



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE QUÍMICA

T E S I S

M A N C O M U N A D A

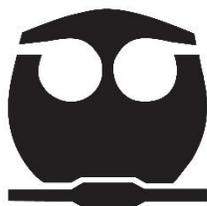
**DESARROLLO DE LA INGENIERÍA BÁSICA PARA UNA
PLANTA DE PRODUCCIÓN DE GAS DE SÍNTESIS (SYNGAS) A
PARTIR DE LA GASIFICACIÓN DE SUBPRODUCTOS
AGRÍCOLAS**

**QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE
INGENIERO QUÍMICO**

PRESENTAN

AXEL ALEXIS PÉREZ RUÍZ

DANIEL PIZANO GUTIÉRREZ



CIUDAD UNIVERSITARIA, CD. MX., 2018



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.

JURADO ASIGNADO:

PRESIDENTE: M. EN I. JOSÉ ANTONIO ORTIZ RAMÍREZ
VOCAL: ING. JUAN MARIO MORALES CABRERA
SECRETARIO: DR. MODESTO JAVIER CRUZ GÓMEZ
1ER. SUPLENTE: ING. CARLOS ÁLVAREZ MACIEL
2DO. SUPLENTE: M. EN C. SERGIO ADRIÁN GARCÍA GONZÁLEZ

SITIO DONDE SE DESARROLLÓ EL TEMA:

**EDIFICIO DE INGENIERÍA QUÍMICA, CONJUNTO E, CIUDAD
UNIVERSITARIA, COYOACÁN, C. P. 04510**

ASESOR DEL TEMA:

JOSÉ ANTONIO ORTIZ RAMÍREZ

SUSTENTANTE (S):

AXEL ALEXIS PÉREZ RUÍZ

DANIEL PIZANO GUTIÉRREZ

ÍNDICE DE CAPITULOS.

1. GENERALIDADES.....	10
1.1. INTRODUCCIÓN.....	10
1.2. ANTECEDENTES.....	14
1.3. JUSTIFICACIÓN.....	15
1.4. ALCANCE DEL PROYECTO.....	16
1.5. OBJETIVOS PARTICULARES.....	17
2. MARCO TEÓRICO.....	18
2.1. BIOMASA.....	18
2.1.1. ANTECEDENTES.....	18
2.1.2. ¿QUÉ ES LA BIOMASA?.....	19
2.1.3. CARACTERÍSTICAS DE LA BIOMASA.....	20
2.1.4. FUENTES DE BIOMASA.....	25
2.1.5. JUSTIFICACIÓN DE USO DE LA BIOMASA PARA EL PROCESO DE GASIFICACIÓN.....	27
2.2. BIOENERGÍA Y BIOCOMBUSTIBLES.....	28
2.2.1. ¿QUÉ ES LA BIOENERGÍA Y LOS BIOCOMBUSTIBLES?.....	28
2.2.2. CARACTERÍSTICAS DE LA BIOENERGÍA Y LOS BIOCOMBUSTIBLES.....	29
2.3.1. PROCESOS DE CONVERSIÓN DE BIOMASA EN BIOREFINERIAS.....	30
2.3.2. PROCESOS DE CONVERSIÓN TERMOQUÍMICOS.....	32
2.4. GASIFICACIÓN.....	34
2.4.1. UNA VISIÓN GENERAL.....	34
2.5. GAS DE SÍNTESIS (SYNGAS).....	36
2.6. APLICACIONES DEL GAS DE SÍNTESIS.....	37
2.6.1. SÍNTESIS DE COMBUSTIBLES FISCHER-TROPSCH.....	38
2.6.1. PRODUCCIÓN DE HIDRÓGENO.....	40

2.6.2.	<i>PRODUCCIÓN DE CALOR Y ELECTRICIDAD.</i>	41
2.6.3.	<i>PRODUCCIÓN DE METANOL.</i>	43
2.6.4.	<i>PRODUCCIÓN DE AMONÍACO.</i>	44
2.7.	PROCESOS DE LIMPIEZA DEL GAS DE SÍNTESIS.	45
2.8.	CICLO COMBINADO Y CICLO DE BRAYTON.	46
2.8.1.	<i>CICLO TERMODINÁMICO COMBINADO.</i>	47
2.8.2.	<i>CICLO DE BRAYTON.</i>	48
2.8.3.	<i>PARÁMETROS DEL CICLO DE BRAYTON.</i>	49
2.8.4.	<i>VENTAJAS Y DESVENTAJAS DE UNA TURBINA DE GAS.</i>	50
3.	BASES DE DISEÑO.	52
3.1.	MATERIALES.	52
3.1.1.	<i>MATERIAS PRIMAS.</i>	52
3.1.2.	<i>MATERIAS DE PROCESO.</i>	52
3.1.3.	<i>SERVICIOS AUXILIARES.</i>	52
3.1.4.	<i>PRODUCTOS Y SUBPRODUCTOS.</i>	53
3.1.5.	<i>CARACTERÍSTICAS DE PRODUCTOS.</i>	53
3.1.6.	<i>LÍMITES DE PUREZA.</i>	53
3.1.7.	<i>PROPIEDADES COMUNES.</i>	54
3.2.	LUGAR DE ESTABLECIMIENTO.	54
3.2.1.	<i>DATOS DE UBICACIÓN.</i>	54
3.2.2.	<i>DATOS GENERALES.</i>	55
3.2.3.	<i>DATOS METEOROLÓGICOS.</i>	56
3.2.4.	<i>VÍAS DE ACCESO Y COMUNICACIÓN.</i>	56
3.2.5.	<i>JURISDICCIÓN.</i>	56
3.3.	CAPACIDAD DE LA PLANTA.	57
3.3.1.	<i>GENERAL.</i>	57
3.3.2.	<i>PRODUCCIÓN ANUAL.</i>	57
3.3.3.	<i>PRODUCCIÓN DE GAS DE SÍNTESIS.</i>	57

3.3.4.	<i>PROCESAMIENTO DE BIOMASA</i>	58
3.3.6.	<i>SOBREDISEÑO DE EQUIPOS</i>	58
3.3.7.	<i>CORROSIÓN</i>	58
3.4.	CONDICIONES DE PROCESO	59
3.4.1.	<i>TEMPERATURA Y PRESIÓN</i>	59
3.4.2.	<i>MATERIALES DE CONSTRUCCIÓN PARTICULARES</i>	59
3.4.3.	<i>PRECAUCIONES ESPECIALES DE SEGURIDAD</i>	59
3.4.4.	<i>CONTENCIONES Y SEGURIDAD</i>	60
3.5.	NORMATIVIDAD APLICABLE	60
3.6.	SERVICIOS AUXILIARES	61
3.7.	EQUIPOS DE RELEVO	62
3.8.	ESTUDIO ECONÓMICO	62
4.	CRITERIOS DE DISEÑO	63
4.1.	<i>GASIFICADOR DOWNDRAFT</i>	63
4.2.	<i>COMPRESORES</i>	64
4.3.	<i>BOMBAS</i>	65
4.4.	<i>CALDERA ACUOTUBULAR</i>	66
4.5.	<i>INTERCAMBIADORES DE CALOR</i>	67
4.6.	<i>TANQUES DE ALMACENAMIENTO</i>	69
4.6.1.	<i>TANQUE DE ALMACENAMIENTO DE AGUA</i>	69
4.6.2.	<i>TANQUE DE ALMACENAMIENTO DE SYNGAS</i>	71
4.6.3.	<i>TANQUE DE ALMACENAMIENTO DE GAS NATURAL</i>	72
5.	DIAGRAMA DE FLUJO DE PROCESO	73
5.1.	<i>DFP</i>	73
5.2.	<i>LISTA DE EQUIPOS</i>	74
5.3.	<i>BALANCE DE MATERIA Y ENERGÍA</i>	76
6.	DESCRIPCIÓN DE PROCESO	81

6.1.	ÁREA 100: PRETRATAMIENTO Y GASIFICACIÓN.....	81
6.2.	ÁREA 200: LIMPIEZA Y ADECUACIÓN DE GAS DE SÍNTESIS.....	83
6.3.	ÁREA 300: CICLO DE BRAYTON.....	84
6.4.	ÁREA 400: APROVECHAMIENTO DE ENERGÍA.....	85
7.	MEMORIAS DE CÁLCULO.....	87
7.1.	GASIFICADOR <i>DOWNDRAFT</i> GF-101 A/B.....	87
7.2.	INTERCAMBIADOR DE CALOR C&T EC-202.....	89
7.3.	SEPARADOR CICLÓNICO CL-201.....	91
7.4.	CALDERA ACUOTUBULAR CA-301.....	93
7.5.	DIÁMETRO DE TUBERÍAS.....	96
8.	HOJAS DE DATOS.....	98
8.1.	GASIFICADOR <i>DOWNDRAFT</i> GF-101 A/B.....	98
8.2.	CALDERA ACUOTUBULAR CA-301.....	100
9.	DIAGRAMA DE TUBERÍA E INSTRUMENTACIÓN.....	102
9.1.	DTI-001.....	102
9.2.	DTI-002.....	103
9.3.	LISTA DE LÍNEAS.....	104
9.3.	LISTA DE INSTRUMENTOS.....	108
10.	FILOSOFÍA DE OPERACIÓN Y CONTROL.....	111
10.1.	ÁREAS 100 y 200.....	111
10.2.	ÁREAS 300 y 400.....	114
11.	EVALUACIÓN ECONÓMICA.....	117
11.1.	ESTUDIO DE MERCADO.....	117
11.1.1.	<i>ENTORNO NACIONAL</i>	117
11.1.2.	<i>COMPETENCIA DE MERCADO</i>	118
11.1.3.	<i>CONSUMIDORES DE SYNGAS</i>	119
11.2.	ESTIMACIÓN DE COSTOS DE EQUIPOS.....	120

11.3.	ESTIMACIÓN DE COSTOS.....	121
11.3.1.	<i>ESTIMACIÓN DE PRECIOS DE VENTA.....</i>	122
11.4.	EVALUACIÓN DE FLUJO DE EFECTIVO.	124
11.4.1.	<i>CALCULO DE ROI.....</i>	124
11.4.2.	<i>CALCULO DE VPN.....</i>	125
11.4.3.	<i>CALCULO DE PRI.....</i>	127
12.	LAYOUT.....	130
13.	CONCLUSIONES.....	131
14.	BIBLIOGRAFÍA.....	133

ÍNDICE DE TABLAS.

Tabla 1. Tipos de Biomasa (Fuente: RWEDP 2002).....	21
Tabla 2: Composición típica de la Biomasa (Fuente: RWEDP 2002).	22
Tabla 3: Poder Calorífico de algunos tipos de Biomasa (Fuente: RWEDP 2002).	24
Tabla 4: Características y condiciones de Gasificadores.	33
Tabla 5: Parámetros de funcionamiento del Ciclo de Brayton.	49
Tabla 6. Reacciones de Gasificación (Castello Belmar, A. M.).....	63
Tabla 7. Relación agente gasificante y Poder Calorífico de Syngas.....	64
Tabla 8. Ubicación de fluido dentro de Intercambiadores de coraza y tubos.	69
Tabla 9. Relación tipo de tanque y Presión del líquido (Agua).	70
Tabla 10. Relación tipo de tanque capacidad (Syngas).....	71
Tabla 11. Relación tipo de tanque capacidad (Gas Natural).....	72
Tabla 12. Lista de equipos y condiciones de operación.	74
Tabla 13. Selección de Diámetro de Tuberías.	96
Tabla 14. Lista y características de Líneas.	104
Tabla 15. Instrumentos locales accesibles.	108
Tabla 16. Instrumentos en línea.....	109
Tabla 17. Instrumentos accesibles con display.....	110
Tabla 18: Estimación de costos de equipos.	120
Tabla 19: Estimación Costo del Proyecto.	121
Tabla 20: Estimación de gastos Anual.	122
Tabla 21: ROI vs Años.....	124
Tabla 22: Calculo del VPN en función al flujo de efectivo estimado.	126
Tabla 23: Calculo del PRI en MXN y USD.	127

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES.

Ilustración 1. Ciclo de obtención de la Biomasa. (Fuente: Sofos Energía, 2010)	20
Ilustración 2. Gráfica de aplicación Proceso Fischer-Tropsch.....	39
Ilustración 3. Diagrama de un Ciclo combinado (Smith, Van Ness).....	49
Ilustración 4. Localización Satelital de las dos posibles ubicaciones.....	54
Ilustración 5. Localización A (Vista frontal).....	55
Ilustración 6. Localización B (Vista frontal).....	55
Ilustración 7: ROI del proyecto en función de los años.....	125
Ilustración 8: Representación del VPN en función de los años.	127
Ilustración 9: Grafica del PRI.	129

1. GENERALIDADES.

1.1. INTRODUCCIÓN.

Actualmente hay un gran interés por el uso de la biomasa como fuente de energía renovable, debido a que existe en grandes cantidades en gran parte del mundo al mismo tiempo que no genera gases contaminantes y su uso contribuye al desarrollo de un medio ambiente sustentable. Muchos factores hacen que hoy en día se estén desarrollando tecnologías para la generación de bioenergía y biocombustibles basadas en el uso de la biomasa y que consecuentemente permitan a largo plazo la sustitución de los combustibles fósiles. Algunos de los principales problemas, en lo que al uso de combustibles fósiles se refiere, es su evidente agotamiento a nivel mundial. Por tal motivo los proyectos relacionados con el aprovechamiento de la biomasa como fuente de energía renovable resultan importantes para su desarrollo y puesta en marcha.

El presente proyecto tiene por objeto evaluar económicamente la producción de gas de síntesis, también llamado *Syngas*, a partir del proceso de gasificación de biomasa, particularmente subproductos agrícolas como el olote de maíz, paja de maíz y bagazo de caña. El desarrollo de este proyecto se encuentra basado en una serie de documentos que, de acuerdo al lenguaje coloquial usado en la Ingeniería de Proyectos, se denominan “entregables” en los cuales se encuentra expuesta toda la información relacionada con la Ingeniería Conceptual e Ingeniería Básica correspondiente al proyecto de la planta de gasificación.

Una gran ventaja de la gasificación de biomasa es su versatilidad, pues se obtiene energía en el momento que se requiera, además de que es eficiente en la producción de energía tanto eléctrica como térmica. Particularmente en este trabajo, el proceso de gasificación de biomasa estará enfocado a la producción de gas de síntesis, como producto principal, siendo además un precursor para la producción

de Amoníaco y Metanol por ejemplo. La biomasa en forma de subproductos agrícolas (olote de maíz, paja de maíz y bagazo de caña) en muchas ocasiones es considerada como desecho, su tratamiento final para desecho no es el apropiado, por tal motivo resulta de gran interés conocer qué se puede hacer con este tipo de biomasa para lograr un aprovechamiento máximo de este recurso y obtener beneficios del mismo.

En la obtención del gas de síntesis a partir de la gasificación de biomasa, se obtiene como co-producto el biocarbón, el cual puede ser aprovechado en la agricultura para mejorar la fertilidad del suelo. En el caso del gas de síntesis, este tiene que pasar por un proceso de limpieza con el fin de adecuarlo a las condiciones necesarias para su utilización en procesos de interés o como materia base para la generación de energía térmica o eléctrica para autoconsumo dentro de la misma planta. Para fines de este proyecto se describirá un proceso particular para la limpieza del gas de síntesis y su posterior uso para la generación de energía eléctrica y térmica.

Los entregables son de vital importancia para futuras fases de desarrollo en los proyectos de ingeniería, dichos documentos tienen que estar fundamentados con información sólida y confiable respecto del tema en desarrollo, así mismo el conocimiento de cada entregable y sus características son importantes para ofrecer un trabajo bueno y de calidad.

A continuación se presenta una descripción breve de los entregables que conforman la Ingeniería Básica de este proyecto, dicha descripción se puede ver aplicada en las secciones correspondientes del proyecto.

- **Bases de Diseño:** Este documento es una recopilación de temas que tienen como fin determinar los límites del proyecto, en este documento se establece el lugar donde la planta será construida, así como las condiciones climatológicas que tiene el mismo lugar, también lleva una serie de

características previamente establecidas como la normatividad a seguir, algún tipo específico de material a ocupar para construcción. Y por último contiene la materia prima a ocupar y los productos a obtener del proceso seleccionado.

- **Criterios de Diseño:** En los criterios de diseño se establecen algunas condiciones de proceso, el objetivo de este entregable es investigar sobre los equipos a utilizar y determinar las temperaturas y presiones de operación que a fines de proyecto apoyan en los cálculos a realizar y proporcionan un panorama más amplio del proceso con el que se trabaja.
- **Diagrama de Flujo de Proceso (DFP):** Es una representación gráfica del proceso, este contiene los equipos con los que se trabajara así como las conexiones encontradas entre los equipos, en este diagrama no se tiene tanto detalle como en el (DTI) pero sirve para darnos una vista amplia del proceso y las reacciones y transformaciones que se llevan a cabo dentro de una planta.
- **Lista de Equipos:** es un listado en el que se incluyen todos los equipos que intervienen en el proceso (Bombas, torres, calderas, tanques, etc.), la cual incluye las condiciones de temperatura y presión en la cual los equipos trabajan, también contiene una clave con la cual puedes localizar al equipo en el DFP y en la descripción del Proceso.
- **Balance de Materia y Energía:** Ambos balances son una serie de cálculos que contienen: la cantidad de materia transportada por las líneas o tuberías de la planta y también la cantidad de calor transferido en el proceso, estos balances nos ayudan a estimar la producción y las características del producto obtenido.

- **Descripción del Proceso:** Es una descripción detallada del proceso. Para facilitar algunas descripciones se dividen por áreas dependiendo la función de cada área y el proceso en general que se siga en esa zona.
- **Memorias de Cálculo:** Son la descripción de los cálculos realizados para obtener los datos de flujo, presión, temperatura, capacidad de los tanques, estas memorias deben ser detalladas con el fin de favorecer revisiones.
- **Hojas de Datos de Equipo:** Se trata de una serie de documentos técnicos en los cuales se hace mención de la información requerida en el DTI así como especificaciones relevantes respecto al equipo en particular. Información como: Condiciones máximas y mínimas de presión, temperatura y flujo, así como material de construcción del equipo, es un ejemplo de lo que requiere llevar este tipo de entregable.
- **Diagrama de Tubería e Instrumentación (DTI):** Consiste en una representación gráfica de la secuencia de equipos, tuberías y accesorios que conforman una sección de la planta. La información presentada en este documento debe ser muy específica además de estar codificada de manera correcta a fin de poder tener una visualización ante posibles escenarios que se puedan presentar. Como complemento de este entregable, se debe realizar una lista de líneas e Instrumentos, cada una por separado, en ambas listas se recupera toda la información expuesta en el Diagrama de Tubería e Instrumentación a manera de símbolos, ambos complementos son importantes ya que facilitan la lectura del DTI permitiendo así una localización rápida de alguna tubería, instrumento o equipo en particular.
- **Filosofía de Operación y Control:** En este entregable se realiza una descripción detallada del funcionamiento de la planta con los instrumentos de medición y control, tomando como base el DTI, también se mencionan las etapas de arranque, operación y paro de manera normal, así como paro de

emergencia. La importancia de la filosofía de operación y control radica en que lo mencionado en ella debe concordar con lo expuesto en el DTI.

- **Plano de Localización General (PLG o *Layout*):** Es un dibujo a escala de una planta, en el cual se encuentran perfectamente distribuidos y localizados todos y cada uno de los elementos de una planta como son: Equipos, áreas funcionales, caminos de acceso, racks de tuberías y estructuras principales.

1.2. ANTECEDENTES.

En los últimos años las reservas de combustibles fósiles en México han disminuido considerablemente, eso aunado a una mala administración de los recursos no renovables, hace que sea preponderante la búsqueda de nuevas alternativas para la generación de energía; ya sea un combustible o energía calorífica, pueden ocuparse en los diferentes Procesos de la industria, estas alternativas son conocidas como energías renovables.

Las energías renovables, son aquellas cuya fuente puede volver a emplearse en más de una ocasión, por lo que se pueden considerar como inagotables. En el caso de los combustibles fósiles, el problema que encontramos es que la cantidad de elementos con los que cuenta inmediatamente es finita, ya que su futuro se proyecta en un escenario donde este tipo de combustible sea escaso llegando al punto que en algún momento se puedan agotar. Eso junto con la poca disposición del recurso en algunas zonas de México y del mundo. Existen zonas con grandes yacimientos de petróleo, pero también existen zonas que no cuentan con este recurso. La alternativa es encontrar una opción viable y autosustentable. Existen diferentes tipos de energías renovables: La solar, la eólica (generación de energía a partir del viento), la geotérmica y la biomasa.

La biomasa es una alternativa sustentable y se puede emplear para generar nuevas formas de producir energía. Existen diferentes tipos de biomasa y cada tipo tiene un proceso diferente de obtención de energía, por lo tanto los productos de cada Proceso también tienen diferentes usos.

Alrededor del mundo, ya se empezaron a tomar medidas para que en el momento en que los combustibles fósiles se agoten, se puedan tener diferentes opciones para generar combustibles a partir de la biomasa.

Este proyecto supone el diseño de una planta de producción de Gas de Síntesis para la generación de energía eléctrica y térmica. El aprovechamiento de residuos agrícolas ha adquirido cada vez mayor importancia debido al aumento en los precios de los combustibles fósiles. Existen dos aplicaciones principales: combustión o Gasificación.

1.3. JUSTIFICACIÓN.

La situación actual en el mundo lleva a la sociedad a buscar alternativas sustentables tanto económica como ambientalmente, esto quiere decir que la viabilidad de los proyectos ya no solo radica en los beneficios monetarios que se obtienen, también cae un peso importante en el impacto que una planta puede tener en los diferentes sectores, tanto para la población que radica a los alrededores como el servicio y beneficios que una planta de esta índole pueda ofrecer ambientalmente.

En este proyecto se busca crear una planta para generar un impacto ambiental positivo, disminuir un poco el uso de combustibles fósiles y transformar la biomasa para buscar nuevas formas de obtener energía.

1.4. ALCANCE DEL PROYECTO.

Se desarrollará la Ingeniería Básica para una planta de producción de gas de síntesis (*Syngas*) a partir de la gasificación de biomasa, particularmente subproductos agrícolas, para lo cual se elaboraran los entregables correspondientes, incluyendo un estimado económico que se limitara exclusivamente al área de proceso, excluyendo áreas generales como por ejemplo almacén, oficinas, estacionamiento, con un estimado de costos Clase V en un rango de -25 + 30% basado en el costo total para conocer la rentabilidad del proyecto.

La lista de entregables a realizar se describe 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:
 - o Gasificador *Downdraft*
 - o Caldera Acuotubular
 - o Separador ciclónico
 - o Intercambiador de Calor C&T
- Hojas de Datos de Equipo
 - o Gasificador *Downdraft*
 - o Caldera Acuotubular
- Diagrama de Tubería e Instrumentación (DTI)
- Filosofía de Operación y Control
- Plano de Localización General (PLG o *Layout*)

1.5. OBJETIVOS PARTICULARES.

- Crear un sistema de producción de gas de síntesis a partir de la gasificación de subproductos agrícolas (olote de maíz).
- Realizar un estimado de costos para la planta de producción de Syngas a partir de la gasificación de biomasa.
- Desarrollar los entregables establecidos en el alcance del proyecto dentro de los límites de batería establecidos.
- Establecer un proceso de generación de energía eléctrica y térmica para el autoconsumo de la planta de proceso.

2. MARCO TEÓRICO.

2.1. BIOMASA.

2.1.1. ANTECEDENTES.

Desde principios de la historia de la humanidad la biomasa ha sido una fuente energética esencial para el hombre, si bien es cierto que con la llegada de los combustibles fósiles este recurso energético perdió importancia en el mundo industrial. La biomasa ha sido el primer combustible empleado por el hombre y el principal hasta la revolución industrial. Se utilizaba para cocinar, para calentar el hogar, para hacer cerámica y, posteriormente, para producir metales y para alimentar las máquinas de vapor. Fueron precisamente estos nuevos usos que progresivamente requerían mayor cantidad de energía en un espacio cada vez más reducido, los que promocionaron el uso del carbón como combustible sustitutivo, a mediados del siglo XVIII.

Desde ese momento se empezaron a utilizar otras fuentes energéticas más intensivas (con un mayor Poder Calorífico), y el uso de la biomasa fue bajando hasta mínimos históricos que coincidieron con el uso masivo de los derivados del petróleo y con unos precios bajos de estos productos.

Sin embargo, actualmente, debido al carácter renovable y no contaminante que tiene y al papel que puede jugar en el momento de generar empleo y activar la economía de algunas zonas rurales, hacen que la biomasa sea considerada una clara opción como fuente energética en diferentes aplicaciones industriales y domésticas.

2.1.2. ¿QUÉ ES LA BIOMASA?

La biomasa está compuesta por toda la materia orgánica, que pueda convertirse en energía. Puede proceder de diferentes fuentes, tanto de la agricultura como los aserraderos y de los residuos urbanos. Analizando diferentes definiciones de biomasa, podemos llegar a establecer una propia:

El término biomasa, se refiere a toda la materia orgánica que proveniente de árboles, plantas y desechos de animales que pueda convertirse en energía; igualmente aquella que proviene de la agricultura (residuos de maíz, café, arroz, nueces, etc.), de aserraderos (podas, ramas, aserrín, cortezas, etc.) y de los residuos urbanos (aguas negras, basura orgánica y otros) (Vargas, 2012).

La biomasa es un recurso que no es nueva. Como seres humanos, tenemos mucho tiempo trabajándola y sobre todo ocupándola para generar energía, desde que descubrimos el fuego la biomasa es algo que se puede quemar por lo tanto ocuparla para conservar el fuego o generar más no es nada nuevo, simplemente podemos mejorar eso y ocuparlo para generar energía de una forma diferente. Los avances tecnológicos, favorecen el desarrollo de los procesos para la transformación de esta biomasa en una forma eficiente, que al transformarse en un combustible líquido o gaseoso, nos puede beneficiar al ocuparla en el proceso de combustión. En la Figura 1 se muestra el ciclo de obtención de la biomasa.

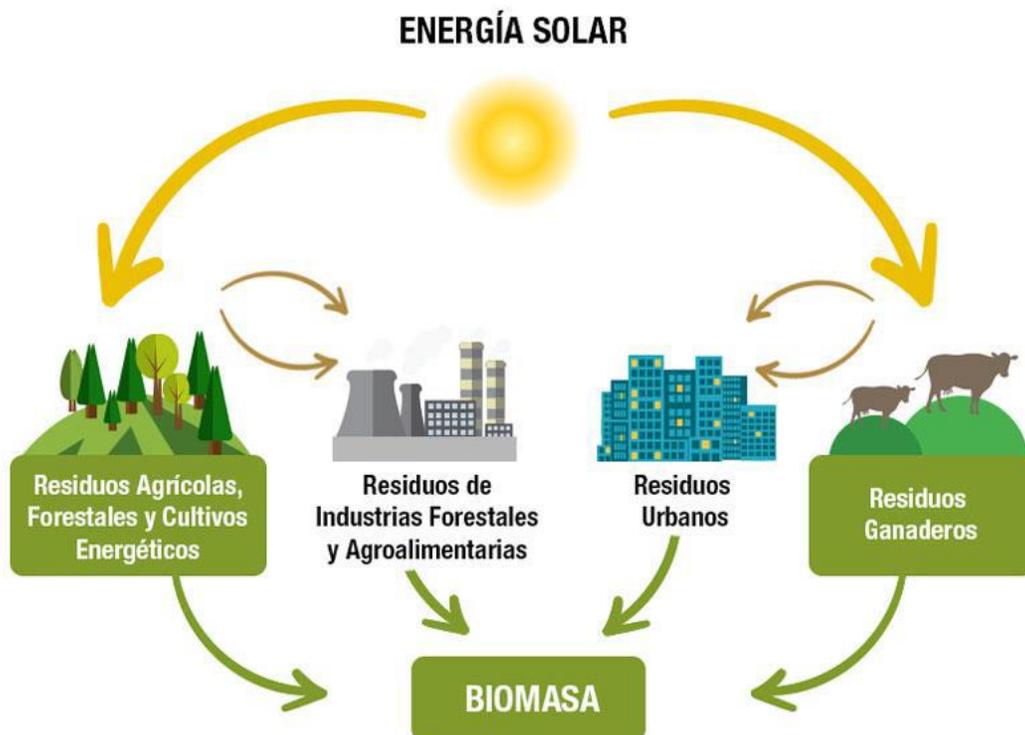


Ilustración 1. Ciclo de obtención de la Biomasa. (Fuente: Sofos Energía, 2010)

2.1.3. CARACTERÍSTICAS DE LA BIOMASA.

Para evaluar la factibilidad técnica y económica de un proceso de conversión de biomasa en energía, es necesario tener en cuenta algunos parámetros de caracterización, ya que estos determinan el proceso de conversión óptimo al mismo tiempo que permite realizar proyecciones de los beneficios económicos y ambientales que se esperan. A continuación se hace mención de los parámetros más importantes a considerar:

El proceso de interés para este proyecto es de tipo termoquímico, por lo que el tipo de biomasa corresponde a subproductos agrícolas, principalmente olote de maíz proveniente de cultivos energéticos.

- **Tipo de Biomasa:** La biomasa se presenta en diferentes estados físicos que determinan la factibilidad técnica y económica de los procesos de conversión energética que pueden aplicarse a cada tipo en particular. A continuación se presenta la Tabla 1 con los estados típicos de la biomasa, así como algunas características físicas.

Tabla 1. Tipos de Biomasa (Fuente: RWEDP 2002)

Recurso de biomasa	Tipo de residuo	Características físicas
Residuos forestales	Restos de aserrío: corteza, aserrín y astillas.	Polvo sólido, HR* > 50%
	Restos de ebanistería: aserrín, trozos y astillas.	Polvo sólido, HR=30-45%
	Restos de plantaciones: ramas, cortezas y raíces.	Sólido, HR > 55%
Residuos agropecuarios	Cáscara y pulpa de frutas y vegetales.	Sólido, alto contenido de humedad
	Cáscara y polvo de granos secos (arroz, café).	Polvo, HR < 25%
	Estiércol.	Sólido, alto contenido de humedad
	Residuos de cosechas.	Sólido, HR > 55%
Residuos industriales	Cáscara y pulpa de frutas y vegetales.	Sólido, humedad moderada
	Residuos de procesamiento de carnes.	Sólido, alto contenido de humedad
	Aguas de lavado y precocido de carnes y vegetales.	Líquido
	Grasas y aceites vegetales.	Líquido graso
Residuos urbanos	Aguas residuales.	Líquido
	Residuos domésticos orgánicos.	Sólidos, alto contenido de humedad
	Residuos orgánicos.	Sólidos, alto contenido de humedad

HR* = Humedad Relativa

- **Composición química:** Todas las formas de biomasa consisten en una parte orgánica, una inorgánica y agua. En la combustión se quema la parte orgánica. La inorgánica influye en el proceso de combustión y forma la ceniza o residuo sólido que queda después de la combustión.

Los elementos químicos más importantes son carbono (C), hidrógeno (H), nitrógeno (N), azufre (S) y, en algunos casos, cloro (Cl). Además, contiene oxígeno (O), el cual no se determina directamente, se calcula como la diferencia entre el peso total y la suma de los otros elementos. En la Tabla 2 se muestran composiciones químicas según la fuente de biomasa.

Tabla 2: Composición típica de la Biomasa (Fuente: RWEDP 2002).

Tipo de Biomasa	% Peso (Base seca)						
	C	H	N	O	S	Cl	Ceniza
Madera							
Sauce	47.66	5.20	0.30	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	0.03	0.78
Eucalipto	50.43	6.01	0.17	41.53	0.08	0.03	1.76
Roble	49.89	5.98	0.21	42.57	0.05	0.01	1.26
Subproductos agrícolas							
Brizna de trigo	39.07	4.77	0.58	0.08	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	1.20
Fibra de coco	50.29	5.05	0.45	39.63	0.16	0.28	4.14
Carbón mineral	71.70	4.70	1.30	8.30	0.64	0.06	20.70

- **Humedad:** El contenido de humedad, o humedad relativa de la biomasa, es la relación de la masa de agua contenida por kilogramo de materia seca. Esta propiedad se convierte en factor crítico cuando se quiere recuperar la energía contenida en la biomasa pues determina la energía que se puede obtener por medio de la combustión. Cuando se quema la biomasa, primero se necesita evaporar el agua antes de que el calor esté disponible; por eso, cuanto más alto el contenido de humedad menor el Poder Calorífico.

Todos los combustibles contienen una cantidad de agua pero, para la biomasa, los niveles pueden ser altos; depende del tipo de biomasa, el tiempo entre su cosecha y su uso y la humedad atmosférica. Después de haberla cosechado, paulatinamente perderá la humedad hasta que se establezca un equilibrio con el ambiente.

- **Porcentaje de cenizas:** El porcentaje de cenizas indica la cantidad de materia sólida no combustible por kilogramo de material. En los procesos que incluyen la combustión de la biomasa es importante conocer el porcentaje de generación de ceniza y su composición, puesto que en algunos casos, esta se puede utilizar; por ejemplo, la ceniza de la cascarilla de arroz es un excelente aditivo en la mezcla de concreto o para la fabricación de filtros de carbón activado.
- **Poder Calorífico:** Es la energía que se libera en forma de calor cuando un material combustible es sometido a un proceso de combustión completa. Se expresa como la cantidad de energía por unidad física.

El Poder Calorífico se puede anotar de dos formas diferentes: bruto y neto. El bruto se define como la cantidad total de energía que se liberaría vía combustión, dividido por el peso. El neto es la cantidad de energía disponible después de la evaporación del agua, es decir, es la cantidad de energía

realmente aprovechable. En la Tabla 3 se pueden ver algunos de los valores típicos del Poder Calorífico de diferentes formas de biomasa.

Tabla 3: Poder Calorífico de algunos tipos de Biomasa (Fuente: RWEDP 2002).

Tipo de Biomasa	Poder Calorífico bruto (MJ/kg)
Madera	
Astilla de madera	20.89
Corteza de pino	20.95
Desechos industriales de madera	19.00
Subproductos agrícolas	
Paja de trigo	18.94
Caña	18.06
Bagazo	18.09
Cascara de coco	18.60
Olote de maíz	17.72
Paja de arroz	15.61
Cascarilla de arroz	15.58
Aserrín	19.34

- **Densidad aparente:** Esta se define como el peso por unidad de volumen del material en el estado físico que presenta, bajo condiciones dadas. Combustibles con alta densidad aparente favorecen la relación de energía por unidad de volumen, requiriéndose menores tamaños de los equipos y aumentando los períodos entre cargas.

Por otro lado, materiales con baja densidad aparente necesitan mayor volumen de almacenamiento y transporte y, algunas veces, presentan problemas para fluir por gravedad, lo cual complica el Proceso de combustión, y eleva los costos del Proceso.

2.1.4. FUENTES DE BIOMASA.

Actualmente hay una amplia variedad de recursos considerados como biomasa apropiados para producir energía:

- **Plantaciones energéticas:** Estas son grandes plantaciones de árboles o plantas cultivadas con el fin específico de producir energía. Para ello se seleccionan árboles o plantas de crecimiento rápido y bajo mantenimiento, las cuales normalmente se cultivan en tierras de bajo valor productivo. Su periodo de cosecha varía entre los tres y los diez años. También se utilizan arbustos que pueden ser podados varias veces durante su crecimiento, para extender la capacidad de cosecha de la plantación.

Existen también muchos cultivos agrícolas que pueden ser utilizados para la generación de energía: caña de azúcar, maíz, sorgo y trigo. Igualmente, se pueden usar plantas oleaginosas como girasol o soya y algunas plantas acuáticas como las algas para producir combustibles líquidos como el etanol y el biodiesel.

Adicionalmente, este tipo de cultivos sirve para controlar la erosión y la degradación de los suelos; además, pueden proveer otros beneficios a los agricultores ya que con los cultivos típicos se genera un ingreso sujeto a las fluctuaciones del mercado, al aumento en el costo de los insumos, a las variaciones climáticas, entre otros factores; mientras que con las plantaciones energéticas se tendrá un ingreso permanente debido a la demanda constante de combustibles que tiene una sociedad industrializada cada más consumidora de energía.

- **Residuos forestales:** Los residuos de procesos forestales son una importante fuente de biomasa. Se considera que, de cada árbol extraído para la producción maderera, sólo se aprovecha comercialmente un porcentaje cercano al 20%. Se estima que un 40% se deja en el campo, en las ramas y raíces, a pesar de que tienen un alto potencial energético, cerca del 6-22%

para las ramas, del 21-33% para las raíces y otro 40% en el proceso de aserrío, en forma de astillas, corteza y aserrín.

- **Residuos agrícolas:** La agricultura genera cantidades considerables de desechos (rastros): se estima que, en cuanto a residuos de campo, el porcentaje es más del 60% y en residuos de proceso entre 20% y 40%.

Al igual que en la industria forestal, muchos residuos de la agroindustria se dejan en el campo. Aunque es necesario reciclar un porcentaje de la biomasa para proteger el suelo de la erosión y mantener el nivel de nutrientes orgánicos, una cantidad importante puede ser recolectada para la producción de energía.

Ejemplos comunes de este tipo de residuos son el arroz, el café y la caña de azúcar. Los campos agrícolas también son una fuente importante de leña para uso doméstico: más del 50% del volumen total consumido.

Por otro lado, las granjas producen un elevado volumen de “residuos húmedos” en forma de estiércol de animales. La forma común de tratar estos residuos es esparciéndolos en los campos de cultivo, con el doble interés de disponer de ellos y obtener beneficio de su valor nutritivo. Esta práctica puede provocar una sobre fertilización de los suelos y la contaminación de las cuencas hidrográficas.

- **Residuos urbanos:** Los centros urbanos generan una gran cantidad de biomasa en muchas formas, por ejemplo: residuos alimenticios, papel, cartón, madera y aguas residuales. En el caso de los países latinoamericanos carecen de adecuados sistemas para su procesamiento, lo cual genera grandes problemas de contaminación de suelos y cuencas; sobre todo por la inadecuada disposición de los residuos y por sistemas de recolección y tratamiento con costos elevados de operación.

Por otro lado, los residuos orgánicos en descomposición produce compuestos volátiles (metano, dióxido de carbono, entre otros) grandes

responsables del efecto invernadero. Estos compuestos tienen un considerable valor energético que puede ser utilizado para la generación de energía limpia.

En el corto y mediano plazo la planificación urbana deberá incluir sistemas de tratamiento de residuos que disminuyan eficazmente las emanaciones nocivas de los desechos al ambiente, dándoles un valor de retorno por medio del aprovechamiento de su contenido energético, pues aproximadamente el 80% de los residuos orgánicos pueden ser convertidos en energía.

- **Residuos industriales:** La industria, en especial la alimenticia, genera una gran cantidad de residuos y subproductos, que pueden ser usados como fuentes de energía: los provenientes de todo tipo de carnes (avícola, vacuna, porcina) y vegetales (cáscaras, pulpa) cuyo tratamiento como desechos representan un costo considerable para la industria. Estos residuos son sólidos y líquidos con un alto contenido de azúcares y carbohidratos, los cuales pueden ser convertidos en combustibles gaseosos.

2.1.5. JUSTIFICACIÓN DE USO DE LA BIOMASA PARA EL PROCESO DE GASIFICACIÓN.

Para el presente Proyecto se tomó la decisión de escoger como materia prima los subproductos agrícolas por su disposición localizada en México, además de encontrar una cantidad abundante de esta materia prima, se pueden también proporcionar beneficios tanto a las empresas como a particulares, dependiendo del fin para el que este proyecto sea destinado.

El principal subproducto agrícola en los que nos enfocaremos para este proyecto es el olote de maíz.

2.2. BIOENERGÍA Y BIOCOMBUSTIBLES.

2.2.1. ¿QUÉ ES LA BIOENERGÍA Y LOS BIOCOMBUSTIBLES?

La bioenergía es la energía proveniente de la biomasa a partir de Procesos biológicos o termoquímicos, estos procesos convierten cualquier material, con una cantidad determinada de carbono en una fuente de combustible renovable y aplicable en diferentes procesos presentados en capítulos posteriores.

Los biocombustibles de los que se hablaron anteriormente pueden ser utilizados para generar energía térmica o eléctrica, así como transformarlos en algún otro producto químico como Metanol o hidrógeno, estos procesos se estudiarán más adelante. Estos biocombustibles se pueden clasificar en:

- **Biocombustibles sólidos:** 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 (Syngas), biogás y biometano que son obtenidos con residuos sólidos urbanos y estiércol.

2.2.2. *CARACTERÍSTICAS DE LA BIOENERGÍA Y LOS BIOCOMBUSTIBLES.*

La bioenergía presenta diversas características, dichas condiciones específicas de este tipo de energía la hacen atractiva, con un gran potencial y muy versátil en cuanto a sus aplicaciones. Según la REMBIO estas características son:

- **Es almacenable.** La facilidad de almacenar la biomasa que contiene a la bioenergía la pone por encima de otras energías que no son continuas.
- **Permite satisfacer la mayor parte de los usos finales.** Como ya comentamos esta energía tiene una amplia versatilidad, puede ser aplicada para generar calor, electricidad, fuerza motriz y hasta combustibles.
- **Es ubicua.** La biomasa se puede encontrar en todas partes debido a la variedad de biomasa que existen, podemos cultivar en la mayor cantidad de regiones y, dependiendo del clima, podemos también obtener una biomasa que puede aprovecharse para generar bioenergía.
- **Es escalable.** Se pueden tener sistemas que aprovechen la biomasa en función de la producción, podemos generar cantidades de energía que van de 1kW hasta 300000 kW los que nos da una amplia variedad de tamaños de equipos y plantas.
- **Es descentralizada.** Cualquiera, en pequeña o gran escala, se puede producir bioenergía y aplicarse en cualquier zona.

2.3. PROCESOS DE CONVERSIÓN DE LA BIOMASA.

2.3.1. PROCESOS DE CONVERSIÓN DE BIOMASA EN BIOREFINERIAS.

Las Biorefinerías pueden aplicar cuatro tratamientos o secuencias diferentes, puede ayudarse de la termodinámica, la bioquímica, la mecánica y la química.

- Procesos Termoquímicos.

Estos procesos implican una descomposición térmica de los componentes de la biomasa y una liberación de energía en forma de calor u obtención de biocombustibles intermedios. Hay dos procesos termoquímicos principales que transforman la biomasa lignocelulósica en energía y productos químicos, la gasificación y la pirólisis.

- Procesos Bioquímicos.

A diferencia de los procesos termoquímicos, los procesos bioquímicos ocurren a temperaturas y velocidades bajas y se producen gracias a la acción de microorganismos y/o enzimas específicas que degradan el sustrato fermentable de la biomasa.

Mediante la fermentación, pueden transformarse aquellas materias primas que contienen un gran porcentaje de carbohidratos, en forma simple (sacarosa en la caña de azúcar) o bien en forma de polímeros de almidón (granos de cereal), inulina (agave) o polisacáridos de celulosa y hemicelulosa (materiales lignocelulósicos).

- Procesos Mecánicos.

Los procesos mecánicos, son procesos que no cambian el estado o la composición de la biomasa, sino que sólo se produce una reducción de tamaño para la adaptación de la materia prima a los requisitos de la instalación o una separación de los componentes y la extracción de los compuestos de interés industrial.

- Procesos Químicos.

Los procesos químicos son aquellos que suponen una modificación en la estructura química de la molécula por reacción con otras sustancias, siendo los procesos más comunes la hidrólisis y la transesterificación. La hidrólisis usa ácidos, álcalis o enzimas para des-polimerizar polisacáridos y proteínas en sus componentes de azúcares (obtención de glucosa a partir de celulosa) o productos químicos derivados (ácido levulínico a partir de glucosa).

Conociendo que existen diferentes formas de clasificar a las Biorefinerías, vamos a enfocarnos en definir cómo se pueden clasificar:

- Materia prima utilizada (Biorefinería Verde, Biorefinería de Cultivo Completo, Biorefinería Lignocelulósica, Biorefinería Marina).
- Tipo de tecnología (Biorefinería Termoquímica, Biorefinería Biológica).
- Madurez de la tecnología (Biorefinerías de primera o segunda generación).
- Productos generados.

El concepto que sigue la Biorefinería es explotar esos recursos renovables, poder ocupar al 100% los campos de alimentos con los que nos alimentamos, todo para producir más fuentes de energía.

2.3.2. PROCESOS DE CONVERSIÓN TERMOQUÍMICOS.

Como se describió anteriormente un proceso termoquímico implica una descomposición térmica de los componentes de la biomasa y una liberación de energía. A continuación se mencionan los procesos termoquímicos más comunes así como sus características principales.

2.3.2.1. COMBUSTIÓN DIRECTA.

Es la forma de extraer energía de la biomasa más antigua así como la más económica y común, solo necesita que la biomasa sea calentada en una caldera para que se realice la operación de combustión de la misma, el resultado de esta operación es para producir calor que se puede ocupar de varias formas, como por ejemplo: cocción de alimentos, calefacción, secado y en casos particulares se produce vapor.

Este proceso es ineficiente ya que el rango que tienen de conversión es de 15-38% para generar electricidad por este medio y 70% para energía térmica.

La combustión directa también produce grandes cantidades de CO y CO₂ que afectan directamente al Ciclo del carbono y por lo tanto su contaminación con respecto a otras fuentes es mayor.

2.3.2.2. PIRÓLISIS.

La pirólisis es un proceso termoquímico que ocurre en ausencia de oxígeno. El Proceso de pirólisis tiene tres etapas: la dosificación y alimentación de la materia prima, la transformación de la masa orgánica y, finalmente, la obtención y separación de los productos.

La pirólisis es una descomposición térmica que ocurre en ausencia de oxígeno. La pirólisis siempre es el primer paso en los Procesos de combustión y Gasificación, seguido de una oxidación total o parcial de los productos primarios. El Proceso de pirólisis tiene tres etapas: la dosificación y alimentación de la materia prima, la transformación de la masa orgánica y, finalmente, la obtención y separación de los productos (coque, bioaceite y gas). Existen diferentes tipos de pirólisis. Cada una de ellas tiene diferentes condiciones en el proceso, lo cual favorece la generación de diferentes productos, como se muestra en la tabla para el caso de la madera.

Tabla 4: Características y condiciones de Gasificadores.

Modo	Condiciones	% Líquido	% Carbón	% Gas
Gasificación	-800°C	5	20	85
Flash/Rapida	-500°C, corto tiempo de residencia de vapor caliente -1s	75	12	13
Intermedio	-500°C, corto tiempo de residencia de vapor caliente -10 a 30 s	50	25	25
Carbonización lenta	-400°C, largo tiempo de residencia de vapor caliente –horas hasta dias	30	35	35
Torrefacción lenta	-290°C, tiempo de residencia de sólidos -30 min	-	82	18

2.3.2.3. GASIFICACIÓN.

La Gasificación es un proceso termoquímico en el que un sustrato carbonoso (carbón, biomasa, restos agrícolas, plástico) es transformado en un gas combustible mediante una serie de reacciones que ocurren en presencia de un agente gasificante (generalmente aire) en un ambiente pobre en oxígeno.

El sustrato carbonoso y el agente gasificante son los parámetros que determinan el mayor o menor contenido de energía (Poder Calorífico) del gas.

En cuanto a la biomasa conocemos que está compuesta por carbono, oxígeno e hidrógeno principalmente, los demás componentes presentes en la biomasa están presentes en cantidades muy pequeñas. La gasificación puede ser clasificada atendiendo a los siguientes criterios:

- Agente gasificante: Aire, oxígeno, vapor de agua, CO₂, H₂.
- Presión y temperatura del reactor.
- Tipo de reactor: Lecho fijo o móvil y lecho fluidizado.
- Transporte neumático, sistemas combinados o circulantes, horno rotatorio, etc.
- Forma de suministrar el calor: Método directo o indirecto.
- Forma de alimentar: superior o inferior.
- Forma de separar las cenizas.

2.4. GASIFICACIÓN.

2.4.1. UNA VISIÓN GENERAL.

Como se mencionó con anterioridad la gasificación es un proceso termoquímico en el que un sustrato carbonoso (residuo orgánico) es transformado en un gas combustible de bajo Poder Calorífico, mediante una serie de reacciones que ocurren a una temperatura determinada en presencia de un agente gasificante, dicho proceso se puede entender como una combustión parcial que se lleva a cabo a temperaturas cercanas a los 800 °C, en donde los principales gases resultantes son el CO, H₂, CO₂ y CH₄.

La elección del método para llevar a cabo el proceso de gasificación depende de varios factores, como el tamaño y forma del residuo, el aprovechamiento de la energía del gas producido que vaya a hacerse y, por supuesto, de los condicionantes económicos.

Por su parte, el aprovechamiento energético de este gas pobre puede hacerse quemándolo inmediatamente en una cámara de combustión, o introduciéndolo en una turbina de gas o un motor de combustión interna.

Existen gran variedad de combustibles que pueden ser empleados para gasificación (carbón, madera, restos agrícolas, etc.) y todos ellos difieren mucho en sus propiedades químicas, físicas y morfológicas, lo que supone que deba ajustarse la gasificación a cada uno de ellos y en consecuencia requieren diferentes diseños del reactor e incluso distintas tecnologías de gasificación.

Por esta razón, se desarrollan y comercializan gran número de gasificadores diferentes, todos ellos orientados a manejar las propiedades específicas de un combustible determinado o de una variedad de combustibles.

El proceso de gasificación comienza cuando la biomasa, que deberá estar en estado sólido, es sometida a la acción del calor en condiciones de defecto de aire, o combustión incompleta, se producen una serie de reacciones que dan lugar a un gas de gran interés energético. El gas obtenido cuando la gasificación se realiza con aire, que es el elemento más utilizado para la gasificación de biomasa, se denomina gas pobre y está formado básicamente por monóxido e hidrógeno, además de dióxido de carbono, y metano. Las principales aplicaciones de la gasificación de biomasa se basan en la utilización de la energía térmica que genera el propio proceso de gasificación y el aprovechamiento del gas producido.

2.5. GAS DE SÍNTESIS (SYNGAS).

Se puede definir el gas de síntesis como una mezcla de gases en la que predominan CO y el H₂ en proporciones variables y que es adecuada para la síntesis de productos químicos orgánicos. El gas de síntesis puede obtenerse por procesos de gasificación de carbón, biomasa y fracciones residuales del petróleo, por reformado del gas natural o por descomposición de un compuesto orgánico por plasma.

Por tanto, las materias primas de las que se puede partir para obtener Gas de Síntesis son:

- El carbón, Proceso Coal-to-Liquids (CTL).
- El gas natural, Proceso Gas-to-Liquids (GTL).
- La biomasa, Proceso Biomass-to-liquids (BTL).

Actualmente existe una gran variedad de procesos entre los que se destacan:

- **Reformado de vapor.** El reformado de vapor es un proceso endotérmico realizado en presencia de un catalizador (Ni/Al) a bajas temperaturas. La desventaja principal es que es un Proceso muy costoso.
- **Oxidación parcial.** En el proceso exotérmico de oxidación parcial, el gas natural es oxidado parcialmente con oxígeno puro para producir hidrógeno y monóxido de carbono. Este proceso es relativamente costoso debido a que el consumo de oxígeno puro requiere de una planta de separación de aire y llevar a cabo, además, la reacción sin catalizador supone altas presiones y temperaturas. Por ello, en algunos casos, se usa como catalizador generalmente el aluminio.
- **Reformado de CO₂.** El proceso de reformado de CO₂ es más endotérmico que el de reformado de vapor. En este se opera con una baja relación H₂/CO. Este ratio hace que la conversión de la reacción FT no sea elevada.

Se utilizan altas temperaturas y presiones. La reacción tiene utilidad en una planta para disminuir la contaminación.

- **Reformado autotérmico.** El reformado auto térmico (ATR) emplea la oxidación parcial y el reformado de vapor ya que ambos procesos se llevan a cabo en un mismo reactor. El aire puede ser usado directamente en lugar de oxígeno puro y el resultado es un gas de síntesis disuelto con N_2 . En este proceso se requieren reactores ligeramente más grandes que para la oxidación parcial, pero se elimina la planta de separación para obtener oxígeno puro, reduciendo así el coste del capital para la construcción de la planta. La reacción se lleva a cabo con un catalizador de níquel a altas temperaturas y presiones moderadas.
- **Plasma:** El plasma es el cuarto estado de la materia, además del estado sólido, líquido y gas. En este estado, los átomos del gas han perdido electrones y se encuentran ionizados. Se diferencia del estado gaseoso por una sensibilidad característica a la acción de campos eléctricos y magnéticos, pero también por una capacidad de ser conductor de la luz y de la electricidad. El proceso de gasificación por plasma tiene tres características importantes: Disociación, Destrucción y Fusión.

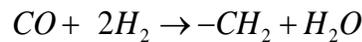
2.6. APLICACIONES DEL GAS DE SÍNTESIS.

Una vez realizada la gasificación de la biomasa, la limpieza y adecuación del Gas de Síntesis, se puede realizar un post tratamiento, el objetivo de este último paso es generar combustibles, energía calorífica o eléctrica, para su venta o aplicación en otros procesos, por ejemplo, en los automóviles después de que el gas recibe este tratamiento se ahorra combustible.

Cada tratamiento necesita condiciones particulares así como características especiales del gas como: retirar alguna impureza en particular o un tipo de gasificación específico.

2.6.1. SÍNTESIS DE COMBUSTIBLES FISCHER-TROPSCH.

Con el proceso Fischer-Tropsch (FT) el gas de síntesis es transformado a una serie de hidrocarburos como la gasolina o el diésel, este proceso requiere de un catalizador y se resume con la siguiente reacción.



$$\Delta H (R, 295 K) = -165 \text{ KJ} / \text{mol}$$

El proceso FT ocupa catalizadores de hierro cobalto y ayudan a la producción de compuestos deseados, da origen a una mezcla de hidrocarburos que son compuestos con un átomo de carbono como metano (CH₄) o hasta cadenas muy largas como gasolina, diésel o compuestos pesados.

Este proceso es la construcción a base de bloques de -CH₂- enlazados formando cadenas de hidrocarburos que siguen el modelo de reacción que a continuación se presenta:

$$\log\left(\frac{W_n}{n}\right) = n \log \alpha + \log\left(\frac{(1-\alpha)^2}{\alpha}\right)$$

En esta ecuación el factor alfa indica la probabilidad de crecimiento de la cadena de hidrocarburos y W_n es la fracción másica de las especies con n número de carbonos. Esta ecuación sugiere que el proceso tiene una distribución de Anderson-Shulz-Flory o por sus siglas ASF y nos indica que las cadenas de

hidrocarburos van creciendo mediante la inserción de C1 con una probabilidad de crecimiento alfa.

En la literatura se encuentra la gráfica que relaciona las probabilidades de crecimiento alfa con la fracción en peso, si al construir un proceso en una Biorefinería nueva se utiliza este proceso para aprovechar el gas de síntesis, se pueden obtener productos de valor como gasolinas, diésel y naftas de forma práctica para la utilización o venta en el sector transporte.

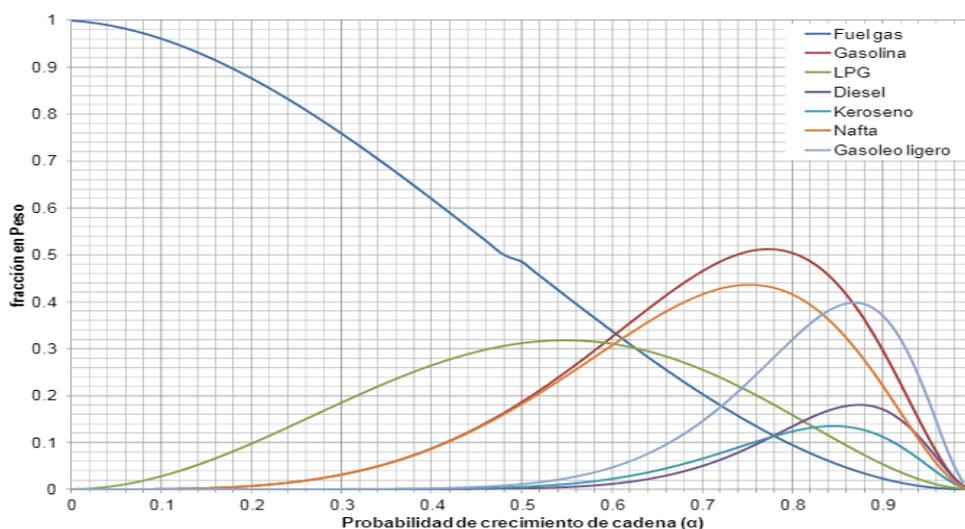


Ilustración 2. Gráfica de aplicación Proceso Fischer-Tropsch.

Actualmente el Proceso FT opera en dos modos: el proceso de alta temperatura (300 – 350 °C), basado en catalizadores de hierro y empleado para la producción de gasolinas y olefinas de bajo peso molecular, y el proceso de baja temperatura (200 – 240 °C) que puede emplear catalizadores a base de hierro o cobalto y es empleado para producir ceras lineales de alto peso molecular. Ambos modos de operación emplean presiones altas de 25 bar, aunque pueden operar a presiones mayores. (Vargas 2012).

Como las reacciones dadas anteriormente que ocupa el proceso son exotérmicas, es necesario retirar el calor generado en el proceso y que de seguir

ahí incrementaría la desactivación del catalizador por sinterización o ensuciamiento, esto junto con la producción de metano.

El calor que es retirado anteriormente puede ser utilizado para producir vapor y después llevarlo a una turbina de vapor la cual tendrá como función generar electricidad; la relación es que en cuanto mayor sea la presión de vapor la eficiencia de la turbina será mayor.

La presión del vapor generado en el Proceso FT de baja temperatura va de los 10 a los 30 bar, mientras que en el FT de alta temperatura puede producir presiones de vapor de hasta 70 bar. (Vargas 2012).

2.6.1. PRODUCCIÓN DE HIDRÓGENO.

Este proceso de aplicación del gas de síntesis es el más recurrido y el que se ocupa en mayor cantidad. El hidrógeno producido es consumido como materia prima en la producción de Amoníaco, en procesos de hidrocraqueado en refinerías y también para la producción de Metanol.

El hidrógeno se produce a partir del gas de síntesis mediante reacciones de intercambio agua-gas. Como los productos de la gasificación son en su mayoría gases, esta tecnología favorece la producción de hidrógeno.

El principal medio es ocupando un gasificador de lecho fluidizado con un catalizador que ayude en la producción, ya que con esta tecnología los porcentajes de hidrógeno que se pueden obtener son de 60% en volumen, el beneficio que encontramos es en capacidad ya que son plantas más pequeñas que las convencionales que funcionan principalmente con gas natural y también el beneficio ambiental, esta opción de generar hidrógeno por medio de un proceso de gasificación tiene un beneficio económico muy grande.

La producción de hidrógeno a partir de métodos de transformación termoquímica de la biomasa puede resultar económicamente atractiva.

La producción del hidrógeno viene acompañada de la producción de otros gases que deben ser eliminados para purificar el hidrógeno. Se han desarrollado métodos para la absorción de CO₂ y membranas, que se emplean de forma exitosa en la purificación del hidrógeno.

Se espera que la producción de hidrógeno a partir de la transformación de la biomasa utilizando procesos termoquímicos, especialmente la gasificación de la biomasa esté disponible en plantas de gran escala en un futuro cercano.

Después de transformar el gas de síntesis en un gas rico en hidrógeno, el hidrógeno es separado y comprimido. En las plantas de producción de hidrógeno de hoy en día se emplean distintos conceptos. Las plantas modernas son diseñadas empleando el sistema PSA (adsorción por variación de presión), aunque el sistema anterior de purificación aún continúa siendo empleado en las plantas ya establecidas.

Para purificar el hidrógeno se deben eliminar los condensados de hidrocarburos y el agua que pueda estar presente en la corriente de gas que sale de los reactores de intercambio ya que pueden dañar el sistema de absorción que consta de carbón activado y zeolitas. Usualmente es suficiente con utilizar un separador gas/líquido y un des-nebulizador antes de emplear el sistema PSA.

2.6.2. PRODUCCIÓN DE CALOR Y ELECTRICIDAD.

Este tipo de transformación del gas de síntesis depende en mayor parte del Poder Calorífico del gas, la cantidad del gas con la que contamos y las necesidades energéticas.

Producir el vapor en una caldera es el método más sencillo en el que podemos ocupar el gas de síntesis, cabe resaltar que no es el más eficiente y no depende directamente del Poder Calorífico ni de la cantidad de gas disponible, es el más sencillo porque los requerimientos del gas no son tan específicos ya que podemos ocupar cualquier gas que posea un Poder Calorífico mínimo de 4-6 MJ/Nm³.

Se puede emplear este en un motor de combustión interna y con la cantidad suficiente también de igual forma se puede emplear en una turbina de gas, como ya es conocido el gas ocupado debe de tener una limpieza mínima solo para cuidar o mantener en condiciones de operación el equipo de calentamiento.

Para producir electricidad el gas proveniente de la Biorrefinería puede mandarse directamente en una turbina de gas. “La generación de energía mediante una turbina de gas se basa en un Ciclo de Brayton. El principio de generación de energía en una turbina de gas es bien conocido. Una cantidad de aire que se encuentra a temperatura ambiente y presión atmosférica es comprimida para quemar una cantidad de combustible comprimido. Los gases de la combustión se pasan a través de una turbina de gas donde se recupera algo del calor que porta el gas de escape y se transforma en trabajo mientras otra parte de la energía se escapa con el gas como calor de desecho. Una parte del trabajo obtenido en la turbina es empleado para comprimir el aire y el resto se emplea para generar electricidad” (Vargas 2012).

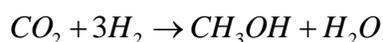
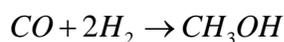
Existen otros procesos para la producción de energía y calor, el proceso denominado como Ciclo combinado con gasificación de biomasa integrado (BIGCC por sus siglas en inglés) es donde el gas de síntesis ya tratado y enfriado es quemado en una turbina de gas para generar electricidad. El gas que se escapa va a un recuperador de calor con el fin de generar vapor que será ocupado posteriormente en una turbina de vapor para generar más electricidad. “Las

eficiencias de estas plantas pueden alcanzar el 80%, con eficiencias en las turbinas de gas de 35-40%". (Vargas 2012).

2.6.3. *PRODUCCIÓN DE METANOL.*

En esta aplicación el Metanol se sintetiza mediante un proceso catalítico a partir de monóxido de carbono e hidrógeno. Esta reacción emplea altas temperaturas y presiones, y necesita reactores industriales grandes y complicados.

Las dos reacciones presentadas a continuación son exotérmicas y se producen con volúmenes muy altos de los reactivos sin embargo, son favorecidas con temperaturas bajas y altas presiones.



Las reacciones simultaneas a este proceso, también fuertemente exotérmicas, pueden conducir a la formación de subproductos tales como metano, alcoholes superiores o éter di metílico (DME por sus siglas en ingles). El proceso más antiguo para la producción industrial de Metanol es la destilación seca de la madera. El Metanol se produce actualmente a escala industrial exclusivamente por conversión catalítica de gas de síntesis.

Los Procesos se clasifican según la presión utilizada:

- Procesos de alta presión. 250-300 bar
- Proceso de presión media. 100-250 bar
- Proceso de baja presión. 50-100 bar

Ambos procesos de alta y baja presión están disponibles para hidrogenar monóxido de carbono. El método de alta presión fue comercializado por BASF.

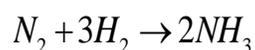
Estos procesos utilizan un catalizador de zinc-cromo que se maneja por encima de 340 °C y requiere una presión entre 300 y 500 bar para obtener concentraciones de Metanol de aproximadamente 5-6% en volumen, en los gases efluentes del reactor, con cantidades significativas de metano, éter di metílico (DME), etanol, y alcoholes superiores.

2.6.4. *PRODUCCIÓN DE AMONIACO.*

El proceso de generación Amoníaco va después de la producción de H₂ ya que este es materia prima en esta reacción.

La mayor parte (por ejemplo, el 85%) de Amoníaco se utiliza para la producción de fertilizantes, mientras que el otro 15% se utiliza en una amplia variedad de aplicaciones. Como productos químicos producidos directamente o indirectamente derivados del Amoníaco (o su derivado ácido nítrico). Se utiliza para la producción de plásticos y fibras como poliuretano y poliamidas.

La síntesis de Amoníaco es una reacción catalítica llevada a cabo a presiones entre 100 y 250 bar y temperaturas entre 350 y 550 °C, según la siguiente reacción:



Típicamente, se utilizan catalizadores basados en hierro para la síntesis de Amoníaco. La reacción es termodinámicamente limitada y la conversión por Ciclo está limitada a aprox. 20 a 30%. El gas no convertido es parcialmente recirculado, mientras que la otra parte es retirada para evitar la acumulación de gases inertes e impurezas. El Amoníaco se recupera del gas como un líquido por enfriamiento y condensación.

2.7. PROCESOS DE LIMPIEZA DEL GAS DE SÍNTESIS.

Uno de los principales problemas del producto principal (Syngas) son las impurezas o ciertos contaminantes, con el paso del proceso de gasificación se espera que el producto cumpla con los requerimientos de pureza necesarios para ser ocupado dentro del mismo proceso o procesos posteriores, por lo tanto es necesario establecer un sistema de limpieza y/o acondicionamiento. Dicha etapa de limpieza involucra equipos que sean capaces de minimizar los contaminantes que el gas de síntesis presente, estos equipos pueden ser: ciclones, lavadores y filtros y deben eliminar:

- Partículas.
- Compuestos alcalinos.
- Compuestos nitrogenados.
- Compuestos sulfurados.
- Alquitranes.

Remover el dióxido de carbono del gas producido es necesario por varias razones. En combinación con el agua es muy corrosivo y destruye las tuberías y equipos, a menos que sea parcialmente eliminado o se utilicen materiales de construcción muy caros.

Para procesos como la síntesis del Metanol o líquidos FT, la presencia de este gas hace necesario una mayor presión de trabajo.

Los sistemas de adsorción por variación de presión (PSA por sus siglas en inglés) permiten obtener un gas con un alto grado de pureza. La operación en paralelo de estos sistemas permite conseguir un gas puro de forma continua.

La necesidad de ajustar la relación H_2/CO para cumplir con los requerimientos de producción de biocombustibles se puede lograr mediante la utilización de un sistema de reacción de intercambio agua-gas. Estas reacciones se realizan en sistemas de alta temperatura, o de baja temperatura con un catalizador específico para cada tipo de Proceso.

En estos tres pasos se intenta explicar el Proceso de lavado del Gas de Síntesis:

- En el paso uno el gas pasa por un filtro su trabajo es eliminar partículas sólidas grandes que se puedan encontrar en la corriente, el objetivo de eliminarlas es para que no interfieran en Procesos posteriores.
- En el lavado, se busca retirar ácidos como NH_3 HCl o HF funciona con agua, para retirar estos ácidos de la manera más conveniente, posteriormente se coloca en un Venturi cuyo objetivo es retirar el líquido del gas.
- El paso tres consiste en una columna empacada que retira los compuestos que contengan azufre, en especial H_2S .

Una vez realizado este proceso el gas de síntesis quedara limpio y acondicionado para ser ocupado de diferentes formas, cabe resaltar que todo depende de las condiciones requeridas del gas, debe ser limpiado si las características del proceso siguiente son muy estrictas, así como un gas que sea ocupado en un proceso de combustión puede no pasar por el proceso de limpieza si los componentes que contiene el gas no perjudican al proceso o al equipo.

2.8. CICLO COMBINADO Y CICLO DE BRAYTON.

Hasta ahora las fuentes de energía más importantes son la energía química (molecular) de los combustibles y la energía nuclear. Las instalaciones a gran escala

para este propósito dependen del desprendimiento del calor y su consecutiva conversión parcial en trabajo. A pesar del perfeccionamiento en el diseño del equipo, la eficiencia de conversión no se aproxima a 100%. Lo anterior es una consecuencia de la segunda ley de la termodinámica. La eficiencia de las plantas convencionales de energía de vapor por combustibles fósiles rara vez excede 35%. Sin embargo, es posible lograr eficiencias mayores a 50% en plantas de ciclo combinado con generación de energía dual:

- A partir de turbinas de gas de tecnología avanzada.
- A partir de ciclos de potencia de vapor que funcionan con el calor recuperado de los gases que salen calientes de la turbina.

2.8.1. CICLO TERMODINÁMICO COMBINADO.

En una planta de energía convencional, la energía molecular del combustible se libera durante un proceso de combustión. La función del dispositivo de generación de trabajo es transformar parte del calor de combustión en energía mecánica. En una planta de energía nuclear el proceso de fisión libera la energía de los núcleos del átomo, en forma de calor, que a continuación se transforma parcialmente en trabajo. Por esto, el análisis termodinámico de las máquinas térmicas, se aplica tanto a las plantas de energía convencional (combustible fósil) como a las de energía nuclear. La planta de energía de vapor es una máquina térmica a gran escala, en la cual el fluido de trabajo (H_2O) fluye sucesivamente en estado estacionario a través de una bomba, una caldera, una turbina y un condensador en un proceso cíclico.

El fluido de trabajo está separado de la fuente de calor y éste se transfiere a través de una frontera física. En una planta de combustión a fuego directo del combustible fósil, los gases de combustión están separados del vapor por medio de las paredes de la tubería de la caldera. Otra forma de máquina térmica es la de

combustión interna, donde las altas temperaturas se logran directamente por conversión de la energía química de un combustible en energía interna dentro de un dispositivo productor de trabajo. Los ejemplos son los motores Otto y Diésel, así como la turbina de gas.

2.8.2. CICLO DE BRAYTON.

Los motores Otto y Diésel ejemplifican el uso directo de la energía de los gases a temperatura y presión altas, que actúan sobre un pistón dentro de un cilindro; ninguna transferencia de calor se requiere con una fuente externa.

De cualquier modo, las turbinas son más eficientes que los motores oscilantes, en el motor de turbina de gas, las ventajas de la combustión interna se combinan con las de la turbina. La turbina de gas es impulsada por los gases de alta temperatura de una cámara de combustión.

El aire que entra se comprime (presurizado) a una presión de varios bares antes de la combustión. El compresor centrífugo funciona en el mismo eje que la turbina y parte del trabajo de la turbina sirve para impulsar el compresor. Mientras más alta sea la temperatura de los gases de combustión que entran en la turbina, mayor será la eficiencia de la unidad, es decir, aumentará el trabajo producido por unidad de combustible quemado. La temperatura límite se determina por la resistencia de las aspas metálicas de la turbina, y es mucho menor a la temperatura de flama teórica del combustible. Se debe suministrar un exceso de aire suficiente para mantener la temperatura de combustión en un nivel seguro.

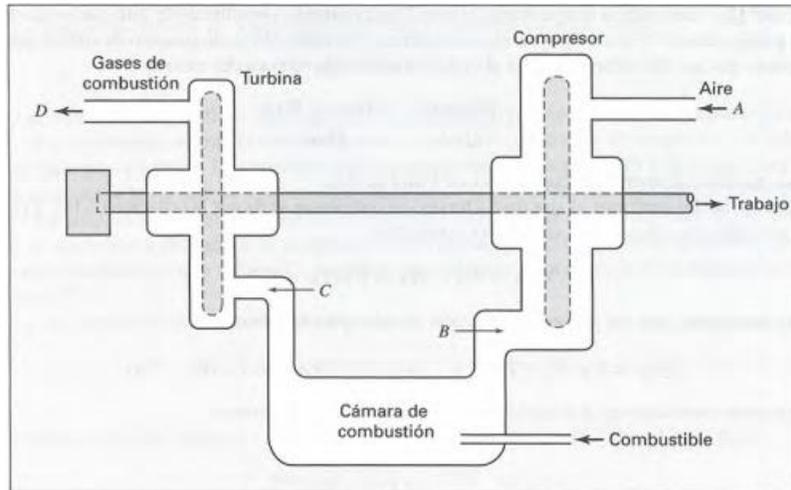


Ilustración 3. Diagrama de un Ciclo combinado (Smith, Van Ness).

2.8.3. PARÁMETROS DEL CICLO DE BRAYTON.

Aunque cada fabricante propone sus parámetros en función del gas combustible y el tamaño de los equipos, la referencia base sigue siendo la misma y son:

Tabla 5: Parámetros de funcionamiento del Ciclo de Brayton.

Parámetros de funcionamiento	Temperatura (°C)	Presión (kg/cm ²)
Aire entrada compresor axial	15	1
Aire salida compresor axial	316	10
Relación de compresión	-	10/1
Gases de combustión entrada turbina	1,100	10
Gases de combustión salida turbina	495-560	1

2.8.4. VENTAJAS Y DESVENTAJAS DE UNA TURBINA DE GAS.

Ventajas:

- Muy buena relación potencia vs. peso y tamaño.
- Bajo costo de instalación.
- Rápida puesta en servicio.
- Es una máquina rotatoria (no tiene movimientos complejos como son los movimientos roto alternativos de los motores de combustión interna).
- Al ser una máquina rotatoria el equilibrio de la misma es prácticamente perfecto y simple, a diferencia de máquinas con movimiento alternativos.
- Menos piezas en movimiento (comparado con los motores de combustión interna).
- Menores pérdidas por rozamiento al tener menores piezas en movimiento.
- Sistema de lubricación más simple.
- Bajas presiones de trabajo (es la máquina térmica que funciona a más baja presiones).
- El Proceso de combustión es continuo y se realiza a presión constante en la cámara de combustión (diferente a los motores de combustión interna).
- Pocos elementos componentes: compresor, cámara/s de combustión y turbina propiamente dicha.
- No necesitan agua (diferente a las turbinas a vapor que requieren de un condensador).
- Permiten emplear diferentes tipos de combustibles como queroseno, gasoleo, gas natural, carbón pulverizado, siempre que los gases de combustión no corroan los álabes o se depositen en ellos.
- El par motor es uniforme y continuo.

Desventajas.

- Bajo rendimiento térmico (alto consumo específico de combustible) debido a:

- Alta pérdida de calor al ambiente que se traduce por la alta temperatura de salida de los gases de escape por chimenea, entre 495 °C a 560 °C.
- Gran parte de la potencia generada por la turbina es demandada por el compresor axial, en el orden de las tres cuartas partes, o sea un 75% de la potencia total de la turbina.

3. BASES DE DISEÑO.

3.1. MATERIALES.

3.1.1. MATERIAS PRIMAS.

	Nombre	Cómo se recibe	Frecuencia de Recibo	Lote Recibido
1	Biomasa	Subproductos agrícolas	Aprox. 30 ton/mes	3 Lotes de 10 ton c/u

NOTA: Entiéndase por subproductos agrícolas: Olote de maíz y/o Rastrojo de maíz.

3.1.2. MATERIAS DE PROCESO.

	Nombre
1	Gas de Síntesis (Syngas)

3.1.3. SERVICIOS AUXILIARES.

	Nombre
1	Aire ambiente (Gasificador)*
2	Agua de enfriamiento y Agua para almacenamiento
3	Electricidad
4	Gas Natural

3.1.4. PRODUCTOS Y SUBPRODUCTOS.

	Nombre	Cómo se envía	Frecuencia de Envío	Lote Envío
1	Syngas	Tanques*	Autoconsumo y venta	Autoconsumo y venta
2	Electricidad/Calor		Autoconsumo y venta	Autoconsumo y venta

3.1.5. CARACTERÍSTICAS DE PRODUCTOS.

Gas de Síntesis (Syngas).

Características del Syngas

Cantidad producida (kg/h)	183.92
Composición (% volumen)*	%
CO₂	2
CO	30
N₂	38
H₂	28
CH₄	2
C₂H₄	0
C₂H₆	0
Poder Calorífico (MJ/lb)	3.5

* Datos obtenidos de balance de materia y energía.

3.1.6. LÍMITES DE PUREZA.

Concepto	Propiedades
Materias primas	Humedad
Productos	
Gas de Síntesis	Aprox. PCI 3.5 MJ/lb

3.1.7. PROPIEDADES COMUNES.

	Nombre	Densidad (kg/m ³)	Temp. (°C)	Gravedad específica
1	Biomasa		T. Ambiente	-
2	Gas Natural	N/A	15.5	0.6 (aire 1.0)
3	Aire Ambiente	4.4	25	1

3.2. LUGAR DE ESTABLECIMIENTO.

3.2.1. DATOS DE UBICACIÓN.

- Población: Tepojaco.
- Estado: Hidalgo.
- Municipio: Tizayuca.



Ilustración 4. Localización Satelital de las dos posibles ubicaciones.



Ilustración 5. Localización A (Vista frontal).



Ilustración 6. Localización B (Vista frontal).

3.2.2. *DATOS GENERALES.*

- Elevación sobre el nivel del mar: 2290m
- Presión atmosférica: 0.76 atm
- Zona sísmica: B

- Estudio de mecánica de suelos: No

3.2.3. DATOS METEOROLÓGICOS.

Temperatura.

Prom. Anual 2017 15.3 °C Máxima 22.3 °C Mínima 8.7 °C

Prom. mensual	15.3	°C	Máxima	22.3	°C	Mínima	8.7	°C
----------------------	------	----	--------	------	----	--------	-----	----

3.2.4. VÍAS DE ACCESO Y COMUNICACIÓN.

Carreteras: Carretera federal México - Pachuca

Ferrocarriles: N/A

Aeropuerto N/A

Puerto marítimo: N/A

Teléfonos: Si

3.2.5. JURISDICCIÓN.

Estado: Hidalgo

Municipio: Tizayuca

Regulador: Municipal, Estatal, Federal

3.3. CAPACIDAD DE LA PLANTA.

3.3.1. GENERAL.

Operación	24	h/día
	6	días/sem.
Turnos	2	
Días festivos No laborables	15	días/año
Operación Anual	298	días/año
Interrupción por Mantenimiento	52	días/año
Operación Anual	7152	h/año

3.3.2. PRODUCCIÓN ANUAL.

Dentro de especificación (SI)	360	ton/año
Dentro de especificación (IN)	661386	lb/año
Reciclo Fuera de Especificación (SI)	N/A	ton/año
Reciclo Fuera de Especificación (IN)	N/A	lb/año
Producción Anual Total (SI)	360	ton/año
Producción Anual Total (IN)	661386	lb/año

3.3.3. PRODUCCIÓN DE GAS DE SÍNTESIS.

Capacidad por hora (SI)	50	kg/h
Capacidad por hora (IN)	110	lb/h
Capacidad diaria (SI)	1200	kg/día
Capacidad diaria (IN)	2,416.8	lb/día
Capacidad anual (SI)	360	ton/año
Capacidad anual (IN)	630,806.4	lb/año

3.3.4. *PROCESAMIENTO DE BIOMASA.*

Mínima	50	%
Normal	100	%
Diseño	115	%
Sobre diseño	125	%

Mínima	25	kg/h
Normal	50	kg/h
Diseño	57.5	kg/h
Sobre diseño	75	kg/h

3.3.5. *TIPO DE CICLO.*

Tipo de Proceso	Discontinuo- Continuo
------------------------	-----------------------

3.3.6. *SOBREDISEÑO DE EQUIPOS.*

Equipos	150 %
----------------	-------

3.3.7. *CORROSIÓN.*

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

3.4. CONDICIONES DE PROCESO.

3.4.1. TEMPERATURA Y PRESIÓN.

	Equipo	Temp. de diseño (°C)	Presión de diseño (atm)
1	Gasificador Downdraft	800-1,200	1-3
2	Caldera Acuotubular	363	63
3	Gen. de electricidad	-	-

3.4.2. MATERIALES DE CONSTRUCCIÓN PARTICULARES.

Gasificación Downdraft: Acero Inoxidable AISI 304.

Caldera Acuotubular: Fabricante.

Turbina de Gas y Vapor: Fabricante.

Filtro de Syngas: Fabricante.

3.4.3. PRECAUCIONES ESPECIALES DE SEGURIDAD.

- Gasificador Downdraft.

Trabaja a altas temperaturas, hay riesgo de explosión. Considerar control de temperatura y utilizar aislantes. Trabaja a altas presiones, Considerar control a presión, Posibles vibraciones y sonidos fuertes. Utiliza material inflamable (Syngas).

- Turbina de Vapor.

Control en la velocidad por vibraciones. Protecciones con válvulas de escape por sobre velocidad. Cuidar nivel de aceite. Cuidar la temperatura Considerar control de temperatura. Cuidar posibles expansiones en carcaza o rotor.

- Caldera Acuotubular.

Trabaja a altas presiones y temperatura, se deben cuidar ambas variables, considerar control de las mismas, así mismo dispositivos de seguridad para protección del personal.

3.4.4. CONTENCIONES Y SEGURIDAD.

- Gasificador Downdraft.

Requiere: Si, de doble contención.

- Turbina de Vapor.

Requiere: Si, de doble contención.

- Caldera Acuotubular.

Requiere: Se definirá posteriormente.

3.5. NORMATIVIDAD APLICABLE.

La siguiente normatividad será usada para el diseño del proyecto, se recurre a esta debido a su conocimiento general y mundial.

- Tuberías: ASME, NRF 32
- Tanques Atmosféricos: API
- Recipientes a presión: ASME

- Sistema Contraincendios: API500
- Bombas: ANSI, ASTM
- Cambiadores de calor: TEMA
- Eléctrico: CFE EM-BT104 y 204
- Turbinas de Vapor: ASME-IEE
- Caldera: ASME, API
- Electricidad generada: ANSI
- Ambientales: NOM
- Diagramas de Simbología: ISA
- Especificación de Tuberías: NRFP-039

En cuanto a NOM y NRF que se encontraron y pueden aplicarse en el presente proyecto se tienen:

- NOM-005-STPS para Sustancias Químicas Peligrosas
- NOM-086-SEMARNAT para combustibles fósiles
- NOM-EM-001-ASEA para Estaciones de servicio (Almacenamiento)
- NRF-010-PEMEX-2014

3.6. SERVICIOS AUXILIARES.

Los servicios auxiliares requeridos en la planta de Gasificación son los siguientes: Vapor, Agua de enfriamiento, Aire Ambiente, Combustibles (Gas LP y Syngas).

3.7. EQUIPOS DE RELEVO.

Equipos de Proceso: Bombas y Filtros.

Instrumentos: Se utilizarán para Gasificador *Downdraft*, Caldera Acuotubular y Filtros de Arena y conocer datos de P, T y Flujo.

3.8. ESTUDIO ECONÓMICO.

Se realizará un estudio de mercado, en el cual se analizarán varios factores como: entorno nacional, demanda del producto, proveedores y consumidores. Así mismo se realizaran estimados de costos del proyecto en un rango de -20 + 30% sobre el costo total, dichos estimados se realizarán para equipos, costos directos, costos indirectos, servicios auxiliares, además de una evaluación de flujo de efectivo. Cabe mencionar que dicho estimado de costos incluye costos de terreno, equipos con instalación, instrumentación y control, únicamente para el área de Proceso. Esto quiere decir que no se incluirá la construcción de oficinas, área común, comedor, almacén, enfermería, etc.

Para evaluar la inversión del proyecto se utilizará el Índice de Retorno sobre la Inversión (ROI por sus siglas en inglés), basado en comparar el beneficio o la utilidad obtenida en relación a la inversión realizada. Así mismo se determinara si la inversión puede incrementar o reducir el valor de la misma mediante el Valor Presente Neto (VPN).

4. CRITERIOS DE DISEÑO.

4.1. GASIFICADOR *DOWNDRAFT*.

- La biomasa a tratar tendrá una densidad de 150 kg/m³ en promedio con una humedad entre 10-30% base húmeda.
- El equipo trabajará de forma continua con una capacidad de 50 kg/h durante 12 horas. El valor de este volumen se obtiene de la relación entre la masa a tratar y la densidad de la biomasa.
- El diámetro de partícula óptimo para el funcionamiento del equipo es de 0.11-0.2 mm.
- 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.

$$h_{cilindro} = 2d_{cilindro}$$

Tabla 6. Reacciones de Gasificación (Castello Belmar, A. M.)

Reacciones	
R1	$C + CO_2 \leftrightarrow 2CO$
R2	$C + H_2O \leftrightarrow CO + H_2$
R3	$C + 2H_2 \leftrightarrow CH_4$
R4	$C + 1/2O_2 \rightarrow CO$
R5	$CO + 1/2O_2 \rightarrow CO_2$
R6	$H_2 + 1/2O_2 \rightarrow H_2O$
R7	$CO + H_2O \leftrightarrow CO_2 + H_2$
R8	$CH_4 + H_2O \leftrightarrow CO + 3H_2$
R9	$CH_4 + 1/2O_2 \rightarrow CO + 2H_2$

- La temperatura de diseño del reactor considerando el Proceso de Gasificación como tecnología a utilizar y la obtención de Gas de Síntesis como producto principal, estará entre 500-600°C.
- La presión de diseño a la que trabajará el equipo será la atmosférica.
- Un factor determinante que define el resultado del proceso es el agente gasificante. Según cual sea utilizado, se tendrán diferentes productos, los que se diferenciarán en composición y el Poder Calorífico.

Tabla 7. Relación agente gasificante y Poder Calorífico de Syngas.

Agente gasificante	Nombre	Poder Calorífico (MJ/m ³)
Aire	Gas pobre (Syngas)	4-7
Vapor de agua	Syngas	10-18
Oxígeno	Syngas	12-28

NOTA: Se denomina Gas pobre al Syngas, utilizando aire como agente gasificante, debido que el porcentaje de Nitrógeno en la composición del gas es elevado.

- El agente gasificante a utilizar para el Proceso de Gasificación será aire. Esta elección está basada en la viabilidad técnico-económica para la obtención de este, ya que en comparación con los otros dos agentes disponibles estos resultan más costosos.

4.2. COMPRESORES.

- Los compresores se dividen en tres categorías:
 - o Desplazamiento positivo: que a su vez se divide en recíprocante y rotativo.
 - o Dinámico: de tipo flujo radial (centrífugo) y flujo axial.
- Para este proyecto se seleccionaran compresores de tipo centrífugo.
- Ventajas de un compresor centrífugo sobre uno recíprocante:

- Menor costo de instalación cuando las condiciones de presión y volumen son favorables.
 - Menos gastos de mantenimiento.
 - Mayor continuidad de servicio y mayor confiabilidad.
 - Menor requerimiento de atención a su operación.
 - Mayor capacidad volumétrica por unidad de área de instalación.
 - Adaptabilidad a motores de alta velocidad y bajo costo de mantenimiento.
-
- La eficiencia para compresores centrífugos grandes está entre 76 y 78% para unidades de 6,000 a 100,000 ACFM (Actual Cubic Feet per Minute) en la succión.
 - Deben ser especificados conforme a la Norma API Estándar 617.
 - La capacidad de diseño de compresores debe ser calculada como mínimo en base a un 10% mayor del flujo normal contemplado en el balance de masa.
 - Se recomienda que la relación de compresión por etapa esté entre 2 y 3 para compresores centrífugos y entre 3 y 4 para reciprocantes.
 - Los centrífugos normalmente no requieren respaldo.
 - Los compresores centrífugos generalmente requieren tambores de separación, sin embargo, pueden succionar de un recipiente de Procesos, si éste está próximo al compresor y tiene los mismos dispositivos de seguridad que un tambor de separación.
 - Las variables a controlar en compresores centrífugos pueden incluir presión de entrada, presión de descarga, flujo, o alguna combinación de éstos parámetros.

4.3. BOMBAS.

- Las bombas centrífugas, reciprocantes y rotativas deben ser especificadas de acuerdo a “Hydraulic Institute Standards”, las bombas de agua

contra incendio serán especificadas de acuerdo a NFPA 20, "Standard for the Installation of Centrifugal Pumps".

- Todas las bombas en servicio continuo deben tener un 100% de respaldo o un respaldo común.
- Considerando que se tiene una bomba de respaldo en servicio crítico, está debe ser de arranque automático, con actuadores por pérdida de presión de descarga o flujo de la bomba principal.
- Se considera como servicio crítico una Bomba de agua para generación de vapor.
- La capacidad normal de una bomba es el flujo normal de Proceso requerido para cumplir con los balances de materia y energía.

4.4. CALDERA ACUOTUBULAR.

- Son equipos en los que la quema de combustibles genera calor a altas temperaturas, el que es absorbido por agua para convertirse en vapor. En éstas puede obtenerse vapor saturado o vapor sobrecalentado.
- Se generara vapor de...
Vapor de baja presión: vapor a presión menor a 100 psig
Vapor de media presión: vapor a presión entre 100 y 200 psig
Vapor de alta presión: vapor a presión mayor a 200 psig.
- El tipo de Caldera a usar será Acuotubulares, son aquellas en las que el agua fluye por los tubos de la caldera. Es el tipo más común.
- Para una misma capacidad de diseño, las calderas Acuotubulares cuestan menos que las Piro tubulares.
- Para calderas en proyectos nuevos debe usarse un factor de diseño entre 15 y 20 %.
- Tanto la caldera como los quemadores de la misma deben ser diseñados para un "Turndown" de 5 a 1 para permitir flexibilidad de la operación.

- Las calderas deben estar provistas de válvulas de alivio con capacidad igual a la máxima producción de vapor posible.
- La cantidad de purga de líquidos depende del nivel de impurezas en el agua de alimentación a la caldera.

4.5. INTERCAMBIADORES DE CALOR.

- Se diseñan para un área mínima de 30-50 ft² (3-5 m²), para presiones de moderada a alta sin costo excesivo.
- Los intercambiadores diseñados con tubos de pequeño diámetro (5/8"-1") son más compactos y más económicos que aquellos que utilizan tubos de mayor diámetro.
- Se utilizan tubos de 1" cuando se espera ensuciamiento porque no es práctico limpiar mecánicamente tubos de diámetro menor.
- Arreglo: Los tubos pueden instalarse en arreglo triangular, cuadrado, o cuadrado rotado. El arreglo triangular proporciona mejores coeficientes de transferencia de calor en el lado de la carcasa, porque presenta mayor turbulencia, requiere menos área para un diámetro dado de carcasa, mientras que el cuadrado se emplea cuando se requiere limpieza mecánica del lado externo de los tubos. Algunas veces, un arreglo triangular ampliamente espaciado facilita la limpieza. Los dos tipos de arreglo cuadrado ofrecen menor caída de presión, (pero menores coeficientes de transferencia de calor) que el arreglo triangular.
- Separación entre tubos (pitch) típicamente es 1.25 veces el DE del tubo.
- Longitud: mientras más largos sean los tubos, menor será el costo del equipo. Las longitudes normales de tubos son 12, 16, 20 y 24 ft.
- Configuración estándar: tubos de acero al carbono, de 3/4" de DE, espesor de pared de 14 BWG como mínimo y 16 o 20 pies de longitud, arreglo triangular de tubos para líquidos limpios, y arreglo cuadrado cuando se requiere limpieza frecuente.

- “Baffles” en la carcasa: sirven para dos propósitos: para dirigir al fluido de la carcasa por una ruta preestablecida, y para soportar los tubos y reducir la vibración. Tipos más comunes: segmental, tipo ventana y longitudinal. Normalmente se utilizan los de tipo simple segmentado, usándose el tipo de corte vertical para fluidos con cambio de fase, y el horizontal para fluidos sin cambio de fase.
- El espaciamiento entre “Baffles” debe ser como mínimo el 20% del diámetro interno de la carcasa, y nunca debe ser menor que 2”. El espaciamiento óptimo es de 40% del diámetro interno de la carcasa.
- Para fluidos muy viscosos, o cuando se tengan gases por la carcasa, se recomienda usar tubos con aletas exteriores, tipo “low fins”.
- Presión de diseño: Debe ser igual a la presión máxima de operación (si el equipo es alimentado por una bomba, tener en cuenta la presión de shutoff de ésta), más 10%, pero no menor que la presión máxima de operación más 30 psi. Si la presión de diseño del lado de baja presión es mayor a 2/3 de la presión de diseño del lado de alta presión, no se requiere la instalación de válvula de alivio por ruptura de tubos
- Temperatura de diseño: Cuando la temperatura del fluido sea menor a 32 °F, usar este valor como temperatura mínima de diseño. Para temperaturas mayores a 32 °F, la temperatura de diseño será igual a la máxima temperatura de operación más 25 °F, pero no menor que 150 °F.
- Ubicación de los fluidos: La ubicación de los fluidos en intercambiadores de calor de tipo tubo - carcasa debe satisfacer la mayoría de los siguientes criterios:

Tabla 8. Ubicación de fluido dentro de Intercambiadores de coraza y tubos.

Servicio	Carcasa	Tubos
Agua de mar		X
Agua de enfriamiento		X
Vapores condensando	X	
Fluidos vaporizando	X	
Fluido a mayor temperatura		X
Mínima caída de presión permisible	X	
Fluidos a alta presión		X
Fluidos corrosivos, construcción con aleaciones		X
Fluidos sucios		
Fluidos limpios de alta viscosidad/flujo laminar	X	
Fluidos con propiedades similares, flujo mayor	X	

De acuerdo a la Tabla anterior, la ubicación de los fluidos para este proyecto es la siguiente:

EC-201: Tubos: Syngas, Carcasa: Aire.

EC-202: Tubos: Agua de enfriamiento, Carcasa: Syngas.

4.6. TANQUES DE ALMACENAMIENTO.

4.6.1. TANQUE DE ALMACENAMIENTO DE AGUA.

- Recipiente atmosférico.
- Seleccionar de acuerdo a la presión de vapor del líquido.

Tabla 9. Relación tipo de tanque y Presión del líquido (Agua).

Presión de vapor del líquido, (bar)	Tipo de Tanque
0.1 o menor	Techo cónico
0.1 a 0.75	Techo flotante
Mayor de 0.75 hasta 6 bar	Techo cónico con sistema de recuperación de vapor

Ecuación de Antoine: $\ln\left(\frac{p_{sat}}{bar}\right) = A - \frac{B}{T/K + C}$ donde los valores de las constantes

están dados en la tabla a seguir:

	A	B	C
Agua	11.2851	3569.3	-56.464

- Por lo tanto, para el Agua:

$$p_{sat} = e^{\left(A - \frac{B}{T/K + C}\right)}$$

$$p_{sat} = e^{\left(11.2851 - \frac{3569.3}{298.15 - 56.464}\right)}$$

$$p_{sat} = 0.031 \text{ bar}$$

- Para fluidos de presión de vapor menor a 0.1 bar deben usarse tanques de techo tipo cónico, los cuales son los más económicos. Estos contienen espacio de vapor susceptible a la corrosión.
- De acuerdo al resultado obtenido para la Presión de vapor del agua, se selecciona un Tanque atmosférico con techo Cónico.
- Presión Diseño: Se diseñan para una presión de 2.5 pulgadas de agua y 1.0 pulgadas de agua de vacío.
- Temperatura de Diseño: Deben diseñarse para la temperatura de operación más 50 °F (10 °C).

- La capacidad neta en tanques atmosféricos de techo cónico es el volumen desde un pie por debajo del techo del tanque hasta dos pies por encima del eje de la boquilla de succión de la bomba.

4.6.2. TANQUE DE ALMACENAMIENTO DE SYNGAS.

- Recipiente a presión.
- De acuerdo a la siguiente tabla se seleccionara el tipo de recipiente:

Tabla 10. Relación tipo de tanque capacidad (Syngas).

Presión de Operación (Bar)	Capacidad (m ³)	Tipo de Tanque
6 mmbar hasta 0.2	-	Techo tipo domo
0.2 a 0.35	Hasta 3000	“Plain Hemiesferoid”
0.2 a 0.35	3000 a 6000	“Noded Hemiesferoid”
0.2 a 0.35	> 6000	“Noded Esferoid”
0.35 a 2.0	Hasta 6000	“Plain Esferoid”
0.35 a 1.0	>6000	“Noded Esferoid”
2.0 a 200	Hasta 600	Cilindro Horizontal
1.4 a 20	De 150 a 8000	Esfera

- La presión de operación de la corriente que almacena el Syngas es de 2 bar, mientras que la capacidad de almacenamiento es de 70 m³/h, por lo tanto se selecciona una Esfera para almacenamiento de este combustible.
- Las esferas deben ser diseñadas de acuerdo al Código ASME para Calderas y Recipientes a presión, Sección VIII, División 1.
- Las boquillas deben ser diseñadas para coincidir con el diámetro de la tubería conectada.

4.6.3. TANQUE DE ALMACENAMIENTO DE GAS NATURAL.

- Recipiente a presión.
- De acuerdo a la siguiente Tabla se seleccionara el tipo de recipiente:

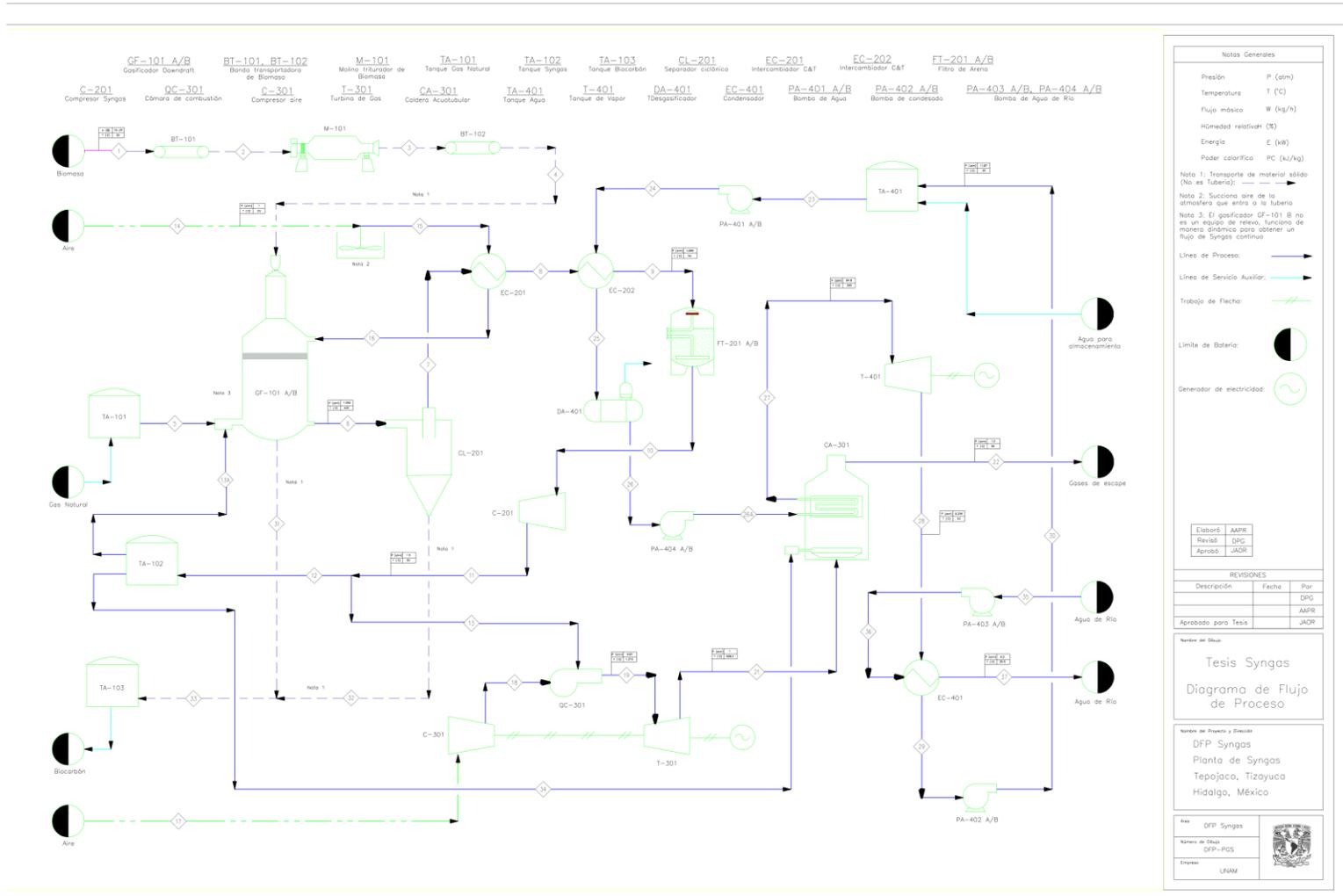
Tabla 11. Relación tipo de tanque capacidad (Gas Natural).

Presión de Operación (Bar)	Capacidad (m ³)	Tipo de Tanque
6 mbar hasta 0.2	-	Techo tipo domo
0.2 a 0.35	Hasta 3000	“Plain Hemiesferoid”
0.2 a 0.35	3000 a 6000	“Noded Hemiesferoid”
0.2 a 0.35	> 6000	“Noded Esferoid”
0.35 a 2.0	Hasta 6000	“Plain Esferoid”
0.35 a 1.0	>6000	“Noded Esferoid”
2.0 a 200	Hasta 600	Cilindro Horizontal
1.4 a 20	De 150 a 8000	Esfera

- La presión de operación de Gas Natural es de 1-2 bar, mientras que la capacidad de almacenamiento es de 1 m³/h, por lo tanto se selecciona un Plain Esferoid (Esferoide) para almacenamiento de este combustible.
- Las esferas deben ser diseñadas de acuerdo al Código ASME para Calderas y Recipientes a presión, Sección VIII, División 1.
- Las boquillas deben ser diseñadas para coincidir con el diámetro de la tubería conectada

5. DIAGRAMA DE FLUJO DE PROCESO.

5.1. DFP.



5.2. LISTA DE EQUIPOS.

Tabla 12. Lista de equipos y condiciones de operación.

Área	Tag	Descripción	Corrientes E/S		P _{normal} (atm)	P _{diseño} (atm)	T _{normal} (°C)	T _{diseño} (°C)
			Entrada	Salida				
100	BT-101	Banda Transportadora	1	2	1.00	1.50	25.00	37.50
100	M-101	Molino de Bolas	2	3	1.00	1.50	25.00	37.50
100	BT-102	Banda Transportadora	3	4	1.00	1.50	25.00	37.50
100	GF-101 A/B	Gasificador Downdraft	4, 5, 13A, 16	6, 31	1.05	1.58	797.00	1195.50
100	TA-101	Tanque Gas Natural	-	5	1.94	2.90	25.00	37.50
100	TA-102	Tanque Syngas	12	13A, 34	1.50	2.25	50.00	75.00
100	TA-103	Tanque Biocarbón	33	-	0.34	0.51	30.00	45.00
200	CL-201	Separador ciclónico	6	7, 32	1.05	1.58		0.00
200	EC-201	Intercambiador C & T	7, 15	8, 16	Tub:	1.57	Tub:	637.50
					Cor:	1.50	Cor:	37.50
200	EC-202	Intercambiador C & T	8, 24	9, 25	Tub:	1.06	Tub:	329.42
					Cor:	12.82	Cor:	25.00
200	FT-201 A/B	Filtro de Arena	9	10	1.07	1.60	50.00	75.00
200	C-201	Compresor de Syngas	10	11	1.50	2.25	50.00	75.00
300	QC-301	Cámara de Combustión	18	19	9.87	14.81	1373.15	2059.73
300	C-301	Compresor de Aire	17	18	9.87	14.81	1373.15	2059.73
300	T-301	Turbina Gas	19	21	9.87	14.81	1373.15	2059.73
400	CA-301	Caldera Acuotubular	21, 26A, 34	22, 27	5.00	7.50	888.30	1332.45

Universidad Nacional Autónoma de México

400	TA-401	Tanque Agua	30	23	1.00	1.50	25.00	37.50
400	PA-401 A/B	Bomba Agua	23	24	12.82	19.23	25.00	37.50
400	T-401	Turbina Vapor	27	28	84.80	127.21	300.00	450.00
400	DA-401	Desgasificador	25	26	12.82	19.23	90.00	135.00
400	PA-402 A/B	Bomba Agua	29	30	11.87	17.80	30.00	45.00
400	EC-401	Condensador	28, 36	36, 37	4.20	6.29	25.00	37.50
400	PA-403 A/B	Bomba Agua	35	36	4.20	6.29	25.00	37.50
400	PA-404 A/B	Bomba Agua	26	26A	25.14	37.71	90.00	135.00

5.3. BALANCE DE MATERIA Y ENERGÍA.

		N° Corriente	1	2	3	4	5	6	7
Materia	Unidades	Paja de Maíz	Paja de Maíz	Pellets de Maíz	Pellets de Maíz	Gas Natural	Syngas	Syngas	
Fase		S	S	S	S	G	G	G	
Flujo másico	kg/h	50	50	50	50	0.872	84.54	83.5	
	lb/h	110.13	110.13	110.13	110.13	1.92	186.21	183.92	
Flujo volumétrico	m³/h	0.33	0.33	0.33	0.33	1.085	468	464	
	ft³/h	11.77	11.77	11.77	11.77	38.32	16518.78	16387.54	
Temperatura	°C	25	25	25	25	25	425	425	
	°F	77	77	77	77	77	797	797	
Densidad	kg/m³	150	150	150	150	0.8034	0.181	0.180	
	lb/ft³	9.36	9.36	9.36	9.36	0.05	0.01	0.01	
Presión	atm	1	1	1	1	1.94	1.052	1.048	
	psia	14.7	14.7	14.7	14.7	28.45	15.47	15.401	
Entalpía	kJ/kg	-	-	-	-	-	-	-	
	BTU/lb	-	-	-	-	-	-	-	

Universidad Nacional Autónoma de México

	N° Corriente	8	9	10	11	12	13	13A	14
Materia	Unidades	Syngas	Syngas	Syngas	Syngas	Syngas	Syngas	Syngas	Aire
Fase		G	G	G	G	G	G	G	G
Flujo másico	kg/h	83.5	83.5	82.7	81.84	75.89	5.95	2.22	77.12
	lb/h	183.92	183.92	182.08	180.26	167.16	13.10	4.88	169.86
Flujo volumétrico	m³/h	396.5	210.5	210.5	147.04	136.36	10.68	3.98	64.02
	ft³/h	14002.51	7434.29	7434.29	5192.40	4815.13	377.27	140.61	2260.84
Temperatura	°C	329	50	50	50	50	50	50	25
	°F	624.95	122	122	122	122	122	122	77
Densidad	kg/m³	0.2	0.4	0.4	0.56	0.56	0.56	0.56	1.20
	lb/ft³	0.01	0.02	0.02	0.03	0.03	0.03	0.03	0.08
Presión	atm	1.058	1.069	1.058	1.5	1.5	1.5	1.5	2.36
	psia	15.556	15.713	15.556	22.05	22.05	22.05	22.05	34.692
Entalpía	kJ/kg	-	-	-	-	-	-	-	-
	BTU/lb	-	-	-	-	-	-	-	-

Universidad Nacional Autónoma de México

	N° Corriente	15	16	17	18	19	21	22
Materia	Unidades	Aire	Aire	Aire	Aire	Aire caliente	Vapor Aire	Gas de Escape
Fase		G	G	G	G	V	V	G
Flujo másico	kg/h	27.12	27.12	50.00	50.00	50.00	50.00	50.82
	lb/h	59.73	59.73	110.13	110.13	110.13	110.13	111.93
Flujo volumétrico	m³/h	22.51	22.51	41.51	30.26	69.55	96.87	114.13
	ft³/h	794.97	794.97	1465.88	1068.52	2456.19	3420.60	4030.28
Temperatura	°C	25	329.4	25.0	443.0	1373.2	888.3	50.0
	°F	77	624.95	77	829.47	2503.67	1630.94	122
Densidad	kg/m³	1	1	1	2	1	0.52	0.4
	lb/ft³	0.08	0.08	0.08	0.10	0.04	0.03	0.03
Presión	atm	1	1	1	9.87	9.87	5	1.2
	psia	14.7	14.7	14.7	145.09	145.09	73.5	17.64
Entalpía	kJ/kg	-	-	-	-	-	-	-
	BTU/lb	-	-	-	-	-	-	-

Universidad Nacional Autónoma de México

		N° Corriente	23	24	25	26	26A	27	28	29
Materia	Unidades	Agua	Agua	Agua	Agua	Agua	Agua	Vap. Sat.	Vap. Exp.	Agua Cond.
Fase		L	L	L	L-V	L-V		V	V	L
Flujo másico	kg/h	131.37	131.37	131.37	131.37	131.37	131.37	131.373	131.373	131.373
	lb/h	289.37	289.37	289.37	289.37	289.37	289.37	289.37	289.37	289.37
Flujo volumétrico	m³/h	0.13	0.13	0.13	0.13	0.13	0.13	0.13	0.13	0.13
	ft³/h	4.64	4.64	4.64	4.64	4.64	4.64	4.64	4.64	4.64
Temperatura	°C	25	25	90	90.0	90.0	300.0	53.0	30.0	
	°F	77	77	194	194.00	194.00	572	127.4	86	
Densidad	kg/m³	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000
	lb/ft³	62.37	62.37	62.37	62.37	62.37	62.37	62.37	62.37	62.37
Presión	atm	1	12.82	12.82	12.82	25.14	84.80	0.339	0.339	
	psia	14.7	188.47	188.47	188.47	369.54	1246.61	5.0	5.0	
Entalpía	kJ/kg	104.8	104.8	376.9	2283.2	2284.2	2751	2597.5	125.7	
	BTU/lb	45.05	45.05	162.03	981.55	981.98	1182.65	1116.67	54.04	

Universidad Nacional Autónoma de México

		N° Corriente	30	31	32	33	34	35	36	37
Materia	Unidades	Agua	Biocarbón	Biocarbón	Biocarbón	Syngas	Agua de Río	Agua de Río	Agua de Río	
Fase		L	S	S	S	G	L	L	L	
Flujo másico	kg/h	131.373	3.043	1.040	4.083	0.817	32.277	32.277	32.277	
	lb/h	289.37	6.70	2.29	8.99	1.80	71.09	71.09	71.09	
Flujo volumétrico	m³/h	0.13	0.01	0.00	0.01	1.47	0.03	0.03	0.03	
	ft³/h	4.64	0.31	0.10	0.41	51.86	1.14	1.14	1.14	
Temperatura	°C	30.0	50.0	50.0	50.0	50.0	25.0	25.0	25.5	
	°F	86	122	122	122	122	77	77	77.9	
Densidad	kg/m³	1000	350	350	350	1	1000	1000	1000	
	lb/ft³	62.37	21.83	21.83	21.83	0.03	62.37	62.37	62.37	
Presión	atm	11.87	1	1	1	1.5	1	4.20	4.20	
	psia	174.43	14.7	14.7	14.7	22.05	14.7	61.67	61.67	
Entalpía	kJ/kg	125.7	-	-	-	-	104.8	104.8	117.3	
	BTU/lb	54.04	-	-	-	-	45.05	45.05	50.43	

6. DESCRIPCIÓN DE PROCESO.

6.1. ÁREA 100: PRETRATAMIENTO Y GASIFICACIÓN.

El Proceso de pre-tratamiento comienza transportando la materia prima desde un sitio de almacenamiento en la planta a la banda transportadora BT-101, la paja de maíz va directamente al Molino de Bolas M-101, en este equipo la materia prima será triturada hasta formar pellets con un diámetro de partícula en un rango de 0.11-0.2 mm. Se necesita este diámetro para ayudar en etapas posteriores del Proceso específicamente al Gasificador ya que este equipo requiere un diámetro determinado para su funcionamiento óptimo, así como un porcentaje de humedad entre 15-25%.

Después del molino los pellets serán transportados en otra banda, BT-102, hasta la tolva del Gasificador y así comenzar con el Proceso de Gasificación.

El Proceso de Gasificación comienza con la alimentación de la materia prima ya pre-tratada en el domo del Gasificador Downdraft (Corrientes paralelas) GF-101 A/B (Se contempla un equipo de relevo para garantizar un flujo continuo de Syngas, ya que se busca una generación de energía eléctrica autosuficiente para aprovechamiento general de la planta). Dicho Gasificador debe tener una temperatura inicial en un rango de 700-800 °C aprox. por lo tanto debe ser precalentado 45 minutos antes con la ayuda de un quemador integrado en el fondo del Gasificador, el quemador es alimentado (inicialmente) con Gas Natural que proviene del Tanque TA-101 (después de la Gasificación y una vez que se produzca Gas de Síntesis el quemador podrá ser accionado con una fracción del mismo gas y así economizar el Gas Natural).

Cuando el Gasificador este pre-calentado y listo para recibir la biomasa, los pellets proveniente de la banda transportadora BT-102 serán recibidos en una tolva,

que se encuentra en la parte superior del Gasificador y sirve para almacenar la biomasa entrante, los pellets serán dosificados con un tornillo que ira rotando y moviendo paquetes de pellets para así tener un flujo constante en la primera sección del Gasificador, este equipo cuenta con 4 secciones que se describen a continuación.

- Zona de secado. La biomasa al ingresar a la primera sección, pierde completamente la humedad debido a la temperatura, por lo que es importante que la biomasa que entre tenga un porcentaje de humedad aproximado (15-25%) para aprovechar eficientemente el uso del calor en el Gasificador.
- Zona de pirólisis. También llamada zona de destilación. Consiste en una ruptura de las cadenas largas de hidrocarburos en otras más pequeñas. Uno de los productos obtenidos de la pirólisis es el alquitrán formado a partir de la licuefacción de los gases condensables. Es importante tener en cuenta su presencia durante la Gasificación por todos los problemas que involucra al ser un líquido viscoso.
- Zona de oxidación. Los productos obtenidos en la pirólisis pasan por esta sección, también conocida como corazón del reactor. Aquí es donde se agrega el agente gasificante, en este caso aire ambiente, para que predominen las reacciones de combustión. 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. En esta última etapa ocurren principalmente las reacciones endotérmicas de oxidación parcial, que producen el gas combustible denominado Syngas que sale como producto principal para fines de este proyecto a una temperatura aproximada de 700 °C y presión por encima de la atmosférica, teniendo un Poder Calorífico Inferior (PCI) aproximado de 5,000 kJ/kg.

El reactor de Gasificación tiene como subproducto cenizas conocidas como Biocarbón, las cuales se forman durante la etapa de pirólisis, pero que no reaccionan en las etapas subsecuentes de oxidación y reducción. Estas se retiran cada hora mediante la apertura de una compuerta en la sección inferior del Gasificador transportando dicho subproducto manualmente en una unidad móvil para su almacenamiento en el tanque TA-103.

Finalmente el Syngas sale en la parte inferior del Gasificador Downdraft para continuar su Proceso de limpieza en la siguiente área, y así poder aprovecharlo posteriormente dentro de nuestro Proceso.

6.2. ÁREA 200: LIMPIEZA Y ADECUACIÓN DE GAS DE SÍNTESIS.

El Gas de Síntesis al salir del Gasificador lleva cenizas de biocarbón esto a raíz que el Gasificador es de corrientes paralelas, por lo tanto para retirarlas el Syngas entra al equipo CL-201 que es un ciclón de alta eficiencia, en este se espera retirar estas partículas que van como excedentes y que de no retirarse afectarían el funcionamiento adecuado de los equipos posteriores, por lo tanto el objetivo es dejar el Gas de Síntesis limpio y listo para entrar al tren de intercambiadores.

El tren de intercambiadores empieza con el equipo EC-201, este intercambiador es de coraza y tubos, el Gas de Síntesis a 425 °C entra por la coraza mientras que en los tubos pasa aire, proveniente de la atmosfera con la ayuda de un soplador, este será precalentado para ahorrar energía en el Gasificador, se desea ocupar solo la cantidad requerida estequiométricamente para no tener un excedente que afecte en el Proceso y tamaño de los equipos.

En el siguiente intercambiador, EC-202, que igual es de coraza y tubos, entra el Gas de Síntesis a una temperatura de 397 °C por la coraza y calentara agua

proveniente del tanque TA-401 a temperatura ambiente que pasará por los tubos llegando a una temperatura de 90 °C, por otro lado la temperatura del Syngas a la salida del EC-202 será de 50 °C, el agua caliente que sale de este intercambiador EC-202 será ocupada para etapas posteriores en el Proceso.

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 FT-201A, o en su defecto al FT-201B por cuestiones de mantenimiento del filtro principal, para sustraer dichas sustancias indeseables y poder ingresar un flujo limpio de Syngas al compresor centrífugo C-201 y llevarlo hasta una presión casi del doble de la presión barométrica.

El siguiente paso consiste en almacenar una fracción necesaria para la Gasificación en el tanque TA-102, mismo que sirve como combustible de los Gasificadores en su funcionamiento normal para hacer auto sustentable el Proceso de generación de Syngas en el Gasificador. Otra fracción del Gas de Síntesis presurizado es destinada a un quemador donde es consumido para entrar al Ciclo de Brayton y así generar energía eléctrica.

6.3. ÁREA 300: CICLO DE BRAYTON.

Para dar inicio al Ciclo de Brayton se succionara aire con la ayuda de un ventilador el cual será comprimido en el equipo C-301 que es un compresor centrífugo y llevara el aire a una presión cercana a 10 atm y una temperatura aproximada de 300 °C.

Una parte del aire comprimido se destina a la cámara de combustión QC-301 donde se quemara junto con la fracción requerida de Syngas proveniente del C-201. Las cámaras de combustión tienen como fin lograr una eficiente combustión y por otro lado asegurar bajas emisiones contaminantes, especialmente en contenidos de óxidos de nitrógeno (NO y NO₂).

En la cámara de combustión se produce la oxidación del Syngas desarrollándose muy altas temperaturas, cercana a los 1,500 °C. Los parámetros que se deben vigilar que cumpla la cámara de combustión son:

- Estabilizar la llama dentro de aire caliente que se encuentra a alta velocidad, de manera que ésta se mantenga estable.
- Asegurar una corriente de gases continua hacia la turbina.
- Mantener una temperatura constante de los gases de combustión que ingresan a la misma.
- La caída de presión dentro de la cámara debe ser la menor posible a fin de minimizar las caídas de presión entre el compresor axial y la turbina.

Las corrientes de salida de la cámara de combustión QC-301 y del compresor centrífugo C-301 llegan a la turbina de gas T-301, que tiene por objeto ser la parte final del Ciclo de Brayton llevando el aire a una presión y temperatura de 1.5 atm y aproximadamente 600 °C respectivamente.

El objetivo principal de ocupar el Ciclo de Brayton en esta sección del Proceso es obtener energía eléctrica por medio de un generador eléctrico accionado por la turbina T-301.

6.4. ÁREA 400: APROVECHAMIENTO DE ENERGÍA.

El agua a condiciones ambientales, proveniente del tanque de almacenamiento TA-401, es bombeada por el equipo PA-401 A/B que se encarga de llevarla a intercambiador de calor EC-202 donde se calentara hasta una temperatura cercana a 90°C, cuyo objetivo es disminuir la temperatura de salida del Gas de Síntesis de el mismo intercambiador.

El agua caliente proveniente del EC-202 es llevada al equipo DA-401 que es un des-Gasificador, el cual tiene como objetivo eliminar la mayor cantidad posible de oxígeno en el agua, esto debido a que este gas es un agente corrosivo de alto peligro para el equipo CA-401, que es una caldera acuotubular, ya que puede perforar los tubos por los que pasa el agua provocando fugas, pérdida de eficiencia o inestabilidad en el Proceso.

El agua proveniente del equipo DA-401 es bombeada por el equipo PA-404 A/B a una caldera acuotubular CA-401, la cual es accionada con un quemador que utiliza como combustible Gas de Síntesis utilizando el aire caliente proveniente de la Turbina de gas T-301 para llevarlo a una temperatura de 979.15 °C y con esto calentar el agua proveniente de la bomba que pasa por los tubos de la caldera hasta llevarla a la temperatura de 300 °C y una presión de 84 atm, dichas condiciones corresponden a un vapor saturado que nos servirá para accionar el siguiente equipo. Mientras que los gases de escape, generados en la caldera serán expulsados por medio de una chimenea a la atmósfera vigilando que cumplan las restricciones marcadas por norma en cuestiones ambientales.

El vapor saturado será dirigido a una Turbina de vapor T-401, donde su presión y temperatura disminuirán hasta 10 inHg y 53 °C respectivamente, para generar energía eléctrica mediante un generador accionado por la misma turbina, el vapor a la salida de este equipo será dirigido a un condensador, EC-401 con la finalidad de obtener las condiciones necesarias de presión y temperatura para ser recirculado con ayuda de una bomba PA-402 A/B hacia el tanque de almacenamiento TA-401.

El equipo EC-401 es un intercambiador de calor de coraza y tubos que condensará el vapor proveniente de la turbina con ayuda de agua de río, que es bombeada por el equipo PA-403 A/B a condiciones atmosféricas; el agua de río pasará por la coraza y su cambio de temperatura será máximo 0.5 °C para no afectar el ecosistema de donde es tomada.

7. MEMORIAS DE CÁLCULO.

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

	Proyecto: "Desarrollo de la Ingeniería Básica para una planta de producción de Gas de Síntesis (Syngas) a partir de la Gasificación de subproductos agrícolas".	Hoja 1-2
Elaboró: DPG Revisó: AAPR Aprobó: JAOR	Memoria de Calculo Gasificador <i>Downdraft</i> GF-101 A/B	Fecha: 22/06/2017

Cálculo del tamaño del Gasificador *Downdraft*

Capacidad de tratamiento	50	kg/h
Densidad de la biomasa	150	kg/m ³

Volumen del reactor:

$$V_{\text{gasificador}} = \frac{m_{\text{biomasa}}}{\rho_{\text{biomasa}}}$$

$$V_{\text{gasificador}} = A_{\text{cilindro}} * h_{\text{cilindro}}$$

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

$$h_{\text{cilindro}} = 1.5 * d_{\text{cilindro}}$$

Con estas ecuaciones, después de realizar los cálculos para diferentes tamaños de altura y diámetro se obtiene:

d (m)	h (m)	A (m ²)	V (m ³)
0.1	0.15	0.0079	0.0012
0.2	0.3	0.0314	0.0094
0.3	0.45	0.0707	0.0318
0.4	0.6	0.1257	0.0754
0.5	0.75	0.1963	0.1473
0.6	0.9	0.2827	0.2545
0.7	1.05	0.3848	0.4041
0.8	1.2	0.5027	0.6032
0.9	1.35	0.6362	0.8588
1	1.5	0.7854	1.1781
1.5	2.25	1.7671	3.9761
2	3	3.1416	9.4248
2.5	3.75	4.9087	18.4078
3	4.5	7.0686	31.8086
3.5	5.25	9.6211	50.5109

Seleccionamos la columna después de realizar el cálculo que nos da referencia al volumen de la biomasa ocupada por hora.

Volumen requerido para la cantidad de biomasa a utilizar.

Paja de maíz	50	kg/h
Flujo másico de aire	27.12	kg/h
Flujo másico de Syngas	57	kg/h
Paja de maíz	0.333	m ³ /h
Flujo volumétrico de aire	22.51	m ³ /h
Flujo volumétrico de Syngas	334.79	m ³ /h
Suma	5.96	m ³ /min

De acuerdo al volumen obtenido, se selecciona un reactor con un volumen de 9.4248 m³.

	Proyecto: "Desarrollo de la Ingeniería Básica para una planta de producción de Gas de Síntesis (Syngas) a partir de la Gasificación de subproductos agrícolas".	Hoja 2-2
Elaboró: DPG Revisó: AAPR Aprobó: JAOR	Memoria de Calculo Gasificador <i>Downdraft</i> GF-101 A/B	Fecha: 22/06/2017

Diseño del Gasificador *Downdraft*.

Capacidad de tratamiento	50	kg/h
Densidad de biomasa	150	kg/m ³
Volumen requerido	9.42	m ³
Área	3.14	m ²
Altura	3	m
Diámetro	2	m

Cálculo de presión.

$$P_{calc.} = P_{atm.} + P_{hidr.}$$

$$P_{hidr.} = \rho_{biomasa} * g * h$$

$$g = 9.81 \frac{m}{s^2}$$

$$P_{salida} = P_{entrada} - \Delta P$$

Presión de entrada	1	atm
Presión de entrada	101.325	kPa
Presión hidrostática	5297.4	Pa
Presión hidrostática	0.052	atm
Presión calculada	1.052	atm
Presión calculada	106622.4	Pa
Presión calculada	106.622	kPa
ΔP (teórica)	0.98	kPa
Presión de salida	100.325	kPa
Presión de salida	0.99	atm

Referencia:

CASTELLO BELMAR ANGELO MICHELE . (2014). Diseño de un reactor continuo de gasificación de biomasa. Universidad de Chile.

BRANAN CARL. (2002). Rules of Thumb for Chemical Engineers. Houston Texas: Gulf Professional Publishing.

Balance de Energía en el Gasificador *Downdraft*.

$$Q_{cedido} = Q_{absorbido}$$

Biomasa de tratamiento	50	kg
Capacidad calorífica de Biomasa	490	Cal/kg K
Temperatura de entrada	25	°C
Temperatura de salida	425	°C
Calor ganado	9800000	Cal
Poder Calorífico Inferior	9032	kCal/m ³
Temperatura de entrada	25	°C
Volumen de Gas Natural utilizado	1.085	m ³
Masa tratada	0.872	kg

7.2. INTERCAMBIADOR DE CALOR C&T EC-202.

	Proyecto: "Desarrollo de la Ingeniería Básica para una planta de producción de Gas de Síntesis (Syngas) a partir de la Gasificación de subproductos agrícolas".	Hoja 1-2
Elaboró: AAPR Revisó: DPG Aprobó: JAOR	Memoria de Calculo Intercambiador de calor C&T EC-202	Fecha: 22/06/2017

Datos

Syngas		
Masa de Entrada	56.9	Kg/h
Temperatura de Entrada	329	°C
Temperatura de Salida	50	°C
Agua		
Temperatura de Entrada	25	°C
Temperatura de Salida	90	°C

Y las propiedades de las sustancias que se encuentran en el intercambiador son:

Agua			Syngas		
Temperatura media	57.5	°C	Temperatura media	189.71	°C
Cp	1000	Kcal/kg°C	Cp	366	Kcal/kg°C
K	0.13	Kcal/hm ² °C	K	0.173	Kcal/hm ² °C
Mu	0.0007	Ps	Mu	0.00055	Ps
Ro	1	Kg/m ³	Ro	0.17	Kg/m ³
Pr	5	-	Pr	7	-
Rdi	0.0003	-	Rdi	0.00122	-

En los siguientes pasos se realizan los cálculos para conocer factores x, y, z así como elegir un BWG y proponer una U para pasos posteriores.

Universidad Nacional Autónoma de México

	Proyecto: "Desarrollo de la Ingeniería Básica para una planta de producción de Gas de Síntesis (Syngas) a partir de la Gasificación de subproductos agrícolas".	Hoja 2-2
Elaboró: AAPR Revisó: DPG Aprobó: JAOR	Memoria de Calculo Intercambiador de calor C&T EC-202	Fecha: 22/06/2017

Paso 3 Temperaturas

LMTD		
DT1	239.42	
DT2	25	
DT Ln	94.9	
Coeficiente Z		
Qperdido	279	
Qganado	65	
Z	4.3	
Coeficiente X		
Q ganado	65	
rango	304	
X	0.214	
Y	0.82	

Paso 5 Calculo de U0

Do	0.0127	m
Di	0.0094	m
x	0.0017	m
Dln	0.0110	
Rdi	0.0012	
1/ho	0.0086	
Rdo	0.0003	
U0	230.7	

Paso 4

Tamaño de tubos		
Ca	0.0921	m3/s
U	10	m/s
At	0.00921	m2
Elección de tubos		
Tubo 3/4	BWG 14	
x	0.065	in
x	0.0017	m
Di	0.37	in
Di	0.0094	m
Do	0.5	in
Do	0.0127	m
Área de flujo del tubo		
Di	0.37	in
Área	6.94E-5	Ft
N tubos	130	-
Paso 6 Calculo Área (intercambiador)		
Q	5821466.13	
U0	230	
DT Ln	94.9	
Y	0.82	
A0	324	m2

Referencia:

BRANAN CARL. (2002). Rules of Thumb for Chemical Engineers. Houston Texas: Gulf Professional Publishing.

7.3. SEPARADOR CICLÓNICO CL-201.

	Proyecto: "Desarrollo de la Ingeniería Básica para una planta de producción de Gas de Síntesis (Syngas) a partir de la Gasificación de subproductos agrícolas".	Hoja 1-2
Elaboró: DPG Revisó: AAPR Aprobó: JAOR	Memoria de Calculo Separador ciclónico CL-201	Fecha: 22-06-2017

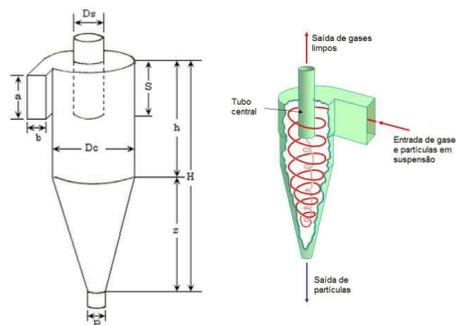
Datos Generales

Servicio Remoción de partículas no deseadas en el Syngas

Fluido de trabajo	Gas de Síntesis (Syngas)
Corriente de entrada	6
Corriente de salida	7, 31 (Salida de Biocarbón)
Tipo de ciclón	Alta eficiencia

Propiedades del Fluido en la alimentación

Temperatura	797	°F
Densidad	0.01	lb/ft ³
Flujo de operación a T de entrada	125.65	lb/h
Presión de operación	15.28	psia



Características generales del Ciclón de alta eficiencia

Dimensión	Nomenclatura	Tipo de ciclón		
		Stairmand	Swift	Echeverri
Diámetro de ciclón	Dc/Dc	1.0	1.0	1.0
Altura de entrada	a/Dc	0.5	0.44	0.5
Ancho de entrada	b/Dc	0.2	0.21	0.2
Altura de salida	S/Dc	0.5	0.5	0.625
Diámetro de salida	Ds/Dc	0.5	0.4	0.5
Altura parte cilíndrica	h/Dc	1.5	1.4	1.5
Altura parte cónica	z/Dc	2.5	2.5	2.5
Altura total del ciclón	H/Dc	4.0	3.9	4.0
Diámetro salida partículas	B/Dc	0.375	0.4	0.375
Factor de configuración	G	551.22	698.65	585.71
Número cabezas de velocidad	NH	6.4	9.24	6.4
Número de vórtices	N	5.5	6.0	5.5

Cálculo del diámetro del Ciclón

Flujo volumétrico	322	m ³ /h
Velocidad	6.94	m/s
Diámetro del Ciclón	0.36	m

$$D_{ciclón} = \sqrt{\frac{Q}{v(0.5)(0.2) \cdot 3600}}$$

	Proyecto: "Desarrollo de la Ingeniería Básica para una planta de producción de Gas de Síntesis (Syngas) a partir de la Gasificación de subproductos agrícolas".	Hoja 2-2
Elaboró: DPG Revisó: AAPR Aprobó: JAOR	Memoria de Calculo Separador ciclónico CL-201	Fecha: 22-06-2017

Caída de Presión

Densidad del Syngas	0.01	kg/m ³
Velocidad de entrada del Syngas	6.94	m/s
Numero cabezas velocidad entrada	9.24	
Caída de Presión	222.47	Pa

$$\Delta P = \frac{1}{2} \rho v^2 N_H \quad N_H = K \frac{a \times b}{D_s^2}$$

Presión de salida del Ciclón

Presión de entrada	1.039	atm
Presión de salida	1.037	atm

Dimensionamiento del Ciclón

Dimensión	Nomenclatura	Swift	Factor	Unidad (m)
Diámetro de ciclón	Dc/Dc	1.0		
Altura de entrada	a/Dc	0.44	a	0.158
Ancho de entrada	b/Dc	0.21	b	0.076
Altura de salida	S/Dc	0.5	S	0.18
Diámetro de salida	Ds/Dc	0.4	Ds	0.144
Altura parte cilíndrica	h/Dc	1.4	h	0.504
Altura parte cónica	z/Dc	2.5	z	0.9
Altura total del ciclón	H/Dc	3.9	H	1.404
Diámetro salida partículas	B/Dc	0.4	B	0.144
Factor de configuración	G	698.65		
Número cabezas de velocidad	NH	9.24		
Número de vórtices	N	6.0		

Eficiencia del Ciclón

Tamaño de partícula	5	µm
Eficiencia	0.988	

Referencia:

BRANAN CARL. (2002). Rules of Thumb for Chemical Engineers. Houston Texas: Gulf Professional Publishing.

7.4. CALDERA ACUOTUBULAR CA-301.

	Proyecto: "Desarrollo de la Ingeniería Básica para una planta de producción de Gas de Síntesis (Syngas) a partir de la Gasificación de subproductos agrícolas".	Hoja 1-3
Elaboró: AAPR Revisó: DPG Aprobó: JAOR	Memoria de Calculo Caldera Acuotubular CA-301	Fecha: 22/06/2017

Datos Generales

Servicio Generación de Vapor Saturado para aprovechamiento subsecuente en el proceso

Fluido de trabajo	Gas de Síntesis (Syngas), Aire y Agua
Corriente de entrada	21, 26A, 34
Corriente de salida	22, 27

Entrada a Caldera

Agua

Flujo de alimentación	98.08	kg/h
Capacidad calorífica	1000	Cal/kg K
T ₁ (Entrada)	363.15	K
T ₂ (Salida, Vap. Sat.) (Dato obtenido de Tablas de Vapor)	573.15	K

$$Q_{ganado} = mCp\Delta T$$

Calor ganado	2.06x10 ⁷	Cal/h
--------------	----------------------	-------

$$\Delta Q = Q_{ganado} - Q_{cedido}$$

Diferencia de Calor (Función objetivo)	0	Cal/h
--	---	-------

Gas de Síntesis (Syngas)

Flujo de alimentación requerido	10.89	kg/h
PCI	1.89x10 ⁶	Cal/kg

Aire

Flujo de alimentación	200	kg/h
Capacidad calorífica	241.87	Cal/kg K
T ₁ (Entrada)	863.5	K
T ₂ (Salida) (Variable ajustada con Solver)	1289.3	K

$$Q_{cedido} = mCp\Delta T$$

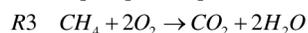
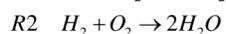
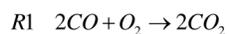
Calor cedido	2.06x10 ⁷	Cal/h
--------------	----------------------	-------

$$m_{syngas} = \frac{Q}{PCI}$$

	Proyecto: "Desarrollo de la Ingeniería Básica para una planta de producción de Gas de Síntesis (Syngas) a partir de la Gasificación de subproductos agrícolas".	Hoja 2-3
Elaboró: AAPR Revisó: DPG Aprobó: JAOR	Memoria de Calculo Caldera Acuotubular CA-301	Fecha: 22/06/2017

Combustión

Reacciones de combustión



Oxígeno requerido para combustión completa

Flujo de alimentación requerido	42	kg/h
Flujo de alimentación requerido	1.31	mol/h

Composición del Syngas de entrada para flujo requerido

Componente	Fracción mol	Flujo (kg/h)
CO	0.30	3.31
H₂	0.27	2.93
CH₄	0.02	0.21
N₂ *	0.38	4.17
CO₂ *	0.03	0.27

* Inertes

Balance de Materia

R1	2	CO	+	1	O ₂	→	2	CO ₂			
Inicio		0.118			0.059						
Reacciona		0.059			0.059			0.118			
Final		0			0			0.118			

R2	2	H ₂	+	1	O ₂	→	2	H ₂ O			
Inicio		1.464			0.732						
Reacciona		0.732			0.732						1.464
Final		0			0						1.464

R3	1	CH ₄	+	2	O ₂	→	1	CO ₂	+	2	H ₂ O
Inicio		0.013			0.521						
Reacciona		0.013			0.026			0.013			0.026
Final		0			0.495			0.013			0.026

	Proyecto: "Desarrollo de la Ingeniería Básica para una planta de producción de Gas de Síntesis (Syngas) a partir de la Gasificación de subproductos agrícolas".	Hoja 3-3
Elaboró: AAPR Revisó: DPG Aprobó: JAOR	Memoria de Calculo Caldera Acuotubular CA-301	Fecha: 22/06/2017

Gases de escape (Salida)

Componente	PM (kg/mol)	Flujo (mol/h)	Flujo (kg/h)
CO	28	-	-
H ₂	2	-	-
CH ₄	16	-	-
CO ₂	44	0.137	6.041
N ₂	28	5.792	162.164
H ₂ O	18	1.490	26.824
O ₂	32	0.495	15.850

Flujo de Gases de escape **210.888** **kg/h**

Referencias:

- Camacho Muñoz José Manuel. (2008). Diseño de una caldera acuotubular. Universidad de Cádiz.
BRANAN CARL. (2002). Rules of Thumb for Chemical Engineers. Houston Texas: Gulf Professional Publishing.

7.5. DIÁMETRO DE TUBERÍAS.

Tabla 13. Selección de Diámetro de Tuberías.

# de Línea	Fluido	Estado	w (lb/h)	ρ (lb/ft ³)	DI (in)	D _{nominal} calculado (in)	D _{comercial} (in)
5	Gas Natural	G	1.92	0.05	0.215	0.125	1/8
6	Syngas	G	186.21	0.01	5.047	5	3
7	Syngas	G	183.92	0.01	5.047	5	3
8	Syngas	G	183.92	0.01	5.047	3	3
9	Syngas	G	183.92	0.02	5.761	6	2
10	Syngas	G	182.08	0.02	5.761	6	2
11	Syngas	G	180.26	0.03	4.813	5	1 1/2
12	Syngas	G	167.16	0.03	5.761	6	2
13	Syngas	G	13.10	0.03	1.939	2	1
13A	Syngas	G	4.88	0.03	1.939	2	1
14	Aire	G	169.86	0.08	2.469	2.5	3 1/2
15	Aire	G	59.73	0.08	2.469	2.5	1
16	Aire	G	59.73	0.08	1.61	1.5	1
17	Aire	G	110.13	0.08	3.548	3.5	3 1/2
19	Gases de C.	G	110.13	0.04	3.548	3.5	3 1/2
20	Aire	G	110.13	0.04	3.548	3.5	3 1/2
21	Gases de C.	G	110.13	0.03	10.02	10	10
22	Gases de e.	G	111.93	0.03	6.065	6	6
23	Agua	L	289.37	62.37	0.302	0.25	1/4
24	Agua	L	289.37	62.37	0.302	0.25	1/4
25	Agua	L-V	289.37	62.37	0.302	0.25	1/4
26	Agua	L-V	289.37	62.37	0.302	0.25	1/4

Universidad Nacional Autónoma de México

27	Vapor Sobr.	V	289.37	62.37	0.302	0.25	1/4
28	Vapor Exp.	V	289.37	62.37	0.302	0.25	1/4
29	Agua Cond.	L	289.37	62.37	0.302	0.25	1/4
30	Agua	L	289.37	62.37	0.302	0.25	1/4
34	Syngas	G	1.80	0.03	1.049	1	1
35	Agua de Río	L	71.09	62.37	0.215	0.125	0.125
36	Agua de Río	L	71.09	62.37	0.215	0.125	0.125
37	Agua de Río	L	71.09	62.37	0.215	0.125	0.125

8. HOJAS DE DATOS.

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

Elaboró: AAPR Revisó: DPG Aprobó: JAOR	Hoja de Datos "Gasificador Downdraft" GF-101 A/B	N° Proyecto: Tesis Syngas Fecha: 22/07/2017 Hoja 1-2
Proyecto " <u>Desarrollo de la Ingeniería Básica para una planta de producción de Syngas a partir de subproductos agrícolas</u> " Sitio: Tepojaco, Tizayuca, Hidalgo Servicio: Gasificación de Biomasa Fabricante: (1)	Tag: GA-101 A/B Modelo: (1) N° de serie: (1) Cantidad: 1 (Uno)	
Condiciones de operación y Diseño		

Alimentación					Combustible				
Fluido	Biomasa		Diseño		Fluido	Gas Natural	Gas		
Flujo	110.13	lb/h	165.195	lb/h	Flujo	1.92	lb/h	2.88	lb/h
Presión	14.7	psi	22.05	psi	Presión	28.45	psia	42.675	psia
Temp.	77	°F	115.5	°F	Temp.	77	°F	115.5	°F
Salida					PCI	31542	KJ/K		
Fluido	Gas de Síntesis				Composición del Gas de Síntesis				
Flujo	186.21	lb/h			N ₂	38			
Presión	15.28	psi			CO ₂	30			
Temp.	797	°F			CO	3			
Datos Generales					H ₂	27			
Eficiencia	75-85			%	CH ₄	2			
Perdidas por Radiación			(1)	BTU/lb	C2*	-----			
Dimensiones (Alto/Ancho/Largo)					Datos del Servicio				
6.56	6.56	9.84		ft	Temp.	Min 57	°F	Max 95	°F
Combustible a ocupar				Gas Natural	Presión Bar	14.7	Psia		
				Gas de Síntesis					
Construcción									

Universidad Nacional Autónoma de México

Elaboró: AAPR Revisó: DPG Aprobó: JAOR	Hoja de Datos "Gasificador Downdraft" GF-101 A/B	N° Proyecto: Tesis Syngas Fecha: 22/07/2017 Hoja 2-2
Proyecto "Desarrollo de la Ingeniería Básica para una planta de producción de Syngas a partir de subproductos agrícolas" Sitio: Tepojaco, Tizayuca, Hidalgo Servicio: Gasificación de Biomasa Fabricante: (1)	Tag: GA-101 A/B Modelo: (1) N° de serie: (1) Cantidad: 1 (Uno)	

Posición		Vertical						
Diámetro/Longitud			6.56	ft	Humedad relativa	35	%	
Base	7	X	7	ft	Servicio	En espera / Continuo		
					Localización	Exterior		
Capacidad @Normal			110.2	lb		Con Techo		
Capacidad @ Lleno de Agua			--	lb				
Diámetro del Hogar			--	in	Materiales			
Volumen del Hogar			--	ft ³	--			
					Cuerpo		Grado	(1)
Diseño del Recipiente		Entrada			Tapas		Grado	(1)
Max. Presión Perm.	--		psig		Refractario		Grado	(1)
Max. Temp. Perm.	--		°F		Quemador		Grado	(1)
Prueba Hidrostática	--		psig					

8.2. CALDERA ACUOTUBULAR CA-301.

Elaboró: DPG Revisó: AAPR Aprobó: JAOR	Hoja de Datos "Caldera Acuotubular" CA-301	N° Proyecto: Tesis Syngas Fecha: 22/07/2017 Hoja 1-2
Proyecto "Desarrollo de la Ingeniería Básica para una planta de producción de Syngas a partir de subproductos agrícolas" Sitio: Tepojaco, Tizayuca, Hidalgo Servicio: Calentamiento de agua para generación de electricidad. Fabricante: (1)	Tag: CA-401 Modelo: (1) N° de serie: (1) Cantidad: 1 (Uno)	
Condiciones de operación y Diseño		

Alimentación					Combustible				
Fluido	Agua		Diseño		Tipo de Combustible	Gas			
Flujo	298.37	lb/h	447.55	lb/h	Fluido	Gas de Síntesis	Diseño		
Presión	188.47	psi	282.71	psi	Flujo	23.98	lb/h	35.97	lb/h
Temp.	62.37	°F	93.55	°F	Presión	22.05	psia	33.07	psia
Salida					Temp.	122	°F	183	°F
Fluido	Vapor de agua				PCI	----	KJ/K		
Flujo	298.37	lb/h			Composición del Gas de Síntesis				
Presión	1246.61	psi				N ₂	38		
Temp.	572	°F				CO ₂	30		
Datos Generales						CO	3		
Eficiencia	75-85			%		H ₂	27		
Perdidas por Radiación			(1)	BTU/lb		CH ₄	2		
Dimensiones (Alto/Ancho/Largo)						C2*	-----		
				ft	Datos del Servicio				
Combustible a ocupar			Gas de Síntesis		Temp.	Min 57	°F	Max 95	°F
					Presión Bar	14.7	Psia		
Construcción									

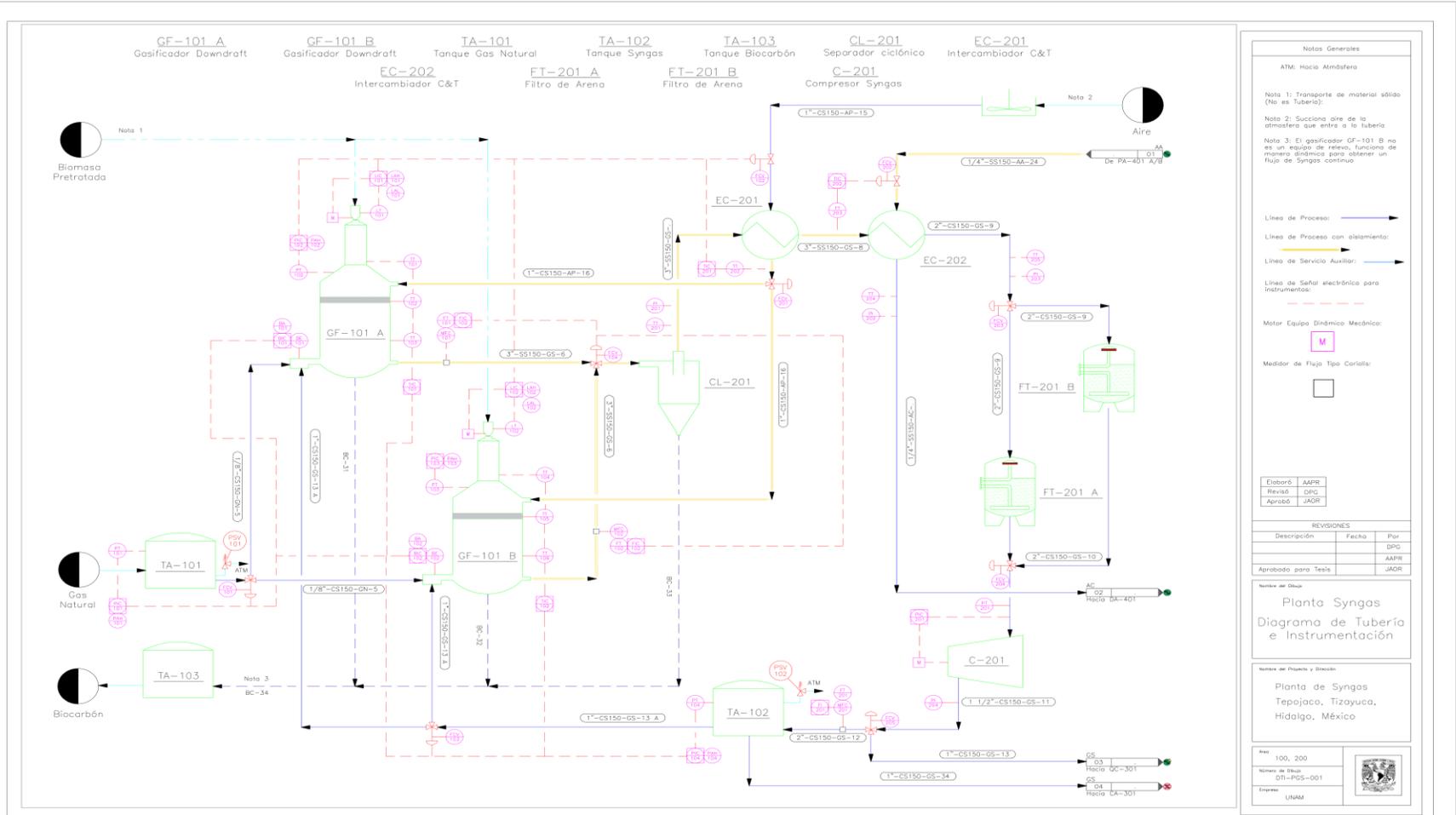
Universidad Nacional Autónoma de México

Elaboró: DPG Revisó: AAPR Aprobó: JAOR	Hoja de Datos “Caldera Acuotubular” CA-301	N° Proyecto: Tesis Syngas Fecha: 22/07/2017 Hoja 2-2
Proyecto “ <u>Desarrollo de la Ingeniería Básica para una planta de producción de Syngas a partir de subproductos agrícolas</u> ” Sitio: Tepojaco, Tizayuca, Hidalgo Servicio: Calentamiento de agua para generación de electricidad. Fabricante: (1)	Tag: CA-401 Modelo: (1) N° de serie: (1) Cantidad: 1 (Uno)	

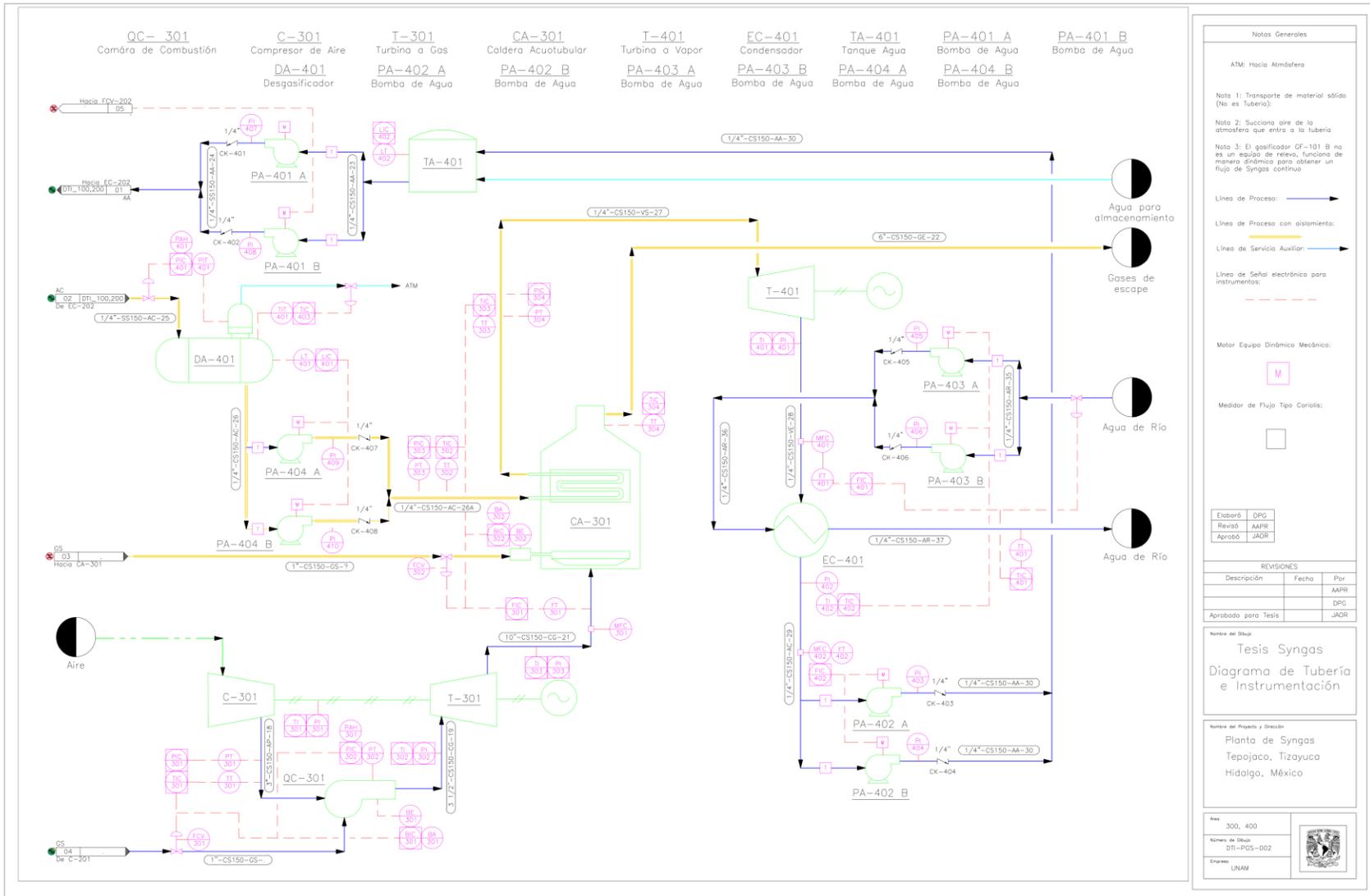
Posición		Vertical							
Diámetro/Longitud		(1)	ft	Humedad relativa	35	%			
Base		(1)	ft	Servicio		En espera / Continuo			
				Localización		Exterior			
Capacidad @Normal		(1)	lb			Con Techo			
Capacidad @ Lleno de Agua		(1)	lb						
Diámetro del Hogar		(1)	in	Materiales					
Volumen del Hogar		(1)	ft ³						
				Cuerpo		Grado	(1)		
Diseño del Recipiente	Entrada			Tapas		Grado	(1)		
Max. Presión Perm.	(1)	psig		Refractario		Grado	(1)		
Max. Temp. Perm.	(1)	°F		Quemador		Grado	(1)		
Prueba Hidrostática	(1)	psig							

9. DIAGRAMA DE TUBERÍA E INSTRUMENTACIÓN.

9.1. DTI-001.



9.2. DTI-002.



9.3. LISTA DE LÍNEAS.

Tabla 14. Lista y características de Líneas.

# de Línea	Tag	D _{comercial} (in)	Fluido	Estado	De...	Hacia...	Pop. (psia)	Top. (°F)	w (lb/h)	ρ (lb/ft³)	Servicio	Clase
1	1/8"-SS150-GN-1	1/8	Gas Natural	G	TP-101	GF-101 A/B	28.45	77	1.92	0.05	GN	SS150
2	3"-SS150-GS-2	3	Gas de Síntesis	G	GF-101 A/B	CL-201	15.47	797	186.21	0.01	GS	SS-150
3	3"-SS150-GS-3	3	Gas de Síntesis	G	CL-201	EC-201	15.40	797	183.92	0.01	GS	SS-150
4	3"-SS150-GS-4	3	Gas de Síntesis	G	EC-201	EC-202	15.56	624.95	183.92	0.01	GS	SS-150
5	2"-CS150-GS-5	2	Gas de Síntesis	G	EC-202	FT-201 A/B	15.71	122	183.92	0.02	GS	CS-150
6	2"-CS150-GS-6	2	Gas de Síntesis	G	FT-201 A/B	C-201	15.56	122	182.08	0.02	GS	CS-150
7	1 1/2"-CS150-GS-7	1 1/2	Gas de Síntesis	G	C-201	VC-108	22.05	122	180.26	0.03	GS	CS-150
8	1"-CS150-GS-8	1	Gas de Síntesis	G	VC-108	DTI-002	22.05	122	13.10	0.03	GS	CS-150
9	2"-CS150-GS-9	2	Gas de Síntesis	G	VC-108	TA-102	22.05	122	167.16	0.03	GS	CS-150
10	1"-CS150-GS-10	1	Gas de Síntesis	G	TA-102	GF-101 A/B	22.05	122	4.88	0.03	GS	CS-150

Universidad Nacional Autónoma de México

11	1"-CS150-AP-11	1	Aire planta	G	Límite de batería	EC-201	14.7	77	59.73	0.08	AP	CS-150
12	1"-CS150-AP-12	1	Aire planta	G	EC-201	GF-101 A/B	14.7	624.95	59.73	0.08	AP	CS-150
13	1/4"-SS150-AA- 13	1/4	Agua	L	DTI-002	EC-202	188.47	77	289.37	62.37	AA	SS-150
14	1/4"-SS150-AC- 14	1/4	Agua Caliente	L	EC-202	DTI-002	188.47	194.00	289.37	62.37	AC	SS-150

Universidad Nacional Autónoma de México

# de Línea	Tag	D _{comercial} (in)	Fluido	Estado	De...	Hacia...	Pop. (psia)	Top. (°F)	w (lb/h)	ρ (lb/ft³)	Servicio	Clase
15	1"-CS150-AP-15	1	Aire planta	G	Límite de batería	EC-201	14.7	77	59.73	0.08	AP	CS-150
16	1"-CS150-AP-16	1	Aire planta	G	EC-201	GF-101 A/B	14.7	77	59.73	0.08	AP	CS-151
18	3"-CS150-AP-18	3	Aire proceso	G	C-301	QC-301	145.09	576.44	110.13	0.13	AP	CS-150
19	1/2"-CS150-AP-19	1/2	Aire Proceso	G	QC-301	T-301	145.09	2012	110.13	0.05	AP	CS-150
21	10"-CS150-GC-21	10	Gases de Combustión	G	T-301	CA-401	14.7	946.96	110.13	0.01	GC	CS-150
22	6"-CS150-GE_22	6	Gases de Escape	G	CA-301	Límite de Batería	17.64	77.00	119.59	1.20	GE	CS-150
23	1/4"-CS150-AA-23	1/4	Agua Almacenamiento	L	TA-401	PA-401 A/B	14.7	122.00	0.13	1.00	AA	CS-150
24	1/4"-SS150-AA-24	1/4	Agua Almacenamiento	L	PA-401 A/B	EC-202	188.47	77.00	0.13	12.82	AA	CS-150
25	1/4"-SS150-AC-25	1/4	Agua Caliente	L	EC-202	DA-401	188.47	194.00	0.13	12.82	AC	CS-150
26	1/4"-CS150-AC-26	1/4	Agua Caliente	L-V	DA-401	PA-404 A/B	188.47	194.00	0.13	12.82	AC	CS-150
27	1/4"-CS150-VS-27	1/4	Vapor Saturado	V	CA-301	T-401	369.54	194.00	0.13	25.14	VS	CS-150
28	1/4"-CS150-VE-28	1/4	Vapor Enfriado	V	T-401	EC-401	1246.61	572.00	0.13	84.80	VE	CS-150
29	1/4"-CS150-AC-29	1/4	Agua Caliente	L	EC-401	PA-402 A/B	4.983051	127.40	0.13	0.34	AC	CS-150

Universidad Nacional Autónoma de México

30	1/4"-CS150-AA-30	1/4	Agua Almacenamiento	L	PA-402 A/B	TA-401	4.983051	86.00	0.13	0.34	AA	CS-150
34	1"-CS150-GS-34	1	Gas de Síntesis	G	TA-102	CA-401	22.05	122.00	5.83	1.50	GS	CS-150
35	1/4"-CS150-AR-35	1/4	Agua de Rio	L	Límite de Bateria	PA-403 A/B	14.7	77.00	0.03	1.00	AR	CS-150
36	1/4"-CS150-AR-36	1/4	Agua de Rio	L	PA 403 A/B	EC-401	61.67	77.00	0.03	4.20	AR	CS-150
37	1/4"-CS150-AR-37	1/4	Agua de Rio	L	EC-401	Límite de Bateria	61.67	77.90	0.03	4.20	AR	CS-150

9.3. LISTA DE INSTRUMENTOS.

Tabla 15. Instrumentos locales accesibles.

#	DTI	Área	Tipo	Tag
1	1	100	PT	100-PT-101
2	1	100	PAH	100-PAH-101
3	1	100	LAH	100-LAH-101
4	1	100	LAL	100-LAL-101
5	1	100	LT	100-LT-101
6	1	100	PT	100-PT-102
7	1	100	PAH	100-PAH-102
8	1	100	BA	100-BA-101
9	1	100	BE	100-BE-101
10	1	100	TT	100-TT-101
11	1	100	TT	100-TT-102
12	1	100	TT	100-TT-103
13	1	100	FT	100-FT-101
14	1	100	LAH	100-LAH-102
15	1	100	LAL	100-LAL-102
16	1	100	LT	100-LT-102
17	1	100	PT	100-PT-103
18	1	100	PAH	100-PAH-103
19	1	100	BA	100-BA-102
20	1	100	BE	100-BE-102
21	1	100	TT	100-TT-104
22	1	100	TT	100-TT-105
23	1	100	TT	100-TT-106
24	1	100	FT	100-FT-102
25	1	100	PT	100-PT-104
26	1	100	PAH	100-PAH-104
27	1	200	TT	200-TT-201
28	1	200	PI	200-PI-201
29	1	200	TT	200-TT-202
30	1	200	TT	200-TT-203
31	1	200	TT	200-TT-204
32	1	200	PI	200-PI-202
33	1	200	TT	200-TT-205
34	1	200	PI	200-PI-203
35	1	200	PT	200-PT-201
36	1	200	PI	200-PI-204
37	1	200	FT	200-FT-201
38	1	200	FI	200-FI-201
39	2	300	TI	300-TI-301
40	2	300	PI	300-PI-301
41	2	300	PT	300-PT-301
42	2	300	TT	300-TT-301
43	2	300	BE	300-BE-301
44	2	300	BA	300-BA-301
45	2	300	PAH	300-PAH-301
46	2	300	TI	300-TI-302
47	2	300	PI	300-PI-302
48	2	300	PT	300-PT-302
49	2	300	TI	300-TI-303
50	2	300	PI	300-PI-303
51	2	300	FT	300-FT-301
52	2	300	BE	300-BE-302
53	2	300	BA	300-BA-302
54	2	300	PT	300-PT-303
55	2	300	TT	300-TT-302
56	2	300	TT	300-TT-304
57	2	300	TT	300-TT-303
58	2	300	PT	300-PT-304
59	2	400	TI	400-TI-401
60	2	400	PI	400-PI-401

#	DTI	Área	Tipo	Tag
62	2	400	TT	400-TT-401
63	2	400	PI	400-PI-402
64	2	400	TI	400-TI-402
65	2	400	FT	400-FT-402
66	2	400	PI	400-PI-403
67	2	400	PI	400-PI-404
68	2	400	PI	400-PI-405
69	2	400	PI	400-PI-406
70	2	400	LT	400-LT-402
71	2	400	PI	400-PI-407
72	2	400	PI	400-PI-408
73	2	400	PAH	400-PAH-401
74	2	400	TIT	400-TIT-401
75	2	400	LT	400-LT-401
76	2	400	PI	400-PI-409
77	2	400	PI	400-PI-410

Tabla 16. Instrumentos en línea.

#	DTI	Área	Tipo	Tag
1	1	100	FCV	100-FCV-101
2	1	100	MFC	100-MFC-101
3	1	100	MFC	100-MFC-102
4	1	100	FCV	100-FCV-102
5	1	100	FCV	100-FCV-103
6	1	200	FCV	200-FCV-202
7	1	200	FCV	200-FCV-203
8	1	200	FCV	200-FCV-204
9	1	200	MFC	200-MFC-201
10	2	300	FCV	300-FCV-301
11	2	300	MFC	300-MFC-301
12	2	300	FCV	300-FCV-302
13	2	400	MFC	400-MFC-401
14	2	400	MFC	400-MFC-402

Tabla 17. Instrumentos accesibles con display.

#	DTI	Área	Tipo	Tag
1	1	100	PIC	100-PIC-101
2	1	100	LIC	100-LIC-101
3	1	100	PIC	100-PIC-102
4	1	100	BIC	100-BIC-101
5	1	100	TIC	100-TIC-101
6	1	100	LIC	100-LIC-102
7	1	100	PIC	100-PIC-103
8	1	100	BIC	100-BIC-102
9	1	100	TIC	100-TIC-102
10	1	100	PIC	100-PIC-104
11	1	200	TIC	200-TIC-201
12	1	200	TIC	200-TIC-202
13	1	200	PIC	200-PIC-201
14	2	300	PIC	300-PIC-301
15	2	300	TIC	300-TIC-301
16	2	300	BIC	300-BIC-301
17	2	300	PIC	300-PIC-302
18	2	300	FIC	300-FIC-301
19	2	300	BIC	300-BIC-302
20	2	300	PIC	300-PIC-303
21	2	300	TIC	300-TIC-303
22	2	300	TIC	300-TIC-304
23	2	300	PIC	300-PIC-304
24	2	300	TIC	300-TIC-303
25	2	400	FIC	400-FIC-401
26	2	400	TIC	400-TIC-401
27	2	400	TIC	400-TIC-402
28	2	400	FIC	400-FIC-402
29	2	400	LIC	400-LIC-402
30	2	400	PIT	400-PIT-401
31	2	400	PIC	400-PIC-401
32	2	400	TIT	400-TIT-401
33	2	400	TIC	400-TIC-401
34	2	400	LIC	400-LIC-401

10. FILOSOFÍA DE OPERACIÓN Y CONTROL.

10.1. ÁREAS 100 y 200.

Para arrancar la planta, previamente se debe colocar la biomasa en la banda transportadora, BT-101 que se encargara de llevar la biomasa al molino de bolas M-101 que previamente debe estar encendido para el uso óptimo del equipo, una vez que la biomasa este triturada y que tenga un diámetro de partícula entre 0.11 – 0.20 mm será transportada por la banda BT-102 y alimentara la tolva del Gasificador, estos pasos deben ser realizados ya que se necesita la biomasa previamente limpia y con un diámetro de partícula adecuado.

Al arrancar la planta el tanque TA-101 que almacena gas natural, suministrara el combustible requerido precalentando los Gasificadores GF-101 A/B hasta una temperatura de 800 °C aprox. La válvula FCV-101 debe ser abierta y alimentara primero al Gasificador GF-101 A un tiempo alrededor de 35 min, después de esto se desviara al Gasificador GF-101 B alternando la alimentación entre uno y otro estableciendo así una operación continua.

El tanque TA-101 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 activará en caso de que la presión en el taque aumente peligrosamente, en cuyo caso la válvula de alivio de presión PSV-101 se encargaría de disminuirla a niveles seguros.

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 BIC-101/102 y a su alarma por falla de flama BA-101/102. El objetivo es 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 Syngas producido por el efecto de la Gasificación.

Cada uno de los Gasificadores cuenta con tres transmisores de temperatura TT-101/ 102/ 103/ 104/ 105/ 106, los cuales nos permiten conocer y monitorear la temperatura en las zonas del Gasificador, cada trio de transmisores manda una señal a su respectivo indicador-controlador de temperatura TIC-101/ 102

Cuando el Gasificador 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/ 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/ 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.

Mientras el Gasificador se precalienta, tanto A como B se va llenando su respectiva tolva con los pellets de biomasa previamente acondicionada, Cada una de las tolvas cuenta con un transmisor de nivel LT-101/ 102, que se comunican con sus respectivos indicadores-controladores de nivel LIC-101/102 y con alarmas por alto y bajo nivel LAH-101/ 102 y LAL-101/102 , esto con el objetivo de avisar en caso de que la tolva llegue a su límite o falte biomasa y sea necesario rellenarla.

Una vez que la tolva llegue a un nivel óptimo, y se haya alcanzado la temperatura necesaria en el Gasificador, el indicador controlador de nivel enviara una señal al motor del tornillo que se encargara de alimentar y dosificar la biomasa entrante en el lecho 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-102 para detener el flujo de aire hacia el Gasificador, y también una señal de paro al motor del tornillo.

Ambos Gasificadores cuenta con un transmisor de presión PT-102/ 103 que tienen montado su respectivo indicador-controlador de presión PIC-102/ 103. Así como una alarma por alta presión PAH-102/ 103.

La alarma se encenderá en caso de que la presión interna del Gasificador se eleve a niveles peligrosos, en cuyo caso el PIC-102/ 103 ejercerá un control sobre la válvula de control de flujo FVC-102 que regula la entrada del agente gasificante al Gasificador; 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-102 que se localiza a la salida del soplador estará calibrada según la alimentación de biomasa que se tenga en la tolva del Gasificador, la válvula tendrá la capacidad de suministrar un caudal de 0.45 m³ de aire por cada kilogramo de biomasa.

La línea de salida del intercambiador que lleva aire caliente cuenta con un transmisor de temperatura TT-202 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.

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 CL-201 cuenta con un indicador de presión local PI-201 y un transmisor de temperatura TT-201 que nos da a conocer las condiciones del mismo

También se cuenta con un indicador de presión local PI-203 para conocer la presión a la salida del segundo intercambiador de calor IC-202, así como un

transmisor de temperatura TT-203 con su indicador-registrador de temperatura TIR-201 para tener un registro estadístico de la temperatura del Syngas después del paso por los intercambiadores de calor.

A la entrada del compresor C-201 se tiene un transmisor de presión PT-201 conectado a un indicador-controlador de presión PIC-201

A la entrada del tanque de almacenamiento hay un medidor de flujo tipo Coriolis MFC-201 que cuenta con su transmisor de flujo FT-201 para mandar una señal al indicador de flujo FI-201 montado en un panel accesible al operador. El tanque TA-102 tiene un transmisor de presión PT-104 conectado a un indicador controlador de presión PIC-104 que manda una señal a la alarma por alta presión PAH-104, 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-104 puede cerrar o desviar el flujo de Syngas con la válvula de control de tres vías FCV-103 según se necesite.

10.2. ÁREAS 300 y 400.

El Área 300 comienza con una válvula FCV-301 que permanece cerrada mientras no ingrese aire a la Cámara de Combustión QC-301 así como al compresor C-301 que son los equipos que dan inicio al Ciclo de Brayton, estos dos equipos cuentan con transmisores de presión PT-301/302 que son los encargados de registrar la presión, para un análisis en planta; cada transmisor de presión está conectado a su indicador-controlador respectivo PIC-301/302, el compresor C-301 suministrara aire a la Cámara de Combustión a razón de 0.5 correspondiente a la mitad del flujo total que ingresa al mismo. El PIC-301 abrirá o cerrará la válvula de control FCV-301 dependiendo del flujo de Gas de Síntesis necesario en la Cámara de Combustión.

La Cámara de Combustión cuenta con un indicador-controlador de flama BIC-301 así como su alarma por falta de flama BA-301 que cerraran la válvula de control FCV-301 en que caso de ser necesario, así como un indicador-controlador

de presión y una alarma por alta presión PAH-301 que cerraran la válvula cuando se requiera.

De la cámara de combustión se suministrara el aire caliente a la turbina T-301 donde se ocuparán este aire y el proveniente del compresor C-301 y así generar energía eléctrica dando fin al Ciclo de Brayton.

A la salida de la turbina T-301 se cuenta con un indicador de temperatura TIR-303 así como un indicador de presión PIR-303 dichos indicadores cuentan con un registro para guardar los datos estadísticos de la cantidad de aire entrante y la producción de electricidad así como la salida de dicho aire.

Esta línea cuenta con un indicador de flujo coriolis MFC-301 así como un transmisor de flujo FT-301 y su respectivo FIC-301 este último abrirá la válvula de control de flujo FCV-302 según sea requerido el Gas de Síntesis proveniente del TA-102, esto con el fin de quemar el Gas de Síntesis en la caldera CA-301.

La caldera CA-301 cuenta en la parte del quemador con un alarma por falta de flama BA-302 un indicador de flama BE-302 que se encuentran conectados con su respectivo indicador controlador de flama BIC-302 que se encargara de cerrar la válvula de control FCV-302 para que el Gas de Síntesis deje de suministrarse, en el domo de la caldera, se encuentra un transmisor de temperatura TT-304 así como un indicador controlador de temperatura TIC-304 que sirven para abrir la válvula de apertura de los gases de escape, que tendrá la función de medir la temperatura de dichos gases antes de ser liberados a la atmosfera.

En la caldera se evaporara agua caliente con ayuda del aire que fue calentado quemando el Gas de Síntesis, dicha agua proviene de un des-Gasificador DA-401 en el cual fueron retirados los gases oxidantes para ayudar a que la caldera funcione adecuadamente, dicho des-Gasificador es alimentado con agua proveniente del intercambiador de calor EC-202 y cuenta con un transmisor indicador de presión PIT-401 así como una alarma por alta presión PAH-401 ambos instrumentos estarán interconectados con su respectivo indicador- controlador de presión PIC-401 que abrirá una válvula de alivio en caso de llegar a una presión

elevada, el des-Gasificador también contara con un transmisor de nivel LT-401 junto con un indicador controlador de nivel LIC-401 que accionara el motor de la bomba en turno PA-404 A/B para llevar el agua caliente des-gasificada a la caldera.

El vapor sobrecalentado en la caldera será dirigido a la turbina de vapor T-401, esta línea cuenta con un transmisor de temperatura y su respectivo indicador controlador de temperatura que ayudaran a abrir o cerrarla en caso de que el flujo de Gas de Síntesis no sea el adecuado para cumplir con las condiciones de vapor requerido a la entrada de la turbina.

La turbina expandirá este vapor sobre calentado hasta una presión de condensación al mismo tiempo que se generara energía eléctrica en un alternador *adecuado* a la misma para su aprovechamiento posterior.

A la descarga de la turbina se cuenta con un indicador de presión PI-401 y uno de temperatura TI-401 esta línea será dirigida a un condensador EC-401 y cuenta con un medidor de flujo coriolis MFC-401 que a su vez se encuentra conectado a un transmisor de flujo FT-401 y a un indicador controlador de flujo FIC-401 que abrirá la válvula FCV-401 para la alimentación según sea requerida de agua de río.

A la salida del agua de río del condensador EC-401 se cuenta con un transmisor de temperatura TT-401 y su respectivo indicador controlador de temperatura TIC-401 solo para corroborar que la temperatura de salida del agua no afecte las condiciones a las que se encuentra el río y no afectar el ecosistema.

El agua condensada pasara por un medidor de flujo coriolis y un transmisor de flujo MFC-402 y FT-402 con su indicador controlador de flujo correspondiente FIC-402 que accionara el motor de la bomba en turno PA-402 A/B para llevar el agua al tanque de almacenamiento TA-401 que contara con un transmisor de nivel LT-402 en conjunto con un indicador controlador de nivel LIC-402 que intentaran evitar desbordes.

11. EVALUACIÓN ECONÓMICA.

11.1. ESTUDIO DE MERCADO.

En los últimos años se observa un interés en el cuidado y protección del medio ambiente, las personas se preocupan, más por el lugar donde viven y por las cosas que consumen, muchos buscan la procedencia de los materiales con el objetivo de disminuir el uso de contaminantes para la producción de lo que ocupan o prevenir el maltrato ecológico que muchas empresas sin pensarlo dos veces realizan.

La sociedad en la última década ha vivido un incremento aparente en el reciclaje, y ahorro de recursos naturales, esto debido a que la sociedad toma conciencia del daño que como ser humano podemos ocasionar, por lo tanto empresas o proyectos como este tienen cabida en esta nueva era de buscar las cosas “más verdes”, buscar una empresa que sea sostenible es una preocupación latente, y si con esto se obtiene un producto que apoya a reducir contaminantes potenciales del medio ambiente, llegando al objetivo que se plantea la sociedad, conseguir un desarrollo sostenible.

11.1.1. ENTORNO NACIONAL.

Como es conocido, gran parte del territorio Nacional es un suelo fértil para las cosechas y posee una alta variabilidad de climas por lo que se pueden producir distintos cultivos y platas, estos cultivos en algunos casos son potencializados con agentes químicos o alimentos transgénicos que favorecen a lo largo del año la producción agrícola.

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 (transgénicos)
- Herbicidas
- Insecticidas
- Quema

11.1.2. COMPETENCIA DE MERCADO.

En nuestro país el Syngas es un mercado nuevo, es un proyecto a largo plazo, aún faltan muchas cosas por investigar y conocer sobre este producto, la carencia de información lleva a que a pesar de ser un producto sustentable y ecológicamente viable, exista un estancamiento en la producción, compra o venta de este gas, por lo tanto proponer que el Gas de Síntesis sirva para el autoconsumo de industrias es una alternativa viable para dar a conocer este producto relativamente nuevo, debido a que no solo se proporcionaría el gas para autoconsumo o para la empresa que lo compre, si se decide comercializarlo, sino también se contaría con biocarbón obtenido del Gasificador, que a su vez puede ser otro producto de valor.

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.

11.1.3. CONSUMIDORES DE SYNGAS.

Para nuestro producto los principales consumidores de Syngas serían las empresas que lleguen a consumir los servicios que ofrece la planta de Proceso, puede ofrecer el Syngas como combustible para calderas, no como sustituto, pero si como un combustible que pueda disminuir el consumo de gas natural y así los costos de la empresa.

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.

Con lo descrito anteriormente, se puede pensar que se cuentan con alternativas para explotar los servicios que pudiera llegar a ofrecer la planta de Proceso, como la producción y comercialización de Syngas, Biocarbón y electricidad.

11.2. ESTIMACIÓN DE COSTOS DE EQUIPOS.

Tabla 18: Estimación de costos de equipos.

Área	Tag	Descripción	Unidad	Cantidad	* Costo unitario (2009) (USD)	Costo total (2009) (USD)	Costo unitario 2016 (USD)	Costo Instalación 2016 (USD)	Costo total 2016 (USD)
100	BT-101	Banda Transportadora	m ²	2	\$55,100.00	\$110,200.00	\$57,190.40	\$5,719.04	\$125,818.88
100	M-101	Molino de Bolas	m ³	1	\$15,000.00	\$15,000.00	\$15,569.07	\$1,556.91	\$17,125.98
100	GF-101 A/B	Gasificador Downdraft	kg/h	2	\$15,600.00	\$31,200.00	\$16,191.84	\$1,619.18	\$35,622.04
100	TA-101	Tanque Gas Natural	m ³	1	\$55,600.00	\$55,600.00	\$57,709.37	\$5,770.94	\$63,480.31
100	TA-102	Tanque Syngas	m ³	1	\$55,600.00	\$55,600.00	\$57,709.37	\$5,770.94	\$63,480.31
100	TA-103	Tanque Biocarbón	m ³	1	\$55,600.00	\$55,600.00	\$57,709.37	\$5,770.94	\$63,480.31
200	CL-201	Separador ciclónico	m ²	1	\$26,500.00	\$26,500.00	\$27,505.37	\$2,750.54	\$30,255.90
200	EC-201	Intercambiador C & T	m ²	1	\$18,700.00	\$18,700.00	\$19,409.45	\$1,940.94	\$21,350.39
200	EC-202	Intercambiador C & T	m ²	1	\$45,000.00	\$45,000.00	\$46,707.22	\$4,670.72	\$51,377.95
200	FT-201 A/B	Filtro de Arena	m ²	2	\$24,800.00	\$49,600.00	\$25,740.87	\$2,574.09	\$56,629.91
200	C-201	Compresor de Syngas	kW	1	\$251,000.00	\$251,000.00	\$260,522.51	\$26,052.25	\$286,574.77
300	C-301	Compresor de Aire	kW	1	\$215,000.00	\$215,000.00	\$223,156.74	\$22,315.67	\$245,472.41
300	T-301	Turbina a Gas	kW	1	\$98,000.00	\$98,000.00	\$101,717.95	\$10,171.80	\$111,889.75
400	CA-301	Caldera aquotubular	MJ/h	1	\$331,000.00	\$331,000.00	\$343,557.58	\$34,355.76	\$377,913.34
400	TA-401	Tanque Agua	m ³	1	\$55,600.00	\$55,600.00	\$57,709.37	\$5,770.94	\$63,480.31
400	PA	Bomba	kW	8	\$3,220.00	\$25,760.00	\$3,342.16	\$334.22	\$29,411.02
400	T-401	Turbina a Vapor	kW	1	\$166,000.00	\$166,000.00	\$172,297.76	\$17,229.78	\$189,527.53
400	DA-401	DesGasificador	m ³	1	\$2,450.00	\$2,450.00	\$2,542.95	\$254.29	\$2,797.24
400	EC-401	Condensador	m ²	1	\$34,800.00	\$34,800.00	\$36,120.25	\$3,612.03	\$39,732.28
* CEPCI, Chemical Engineering Plant Cost Indicator, para Equipos. Tomado de la revista Chemical Engineering, actualizado a Nov. 2016 ** Nota: Tipo de cambio, 1 USD = \$ 18.91 (Nov. 2017)							TOTAL	USD	\$1,875,420.62
								MXN	\$35,464,203.89

11.3. ESTIMACIÓN DE COSTOS.

Costo Terreno

Costo unitario	\$2,000.00	MXN/m ²
Área total	\$2,700.00	m ²
Costo del terreno	\$5,400,000.00	MXN
Costo del terreno	\$285,563.19	USD

Gasto de servicios

Agua	\$4,260.00	MXN/año
Luz	\$4,500.00	MXN/año
Predio	\$22,950.00	MXN/año
TOTAL	\$31,710.00	MXN/año

Tabla 19: Estimación Costo del Proyecto.

Costo Total de Proyecto

Costo Equipos	\$35,464,203.89	MXN
Costo Terreno	\$5,400,000.00	MXN
Costo Instrumentos	\$1,270,000.00	MXN
Costo de PLC Proceso	\$850,900.00	MXN
Costo PLC Lógica y Control	\$1,079,500.00	MXN
TOTAL	\$44,064,603.89	MXN

Tabla 20: Estimación de gastos Anual.

Gasto Anual

Gastos de Mantenimiento	\$4,847,106.43	MXN/año
Gastos Administrativos	\$7,490,982.66	MXN/año
TOTAL	\$12,338,089.09	MXN/año
	\$652,463.73	USD/año

11.3.1. ESTIMACIÓN DE PRECIOS DE VENTA.

Precio Venta Syngas

\$3.33	USD/MMBTU
\$0.15	USD/kg
\$2.81	MXN/kg
\$10.00	MXN/kg

Producción Syngas

Horas Trabajadas al día	24	h/día
Total de días de Producción	298	días/año
Syngas	84.54	kg/h
Syngas	604627.44	kg/año
Flujo Efectivo Syngas	\$6,046,274.39	MXN/año

Precio Venta Biocarbón

Biocarbón producido	4.08	kg/h
Producción anual	29199.24196	kg/año
Precio Venta Biocarbón	\$35.00	MXN/kg
Flujo Neto Efectivo Biocarbón	\$ 1,021,973.47	MXN/kg

Precio Energía Eléctrica

257	kWh
\$24.70	\$/kWh

Producción de Energía Eléctrica

Energía producida	1838064	kW/año
Flujo Efectivo	\$45,395,953.25	\$/año
Electricidad		

Después de realizar el balance ganancias y gastos necesarios en la planta anualmente se tiene un flujo de efectivo positivo.

Flujo Neto Efectivo Planta Syngas

Flujo Neto Total Efectivo	\$20,687,033.84	\$/año
----------------------------------	-----------------	--------

11.4. EVALUACIÓN DE FLUJO DE EFECTIVO.

11.4.1. CALCULO DE ROI.

Se desarrolla la ecuación que relaciona a la inversión inicial con el flujo de efectivo neto para cada año. Realizando los cálculos de ROI se obtienen los siguientes resultados para el ROI:

Tabla 21: ROI vs Años.

Año	ROI
1	-53%
2	-6%
3	41%
4	88%
5	135%
6	182%
7	229%
8	276%
9	323%
10	369%

$$ROI = \frac{\text{Ingresos} - \text{Inversión}}{\text{Inversión}} * 100$$

Graficando el ROI en función del tiempo del proyecto (años) se obtiene la siguiente gráfica con una tendencia lineal.

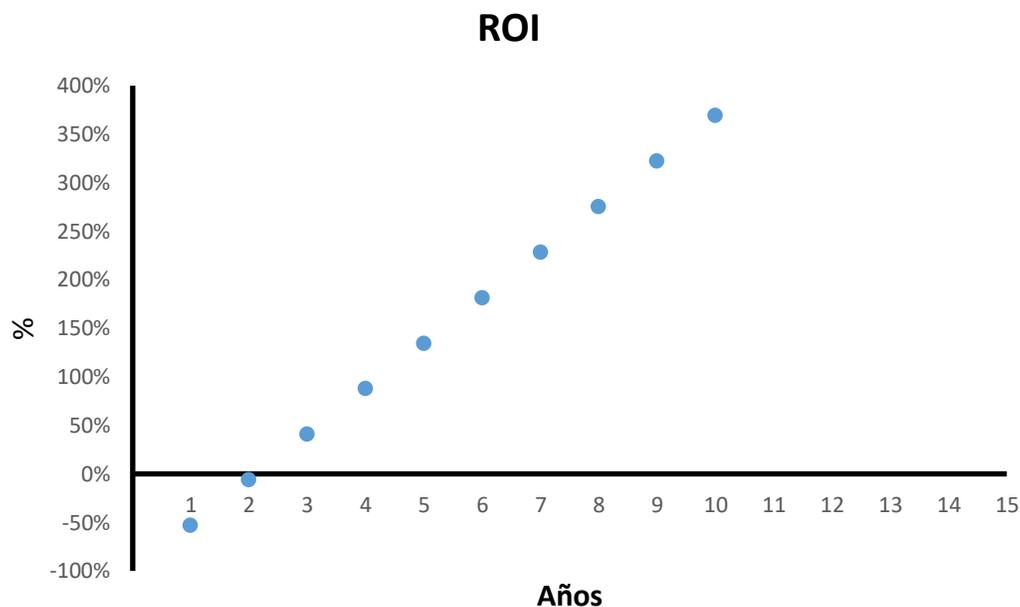


Ilustración 7: ROI del proyecto en función de los años.

11.4.2. CALCULO DE VPN.

Mediante la ecuación del valor presente neto presentada a continuación, se desarrolla la siguiente tabla para poder calcular el VPN.

$$VPN = \sum_{i=1}^n \frac{FE_i}{(1+i)^i}$$

Tabla 22: Calculo del VPN en función al flujo de efectivo estimado.

Año	Flujo de Efectivo (MXN/año)	Flujo de Efectivo (USD/año)	VPN (MXN)	VPN (USD)
0	\$0.00	\$0.00	-\$43,149,203.89	-\$2,281,819.35
1	\$18,893,702.28	\$999,138.14	\$16,429,306.33	\$868,815.78
2	\$19,838,387.39	\$1,049,095.05	\$15,000,671.00	\$793,266.58
3	\$20,830,306.76	\$1,101,549.80	\$13,696,264.82	\$724,286.88
4	\$22,913,337.44	\$1,211,704.78	\$13,100,775.05	\$692,796.14
5	\$25,204,671.18	\$1,332,875.26	\$12,531,176.13	\$662,674.57
6	\$28,985,371.86	\$1,532,806.55	\$12,531,176.13	\$662,674.57
7	\$28,985,371.86	\$1,532,806.55	\$10,896,674.90	\$576,238.76
8	\$25,204,671.18	\$1,332,875.26	\$8,239,451.72	\$435,719.29
9	\$22,913,337.44	\$1,211,704.78	\$6,513,400.57	\$344,442.12
10	\$20,830,306.76	\$1,101,549.80	\$5,148,933.26	\$272,286.26
11	\$20,830,306.76	\$1,101,549.80	\$4,477,333.27	\$236,770.66
12	\$20,830,306.76	\$1,101,549.80	\$3,893,333.27	\$205,887.53
13	\$20,830,306.76	\$1,101,549.80	\$3,385,507.20	\$179,032.64
14	\$20,830,306.76	\$1,101,549.80	\$2,943,919.30	\$155,680.56
15	\$20,830,306.76	\$1,101,549.80	\$2,559,929.83	\$135,374.40

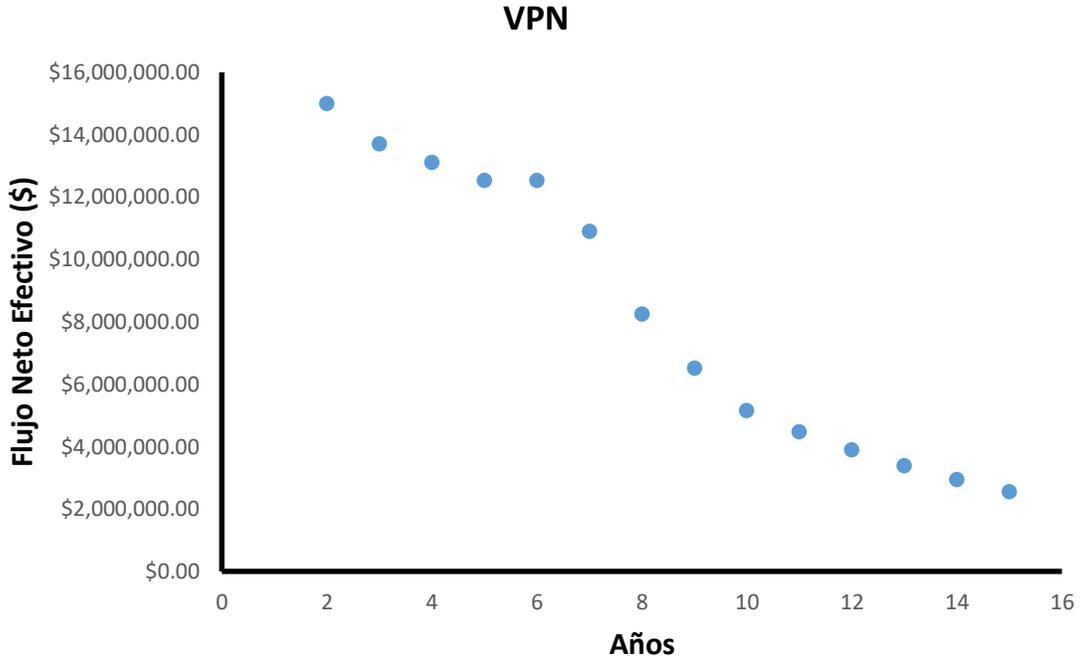


Ilustración 8: Representación del VPN en función de los años.

11.4.3. CALCULO DE PRI.

La siguiente tabla que se muestra a continuación presenta el valor del PRI con respecto al tiempo.

Tabla 23: Calculo del PRI en MXN y USD.

Año	PRI (MXN)	PRI (USD)
0		
1	-\$36,337,278.70	-\$1,921,590.62
2	-\$16,498,891.31	-\$872,495.57
3	\$4,331,415.45	\$229,054.23
4	\$27,244,752.89	\$1,440,759.01

Universidad Nacional Autónoma de México

5	\$52,449,424.07	\$2,773,634.27
6	\$81,434,795.93	\$4,306,440.82
7	\$110,420,167.78	\$5,839,247.37
8	\$135,624,838.96	\$7,172,122.63
9	\$158,538,176.40	\$8,383,827.41
10	\$179,368,483.16	\$9,485,377.22
11	\$200,198,789.92	\$10,586,927.02
12	\$221,029,096.69	\$11,688,476.82
13	\$241,859,403.45	\$12,790,026.62
14	\$262,689,710.21	\$13,891,576.43
15	\$283,520,016.97	\$14,993,126.23

Calculo del retorno de inversión mediante la iteración de función objetivo:

PRI	\$24,255,501.27	MXN/año
CTP	\$43,149,203.89	MXN/año
FEA	\$30,975,479.37	MXN/año
GA	\$12,081,777.09	MXN/año

$$\text{Función Objetivo: } [FEA - (CTP + GA)] - PRI = 0$$

Tiempo de Recuperación

3.9	Años
47	Meses

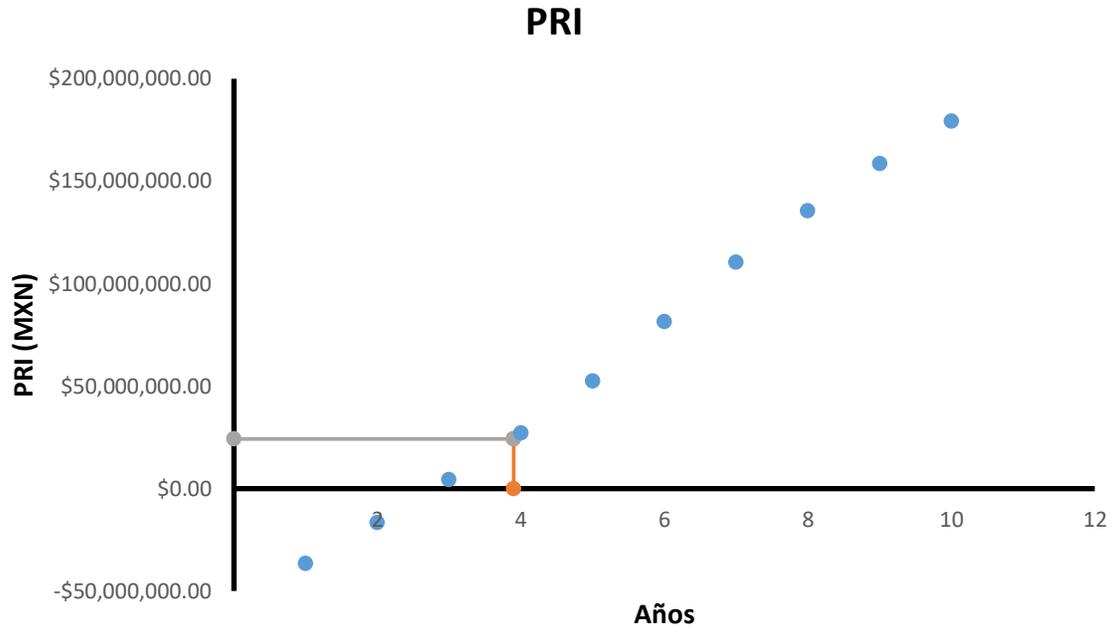
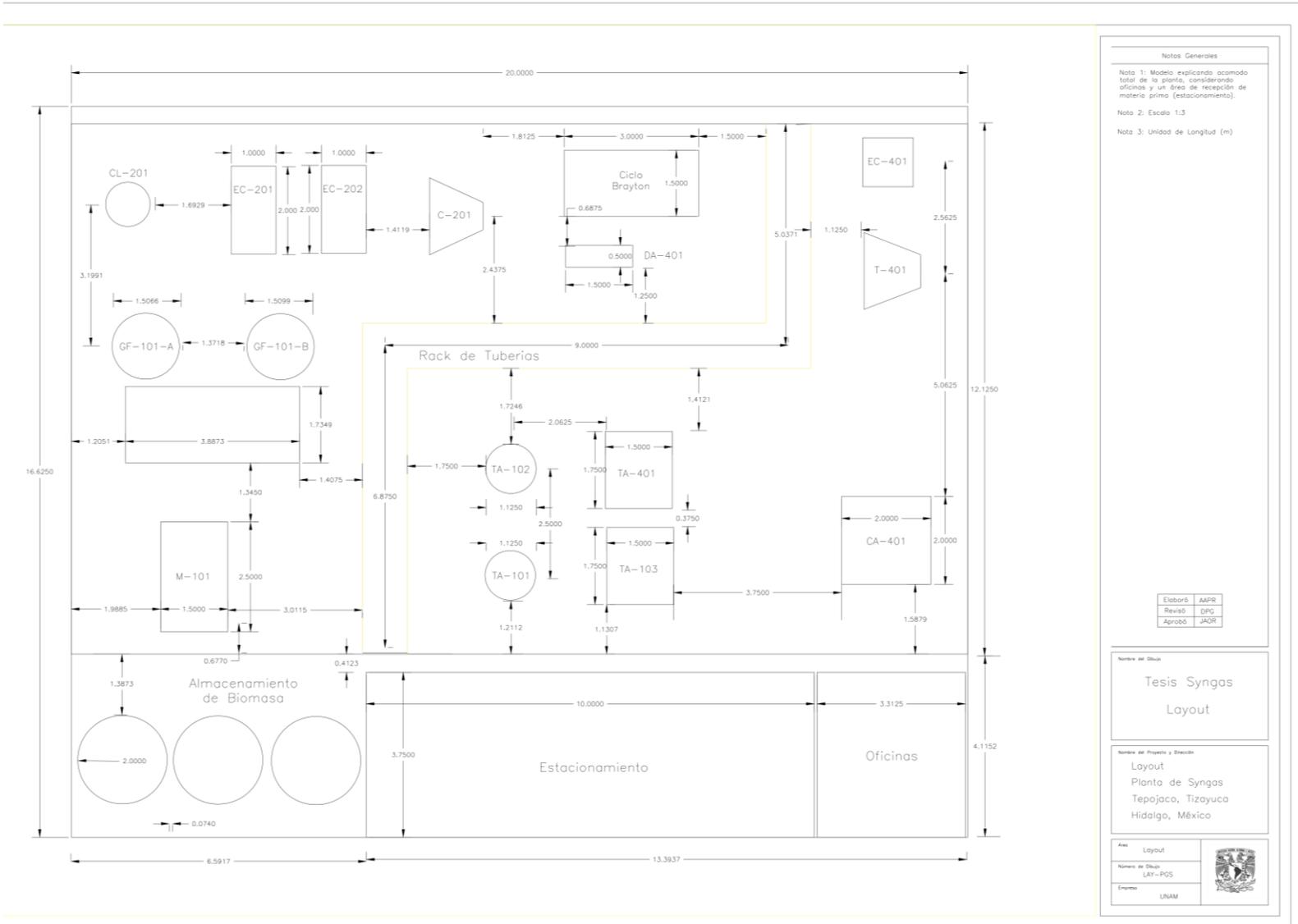


Ilustración 9: Grafica del PRI.

12. LAYOUT.



* Nota: El espaciamiento entre equipos de Proceso, fue establecido en base a la NRF-010-PEMEX-2014

13. CONCLUSIONES.

- Se creó un sistema de producción Gas de Síntesis a partir de la Gasificación de subproductos agrícolas (olote de maíz), se seleccionó el olote de maíz debido a las características que presenta, en cuanto a composición química, ya que se observó que esta materia prima la capacidad de producir el Syngas con las características necesarias para ser empleado como combustible y poder ser comercializado. También se desarrolló un sistema de generación energía, el cual tiene por objeto el autoconsumo de la misma para la planta de Proceso, creando de esta manera una planta sustentable que produce una cantidad excedente de Gas de Síntesis, Biocarbón y energía para su posterior venta.
- Se consiguió un estimado de costos para la planta de producción de *Syngas* a partir de la Gasificación de biomasa obteniendo así un valor cercano a los \$45,000,000 de inversión inicial obteniendo un retorno de inversión a 3.9 años, esto debido a que visualiza un proyecto a largo plazo, las ganancias serían visibles en la planta antes de los 10 años previstos, esto debido al bajo costo del Gas de Síntesis en el país, si se pudiera cambiar el costo del gas teniendo una propuesta de valor agregada al Syngas el periodo retorno de inversión disminuiría considerablemente.
- Se desarrollaron los entregables establecidos en el Alcance del Proyecto dentro de los límites de batería establecidos, todos los entregables fueron evaluados y entregados en este documento. Se encontraron complicaciones en el desarrollo de material como el DFP o el DTI ya que se desarrolló partiendo de las referencias que se tenían, la idea inicial fue muy simple, sin embargo los problemas se presentaron cuando el sistema paso a ser de generación de electricidad complicándose así la cantidad de equipos y extendiéndose el producto final.

- Se considera una venta del 50% de electricidad producida, debido a que también se ocupará para autoconsumo, el 50% se toma en cuenta como un caso optimista, considerando que para el cálculo del PRI se tomaron en cuenta con los valores obtenidos de esta venta.

14. BIBLIOGRAFÍA.

API, Worksheet for LHV and CO₂, H₂O, N₂ formed.

Arenas Castellanos, D. (2011). *“Propuesta de Diseño de un proceso para la generación de energía eléctrica a partir de los residuos de la producción del café”*. Pontificia Universidad Javeriana.

Aristizábal Álvarez M & Valencia Naranjo, L. (2015). *Diseño conceptual de un Gasificador para la producción de Gas de Síntesis a partir de residuos de poda generados en la Universidad EAFIT*. Colombia.

Biomasa. Consultado: 02/10/2017, de Fundación energizar Sitio web: http://www.energizar.org.ar/energizar_desarrollo_tecnologico_biomasa.html.

Biorefinerías, *“Una oportunidad de negocio para zonas rurales y la industria.”* España: Agencia provincial de energía.

Branan, C. *Rules of Thumb for Chemical Engineers 3rd Edition*.

Cárdenas Vargas, R. (2012). *Biorefinerías para la producción de Biocombustibles de segunda generación*. Instituto Ingeniería Energética, Universidad Politécnica de Valencia.

Camacho Muñoz, J. M. (2010). *Diseño de una Caldera Acuotubular*. E.U.I.T. Naval, Universidad de Cádiz.

CAPCOST, Costos de Equipos de Proceso.

CEPCI: Chemical Engineering Plant Cost Indicator, para Equipos, *Chemical Engineering, December 2010*.

Felix Hernández, J. (2012). *Ciclo Brayton. Turbinas a Gas*. Facultad Regional Mendoza. Universidad Tecnológica Nacional.

García García, C. I. (2013). *Planta de Gasificación de Biomasa para la producción de energía eléctrica por medio de un Ciclo Rankine*. Universidad Pontificia Madrid.

Gill, J. M. (2009). *“El futuro de los biocombustibles, biorefinerías integradas”*. Universidad de Valladolid.

Hermann Hofbauer, Reinhard Rauch. (2007). *Report on Gas Cleaning for Synthesis Applications*. Viena: University of Technology Institute of Chemical Engineering.

Jantesa Ingeniería y Construcción, “*Criterios de Diseño de Procesos*”.

Macías de la Fuente, A. (2015), “*Diseño del sistema de limpieza del gas de síntesis en una central GICC*”.

NRF-010-PEMEX-2014. *Espaciamientos mínimos y criterios para la distribución de instalaciones industriales*.

Sacramento Rivero, J. C. (2010). *Diagnóstico del desarrollo de Biorrefinerías en México*. Revista Mexicana de Ingeniería Química, 9, 261- 283.

Sánchez Bastardo, N. (2014). “*Obtención de Gas de Síntesis a partir de Biomasa utilizando catalizadores de Níquel*”. Universidad de Valladolid.

Smith & Van Ness, (2005), “*Introducción a la Termodinámica en Ingeniería Química*”, Editorial: McGraw-Hill.