables y tener un registro de consulta. Adicionalmente el PIT-405 manda una señal al controlador de presión PC-405 que a su vez gobierna la válvula controladora de presión PCV-404 ubicada en la línea de vapor sobrecalentado, para que mantenga la presión en 600 psig.

A la salida de la turbina de vapor se cuenta con un indicador de presión y otro de temperatura (PI-403 y TI-403 respectivamente) colocados en un panel accesible, para que el operador verifique las condiciones de salida de 4 inHg y 52 °C. Además la turbina cuenta con un transmisor de vibración VT-401 en la parte de los cojinetes y el eje de rotación, que envía una señal al controlador de vibración VC-401 para que cuando la vibración en el equipo sobrepase los parámetros de estabilidad mande una señal a la alarma VAH-401 y cierre totalmente la válvula de control PCV-404, evitando así daños en los equipos.

C A P Í T U L O X

C O S T O S D E L P R O Y E C T O

10.1. ESTUDIO DE MERCADO

El interés por el cuidado del medio ambiente y la preocupación por el estado de la Tierra es cada vez mayor entre la población mundial. El planeta se calienta, los polos se derriten y los fenómenos meteorológicos son cada vez más destructivos, por lo que la conciencia ambiental está más presente en todos los aspectos de la sociedad.

Desde el reciclaje y el ahorro de agua en los hogares hasta las multas por sobrepasar el límite de emisión de gases contaminantes a la atmósfera por parte de las industrias.

Si a esto se le añade la dependencia energética del exterior, el alto precio del crudo y la conciencia de que las reservas y los recursos energéticos no son ilimitados hace que se busquen distintos métodos para conseguir un desarrollo sostenible. Por lo que este tipo de proyectos tiene cabida en el mercado actual.

10.2. ENTORNO NACIONAL

En la actualidad gran parte del territorio Nacional es suelo fértil para las cosechas de distintos cultivos y plantas, sin embargo en la mayor parte del territorio la utilización de fertilizantes químicos, herbicidas, e insecticidas ha provocado un deterioro en la calidad de la tierra, y con esto un deterioro y reducción en los cultivos.

Existe una gran cantidad de tecnologías aplicadas a la agricultura con el fin de mejorar las cosechas y cultivos a corto plazo. Entre los principales se encuentran:

- » Fertilizantes Químicos
- » Abonos Naturales
- » Semillas Mejoradas
- » Herbicidas
- » Insecticidas
- » Quema

En la actualidad y como se muestra en la Tabla 24. En los Estados Unidos Mexicanos una de las tecnologías aplicadas a la agricultura con el fin de mejorar las cosechas y cultivos es la utilización de fertilizantes químicos, insecticidas y la quema controlada.

En la actualidad pocos agricultores o profesionales que se encuentran dedicados a viveros o a la jardinería tienen conocimiento de que las plantas sintetizan, con la ayuda de la luz solar, compuestos orgánicos que exudan por sus raíces. Por medio de la fotosíntesis, el carbono que contiene el dióxido de carbono del aire es convertido en compuestos hidrogenados provenientes del agua y el oxígeno es liberado para que respiremos los seres humanos y los animales. Una gran parte de la energía que se capta en la fotosíntesis por las hojas es dedicada a formar carbohidratos y proteínas que son liberadas por las raíces como exudados al suelo.

Si alguien creyera que las raíces sólo mandan nutrientes a las hojas para que se realice la fotosíntesis, podría maravillarse con el conocimiento de que las plantas utilizan a sus raíces para

controlar la vida del suelo. Efectivamente, los exudados de la raíz de carbohidratos que incluyen azúcares y proteínas con funciones de control, despiertan, atraen y multiplican o mantienen una compleja y variada flora bacteriana y hongos que son benéficos para la planta. Esta vida microscópica se alimenta de los exudados de la raíz y de los pedazos de piel o cáscara que son eliminados de las puntas de las raíces o rizomas durante su crecimiento.

Las proteínas exudadas de las raíces controlan el tipo y cantidad de microorganismos que la planta necesita durante su desarrollo, por eso las concentraciones y actividad de éstos varía de acuerdo a los nutrientes que la planta necesita. Algunas bacterias pueden fijar el nitrógeno del aire, y los micelios (hongos) pueden digerir los minerales y descomponer los restos orgánicos para convertirlos en nutrientes que ponen a disposición de las raíces. Esta vida se origina en la rizósfera, el espacio que rodea a cada raíz hasta una distancia de 2 mm de ella.

Los micelios, que son los hongos unicelulares que se unen en cadenas de varios kilómetros de longitud, penetran el suelo a profundidades mucho mayores que las raíces mismas y extraen los nutrientes del mismo y lo transportan hasta su origen en la rizósfera. A los micelios que penetran hasta dentro de la raíz y se alimentan de los azúcares y carbohidratos que están entre las células de la raíz se les llama endorriza, y a los micelios que no penetran la raíz y que hacen su intercambio de nutrientes en la rizósfera se les llama ectorriza. Ambos contribuyen enormemente a la alimentación y salud de la planta en una simbiosis perfecta.

Las bacterias y micelios están en la base de una cadena alimenticia pues son comidos por protozoarios y nematodos que a su vez son comidos por insectos que a su vez son comidos por animales etc. Las excreciones de estas criaturas son también nutrientes para las plantas. Los efectos de estas interrelaciones son benéficos para las plantas pues proveen estructura y respiración al suelo, fertilización de flores, etcétera. El conocimiento de estas interrelaciones y su aprovechamiento práctico ha dado lugar a un nuevo concepto de agricultura llamado permacultura, que se puede aplicar en cualquier escala, desde un jardín hasta una gran extensión de tierra.

Hasta hace sólo tres o cuatro años lo descrito brevemente arriba constituía el estado del arte en agricultura y jardinería. El redescubrimiento de la “terra preta do indio” y la expansión mundial de la conciencia de sus posibilidades a partir del año 2007, está generando un interés internacional en el biocarbón (*biochar*) que está pronto a convertirse en la “Revolución Negra”. La revolución verde de los años setentas del siglo pasado logró doblar la producción mundial de alimentos. La “Revolución Negra” promete volver a lograrlo y aún exceder varias veces el rendimiento (del 200 al 600%), de acuerdo a evaluaciones preliminares.

En nuestro país la puesta en marcha del desarrollo de esta tecnología, así como la utilización del biocarbón traería consigo un sin fin de beneficios, ya que en gran parte del territorio nacional se cultivan diferentes tipos de plantas que se verían beneficiados con la introducción del biocarbón. Además se podrían destinar el programa de recolección de basura orgánica a la producción del biocarbón, una vez adaptado el proceso al uso de basura orgánica como materia prima, lo cual no está muy lejos de suceder.

Tabla 24 . Superficie agrícola total según tipo de tecnología aplicada para el manejo de los cultivos o plantaciones por región ecológica (2012). Unidades en hectáreas (INEGI, 2012).

Región ecológica	Superficie agrícola ^a	Tipo de tecnología aplicada en las labores agrícolas										Otro tipo de tecnología
		Fertilizantes químicos	Semilla mejorada	Abonos naturales	Herbicidas			Insecticidas			Quema controlada	
					Total	Químicos	Orgánicos	Total	Químicos	Orgánicos		
Estados Unidos Mexicanos	29,902,091	7,870,743	4,156,802	1,316,617	5,536,741	5,160,327	376,413	3,734,930	3,611,602	123,328	506,245	33,010
California Mediterránea	27,240	4,850	5,136	7,978	2,517	2,442	74	2,241	1,648	592	141	1
Desiertos de América del Norte	3,686,389	930,392	717,881	153,028	670,521	594,820	75,700	602,408	559,427	42,980	46,085	9,530
Elevaciones Semiáridas Meridionales	4,576,890	1,955,394	1,044,985	341,372	1,441,957	1,354,957	87,000	935,721	913,485	22,235	45,403	7,309
Grandes Planicies	1,292,947	271,555	482,335	65,650	267,669	253,018	14,651	118,269	116,227	2,041	3,558	1,331
Selvas Cálido-Húmedas	6,840,575	802,826	324,361	78,930	689,435	649,716	39,718	438,630	429,445	9,185	140,891	3,913
Selvas Cálido-Secas	6,375,002	1,645,735	1,047,339	203,429	1,139,377	1,054,458	84,918	936,507	904,393	32,113	163,170	5,436
Sierras Templadas	7,103,044	2,259,987	534,762	466,228	1,325,264	1,250,914	74,350	701,151	686,973	14,178	106,993	5,487

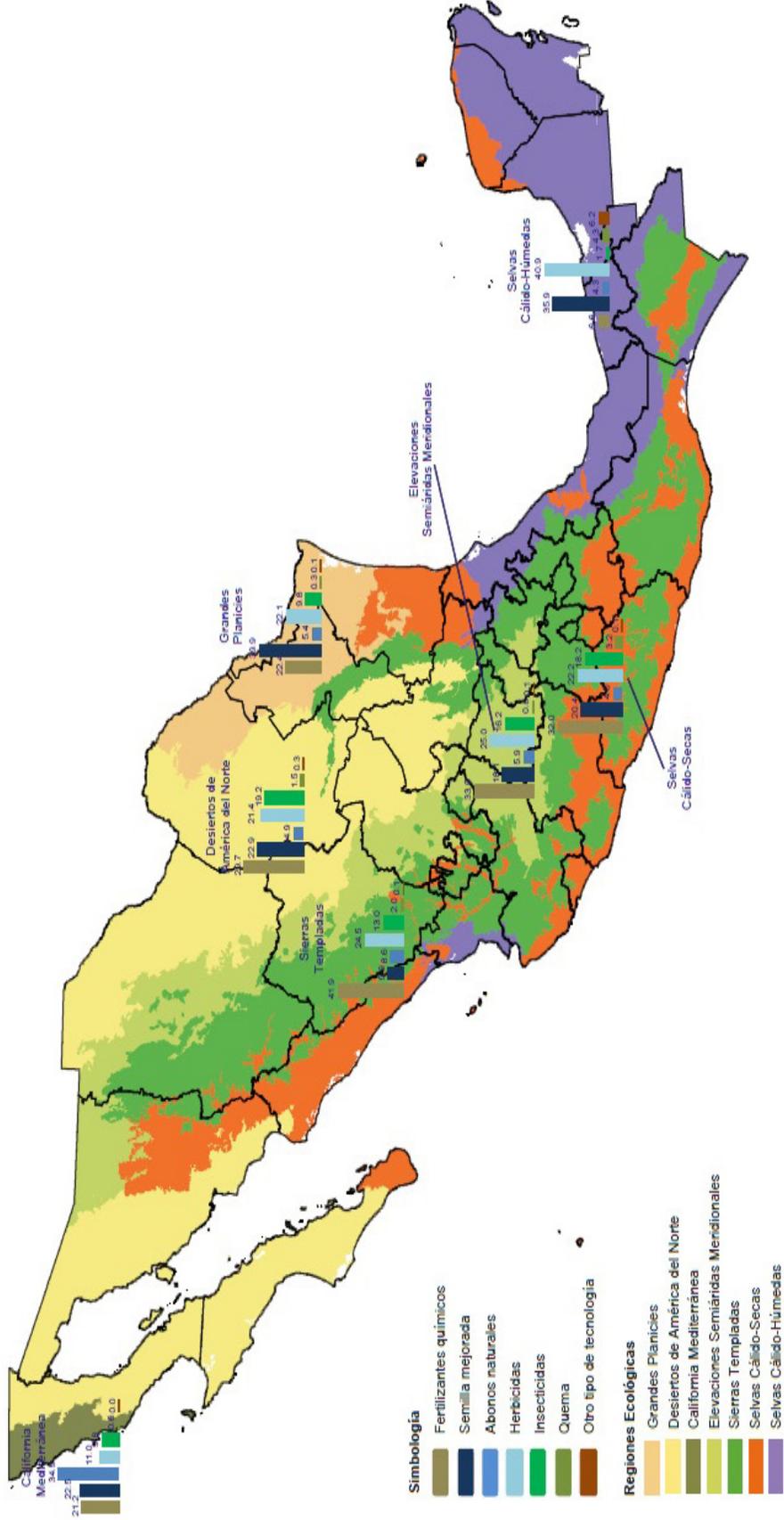


Ilustración 26 . Superficie agrícola total de las unidades de producción según tipo de tecnología aplicada para el manejo de los cultivos o plantaciones por región ecológica (Porcentaje) (INEGI, 2012).

10.3. COMPETENCIA DE MERCADO

En nuestro país el tema del biocarbón es nuevo en varios sentidos, desde la investigación hasta la puesta en marcha en cuanto a la producción.

En la actualidad y en la mayor parte del territorio nacional la utilización de fertilizantes naturales es muy poca, en comparación a la utilización de herbicidas, insecticidas y fertilizantes químicos, e inclusive en gran parte del territorio nacional la quema controlada de cultivos representa un alto porcentaje en el manejo de cultivos, debido a esto el incursionar en el mercado nacional con un producto de alta calidad y eficiencia en un sector poco explotado como es el de los fertilizantes naturales; esto generaría una gran oportunidad de desarrollo y crecimiento a futuro, aunado al valor agregado que tendría la generación energía eléctrica para comunidades rurales.

En la actualidad ya existen empresas como *Artesano Natural S.A. de C.V.* que se encuentra ubicada en Monterrey, Nuevo León, y que ya produce Biocarbón a partir de la pirólisis de biomasa, bajo el nombre de *Biocarb*.

Artesano Natural S.A. de C.V. Se encuentra actualmente comercializando el *Biocarb* a través de una red de mercadeo de multinivel, combinada con precios de mayoreo en 24 rangos según el volumen, con precios en pesos mexicanos que van de \$40/kg a \$10.50/kg.

La producción mundial de biocarbón en el mundo es muy reducida. La mayor parte se destina a estudios académicos. Una empresa en California está empezando a mercadear un horno de pirólisis de biomasa en \$50,000 USD para vender biocarbón a un precio meta de \$1 a \$2 USD por libra. (\$50 pesos por kilo aprox.). En Australia una compañía que produce biocombustible vende como subproducto un biocarbón a \$1000 USD la tonelada.

10.4. CONSUMIDORES DE BIOCARBÓN

Los principales consumidores del biocarbón se encuentran en el sector agrícola del país, aquellos productores agrícolas dedicados principalmente al cultivo de alimentos y plantas, sin menospreciar que se puede tener gran consumo por parte de las personas dedicadas a tener viveros a menor o mayor escala, así como a las personas que gusten de cultivar plantas en sus jardines.

Sin embargo la utilización del biocarbón no se limita a su utilización como fertilizante natural, también puede ser utilizado como combustible natural, utilizándose en calentadores, en hogueras, anafres, calderas, para producir calor, entre otras utilidades. Aunque no es la mejor forma de utilizarlo.

10.5. FINANCIAMIENTO DEL PROYECTO

Los proyectos de este tipo suelen estar financiados con un porcentaje alto por entidades externas, ya sean de crédito o públicas a través de subvenciones. En este caso, se considera que el 80 % de la inversión inicial corre a cargo de fondos externos, y el 20 % restante serán fondos propios.

La financiación externa puede venir por muchas vías como las líneas de crédito mediante Bancos o mediante fondos mixtos que son un instrumento que apoyan el desarrollo científico y tecnológico estatal y municipal, a través de un fideicomiso constituido con aportaciones del Gobierno del estado o municipio, y el Gobierno Federal, a través del Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT).

Con estos fondos se pretende permitir a los gobiernos de los estados y a los municipios destinar recursos a investigaciones científicas y a desarrollos tecnológicos, orientados a resolver problemáticas estratégicas, especificadas por el propio estado, con la coparticipación de recursos federales.

Son sujetos de apoyo las Instituciones, centros, laboratorios, universidades y empresas públicas y privadas, así como personas que se encuentran inscritas en el Registro Nacional de Instituciones y Empresas Científicas y Tecnológicas (RENIECyT) que estableció este Instituto para fomentar el uso de energías renovables y la mejora en la eficiencia energética. Dichos préstamos tenía una dotación inicial de 30 millones de euros para financiar las inversiones de proyectos de energía solar térmica, fotovoltaica aislada y biomasa doméstica e instalaciones de cogeneración.

10.5.1. CRÉDITO PARA PROYECTOS DE INVERSIÓN

Créditos mayores a 3 millones de dólares destinados a apoyar proyectos de inversión para la implantación, adecuación, ampliación o modernización de instalaciones productivas y bodegas de almacenamiento, incluyendo la adquisición de maquinaria y equipo.

Beneficiarios:

- » Empresas exportadoras o proveedores de exportadores, esto es que provean insumos, servicios o bienes intermedios o finales que se incorporen a productos o servicios de exportación.
- » Empresas generadoras de divisas y sus proveedores.
- » Empresas que sustituyan importaciones.
- » Empresas mexicanas que importan materias primas, insumos o componentes para sus procesos de producción destinada al mercado internacional.

Beneficios:

- » Créditos en dólares o en moneda nacional.
- » Plazos hasta por 15 años en función de los flujos esperados del proyecto de inversión. En el caso de empresas de nueva creación, financiamos hasta el 50% del importe del proyecto. Para empresas que están operando, hasta el 85% del importe del proyecto o inversión sin que el monto exceda un 30% de incremento del activo fijo.

10.5.2. PROGRAMA DE APOYO PARA PROYECTOS SUSTENTABLES

Es un programa que brinda apoyo financiero a largo plazo a empresas que promuevan proyectos orientados al uso y conservación sustentable de los recursos naturales, a fin de disminuir la contaminación de la atmósfera, aire, agua y fomento del ahorro y uso eficiente de energía.

Está dirigido a empresas con proyectos que promueven el desarrollo de energías renovables, eficiencia energética y el uso de energías limpias que hagan frente al cambio climático. El proyecto aquí presentado cumple este aspecto, por lo que se puede contar con dicho apoyo financiero.

10.6. ANÁLISIS DE LA INVERSIÓN

10.6.1. CRITERIO DE SELECCIÓN DE INVERSIONES

Para el cálculo de los siguientes índices de inversiones es necesario conocer el concepto de flujo neto de efectivo. Éste comprende la suma de todos los cobros menos todos los pagos efectuados durante la vida útil del proyecto de la inversión.

A. VALOR PRESENTE NETO [VPN]

El valor presente neto es un criterio financiero para el análisis de proyectos de inversión que consiste en determinar el valor actual de los flujos de efectivo que se esperan en el transcurso de la inversión.

El VPN es una medida del beneficio que rinde un proyecto de Inversión a través de toda su vida útil; se define como el Valor Presente de su Flujo de Ingresos Futuros menos el Valor Presente de su Flujo de Costos. Es un monto de dinero equivalente a la suma de los flujos de Ingresos netos que generará el proyecto en el futuro.

El método del valor presente neto proporciona un criterio de decisión preciso y sencillo; se deben realizar sólo aquellos proyectos de inversión que actualizados a la tasa de descuento relevante, tengan un igual o superior a cero. Es decir si un proyecto de inversión tiene un VPN positivo, el proyecto es rentable. La ecuación para calcular el VPN se expresa así:

$$VPN = \sum_j \frac{I_j}{(1+i)^j} \quad [6.6]$$

Donde:

I_j = Suma en el periodo j

i^j = Tasa de descuento

J = Periodo

B. RETORNO SOBRE LA INVERSIÓN [ROI]

El nombre original proviene de *Return On Investment* en inglés. Este es un valor que mide la rentabilidad de una inversión que se ha obtenido o que se planea obtener.

El ROI es un parámetro muy simple de calcular para saber lo positiva que es una inversión. Los valores de ROI cuanto más altos mejor. Si tenemos un ROI negativo, quiere decir que se estaría perdiendo dinero y si tenemos un ROI muy cercano a cero, también podemos pensar que la inversión no es muy atractiva.

A la hora de evaluar una inversión nos viene muy bien calcular el ROI, sobre todo para comparar dos posibles inversiones, pues si con una inversión conseguimos un ROI mejor que con otra, pues debemos pensar en invertir nuestro dinero únicamente en la fórmula que nos reporte mejores ratios.

El ROI se puede utilizar para cualquier tipo de inversión, y se puede calcular con la siguiente ecuación.

$$ROI = \left(\frac{\text{Flujo Total de Efectivo} - \text{Costo de la Inversion}}{\text{Costo de la Inversion}} \right) \times 100 \quad [6.7]$$

C. PERIODO DE RECUPERACIÓN DE LA INVERSIÓN [PRI]

El método de periodo de recuperación determina el tiempo que toma recibir de regreso la inversión inicial. La forma más sencilla de ver el periodo de recuperación es como la cantidad de tiempo necesaria para llegar al punto de equilibrio; es decir, cuando no se gana ni se pierde.

El PRI es el tercer criterio más usado para evaluar un proyecto y tiene por objeto medir en cuánto tiempo (años, meses o días) se recupera el total de la inversión a valor presente.

La siguiente expresión ayuda a calcular el tiempo requerido para alcanzar al punto de equilibrio, dando unidades en años.

$$PRI = \text{Flujo de Efectivo Anual} - (\text{Costo Total del Proyecto} + \text{Gasto Anual}) \quad [6.8]$$

10.7. COSTOS DEL PROYECTO

Tabla 25 . Costo de equipos principales usando factor de actualización de costo CEPSI⁶. Elaboración propia.

Tag de Equipo	Capacidad con 50% sobrediseño	Unidad	Cantidad	Costo Unitario Ref. 2011 [USD]	Costo Total 2011 [USD]	Costo Unitario 2012 [USD]	Costo Instalación [USD]	Costo Total 2012 [USD]
GF-101A/B	450.0	kg/h	2	\$43,635.00	\$87,270.00	\$43,057.65	\$15,070.18	\$116,255.67
TP-101	6,300.0	gal	1	\$63,980.42	\$63,980.42	\$63,133.88	\$31,566.94	\$94,700.82
TP-102	14,940.0	gal	1	\$85,234.86	\$85,234.86	\$84,107.10	\$42,053.55	\$126,160.66
C-201	11.0	hp	1	\$11,558.29	\$11,558.29	\$11,405.36	\$3,421.61	\$14,826.97
CL-201	1,649.0	ft3/min	1	\$7,879.25	\$7,879.25	\$7,775.00	\$3,110.00	\$10,884.99
F-201A/B	20.0	ft2	2	\$6,578.48	\$13,156.97	\$6,491.44	\$2,596.58	\$18,176.04
IC-201	61.5	ft2	1	\$9,289.05	\$9,289.05	\$9,166.14	\$4,583.07	\$13,749.21
IC-202	46.5	ft2	1	\$7,427.34	\$7,427.34	\$7,329.07	\$3,664.53	\$10,993.60
IC-401	30.0	ft2	1	\$6,725.31	\$6,725.31	\$6,636.33	\$3,318.17	\$9,954.50
IC-301	150.0	ft2	1	\$15,445.87	\$15,445.87	\$15,241.50	\$7,620.75	\$22,862.25
TV-401	2,014.5	kg/h	1	\$131,570.81	\$131,570.81	\$128,258.00	\$64,129.00	\$192,387.00
B-301A/B			2			\$43,464.75	\$21,732.37	\$130,394.24
B-401A/B			2			\$107,383.49	\$53,691.75	\$322,150.48
CH-301	4,657.5	BTU/h	1	\$518,206.46	\$518,206.46	\$51,135.00	\$10,227.00	\$61,362.00
CA-401			1			\$52,157.70	\$26,078.85	\$78,236.54
DA-301			1			\$52,669.05	\$13,167.26	\$65,836.31
V-301A/B			2			\$26,845.87	\$10,738.35	\$75,168.44
V-201	39,672.3	ft3/h	1	\$18,718.38	\$18,718.38	\$18,470.71	\$7,388.28	\$25,859.00
TOTAL								USD 1,389,958.71
TOTAL								MXN 17,652,475.67

⁶ CEPSI: Chemical Engineering Plant Cost Indicator, para Equipos. Tomado de la revista Chemical Engineering, actualizado a Jul-2012.

Tabla 26 . Costo del terreno para 2,000 m². Elaboración propia.

Costos de Terreno		
Costo Unitario	\$2,500.00	MxN/m ²
Área Total	2000	m ²
Costo del Terreno	\$5,000,000.00	MxN
Costo del Terreno	\$393,700.79	USD

Tabla 27 . Costos Totales del Proyecto. Elaboración propia.

Costos Totales del Proyecto		
Concepto	USD	MxN
Costo Total de Equipos	\$1,641,958.71	\$20,852,875.67
Costo de PLC Proceso	\$67,000.00	\$850,900.00
Costo de PLC de Lógica y Control	\$85,000.00	\$1,079,500.00
Costo Instrumentos	\$100,000.00	\$1,270,000.00
Costo del Terreno	\$393,700.79	\$5,000,000.00
Costo Total del Proyecto	\$2,035,659.50	\$25,852,875.67

Tabla 28 . Precio de venta de biocarbón y energía eléctrica excedente . Elaboración propia.

Precio del Biocarbón		
Concepto	MxN/kg	USD/kg
Precio Biocarbón	\$35.00	\$2.76

Precio de Energía Eléctrica		
Concepto	MxN/kW	USD/kW
Precio Energía Eléctrica	\$1.70	\$0.134

Tabla 29 . Cálculo del Flujo de Efectivo por producción de biocarbón. Elaboración propia.

Producción de Biocarbón		
Horas Trabajadas al día	24	h/día
Total de días de Producción	299	días/año
Biocarbón	32	kg/h
Biocarbón Producido	229,632	kg/año
	MxN/año	USD/año
Flujo de Efectivo por Biocarbón	\$8,037,120.00	\$632,844.09

Tabla 30. Cálculo del Flujo de Efectivo por producción de electricidad. Elaboración propia.

Producción de Energía Eléctrica		
Energía Producida	1,712,911.2	<i>kW/año</i>
	MxN/año	USD/año
Flujo de Efectivo por Electricidad	\$2,911,949.04	\$229,287.33

Tabla 31. Flujo Neto de Efectivo para la planta de biocarbón. Elaboración propia.

Flujo Neto de Efectivo		
	MxN/año	USD/año
Flujo Neto Total de Efectivo	\$10,949,069.04	\$862,131.42

Tabla 32 . Gastos del proyecto. Elaboración propia.

Gastos Anuales del Proyecto		
Concepto	MxN/año	USD/año
Gastos de Mantenimiento⁷	\$2,843,816.32	\$223,922.55
Gastos Administrativos⁸	\$1,524,900.00	\$120,070.87
Gasto Total	\$4,368,716.32	\$343,993.41

⁷ Se considera el 11% del costo total del proyecto por operación severa (Peters & Timmerhaus, 1991, pág. 203).

⁸ Se considera el 17% del costo total del proyecto por 25,415 Horas Hombre/año en operación (Peters & Timmerhaus, 1991, págs. 197-207).

10.8. ANÁLISIS DEL COSTO DEL PROYECTO

10.8.1. CALCULANDO ROI DEL PROYECTO

De acuerdo a la ecuación 10.2 mostrada en este capítulo, se obtienen los siguientes resultados en la Tabla 33.

Tabla 33 . Cálculo de ROI del proyecto. Elaboración propia.

ROI					
ROI (año 1)	-61.85	%	ROI (año 6)	128.93	%
ROI (año 2)	-23.69	%	ROI (año 7)	167.08	%
ROI (año 3)	14.46	%	ROI (año 8)	205.24	%
ROI (año 4)	52.62	%	ROI (año 9)	243.39	%
ROI (año 5)	90.77	%	ROI (año 10)	281.54	%

10.8.2. RESULTADO GRÁFICO DE ROI DEL PROYECTO

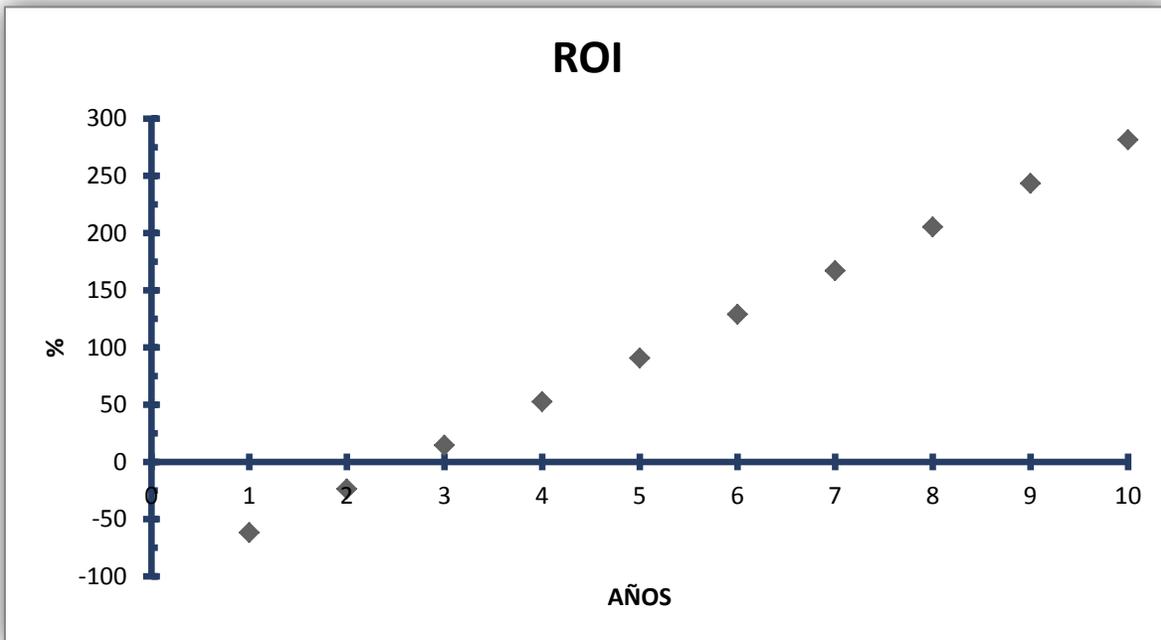


Ilustración 27 . Porcentaje de ROI en función de la cantidad de años del proyecto. Elaboración propia.

10.8.3. CALCULANDO VPN DEL PROYECTO

De acuerdo a la ecuación 10.1 mostrada en este capítulo, y considerando una tasa de interés del 15% anual, se obtienen los siguientes resultados en la Tabla 34.

Tabla 34 . Cálculo del VPN del proyecto. Elaboración propia.

Número de Años	Flujo de Efectivo MxN/año	Flujo de Efectivo USD/año	VPN MxN	VPN USD
0	\$0.00	\$0.00	-\$25,852,875.67	-\$2,035,659.50
1	\$10,949,069.04	\$862,131.42	\$2,776,701.16	\$218,637.89
2	\$11,496,522.49	\$905,237.99	\$2,828,476.21	\$222,714.66
3	\$12,043,975.94	\$948,344.56	\$2,819,504.06	\$222,008.19
4	\$12,591,429.40	\$991,451.13	\$2,764,750.95	\$217,696.93
5	\$13,138,882.85	\$1,034,557.70	\$2,676,312.38	\$210,733.26
6	\$13,686,336.30	\$1,077,664.28	\$2,563,907.39	\$201,882.47
7	\$13,686,336.30	\$1,077,664.28	\$2,229,484.69	\$175,549.98
8	\$13,138,882.85	\$1,034,557.70	\$1,759,718.83	\$138,560.54
9	\$12,591,429.40	\$991,451.13	\$1,374,569.85	\$108,233.85
10	\$12,043,975.94	\$948,344.56	\$1,059,956.01	\$83,461.10
11	\$12,043,975.94	\$948,344.56	\$921,700.88	\$72,574.87
12	\$12,043,975.94	\$948,344.56	\$801,479.03	\$63,108.58
13	\$12,043,975.94	\$948,344.56	\$696,938.28	\$54,877.03
14	\$12,043,975.94	\$948,344.56	\$606,033.29	\$47,719.16
15	\$12,043,975.94	\$948,344.56	\$526,985.47	\$41,494.92

10.8.4. RESULTADO GRÁFICO DEL VPN DEL PROYECTO.

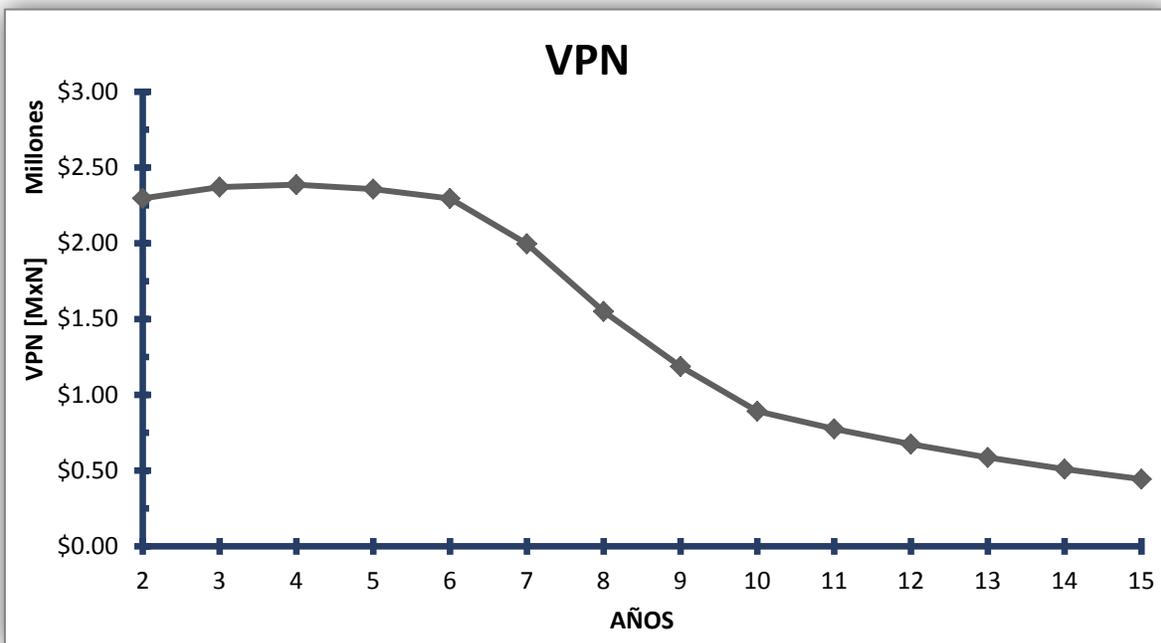


Ilustración 28 . VPN en función del número de años del proyecto. Elaboración propia.

10.8.5. CALCULANDO PRI DEL PROYECTO

De acuerdo a la ecuación 10.3 mostrada en este capítulo, se obtienen los siguientes resultados en la Tabla 33.

Tabla 35 . Cálculo del PRI del proyecto. Elaboración propia.

Año	PRI MxN	PRI USD		Año	PRI MxN	PRI USD
0	-\$25,852,875.67	-\$2,035,659.50		6	\$32,085,675.87	\$2,526,431.17
1	-\$22,659,669.33	-\$1,784,225.93		7	\$43,034,744.91	\$3,388,562.59
2	-\$11,710,600.29	-\$922,094.51		8	\$53,983,813.95	\$4,921,354.95
3	-\$761,531.25	-\$59,963.09		9	\$64,932,882.99	\$5,112,825.43
4	\$10,187,537.79	\$802,168.33		10	\$75,881,952.03	\$5,974,956.85
5	\$21,136,606.83	\$4,310,657.10		11	\$86,831,021.07	\$6,837,088.27

10.8.6. RESULTADO ITERATIVO Y GRÁFICO DEL PRI DEL PROYECTO

Tabla 36 . Cálculo iterativo del PRI del proyecto. Elaboración propia.

		<i>Solver</i>	
Función Objetivo	0	Función Objetivo:	
\$2,035,659.50	USD	$[FEA - (CTP + GA) - PRI] = 0 \quad [6.9]$	
\$25,852,875.67	MxN		
Tiempo de Recuperación		Donde:	
5.4	Años	FEA = Flujo de Efectivo Anual	
65	Meses	CTP = Costo Total del Proyecto	
		GA = Gasto Anual	

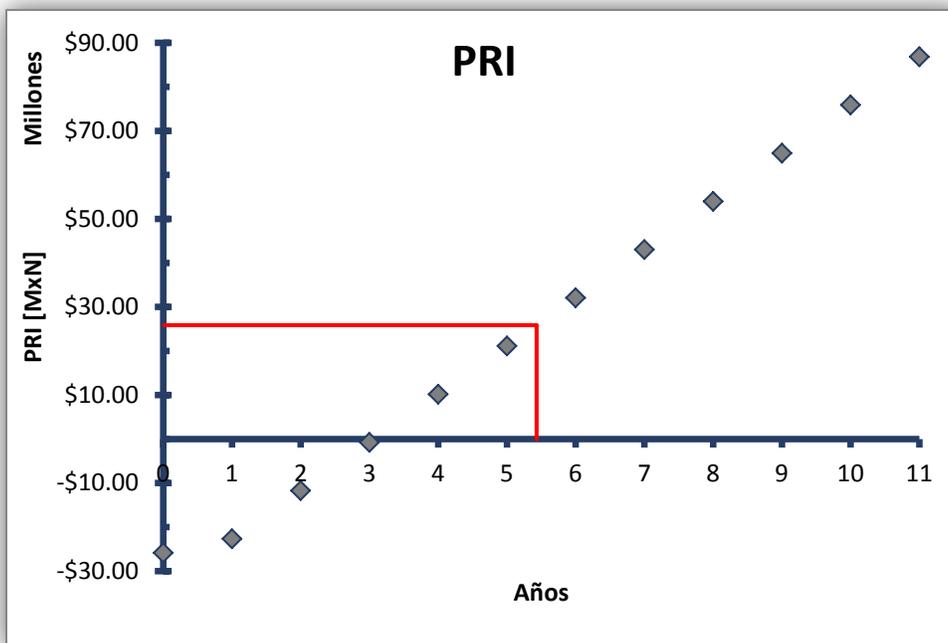
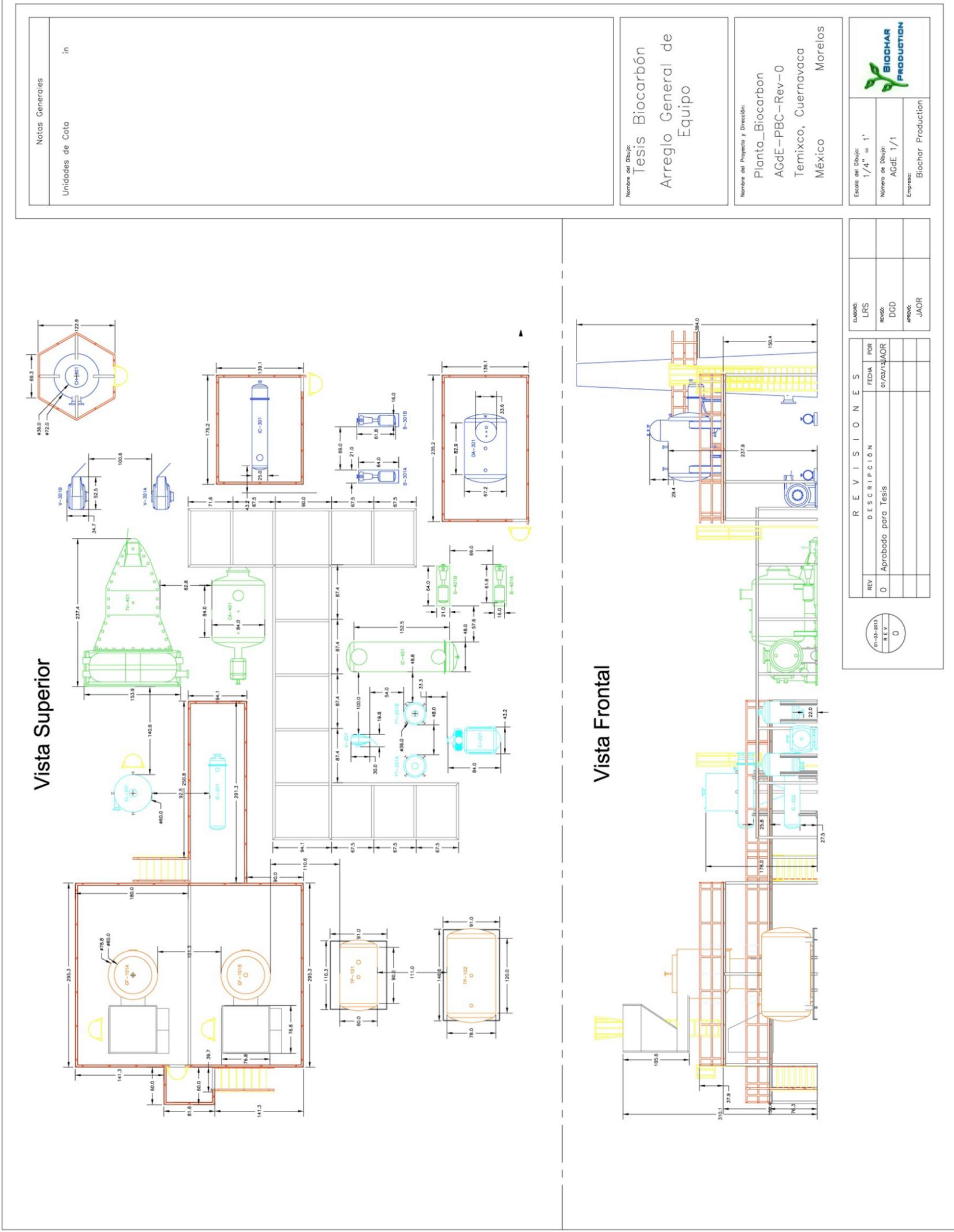


Ilustración 29 . PRI (en MxN) en función del número de años. Elaboración propia

C A P Í T U L O X I

M A Q U E T A 3 D

11.1. ARREGLO GENERAL DE EQUIPOS (LAYOUT)

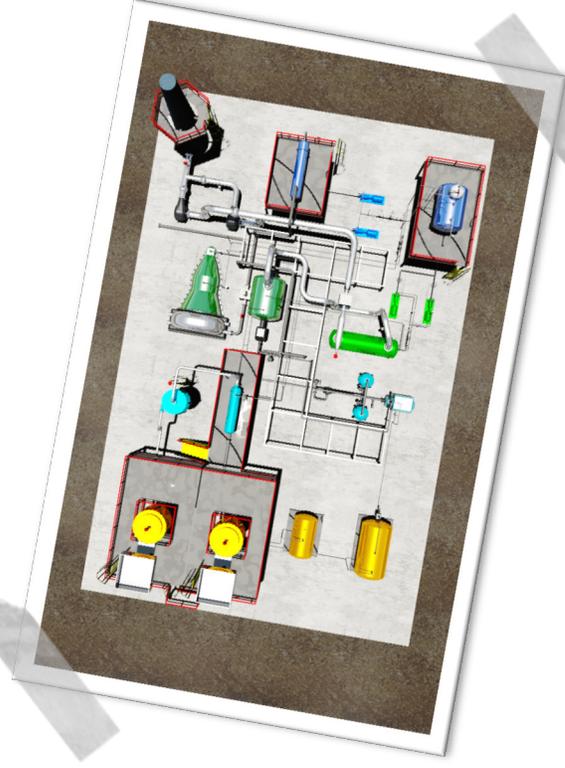


11.2. MAQUETA 3D









CAPÍTULO XII

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

12.1. CONCLUSIONES

Al desarrollar la Ingeniería Básica para una planta de producción de biocarbón a partir de la gasificación de biomasa se alcanzaron satisfactoriamente los objetivos ambiciosos propuestos en un principio, dando una posible solución al deterioro ambiental provocado por la liberación de CO₂ y obteniendo una planta autosustentable de la que se consigue un producto con propiedades de mejorar la fertilidad del suelo.

La viabilidad técnico-económica del presente proyecto es beneficiosa, ya que en México hacen falta proyectos de este tipo para el desarrollo y prosperidad del país, sobre todo en beneficio del medio ambiente. Además de proporcionar una fuente de empleo por lo menos a 15 personas durante la construcción, 5 personas directas durante la operación y 10 empleos indirectos.

Se debe mencionar que al finalizar el proyecto, se logró generar un sistema de producción de biocarbón mediante la tecnología de gasificación, utilizando como materia prima los residuos agroforestales provenientes de aserraderos. Para este fin, se desarrollaron los entregables principales que comprenden la Ingeniería Básica de un proyecto, dentro de los límites de batería que se establecieron.

Los entregables desarrollados para este proyecto, son un reflejo del trabajo realizado para lograr con éxito el alcance planteado, que además sustentan los conocimientos de ingeniería puestos en práctica.

Durante el desarrollo del sistema tecnológico, se empleó un ciclo Rankine de potencia con la finalidad de producir energía eléctrica que abasteciera el suministro eléctrico de la planta, logrando con esto un sistema autosustentable. Cumpliendo así el objetivo de hacer el proyecto energéticamente autosuficiente.

La evaluación económica desarrollada para el proyecto planteado demostró que el proyecto es viable técnica y económicamente, ya que a partir de los resultados obtenidos en el análisis de inversión a través de los tres criterios principales para la selección de la inversión: VPN, ROI, PRI. Se puede concluir que la inversión total del proyecto es de aproximadamente 25,852,875.67 MxN de los cuales el 20%, equivalentes a 5,170,575.67 MxN, serían de inversión propia y el 80% de la Inversión restante, es decir 20,682,300.00 MxN correrá a cargo de fondos externos; dando un flujo de efectivo por aproximadamente 10,949,069.00 MxN, con un crecimiento anual esperado de entre el 3-5%.

De acuerdo a los resultados del VPN, se deduce que la inversión cumple con el objetivo financiero de maximizar la inversión, ya que desde el año 1 se comienzan a tener flujos de efectivo positivos, con crecimientos significativos a lo largo de los años.

Adicionalmente con el ROI, se puede decir que la inversión resulta atractiva debido a que tarda un periodo corto de tiempo (alrededor de 5.4 años), en el que la inversión total del proyecto comienza a recuperarse; comparando con otros proyectos de la misma envergadura y tamaño, resulta ser una opción muy atractiva a un mediano y largo plazo.

Pero sin duda, uno de los puntos más importantes y en el que la mayoría de los inversionistas pone mucha atención es el periodo de recuperación de inversión, y en este se confirma que la recuperación de la inversión es relativamente rápida en comparación a otros, ya que la inversión inicial es recobrada en un periodo no mayor a 6 años.

Así que lo mencionado anteriormente convierte a este proyecto en una opción altamente atractiva, y sobre todo muy rentable en el aspecto económico, y sumando otras virtudes que posee: ser un proyecto sustentable, ayuda a la reducción de las emisiones de CO₂ a la atmósfera y que es amigable con el medio ambiente por ser una tecnología limpia, y además generar beneficios para las comunidades aledañas. Definitivamente estas características lo convierten en un proyecto atrayente para la mayoría de los inversionistas.

Un proyecto de este tipo es una fuente de empleo que ofrece muchos beneficios a la zona donde se instale, porque se estima que la biomasa crea 135 puestos de trabajos directos por cada 10,000 usuarios, frente a los 9 que se crean utilizando petróleo o gas natural (Masera Cerutti, La bioenergía en México, 2011).

Solo resta decir que en un intento por contrarrestar el daño que le hemos causado al Planeta Tierra, que es nuestro hogar, se ha desarrollado una opción para poder equilibrar las emisiones de CO₂ al medio ambiente y así devolverle una pequeña pero significativa parte de lo que hemos hurtado.

Finalmente sólo resta decir que se debe poner en práctica este tipo de proyectos en México, ya que se obtendrían beneficios económicos y sobre todo ambientales al producir biocarbón en una planta con la tecnología de gasificación siendo completamente sustentable, eficiente.

12.2. RECOMENDACIONES

A continuación se presentan algunas recomendaciones a tener en cuenta en futuras etapas de ingeniería.

- » Comparar la eficiencia energética de la planta con la tecnología del ciclo Rankine de potencia contra una planta usando motores de combustión interna mediante el ciclo Brayton.
- » Analizar la posibilidad de usar basura orgánica como materia prima usando la tecnología expuesta en este proyecto, con la finalidad de desahogar los vertederos de basura en el país.
- » Buscar fuentes de inversión para este proyecto en México con la finalidad de hacer crecer y prosperar nuestro país.
- » Considerar la construcción de oficinas, enfermería, comedor y demás áreas que son necesarias para la operación de la planta, pero que no forman parte del alcance de esta Tesis, por lo que no se encuentran consideradas, en las bases de diseño, en los costos, ni en la maqueta 3D de esta Tesis debido a que se consideran Ingeniería de Detalle.
- » Para precisar el costo de la inversión con una aproximación de -10 +20% del costo total, se debe desarrollar la Ingeniería de Detalle, solicitando cotizaciones con las hojas de datos elaboradas en este proyecto.
- » Considerar la ingeniería para los servicios auxiliares.
- » Comparar una planta similar con tecnología de pirólisis.
- » Comparar la eficiencia energética de la planta al usar vapor de agua como agente gasificante en lugar de aire.
- » Estudiar la factibilidad técnico-económica de un módulo compacto para los hogares rurales, con el fin de producir su propio biocarbón con desperdicios agroforestales.

“LA MEJOR HERRAMIENTA DE UN INGENIERO NO ES UN MARTILLO, UN PLANO O UN SOFTWARE, ES... LA IMAGINACIÓN.”

B I B L I O G R A F Í A

- Aguilar Cruz, A. N., & Contreras Durán, J. J. (2008). *Beneficios Económicos, Ambientales y Sociales Asociados al uso de Tecnologías de Gasificación en el Tratamiento de Residuos Sólidos Urbanos en México*. México: Facultad de Química, UNAM.
- Alarcon Herrera, M. T. (2009). *Biomasa*. Chihuahua, México.
- API. (1997). *API Technical Data Book*. USA: API.
- Balderrama Castañeda, S., Luján Álvarez, C., & et. al. (2001). Factibilidad de generación de electricidad mediante gasificación de residuos de aserradero en el norte de México. *Redalyc, XVII(2)*, 67-84.
- Benjamin, T., & Soto, G. (2009). Evaluando la factibilidad del uso de biocarbón en Costa Rica. *Boletín Electronico CATIE*, 1-2.
- Bonilla Durán, A. (2007). *Panorama: CANARA*. Recuperado el 09 de Octubre de 2012, de Camara Nacional de Radio de Costa Rica:
http://www.canara.org/index.php?option=com_content&view=article&id=1205:el-biocarbón&catid=904:comentarios&Itemid=15
- Branan, C. (1976). *The Process Engineer's Pocket Handbook*. Houston: Gulf Publishing Company.
- Branan, C. (2006). *Soluciones Prácticas para el Ingeniero Químico*. México: McGraw-Hill.
- BUN-CA. (2002). *Manuales sobre Energía Renovable: Biomasa*. Costa Rica: BUN-CA.
- Castells, X. E., & Velo, E. (2012). *La Gasificación*. Madrid: Díaz de Santos.
- Cengel, Y. A., & Boles, M. A. (2009). *Termodinámica*. México: McGraw-Hill.
- Centro de Energías Renovables. (2000). *Combustión directa*. Recuperado el 18 de Octubre de 2012, de CER: <http://cer.gob.cl/tecnologias/biomasa/termoquimica/combustion-directa/>
- CRANE;. (1992). *Flujo de Fluidos en Válvulas, Accesorios y Tuberías*. México: McGraw-Hill.
- FAO. (1993). *Deposito de Documentos de la FAO*. Recuperado el 2012 de Octubre de 21, de Estudio FAO Montes 72: <http://www.fao.org/docrep/T0512S/T0512S00.htm>
- Fernández Muerza, A. (2006). *Biocarbón: La solución para el cambio climático*. Recuperado el 10 de Octubre de 2012, de NextFuel: <http://biodiesel.com.ar/?p=1302>
- FRESNO Valves. (16 de Enero de 2008). *Filtros de Grava y Arena Verticales*. Recuperado el 6 de Septiembre de 2012, de <http://www.fresnovalves.com/pdf/Media%20Book%20Spanish.pdf>
- Fuentes Hernández, A. C., & Recio Recio, Á. (2005). Propuesta de Diseño de un Horno-Reactor para Realizar la Pirólisis de la Cáscara de Arroz. *Tecnología Química, XXV(2)*, 87-97.

- González Martínez, A. C. (2007). La extracción y consumo de biomasa en México (1970-2003): integrando la leña en la contabilidad de flujos materiales. *Revista Iberoamericana de Economía Ecológica (REDIBEC)*, VI, 1.
- Greene, R. W. (1987). *Compresores*. España: McGraw-Hill.
- Grupo Guascor. (2009). *Guascor Bioenergía*. España, Álava.
- Howell, J. R., & Buckius, R. O. (1990). *Principios de Termodinámica para Ingeniería*. México: McGraw-Hill.
- IBI. (2007). *International Biochar Initiative*. Recuperado el 13 de Octubre de 2012, de <http://www.biochar-international.org/biochar>
- IDAE. (2007). *Biomasa: Gasificación*. España, Madrid.
- INEGI. (2012). *Censo Agropecuario 2007, VIII Censo Agrícola, Ganadero y Forestal*. Recuperado el 22 de Octubre de 2012, de <http://www.inegi.org.mx/>
- ISA. (1985). *Graphic Symbols for Process Displays*. North Carolina: ISA.
- Kenneth, J. (1989). *Bombas: Selección, Uso y Mantenimiento*. México: McGraw-Hill.
- Lesme Jaén, R. (2000). *Gasificación de Biomasa*. Cuba: Universidad de Oriente.
- Masera Cerutti, O. (2006). *La bioenergía en México: Un catalizador del desarrollo sustentable*. Mexico: Red Mexicana de Bioenergía.
- Masera Cerutti, O. (2007). *Perspectivas de la bioenergía en México*. México.
- Masera Cerutti, O. (2011). *La bioenergía en México*. México: Red Mexicana de Bioenergía.
- Masera, O. R., Aguillón, J., & Gamino, B. (2005). *Estimación del Recurso y Prospectiva Tecnológica de la Biomasa como Energético Renovables en México*.
- Masera, R., Aguillon, J., & Gamino, B. (s.f.).
- Míguez Tabarés, J. L., & Porteiro Fresco, J. (2007). *Energía de la biomasa*. España: López & Vinci.
- Miranda Guardiola, R., & Segovia Martínez, C. C. (2006). Pirólisis de llantas usadas: Estudio cinético. *Ingenierías (Facultad de Ciencias Químicas, UANL)*, IX(32), 8-16.
- Oraga, M., Berset, A., & Grünhut, E. (1987). *La Biomasa Forestal como Fuente de Energía Sistemas y Posibilidades*. San Martín: Departamento de Energía - INTI.
- Perry, R. H. (2005). *Manual del Ingeniero Químico*. Madrid: McGraw-Hill.
- Peters, M. S., & Timmerhaus, K. D. (1991). *Plant Design and Economics for Chemical Engineers*. Singapore: McGraw-Hill.
- Proenza Pérez, N., Cala Aiello, R., Luz Silveira, J., & Zanzi, R. (2006). Estudio termodinámico y dimensionamiento de un gasificador downdraft para un sistema de cogeneración compacto en comunidades aisladas. *Ciencias Exactas*, 53-62.

- Recio Miñarro, J. (2003). *Calculadora de Masas Moleculares*. Recuperado el 1 de Abril de 2012, de Químicaweb: http://www.quimicaweb.net/calculadoramm/calculadora_mm.html
- SEMARNAT, UNAM, INE & CIECO. (2008). *Análisis integrado de las tecnologías, el ciclo de vida y la sustentabilidad de las opciones y escenarios para el aprovechamiento de la bioenergía en México*. México: INE.
- Sierra Alcázar, D. B. (Enero de 2011). *Biocarb*. Recuperado el 28 de Febrero de 2013, de <http://biocarb.com.mx/>
- SMA. (2012). *Composición del aire*. Recuperado el 1 de Abril de 2012, de Secretaría del Medio Ambiente del Gobierno del Distrito Federal: <http://www.sma.df.gob.mx/sma/index.php?opcion=39&id=2#6>
- Soares, C. (2002). *Process Engineering Equipment Handbook*. New York: McGraw-Hill.
- Sofos Energía. (2010). *Energía*. Recuperado el 16 de Septiembre de 2012, de Sofos Energía: <http://www.sofos.es/wp-content/uploads/grafica-biomassa.png>
- Turégano, J., Velasco, M., & Gómez, T. (2012). *Universidad de Zaragoza*. Recuperado el 24 de Octubre de 2012, de TermoGraf: Simulador Termodinámico: <http://termograf.unizar.es/>
- Varios. (2000). *Guía para el control y prevención de la contaminación industrial: Rubro aserraderos y procesos de madera*. Santiago: Comisión Nacional del Medio Ambiente.
- Woods End Laboratories. (9 de Junio de 2009). *Article Archive*. Recuperado el 10 de Octubre de 2012, de Woods End Laboratories: <http://woodsend.org/2009/06/biochar-soil-plant-effects-lab-tests-stirr-questions/>