

**DISEÑO DE UN SISTEMA PARA EL APROVECHAMIENTO DEL BIOGÁS  
APLICADO A LA PRODUCCIÓN DE VAPOR EN LA CERVECERÍA  
BAVARIA BUCARAMANGA**

**JORGE ANDRES CRISTANCHO GÓMEZ**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER  
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO – MECÁNICAS  
ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA  
BUCARAMANGA**

**2009**

**DISEÑO DE UN SISTEMA PARA EL APROVECHAMIENTO DEL BIOGÁS  
APLICADO A LA PRODUCCIÓN DE VAPOR EN LA CERVECERÍA  
BAVARIA BUCARAMANGA**

**JORGE ANDRES CRISTANCHO GÓMEZ**

**Trabajo de Grado para optar al título de  
Ingeniero Mecánico**

**Director**

**OMAR ARMANDO GELVEZ AROCHA  
Ingeniero Mecánico**

**Codirectora**

**LILIANA CRISTINA HERNANDEZ BELLO  
Ingeniera Química**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER  
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO – MECÁNICAS  
ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA  
BUCARAMANGA**

**2009**

## **DEDICATORIA**

A esas dos personas que quiero tanto, a la cuales les tengo profunda admiración y respeto, las cuales me guiaron y acompañaron a lo largo de este camino, para ti mamá y para ti papá, gracias por su dedicación y esfuerzo.

## **AGRADECIMIENTOS**

A mis hermanos Jessica y Andersson, los cuales completan ese grupo motor de mi vida, por su paciencia y comprensión

A Hernán, Yesid, Oscar, Aldemar, Diego, Erika y Astrid por brindarme su amistad y apoyo en los momentos en que más lo necesite.

A mi familia por la confianza y respaldo que me brindaron.

A Liliana Hernández y Omar Gelvez, por su acompañamiento, paciencia y comprensión.

Al Dr. Jaime Eugenio Gutiérrez por abrirme las puertas de la Cervecería y permitirme participar en este proyecto.

A los Drs. Isnardo Mendivelso, Jairo Escobar y Carlos Mora, por la confianza brindada y el apoyo que siempre estuvieron prestos a darme.

A los trabajadores de la PTAR y de las calderas, por su amabilidad y voluntad de servicio.

Y en general a todos los que de una u otra forma colaboraron para hacer esto posible.

**Jorge Andrés Cristancho Gómez.**

## Contenido

INTRODUCCIÓN .....	1
1 GENERALIDADES DE LA PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES BAVARIA – BUCARAMANGA.....	3
1.1 CARACTERISTICAS DE VERTIMIENTO DE LA PLANTA .....	3
1.2 DESCRIPCIÓN GENERAL DE LA OPERACIÓN .....	3
1.2.1 LÍNEA DE AGUA RESIDUAL.....	3
1.2.2 LÍNEA DE LODOS .....	8
1.2.3 NIVELES Y TIEMPOS DE RETENCIÓN.....	10
2 EL BIOGÁS COMO UNA FUENTE RENOVABLE DE ENERGÍA. ....	11
2.1 BIOMASA.....	11
2.2 DIGESTIÓN ANAEROBIA PARA LA PRODUCCIÓN DE BIOGÁS. ....	12
2.2.1 Factores que influyen en la digestión anaerobia. ....	13
2.3 BIOGÁS .....	16
2.4 CONSECUENCIAS DEL ÁCIDO SULFÚRICO SOBRE LOS EQUIPOS.....	18
2.5 ANTECEDENTES SOBRE LA PRODUCCIÓN DE ENERGÍA A PARTIR DE BIOGÁS .....	22
3 DISEÑO DE LA LINEA DE TRANSPORTE .....	25
3.1 PROPIEDADES FÍSICAS DEL BIOGÁS .....	25
3.1.1 Factor de compresibilidad (z) .....	26
3.1.2 Gravedad específica del biogás (G) .....	29
3.1.3 Viscosidad ( $\mu$ ).....	29
3.2 DIMENSIONAMIENTO DE LA LÍNEA DE TRANSPORTE .....	33
3.3.1 Cálculo de la tubería .....	40
4 PROCESO DE DESHIDRATACIÓN DEL BIOGÁS .....	44
4.1 DETERMINACIÓN DEL CONTENIDO DE AGUA DE UNA MEZCLA DE HIDROCARBUROS.....	44
4.2 FACTORES QUE AFECTAN LA FORMACIÓN DE HIDRATOS .....	45
4.2.1 Composición de la fase gaseosa.....	45
4.2.2 Salinidad del agua.. .....	46
4.2.3 Presencia de una fase de hidrocarburo líquido.....	46

4.3	MÉTODOS DE DESHIDRATACIÓN.....	47
4.3.1	Deshidratación por adsorción .....	49
5	SELECCIÓN DEL COMPRESOR .....	59
5.1	COMPRESORES.....	59
5.2	CLASIFICACIÓN DE LOS COMPRESORES. ....	59
5.2.1	Compresores de desplazamiento positivo:.....	59
5.2.2	Compresores de desplazamiento no positivo, o dinámicos: .....	60
6	DISEÑO DEL SISTEMA DE COMBUSTION COMBINADO .....	67
6.1	Propiedades físicas.....	67
6.2	Diseño de la cámara de mezcla .....	87
7	ANÁLISIS DE LAS EMISIONES .....	93
	CONCLUSIONES .....	95
	RECOMENDACIONES.....	97

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Diagrama del proceso de tratamiento primario efectuado a las aguas residuales de la Cervecería Bavaria Bucaramanga.....	4
Figura 2. Tamiz rotativo. ....	5
Figura 3. Diagrama del proceso de tratamiento secundario efectuado a las aguas residuales de la Cervecería Bavaria Bucaramanga.....	6
Figura 4. Tanque de igualación .....	6
Figura 5. Reactor anaerobio PTAR Cervecería Bavaria Bucaramanga.....	7
Figura 6. Fotosíntesis.....	11
Figura 7. Esquema básico de digestión anaerobia.....	13
Figura 8. Digestor anaerobio de domo fijo.....	15
Figura 9. Densidad ( $\rho$ ) del $\text{CH}_4$ [ $\text{kg}/\text{m}^3$ ] como una función de presión (P) y temperatura.....	17
Figura 10. Valor calorífico del biogás $H_u$ , como función de la densidad y porcentaje en volumen de $\text{CH}_4$ ( $\rho = 0,72$ , densidad a condiciones normales). .....	18
Figura 11. Diagrama del proceso de aprovechamiento de biogás .....	22
Figura 12. Esquema de generación de electricidad de un relleno sanitario ..	24
Figura 13. Estimativo en la reducción de emisiones provenientes del quemado de $\text{CO}_2$ al ambiente.....	25
Figura 14. Factor de compresibilidad para gas natural .....	30
Figura 15. Viscosidad de distintos gases en función de la temperatura a una atm.....	31
Figura 16. Viscosidad de gases hidrocarbonados en función de la presión y temperatura .....	32
Figura 17. Plano instalación de la línea de transporte de biogás.....	40
Figura 18. Localización de la región de formación de hidratos para gas natural dulce usando el método de la gravedad del gas .....	48
Figura 19. Esquema y Curva de ruptura ideal de un adsorbedor de lecho fijo .....	54
Figura 20. Evolución de la concentración en un lecho de intercambio iónico	54
Figura 21. Silicagel Microporoso sin indicador .....	56
Figura 22. Isoterma de adsorción a $25\text{ }^\circ\text{C}$ y presión atmosférica.....	57
Figura 23. Principio de funcionamiento de un compresor recíprocante .....	61
Figura 24. Principio de funcionamiento de un compresor de paletas deslizantes. ....	63
Figura 25. Principio de funcionamiento de un compresor de lóbulos. ....	63
Figura 26. Principio de funcionamiento de un compresor de tornillos. ....	64
Figura 27. Generación de biogás año 2008.....	66
Figura 28. Cobertura del Compresor.....	66
Figura 29. Gráfica de temperatura vs flujo, con las condiciones de operación actuales de la caldera (gas natural) .....	68

Figura 30. Gráfica de temperatura vs flujo, con las condiciones de operación actuales de la caldera alimentada con máximo flujo de biogás (500 m <sup>3</sup> /h)...	68
Figura 31. Esquema de la simulación del tren de combustión actual.....	69
Figura 32. Esquema de la simulación del tren de combustión combinado ...	69
Figura 33. Esquema de la cámara de mezcla .....	70
Figura 34. Consumo de gas natural año 2008 .....	74
Figura 35. Simulación del paso del gas natural por la válvula reductora de presión .....	75
Figura 36. Válvula reductora de presión.....	75
Figura 37. Esquema de la simulación del paso de biogás por el compresor	76
Figura 38. Caudal de gas natural vs caudal de biogás .....	77
Figura 39. Esquema del montaje para la simulación de la cámara de combustión .....	79
Figura 40. Curva Relación aire/combustible vs Caudal de biogás .....	80
Figura 41. Esquema del montaje de la simulación de la caldera pirotubular. ....	83
Figura 42. Caldera pirotubular .....	84
Figura 43. Flujo de vapor generado año 2008 .....	87
Figura 44. Esquema del recipiente a presión (Cámara de mezcla) .....	90
Figura 45. Lugar de instalación cámara de mezcla .....	92
Figura 46. Tendencia de la reducción de emisiones en función del biogás aprovechado.....	94

. . . . .  
. . . . .

## LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Composición y propiedades del biogás bajo condiciones estándar (0°C, 101,325 KPa). .....	17
Tabla 2. Comparación de componentes del gas natural y el biogás. ....	19
Tabla 3. Tecnologías de utilización del biogás y requisitos para su uso. ....	20
Tabla 5. Caracterización del biogás generado en la PTAR de la Cervecería Bavaria Bucaramanga .....	26
Tabla 6. Temperatura crítica de los componentes del biogás .....	27
Tabla 7. Presión crítica de los componentes del biogás. ....	28
Tabla 8. Viscosidad y peso molecular de los componentes del biogás .....	32
Tabla 10. Relación longitud/diámetro .....	36
Tabla 9. Diámetro para tubería de polietileno según norma NTC-1746 .....	37
Tabla 12. Parámetros de diseño utilizados en el dimensionamiento de la línea de transporte .....	41
Tabla 13. Dimensionamiento de la tubería .....	43
Tabla 14. Capacidad de la sílica gel .....	57
Tabla 15. Composición química del gas natural suministrada por Gasorient. ....	74
Tabla 16. Resultados de la mezcla biogás - gas natural. ....	78
Tabla 17. Temperatura de llama adiabática de mezcla biogás - gas natural	82
Tabla 19. Parámetros operativos año 2008 .....	86
Tabla 20. Resultados del muestreo isocinético .....	94

## LISTA DE ANEXOS

- Catálogo de TUTHILL Vacuum and Blowers System, sopladores de lóbulos para metano (Componente principal del biogás).
- UW-12 máximas eficiencias admisibles de juntas soldadas.

## GLOSARIO

**BACTERIAS ANAEROBIAS.** Organismo procariota móvil o inmóvil de diferente tamaño y forma de vida según la especie y el medio, que vive en ausencia de aire.

**ENDULZAMIENTO.** Se conoce como endulzamiento al tratamiento de productos que contienen ácido sulfhídrico.

**EQUILIBRIO.** Equilibrio químico es el al que llega cualquier reacción reversible si no existe intervención externa y en el cual se observa que las cantidades relativas de las sustancias que intervienen en la reacción, tanto los (reactivos como los productos) permanecen constantes, en el estado de equilibrio químico las concentraciones de las sustancias participantes no cambian con el tiempo y de igual manera (en un sistema aislado) tampoco se observan cambios físicos a medida que transcurre el mismo.

**GAS DULCE.** Gas natural que contiene cantidades muy pequeñas de ácido sulfhídrico.

**HIDRÓLISIS.** La hidrólisis es una reacción química del agua con una sustancia, la cual al ser disuelta en agua, sus iones constituyentes se combinan con los iones hidronio u oxonio,  $H_3O^+$  o bien con los iones hidroxilo,  $OH^-$ , o ambos. Dichos iones proceden de la disociación o autoprotólisis del agua. Esto produce un desplazamiento del equilibrio de disociación del agua y como consecuencia se modifica el valor del pH.

**LODOS.** Una mezcla de arcillas, agua y productos químicos utilizada en las operaciones de perforación para lubricar y enfriar la barrena, para elevar

hasta la superficie el material que va cortando la barrena, para evitar el colapso de las paredes del pozo y para mantener bajo control el flujo ascendente de crudo o gas. Es circulado en forma continua hacia abajo por la tubería de perforación y hacia arriba hasta la superficie por el espacio entre la tubería de perforación y la pared del pozo.

**PRESIÓN CRÍTICA.** Presión que se necesita para licuar un gas cuando éste se encuentra en su temperatura crítica

**PTAR (PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES).** El tratamiento de aguas residuales (o agua residual, doméstica o industrial, etc.), es un proceso de tratamiento de aguas que a su vez incorpora procesos físicos, químicos y biológicos, los cuales tratan y remueven contaminantes.

**REACTOR ANAEROBIO.** Proceso continuo de tratamiento anaerobio (en ausencia de oxígeno) de aguas residuales en el cual el desecho circula de abajo hacia arriba a través de un manto de lodos o filtro, para estabilizar parcialmente de la materia orgánica. El desecho se retira del proceso en la parte superior; normalmente se obtiene gas como subproducto del proceso.

**RESIDUOS LÍQUIDOS** Materiales residuales líquidos procedentes de actividades industriales.

**RESIDUOS SÓLIDOS** Materiales residuales sólidos procedentes de actividades industriales

**TEMPERATURA CRÍTICA.** Temperatura límite para la licuación de un gas. Por encima de esta temperatura es imposible licuar a un gas, aunque se le someta a enormes presiones

## RESUMEN

### TÍTULO:

**DISEÑO DE UN SISTEMA PARA EL APROVECHAMIENTO DEL BIOGÁS APLICADO A LA PRODUCCIÓN DE VAPOR EN LA CERVECERÍA BAVARIA BUCARAMANGA\***

### AUTOR:

Jorge Andrés Cristancho Gómez\*\*

### PALABRAS CLAVES:

Biogás, digestión anaerobia, PTAR (Planta de Tratamiento de Aguas Residuales), generación de vapor.

### DESCRIPCIÓN:

Para el proceso industrial de la Cervecería Bavaria Bucaramanga, el agua utilizada es tomada del río Surata; como consecuencia de su paso por éste, sufre una contaminación física, química y biológica, la cual resulta lesiva para el medio ambiente al momento de su retorno al río.

Una forma de disminuir la concentración de los agentes contaminantes contenidos en ella, es sometiendo las aguas efluentes del proceso a un sistema de tratamiento, para este tipo de aguas residuales como un proceso adicional, en una planta destinada para tal fin PTAR (Planta de Tratamiento de Aguas Residuales). En el proceso en mención se obtiene biogás como subproducto, el cual se genera a partir de la digestión anaerobia de la materia orgánica y cuyos componentes esenciales son metano ( $\text{CH}_4$ ), componente principal del gas natural, dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ) y pequeñas cantidades de otros compuestos orgánicos denominados COV (Compuestos Orgánicos Volátiles), algunos de los cuales generan malos olores. En la PTAR actualmente se genera entre 200  $\text{m}^3/\text{h}$  y 500  $\text{m}^3/\text{h}$  de biogás, con un poder calorífico 28  $\text{kJ}/\text{m}^3$ , el cual es quemado a la atmósfera, causando una pérdida de energía; una forma de mitigar este efecto, es mediante su aprovechamiento en la producción de vapor, para lo cual se ha diseñado un sistema que consta de: Una etapa de pretratamiento y compresión, otra de transporte y un sistema de combustión combinado, para este último nos valdremos de la simulación del proceso en el software HYSYS.

---

\* Trabajo de grado

\*\* Facultad de Ingenierías Fisicomecánicas, Escuela de Ingeniería Mecánica, Ing. Omar Armando Gelvez Arocha, Ing. Liliana Cristina Hernandez Bello

## SUMMARY

### TITLE:

**DESIGN OF A SYSTEM TO USE BIOGAS APPLIED TO THE STEAM PRODUCTION IN THE BAVARIA BREWERY BUCARAMANGA \***

### AUTHORS:

Jorge Andrés Cristancho Gómez. \*\*

### KEY WORDS:

Biogas, anaerobic digestion, PTAR (Plant Wastewater Treatment), steam generation.

### DESCRIPTION:

The industrial process of the Bavaria brewery of Bucaramanga, use water from the suratá river; after been treated and used in the process it undergoes physical, chemical and biological contamination, it causes damage to the environment if returns without appropriated treatment.

A form to diminish the concentration of the contained polluting agents in her, is submit this effluent waters of the process to a treatment system, this type of residual waters requires an additional process, the plant destined for such aim is usually called PTAR (Plant of Residual Water Treatment). In the PTAR process biogas like by-product is obtained, which is generated from the anaerobic digestion of the organic matter, it's essential components are methane ( $\text{CH}_4$ ), main component of the natural gas, carbon dioxide ( $\text{CO}_2$ ) and small amounts of other organic compounds denominated COV (Volatile Organic Compounds), some of them generate bad scents. At the moment, the PTAR generate between 200  $\text{m}^3/\text{h}$  and 500  $\text{m}^3/\text{h}$  of biogas, with a 28 calorific power  $\text{kJ}/\text{m}^3$ , which is burned to the atmosphere, causing a loss of energy; a form to mitigate this effect, is by means of its advantage in the steam production, for which a system has been designed that consists of: A stage of pre-cure and compression, another one of transport and a combined system of combustion, for this last one we will use ourselves the simulation of the process in software HYSYS.

---

\* Degree Work.

\*\* Physical-Mechanical Engineering Faculty, Mechanical Engineering School, Eng. Omar Gelvez. Eng. Liliana Hernández

## INTRODUCCIÓN

El biogás es una mezcla de gases generados a partir de la descomposición de materia orgánica en condiciones anaerobias y cuyos principales componentes son metano ( $\text{CH}_4$ ) (el cual además es componente principal del gas natural) y dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ). Dentro de su composición también se encuentran pequeñas cantidades de compuestos orgánicos denominados COV (Compuestos Orgánicos Volátiles), algunos de los cuales son causantes de malos olores.

De estos gases el metano es un gas de efecto invernadero (GEI) que tiene un poder de calentamiento global 21 veces superior al del  $\text{CO}_2$ <sup>1</sup>, de aquí que es deseable reducir sus emisiones a la atmósfera puesto que contribuyen significativamente al calentamiento global del planeta. De otra parte, por ser éste es un gas combustible, su manipulación lleva consigo cierto nivel de riesgo que puede afectar la seguridad del lugar (incendios o explosiones) y tener efectos sobre la comunidad aledaña a la fábrica viendo los trabajadores afectada su seguridad e higiene.

De otra parte, se ha concluido que el biogás es una alternativa viable para la producción de energía debido a su alto contenido de metano<sup>2</sup> (40 – 80% en volumen) lo cual redundaría en un alto poder calorífico, característica deseable para un combustible.

El biogás generado en la Cervecería Bavaria Bucaramanga es un subproducto del proceso de tratamiento de aguas efectuado en una PTAR

---

<sup>1</sup> Estudio de viabilidad para el aprovechamiento del biogás producido en el sitio de disposición final de navarro, bajo los mecanismos establecidos en el protocolo de Kioto 2008, **WILFRIDO VALLEJO PATIÑO**

<sup>2</sup>[www.conae.gob.mx/work/sites/CONAE/resources/LocalContent/1477/1/images/b1eteisa.pdf](http://www.conae.gob.mx/work/sites/CONAE/resources/LocalContent/1477/1/images/b1eteisa.pdf)

(Planta de Tratamiento de Aguas Residuales), mediante la cual se busca disminuir la concentración de diferentes agentes contaminantes contenidos en estos vertimientos, y de esta forma reducir el posible impacto ambiental que generen los mismos; dando de paso cumplimiento a lo establecido por la legislación Colombiana en el DECRETO 1594 DE 1984 (Usos del agua y residuos líquidos), el cual establece los procedimientos, las medidas que se deben adoptar para la regulación, legalización y control de los descargos de residuos y materiales que afectan o puedan afectar las condiciones sanitarias del ambiente.

En la actualidad el biogás en mención se captura mediante un sistema de captación y control de extracción, para su posterior combustión al aire libre; lo cual conlleva a una pérdida de energía. A partir de la necesidad de aprovechar esta energía se han llevado a cabo diferentes estudios para su aprovechamiento que han llegado a la conclusión de que un uso eficiente y de fácil ejecución es su utilización como combustible en un sistema para generación de vapor.

En el presente trabajo se busca diseñar un sistema mediante el cual se aproveche energéticamente el biogás en la producción de vapor. Dicho sistema constará de una etapa de pretratamiento (-de ser necesaria-, con la cual se busca tener una concentración permisible de agentes corrosivos para la aplicación en mención y de esta forma extender la vida útil tanto de los equipos como de las instalaciones), una línea de transporte para el biogás, un compresor que impulsará el flujo de biogás desde la PTAR hasta el sistema de alimentación de la caldera y una cámara de mezclado donde se llevaría a cabo la mezcla biogás – gas natural.

# **1 GENERALIDADES DE LA PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES BAVARIA – BUCARAMANGA**

La planta consta de un sistema de tratamiento primario (figura 1) cuya finalidad es retirar la mayor parte de los sólidos suspendidos contenidos en el agua residual, y el sistema de tratamiento secundario (figura 3) que permite remover la materia orgánica soluble con una eficiencia superior al 80%.

## **1.1 CARACTERISTICAS DE VERTIMIENTO DE LA PLANTA**

Caudal de entrada promedio = 180 - 250 m<sup>3</sup>/h

DQO (mg/l) = 800 - 2100

DBO (mg/l) = 650 - 1700

Carga diaria de DBO (Kg/día) = 1400 - 3700

Carga diaria de DQO (Kg/día) = 1700 - 4550

Temperatura ambiente promedio = 27 °C

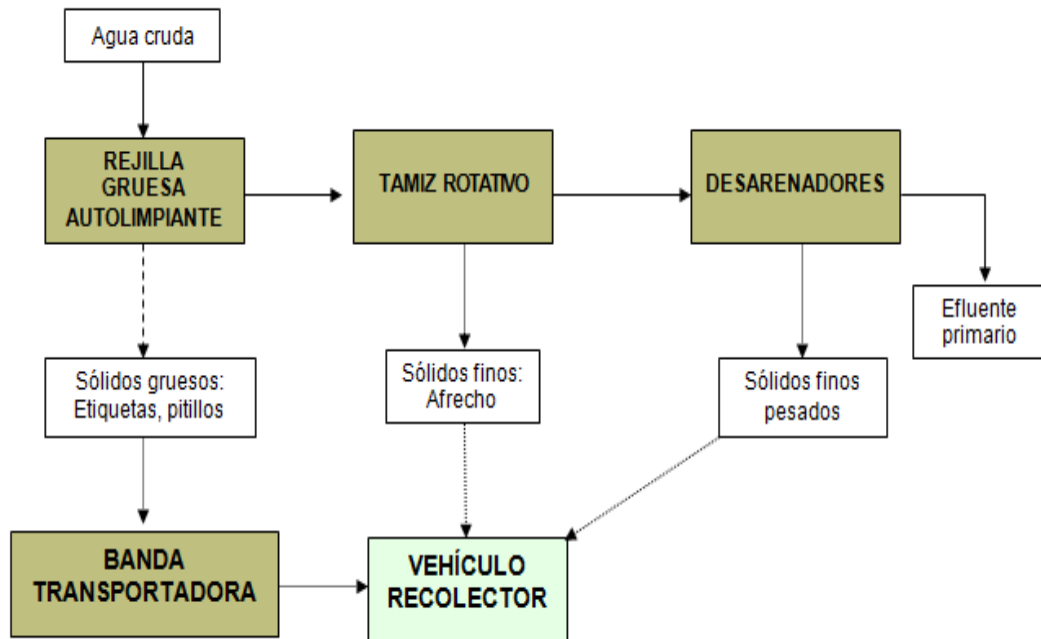
Sólidos suspendidos totales (mg/l) = 500 máx.

Aceites y grasas (mg/l) = 50 máx.

## **1.2 DESCRIPCIÓN GENERAL DE LA OPERACIÓN**

### **1.2.1 LÍNEA DE AGUA RESIDUAL**

El vertimiento proveniente de la Planta de Producción de la Cervecería se compone de los residuos líquidos generados en las áreas de cocinas, cavas, maduración, filtración, envase, depósito, mantenimiento y áreas administrativas (agua residual doméstica).



**Figura 1. Diagrama del proceso de tratamiento primario efectuado a las aguas residuales de la Cervecería Bavaria Bucaramanga**

El agua ingresa por gravedad a la caja receptora la cual contiene un tabique perforado en la parte media que actúa como unidad preliminar para la retención de sólidos gruesos. En la figura 1 podemos ver el diagrama del tratamiento primario, el cual se completa en la rejilla gruesa, tamiz rotatorio (figura 2) y desarenadores (2). A la salida de éstos se encuentra la unidad de aforo del caudal de entrada que consiste en canaleta *Parshall* con lector ultrasónico y medidor de pH. En este punto, se asume que la mayor parte de los sólidos suspendidos ha sido retirada.



**Figura 2. Tamiz rotativo.**

En la figura 3 se muestra el diagrama del tratamiento secundario, en el cual, el caudal ingresa a los tanques de proceso, dirigiéndose inicialmente al tanque de igualación (figura 4) para su homogenización. Si se presentan condiciones extremas de pH o temperatura, el agua entra al tanque de emergencia para luego ser dosificada al tanque de igualación en pequeños caudales. El agua, una vez homogeneizada, es alimentada al tanque de acondicionamiento, donde como su nombre lo dice se acondiciona tanto la carga orgánica como el pH. En esta unidad al agua se le proporciona un tiempo de retención para que ocurra la formación de ácido acético y los otros ácidos volátiles que constituyen la forma asimilable de la carga orgánica para las bacterias metanogénicas. De esta manera el agua está lista para ser enviada al reactor.

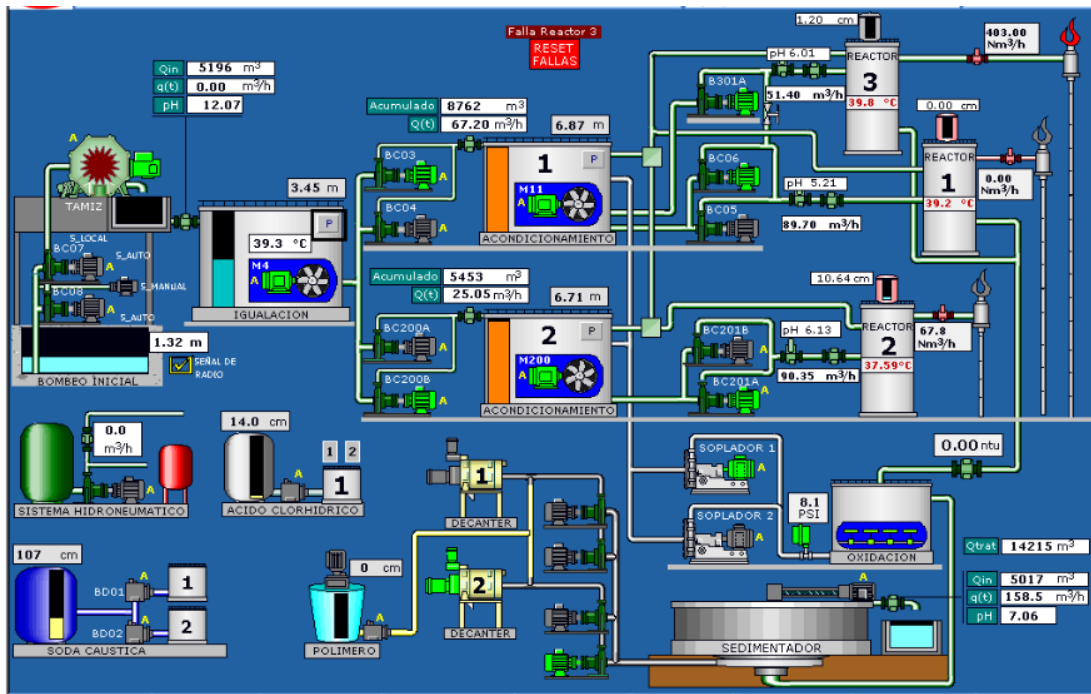


Figura 3. Diagrama del proceso de tratamiento secundario efectuado a las aguas residuales de la Cervecería Bavaria Bucaramanga



Figura 4. Tanque de igualación

En la figura 5, podemos apreciar dos de los tres reactores con que cuenta la PTAR, los cuales consisten, en un tanque alto y delgado que contiene el lodo granular responsable de la degradación anaeróbica de la materia orgánica. El agua es alimentada por la base del reactor y entra inmediatamente en contacto con el lodo generándose el biogás correspondiente. El flujo ascendente de agua y el biogás formado, expanden el lecho de lodo, es decir, lo levantan a lo alto de la torre hasta aproximadamente 1/3 de su altura total, optimizando el contacto de éste con el agua residual. El grado de expansión depende de la carga hidráulica alimentada al reactor y del volumen de biogás generado.



**Figura 5. Reactor anaerobio PTAR Cervecería Bavaria Bucaramanga**

El reactor contiene dos compartimentos con separadores gas - líquido. En el primero de ellos se genera la mayor cantidad de gas el cual permite la expansión del lodo y el ascenso de los fluidos a la parte superior de la torre, a través de las tuberías de elevación (*riser*), hasta el tanque desgasificador donde ocurre la separación de gas de la mezcla lodo - agua. El gas separado sale del reactor para ser finalmente quemado en la antorcha, mientras la mezcla lodo - agua retorna por una tubería central (*downer*) hasta el fondo del reactor, proceso conocido como recirculación interna.

El segundo compartimento opera como una unidad de acabado o pulimento, en la cual, parte de la materia orgánica que no alcanzó a ser transformada a biogás en la primera parte, lo realiza en este compartimento. De la misma forma que en la primera unidad, los fluidos arrastrados por el biogás, ascienden por tuberías de elevación y se separan en el tanque desgasificador. Finalmente, el efluente tratado es evacuado por la porción superior del reactor y llevado al tanque de oxidación de sulfuros para la remoción del sulfuro de hidrógeno formado en las reacciones metanogénicas. Este tanque posee difusores localizados en su base que suministran el aire necesario para la oxidación, y a su vez trabajan como una unidad adicional de tratamiento aerobio. El agua abandona el tanque de oxidación por rebose y se dirige finalmente al tanque de sedimentación secundaria donde se retienen la mayor parte de los sólidos suspendidos contenidos en el agua y arrastrados a su paso por el reactor y el tanque de oxidación. Antes de su salida de la planta, el caudal es aforado en la canaleta *Parshall* de salida.

### **1.2.2 LÍNEA DE LODOS**

Los residuos generados por la operación de la planta de tratamiento son los lodos. En general, los lodos son materiales pastosos formados por la

suspensión de un alto contenido de sólidos en un medio líquido que generalmente es agua.

Durante la operación normal de la planta se generan tres tipos de lodos diferentes:

- Lodos primarios
- Lodos secundarios
- Lodos anaeróbicos

Los lodos primarios surgen de la separación de sólidos suspendidos en las unidades de tratamiento primario: rejilla gruesa, tamiz rotatorio y desarenadores. La naturaleza de estos lodos depende de cada unidad en particular. Así, los lodos de la rejilla gruesa están constituidos prácticamente por residuos sólidos gruesos (etiquetas de botellas y pitillos plásticos). Los lodos del tamiz están formados por residuos en los que predominan el afrecho y los fragmentos de etiquetas principalmente, y tienen un mayor contenido de agua. Los lodos de los desarenadores, en cambio, se caracterizan por su alto contenido de agua.

Los lodos secundarios son aquellos separados por el tanque sedimentador circular y que provienen del reactor y del tanque de oxidación de sulfuros (unidades de tratamiento secundario). Están constituidos en su mayor parte por sólidos finos que se generan por la actividad biológica en el tanque de oxidación. Estos sólidos se asientan en el sedimentador y son acumulados en la tolva del fondo con ayuda de un barredor mecánico que los arrastra y conduce hasta esta unidad. Son principalmente lodos de naturaleza orgánica con un contenido de 1% - 5% de sólidos secos (10.000 - 50.000 mg/l de sólidos totales). Necesitan ser espesados, desaguados y estabilizados antes

de su disposición final sobre suelo o relleno sanitario. La Planta de Tratamiento cuenta con una unidad para el espesado y desaguado de lodos.

Finalmente, cuando se hace referencia a los lodos anaeróbicos, se trata estrictamente del lodo granular contenido dentro del reactor y que constituyen la biomasa responsable del tratamiento secundario propiamente dicho. Esta biomasa, como producto de su actividad biológica metanogénica se reproduce en proporciones tales que, al cabo de cierto tiempo forma un nuevo material celular en forma de lodo granular. Cuando hay suficiente acumulación de lodo granular dentro del reactor, por encima de la cantidad requerida para los caudales y cargas que la planta maneja, entonces dicho lodo puede ser evacuado del reactor y almacenado en el tanque de lodos o llevado a otras plantas de tratamiento que puedan requerir de él. Si no existe demanda externa y la capacidad de almacenamiento del lodo se encuentra copada, entonces, dicho exceso puede ser deshidratado y dispuesto de la misma forma que el lodo aeróbico secundario.

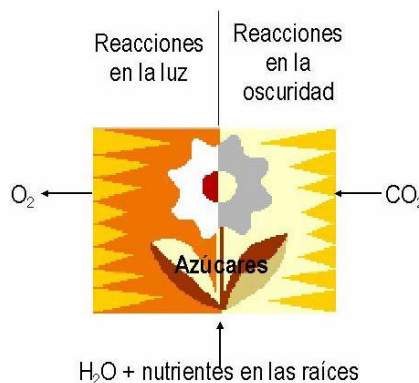
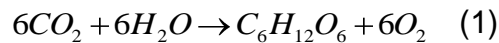
### **1.2.3 NIVELES Y TIEMPOS DE RETENCIÓN**

Los tiempos de retención aplicados son: En el tanque de igualación inferior a 2 horas y de 3 a 5 horas en el tanque de acondicionamiento, para un total de 5 a 7 horas de retención en la etapa de preacidificación. Los niveles de los tanques pueden manipularse a conveniencia dependiendo del pH del agua en estos tanques. Los niveles bajos corresponden a tiempos de retención cortos y favorecen el mantenimiento del pH de alimentación al reactor cuando los valores de pH en el tanque de Acidificación tienden a ser inferiores a 6.8. De igual forma, niveles altos incrementan los tiempos de retención y favorecen la acidificación cuando hay tendencias alcalinas en los tanques de igualación y acidificación.

## 2 EL BIOGÁS COMO UNA FUENTE RENOVABLE DE ENERGÍA.

### 2.1 BIOMASA<sup>3</sup>

La biomasa puede definirse como energía solar almacenada en las plantas. El fenómeno de la fotosíntesis, base de la vida de las plantas y por ende de nuestro planeta es el proceso más importante de aprovechamiento de energía renovable. Consiste en la captación de fotones en las hojas de las plantas por parte de la clorofila y la transformación en energía química empleada en la síntesis de hidratos de carbono por aprovechamiento del CO<sub>2</sub> con liberación de oxígeno. El proceso de fotosíntesis puede representarse simplificado por la reacción 1 y esquemáticamente mediante la figura 6:



Fuente: *ENERGÍAS RENOVABLES Conceptos y Aplicaciones*. Santiago J. Sánchez Miño

**Figura 6. Fotosíntesis**

Mediante diversos procesos tecnológicos, se puede extraer el mayor contenido energético de la biomasa. Cuando la materia orgánica libera su energía almacenada a través de un proceso natural o artificial, devuelve al

<sup>3</sup> **ENERGÍAS RENOVABLES** Conceptos y Aplicaciones. Santiago J. Sánchez Miño

ambiente la misma cantidad de CO<sub>2</sub> que consumió durante su crecimiento, por lo que se dice que este ciclo es CO<sub>2</sub> neutro. Aunque al quemar este material orgánico se liberan cerca de 16 MJ por cada kg.

Toda materia orgánica puede aprovecharse para la producción de energía. Sin embargo, existen productos o cultivos que son mejores que otros por sus propiedades y dependiendo de la aplicación a la que estén destinados. El contenido de humedad de la biomasa afecta su capacidad calórica, particularmente cuando se procesa para quema directa o gas. Para reducir la humedad, esta debe primero comprimirse, secarse y triturarse.

El uso de la biomasa como combustible tiene beneficios significativos como: mitigar el efecto de cambio climático; reducir la lluvia ácida, la erosión del suelo, la contaminación del agua; las cantidades de desechos en rellenos sanitarios; mejorar el ambiente y el hábitat natural y en general, mejorar las condiciones del suelo para los cultivos y bosques.

## **2.2 DIGESTIÓN ANAEROBIA PARA LA PRODUCCIÓN DE BIOGÁS<sup>4</sup>.**

La digestión anaerobia es una fermentación microbiana en ausencia de oxígeno se desarrolla en tres etapas y da lugar a una mezcla de gases (principalmente metano y dióxido de carbono), conocida como "biogás" y a una suspensión acuosa o "lodo" que contiene los componentes difíciles de degradar y los minerales inicialmente presentes en la biomasa. Todo esto por la acción de un grupo específico de microorganismos. Este proceso puede realizarse artificialmente en depósitos cerrados herméticamente llamados reactores.

---

<sup>4</sup> Estudio de pre-factibilidad técnica y económica de la utilización de biogás en plantas diesel para generación eléctrica. **UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER**

La microbiología de un reactor, está basada en una concepción de grupos tróficos extensos aparentemente comunes a todos los procesos de digestión que operan en residuos complejos. Estos son: las bacterias hidrolíticas y fermentativas (grupo I), la bacteria acetogénica productora de H<sub>2</sub> obligada (grupo II) y los metanógenos (grupo III), un cuarto grupo, la bacteria homoacetogénica, que es capaz de sintetizar acetatos a partir de H<sub>2</sub> + CO<sub>2</sub> y es de significación incierta. En la figura 7 se muestra un esquema básico de digestión anaerobia.

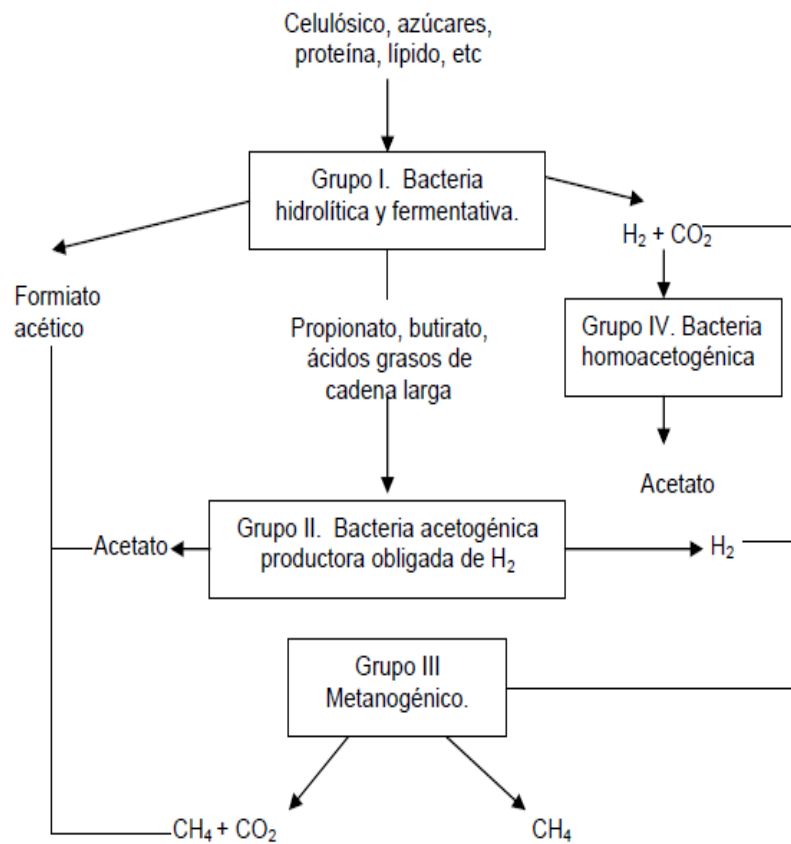


Figura 7. Esquema básico de digestión anaerobia.

### 2.2.1 Factores que influyen en la digestión anaerobia.

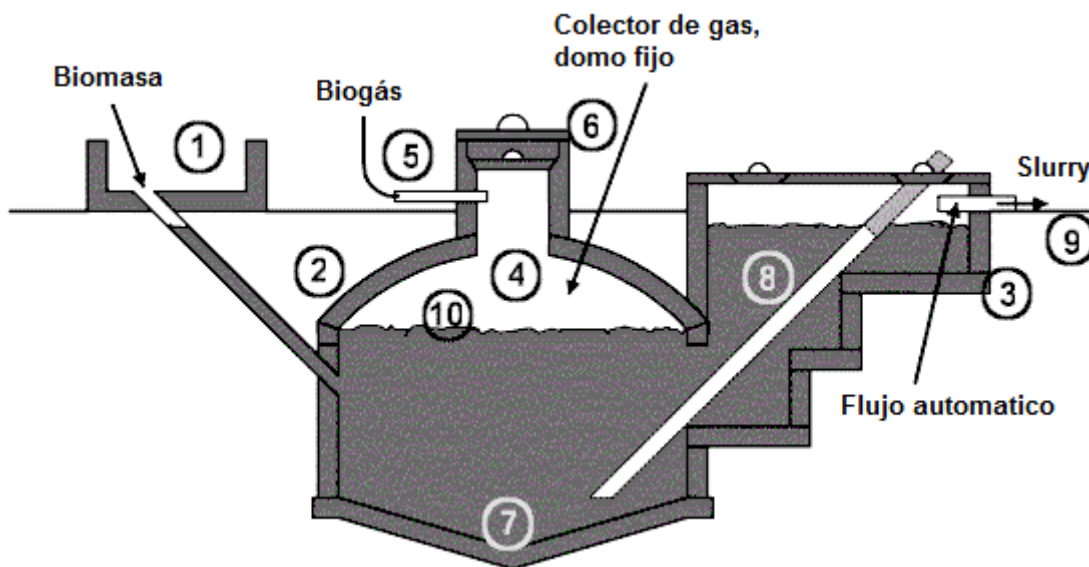
El proceso de conversión anaerobia depende de diversos factores que afectan no sólo la calidad y cantidad del biogás generado, sino también en la

velocidad de generación o en el rendimiento de los sistemas de recuperación del biogás. Para el sistema de tratamiento de aguas residuales que se menciona en este estudio dichos factores son:

- **pH.** Las bacterias formadoras de ácidos (acetogénicas) pueden tolerar bajos niveles de pH, pero las bacterias formadoras de metano son completamente destruidas a un pH inferior de 5,5, la producción de metano es lenta en un pH por debajo de 6,8 o por encima de 8,5, su rango de funcionamiento es de 6,8 a 7,5.
- **Temperatura.** La temperatura influye en la actividad de las bacterias implicadas en el proceso. El contenido de metano depende de la temperatura de fermentación, con bajas temperaturas de fermentación se obtiene un alto porcentaje de metano pero las cantidades totales de gas son menores. Para este caso se utilizan bacterias mesófilas con una temperatura entre 25 a 31 °C con un máximo de 40 °C.
- **Nutrientes:** Además de una fuente de carbono orgánico, los microorganismos requieren de nitrógeno, fósforo y otros factores de crecimiento que tienen efectos complejos. Los niveles de nutrientes deben estar por encima de la concentración óptima para las metanobacterias, ya que ellas se inhiben severamente por falta de nutrientes. En el presente caso la adición de nutrientes al digestor solo es necesaria en el momento de partida de la PTAR para acondicionar el ingreso del sustrato, debido a que en condiciones normales de operación continua estos elementos se encuentran presentes en la biomasa (Aguas Residuales).
- **Relación carbono-nitrógeno (C/N).** La máxima producción de gas se asegura con un rápido crecimiento de la producción bacteriana, para ello,

la presencia de una apropiada relación carbono-nitrógeno (C/N) en el material de fermentación, es un índice significativo de digestibilidad y rendimiento potencial en un determinado material orgánico. Tanto las bacterias formadoras de ácido como las de metano usan alrededor de 30 carbonos para la respiración y mantenimiento del cuerpo por cada átomo de nitrógeno. El valor de C/N está comprendido entre 25 y 30.

Entre otros factores que influyen en la producción se encuentran la presión. Un incremento de la presión puede aumentar la cantidad de dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ) disuelto lo cual afecta el pH debido a la formación de ácido carbónico. Este factor promueve adicionalmente la formación de espuma que a su vez dificulta la salida del biogás, por tanto se hace necesaria la agitación para permitir el paso regular del mismo. A continuación se muestra un esquema típico de un reactor de domo fijo del mismo tipo de los utilizados en la PTAR, en el cual se nombran sus respectivos componentes.



Fuente: *Biogas digest. Vol I-II. Gate-gtz, Alemania. 1999*

**Figura 8. Digestor anaerobio de domo fijo**

1. Tanque de acondicionamiento de biomasa.
2. Digestor.
3. Tanque de compensación y remoción.
4. Gasómetro.
5. Salida de biogás.
6. Escotilla de entrada, con sello hermético.
7. Acumulación de lodos.
8. Tubería de la conexión de salida.
9. Nivel de referencia.
10. La escoria sobrenadante, se rompe con la variación del nivel.

### 2.3 BIOGÁS

El Biogás es una mezcla de gases procedentes de la biodegradación anaerobia cuyos componentes principales son metano ( $\text{CH}_4$ ), dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ) y trazas de ácido sulfhídrico ( $\text{H}_2\text{S}$ ), gas altamente corrosivo. Sus propiedades y composición se presentan en la tabla 1.

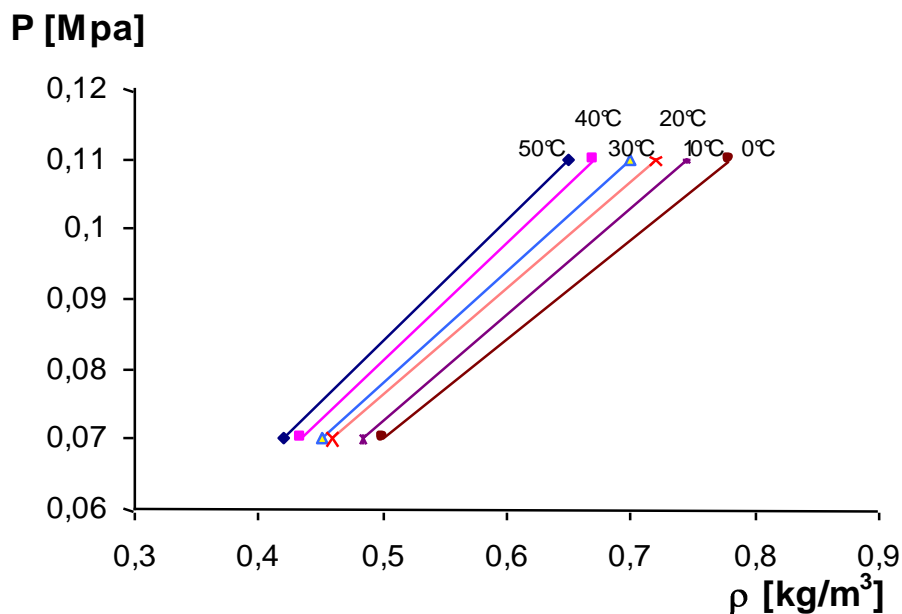
- **Contenido energético del biogás:** La parte útil de la energía del biogás está asociada con el valor calorífico de su contenido de  $\text{CH}_4$  debido a que los demás componentes no participan en la reacción de combustión.

El valor calorífico real del biogás es una función del porcentaje de  $\text{CH}_4$ , la temperatura y la presión absoluta. Para la determinación del valor calorífico se usarán las figuras 9 y 10. Por medio de la figura 9 se determina la densidad real del  $\text{CH}_4$  usando la temperatura ( $32\text{ }^\circ\text{C}$ ) y presión real ( $0,7\text{ Mpa}$ ) del biogás (presión atmosférica + presión medida a la entrada al dispositivo de mezclado), luego, por medio de la figura 10 se determina el valor calorífico del biogás.

**Tabla 1. Composición y propiedades del biogás bajo condiciones estándar (0°C, 101,325 KPa).**

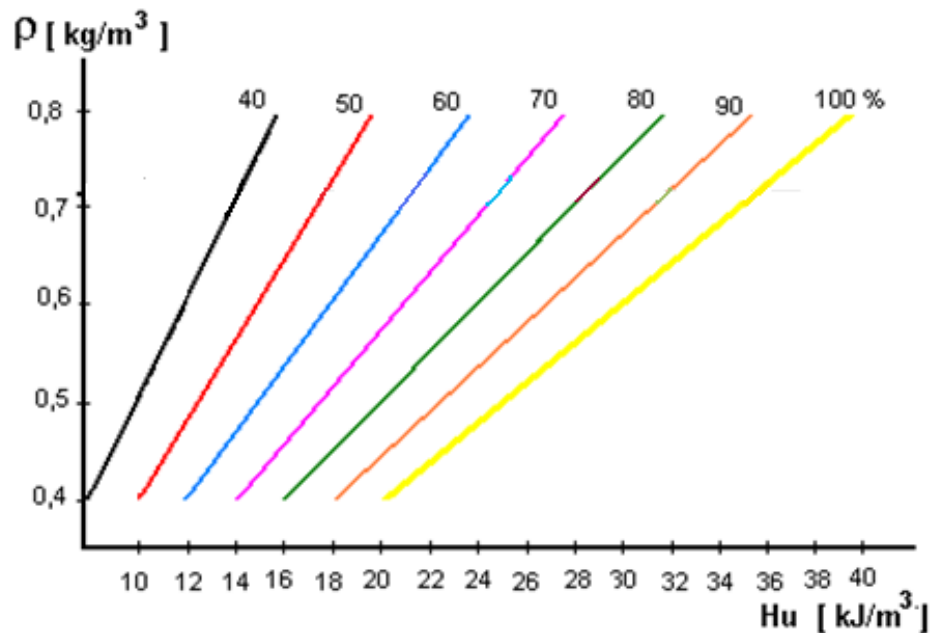
Propiedad \ Componente	CH <sub>4</sub>	CO <sub>2</sub>	H <sub>2</sub> S
Fracción en volumen [%]	55 – 70	27- 44	0 - 3
Valor calorífico neto [Kw-h/m <sup>3</sup> ]	9,9	-	6,3
Inflamabilidad en aire [% en aire]	5 – 15	-	4 - 45
Temperatura de ignición [°C]	650-750	-	-
Presión crítica [KPa]	4700	7500	8900
Temperatura crítica [°C]	-82,5	31	100
Densidad [kg/m <sup>3</sup> ]	0,72	1,98	1,54
Gravedad específica	0,55	2,5	1,2
Capacidad calorífica, Cp [kJ/m <sup>3</sup> °C]	1,6	1,6	1,4
Velocidad de la llama [m/s]	0,43	-	-

Fuente: Biogas digest. Vol I-II. Gate-gtz, Alemania. 1999



Fuente: Biogas digest. Vol I-II. Gate-gtz, Alemania. 1999

**Figura 9. Densidad (ρ) del CH<sub>4</sub> [kg/m<sup>3</sup>] como una función de presión (P) y temperatura.**



Fuente: *Biogas digest. Vol I-II. Gate-gtz, Alemania. 1999*

Figura 10. Valor calorífico del biogás  $H_u$ , como función de la densidad y porcentaje en volumen de  $CH_4$  ( $\rho = 0,72$ , densidad a condiciones normales).

## 2.4 CONSECUENCIAS DEL ÁCIDO SULFÚDRICO SOBRE LOS EQUIPOS

La dificultad de utilizar el biogás como combustible, es su contenido de ácido sulfúdrico ( $H_2S$ ), gas que por su alto poder corrosivo deteriora las instalaciones asociadas. Sus reacciones químicas y sus productos de combustión, el anhídrido sulfuroso y el óxido de azufre, producen graves daños por corrosión y desgaste tanto en el compresor como en la línea de transporte. Algunos efectos del ácido sulfúdrico sobre la producción de biogás, y su utilización como combustible se citan a continuación:

- **Impedimento de la descomposición.** El H<sub>2</sub>S disuelto puede en altas concentraciones tener un efecto tóxico sobre las bacterias existentes en el biorreactor. Como consecuencia se inhibe la formación del biogás y cambia la composición del mismo.
- **Corrosión por H<sub>2</sub>S y SO<sub>2</sub>.** El H<sub>2</sub>S tiene una acción corrosiva sobre las partes metálicas. A su vez el SO<sub>2</sub> que es un producto de combustión de compuestos azufrados en presencia con el vapor de agua, causa daños graves por corrosión.

Aunque a pesar de lo antes descrito, el Biogás puede usarse en todas las aplicaciones diseñadas para gas natural, debido a que su principal componente es el metano (ver tabla 3) y asumiendo un grado de purificación suficiente de ácido sulfhídrico.

**Tabla 2. Comparación de componentes del gas natural y el biogás.**

COMPONENTES	UNIDADES	GAS NATURAL	BIOGÁS
Metano (CH <sub>4</sub> )	% Vol	91	55 - 75
Etano (C <sub>2</sub> H <sub>6</sub> )	% Vol	5.1	0
Butano (C <sub>4</sub> H <sub>10</sub> )	% Vol	1.8	0
Pentano (C <sub>5</sub> H <sub>12</sub> )	% Vol	0.9	0
Dióxido de carbono (CO <sub>2</sub> )	% Vol	0.3	0
Nitrógeno (N <sub>2</sub> )	% Vol	0.61	30 -45
Compuestos Orgánicos Volátiles (COV)	% Vol	0.32	0 -2
Hidrógeno (H <sub>2</sub> )	% Vol	0	0
Ácido sulfhídrico (H <sub>2</sub> S)	ppm	~1	>500
Amoniaco (NH <sub>3</sub> )	ppm	0	~100
Monóxido de carbono (CO)	ppm	0	0
Punto de rocío	°C	<-5	Saturado
Poder calorífico	BTU/SCF	1031	~600

*Fuente: Jensen and Jensen (2000) referenced in Monnet (2003).*

A continuación se relacionan algunas recomendaciones, en cuanto a la cantidad de H<sub>2</sub>S permitidos para la utilización del biogás.

**Tabla 3. Tecnologías de utilización del biogás y requisitos para su uso.**

Tecnología	Requisitos recomendados para el uso del biogás
Calentamiento (Calderas) <sup>a</sup>	H <sub>2</sub> S < 1000 ppm, 0,8-2,5 KPa de presión, remoción de condensado (estufas de cocinas H <sub>2</sub> S < 10 ppm)
Motores de combustión interna <sup>a</sup>	H <sub>2</sub> S < 100 ppm, 0,8-2,5 KPa de presión, (Los motores ciclo Otto son más susceptible a H <sub>2</sub> S que los motores diesel)
Microturbinas <sup>b</sup>	Toleran hasta 70,000 ppm H <sub>2</sub> S > 350 BTU/scf, 520 KPa de presión, remoción de condensados y siloxanos.
Modificaciones de aparatos de gas natural <sup>a,b</sup>	H <sub>2</sub> S < 4 ppm, CH <sub>4</sub> > 95%, CO <sub>2</sub> < 2% volumen, H <sub>2</sub> O < (1*10 <sup>-4</sup> ) kg/MMscf, remover siloxanos y partículas, presiones > 3000 KPa

a Wellinger, A y Linberg, A. Biogas upgrading utilization. International Energy Association, Paris, France; 2000, p.20.

b Capstone turbine corp. (2002). [www.microturbine.com/documents/specsheetlandfill.pdf](http://www.microturbine.com/documents/specsheetlandfill.pdf)

c Kohl, A y Neilsen, R. Gas purification. Gulf Publishing Company, Houston, Texas, 1997, p.1395.

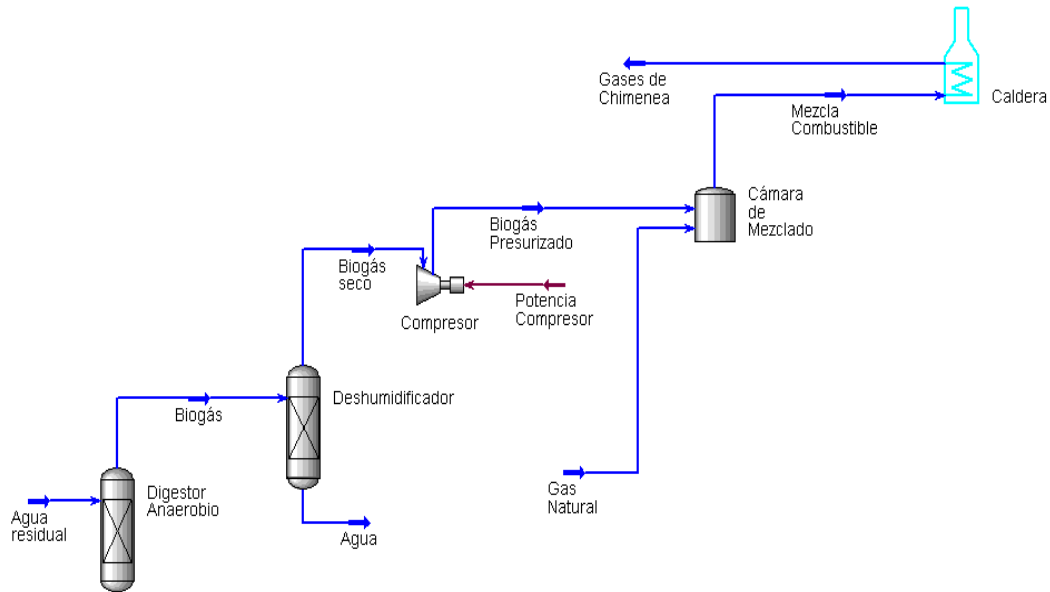
Teniendo en cuenta que la concentración promedio de H<sub>2</sub>S presente en el biogás generado en este caso es de 1.8 ppm y que el límite máximo permitido para la aplicaciones requeridas (Calentamiento en calderas y modificaciones de aparatos de gas natural -soplador-) es de 1000 ppm y 4 ppm respectivamente, se concluye que no es necesario la implementación de un sistema de purificación de H<sub>2</sub>S.

En la planta de tratamiento de aguas residuales actualmente genera entre 200 y 500 m<sup>3</sup>/h de biogás con un poder calorífico 28 kJ/m<sup>3</sup>, el cual se captura utilizando un sistema de captación y control de extracción, para su posterior combustión al aire libre (venteo a la atmósfera); lo cual conlleva a una pérdida de energía significativa.

A partir de la necesidad de aprovechar esta energía se propuso el diseño de un sistema para el aprovechamiento de biogás en la producción de vapor, para el cual se requiere:

- Diseñar la línea de transporte de biogás, la cual consta de una longitud aproximada de 350 m.
- Seleccionar el compresor para impulsar el biogás desde la PTAR hasta la zona de calderas donde sería su aprovechamiento.
- Diseñar el deshidratador, con el fin de prevenir tanto la formación de hidratos, los cuales producen corrosión; como, el golpe de ariete en la tubería.
- Diseñar el tren de combustión combinado para la adaptación de la caldera a un alimento de mezcla de combustibles; en este punto cabe acotar que el sistema de combustión (cámara de combustión, quemador, etc.) se conservará, en este punto se pretende diseñar una cámara de mezclado, donde se lleve a cabo la mezcla biogás - gas natural, la cual permita cumplir con los requerimientos operacionales que actualmente provee el gas natural.

Para este fin se recurrirá a la simulación del tren de combustión en el software HYSYS, a continuación, se muestra un diagrama de cómo sería el proceso de aprovechamiento de biogás.



**Figura 11. Diagrama del proceso de aprovechamiento de biogás**

## **2.5 ANTECEDENTES SOBRE LA PRODUCCIÓN DE ENERGÍA A PARTIR DE BIOGÁS**

La mayoría de aplicaciones en las que se emplea el biogás para generar energía están relacionadas con rellenos sanitarios, este es el caso del relleno sanitario del Salinas Victoria en la zona conurbada de Monterrey, <sup>5</sup>México, donde existe una planta de 7.4 MW instalada, para una celda que contiene 7 millones de toneladas de residuos sólidos municipales. La energía generada es enviada por la red eléctrica de CFE (Comisión Federal de Electricidad) hasta la zona metropolitana de Monterrey para ser usada en alumbrado público, bombeo de agua y el transporte colectivo de la ciudad.

<sup>5</sup> [portal.energia.gob.mx/webSener/res/168/A1\\_Basura.pdf](http://portal.energia.gob.mx/webSener/res/168/A1_Basura.pdf)

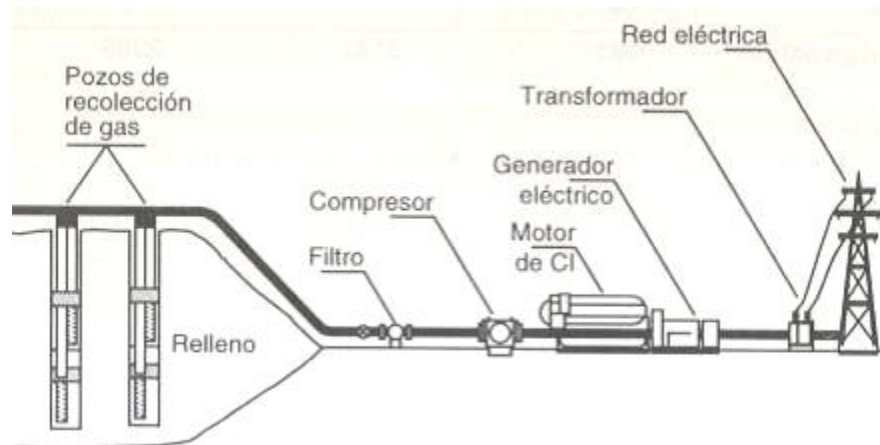
El biogás generado por el sitio es recuperado por los 160 pozos construidos en el relleno sanitario, los cuales están interconectados con 15.8 km de tubería de polietileno de media densidad para conducir el biogás hasta la central por medio de un sistema de compresión. Pasando previamente por filtros y condensadores de humedad que impiden el paso de agua y partículas a los condensadores, al quemador de excedentes y a los motogeneradores, donde el biogás con un contenido del 55% de metano, es convertido por los motogeneradores en electricidad. Esta a su vez es acondicionada por los transformadores elevando su voltaje a 34.5 KV para ser suministrados a alimentadores de distribución de CFE, que a su vez entrega la energía a los usuarios de la misma para alumbrado público, bombeo y tratamiento de agua, transporte y edificios públicos.

Entre los beneficios ambientales derivados del proyecto de Salinas Victoria se puede citar la contribución a la disminución del calentamiento global de nuestro planeta por evitar la emisión de 68 m<sup>3</sup>/min de biogás, que equivalen a dejar de consumir el equivalente a 1 millón de toneladas métricas de carbón, o a retirar 90,000 automóviles de circulación, aunado a que se refuerza una correcta disposición de la basura, evitando riesgos de migración del biogás, incendios, explosiones y malos olores.

Los beneficios energéticos radican en la generación de 52 millones de kWh anuales de energía eléctrica que equivalen a la requerida por 30.000 casas de interés social, y que es capaz de abastecer al 80% del alumbrado público de Monterrey beneficiando a una población de 50.000 mil familias promedio.

Se pueden citar otros casos como el del ayuntamiento de Bilbao (España) donde a partir del biogás producido en el vertedero de Bioartigas se genera 900 kW de forma continua. Igualmente en Río de Janeiro (Brasil) y países

como Holanda, se cubren las necesidades energéticas de más de mil familias a partir de sus rellenos sanitarios. En la figura 12 se puede apreciar un esquema típico utilizado en la generación de electricidad a partir del biogás generado en rellenos sanitarios.



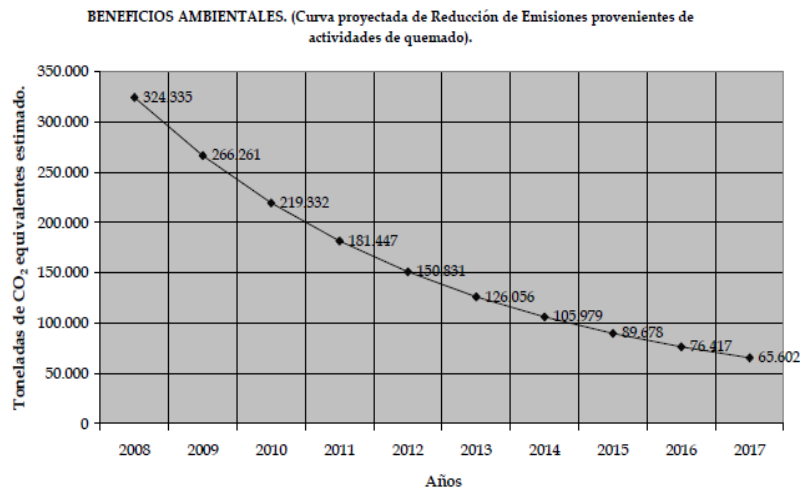
Fuente: [www.metrik.cl](http://www.metrik.cl)

Figura 12. Esquema de generación de electricidad de un relleno sanitario

<sup>6</sup>En Colombia se realizó un estudio en el cual se plantea conocer la viabilidad del aprovechamiento del biogás producido en el sitio de disposición final de Navarro -bajo los mecanismos establecidos en el Protocolo de Kioto- con el objeto de visionar ingresos económicos para la empresa prestadora de servicio público EMSIRVA E.S.P- así como minimizar el impacto ambiental que aporta a la contaminación local en la ciudad de Cali y al calentamiento global.

En la figura 13 se puede ver la tendencia estimada de la reducción de emisiones provenientes del quemado de CO<sub>2</sub> al ambiente si se implementará el proyecto en cuestión.

<sup>6</sup> Estudio de viabilidad para el aprovechamiento del biogás producido en el sitio de disposición final de Navarro, bajo los mecanismos establecidos en el protocolo de Kioto 2008, **WILFRIDO VALLEJO PATIÑO**



*Autor: Wilfrido Vallejo Patiño.*

**Figura 13. Estimativo en la reducción de emisiones provenientes del quemado de CO<sub>2</sub> al ambiente**

### 3 DISEÑO DE LA LINEA DE TRANSPORTE

#### 3.1 PROPIEDADES FÍSICAS DEL BIOGÁS

El comportamiento del biogás debe ser bien comprendido con el fin de lograr diseños confiables para su aprovechamiento y el funcionamiento eficiente de equipos e instalaciones asociadas.

Para el biogás es difícil disponer de primera mano de sus propiedades físicas debido a que por tratarse de una gran variedad de mezcla entre sus diferentes compuestos, los datos para estos son escasos. Motivo por el cual, normalmente se deben estimar a partir de su composición química, con base en las propiedades físicas de los componentes y en las leyes de las mezclas.

A continuación se muestra la caracterización del biogás generado en la PTAR de la Cervecería Bavaria Bucaramanga, en la cual se puede observar su alto contenido de metano.

**Tabla 5. Caracterización del biogás generado en la PTAR de la Cervecería Bavaria Bucaramanga<sup>7</sup>**

ANALISIS DE BIOGAS NORMA ASTM 1945 (03)

SUBMISSION	100071167	
SAMPLE ID	306613	
MATERIAL NAME		
MATERIAL TYPE	BIOGAS	
FECHA DE MUESTREO	09/01/2008	
IDENTIFIC. MUESTRA	Biogas Reactor 1	
SITIO DE MUESTREO	Bavaria cerveceria bucamanga	
PUNTO DE MUESTREO	Salida del quemador	
<b>COMPONENTE</b>	<b>UNIDAD</b>	
Azufre	ppm	1.874
Dioxido de carbono	%molar	18.349
Oxigeno	%molar	0.348
Nitrogeno	%molar	3.604
Metano	%molar	77.698
Monoxido de Carbono	%molar	ND

La generación de biogás en los reactores es muy fluctuante, variando desde 200 hasta 500 m<sup>3</sup>/h, esto se debe a que la carga orgánica de la biomasa varía constantemente, al igual que la alimentación de la misma desde los tanques acondicionadores hacia los reactores.

### 3.1.1 Factor de compresibilidad (z)

#### Temperatura y presión pseudo-crítica de la mezcla<sup>8</sup>

Para determinar el factor de compresibilidad del biogás se empleará el teorema de los estados correspondientes y se tomará como base el factor de compresibilidad del gas natural, el cual enmarca que las características físicas de unas sustancias son controladas por la cercanía relativa de cualquier punto de estado al punto crítico. Si la presión relativa a la presión crítica y la temperatura relativa a la temperatura crítica son las mismas para

<sup>7</sup> INSTITUTO COLOMBIANO DEL PETROLEO. Servicios técnicos y laboratorios

<sup>8</sup> GAS PROCESSORS SUPPLIERS ASSOCIATION (GPSA) Twelfth Edition, Engineering Data Book

dos sustancias diferentes, luego las sustancias están en estados correspondientes y cualquier otra propiedad, como la densidad relativa a la densidad crítica, será la misma para ambas sustancias.

La desviación del comportamiento de gas real respecto al gas ideal es igual para gases diferentes, si corresponde a condiciones similares de temperatura y presión reducida; razón por la cual es necesario determinar la temperatura y presión reducida de la mezcla de gases, que se determina usando valores pseudo-críticos, en lugar de valores críticos verdaderos, para este propósito nos valdremos de la ecuaciones 2 y 3. Las temperaturas y presiones críticas de cada uno de los elementos que componen al biogás se encuentran en las tablas 6 y 7.

$$T_{G_m} = \sum y_i T_{G_i} \quad (2)$$

$T_{G_m}$  = Temperatura pseudo-crítica de la mezcla

$y_i$  = Fracción molar del componente  $i$

$T_{G_i}$  = Temperatura crítica del componente  $i$

**Tabla 6. Temperatura crítica de los componentes del biogás**

COMPONENTE	TEMPERATURA CRITICA (°C)
Sulfuro de hidrogeno	100,45
Dióxido de Carbono	30,98
Oxigeno	-118,57
Nitrógeno	-146,96
Metano	-82,58

Reemplazando los términos de la tabla 6 en (2) tenemos que la temperatura crítica de la mezcla es:

$$T_{G_m} = -64,187 \text{ °C}$$

$$P_{C_m} = \sum y_i P_{C_i} \quad (3)$$

$P_{C_m}$  = Temperatura crítica de la mezcla

$y_i$  = Fracción molar del componente  $i$

$P_{C_i}$  = Temperatura crítica del componente  $i$

**Tabla 7. Presión crítica de los componentes del biogás.**

COMPONENTE	PRESION CRITICA (psia)
Sulfuro de hidrógeno	1306,5
Dióxido de Carbono	1070
Oxígeno	731,4
Nitrógeno	492,5
Metano	667

Remplazando términos de la tabla 7 en (3), encontramos que la presión pseudo-crítica de la mezcla es:

$$P_{C_m} = 734.875 \text{ psia}$$

$$\text{Temperatura pseudo - reducida} = T_R = \frac{T}{|T_{C_m}|} = \frac{32}{64.187} = 0.4985$$

$$\text{Presión pseudo - reducida} = P_R = \frac{P}{|P_{C_m}|} = \frac{15}{734.875} = 0.0204$$

Como se menciona en el sistema de tratamiento secundario, el biogás generado es llevado a unos gasómetros, los cuales después de medir su presión con un barómetro, arrojo que esta se encuentra entre 18.5 - 18.9 mbar, con un promedio de 18.7 mbar a una temperatura (T) de 32 °C.

Con los datos de presión y temperatura pseudo-reducida en la figura 14, donde se lee el factor de compresibilidad (Z), que para este caso será 0.995; razón por la cual se considera el **biogás como gas ideal**.

### 3.1.2 Gravedad específica del biogás (G)

La gravedad específica (5) expresa la relación existente entre la densidad del biogás y la densidad del aire. Por lo cual se hace necesario encontrar la densidad del biogás; para este fin nos valdremos de la ecuación 4.

$$\text{Densidad del biogás} = \sum y_i \rho_i = 0.96447 \frac{\text{Kg}}{\text{m}^3} \quad (4)$$

$$\text{Densidad del aire sobre el nivel del mar} = 1.225 \frac{\text{Kg}}{\text{m}^3}$$

$$\text{Densidad del dióxido de carbono} = 0.18349 \cdot 1.98 = 0.3633 \frac{\text{Kg}}{\text{m}^3}$$

$$\text{Densidad del Oxígeno} = 0.00348 \cdot 1.429 = 4.97 \cdot 10^{-6} \frac{\text{Kg}}{\text{m}^3}$$

$$\text{Densidad del Nitrogeno} = 0.03604 \cdot 1.2506 = 0.04507 \frac{\text{Kg}}{\text{m}^3}$$

$$\text{Densidad del Metano} = 0.77698 \cdot 0.72 = 0.5594 \frac{\text{Kg}}{\text{m}^3}$$

$$\text{Gravedad específica} = \frac{\text{Densidad del biogás}}{\text{Densidad del aire}} = \frac{0.96777}{1.225} = 0.79 \quad (5)$$

### 3.1.3 Viscosidad ( $\mu$ )<sup>9</sup>

La viscosidad para la mezcla de gas se puede estimar mediante el uso de la siguiente ecuación:

---

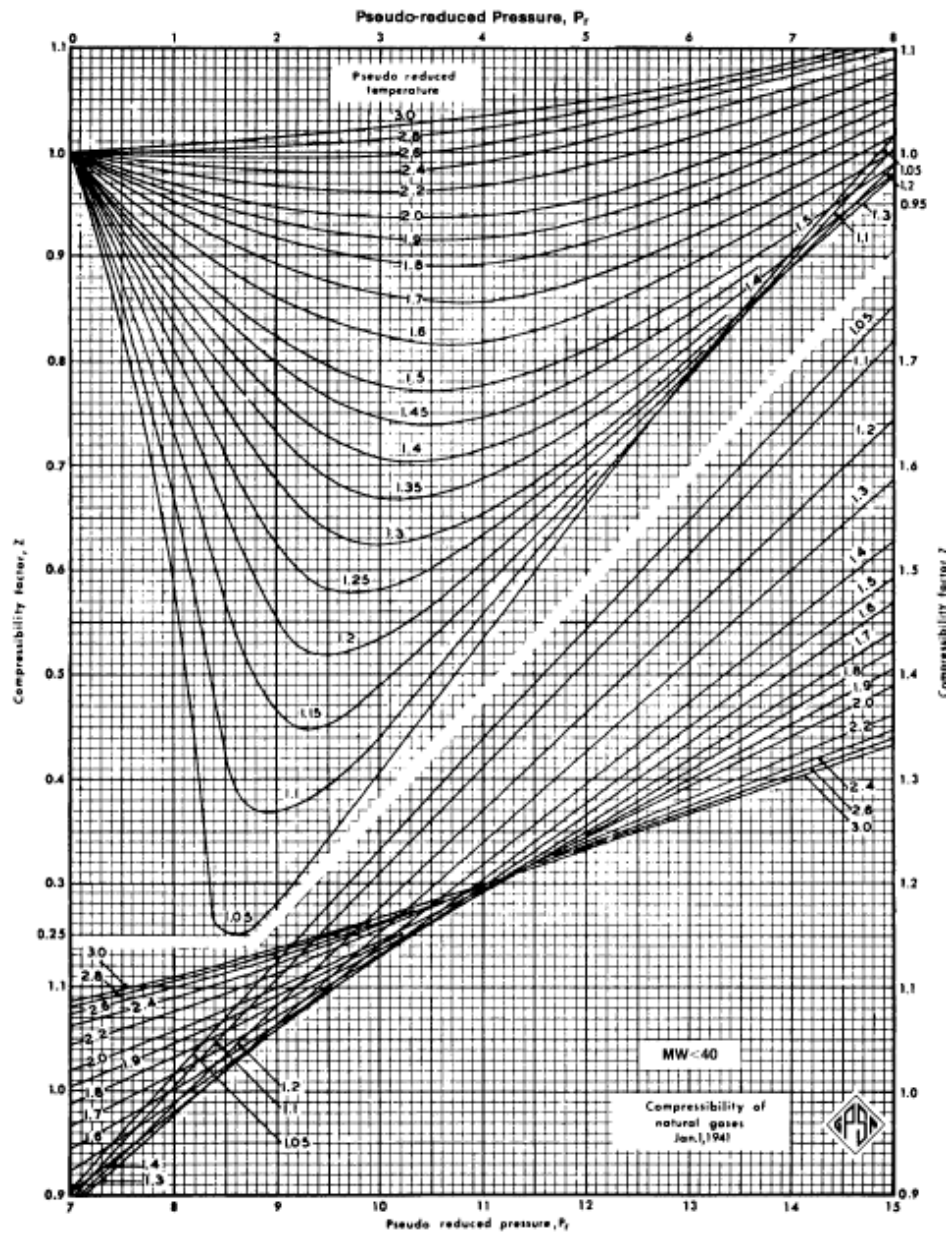
<sup>9</sup> **JOHN M. CAMPBELL.** Gas conditioning and processing, seventh edition, volume I, Campbell Petroleum Series 1994

$$\mu_m = \frac{\sum \mu_i y_i \sqrt{M_i}}{\sum y_i \sqrt{M_i}} \quad (6)$$

$\mu_m$  = Viscosidad de la mezcla.

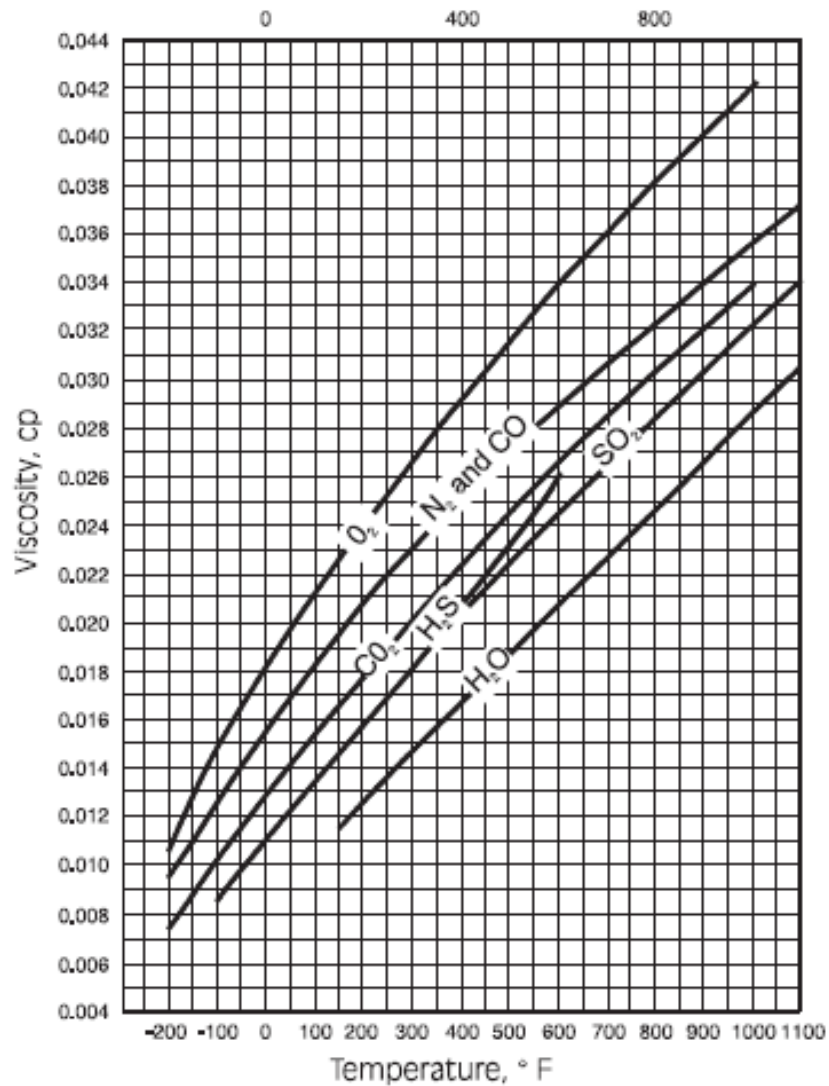
$y_i$  = Fracción molar del elemento  $i$ .

$M_i$  = Masa molar del elemento  $i$ .



Fuente: GAS PROCESSORS SUPPLIERS ASSOCIATION (GPSA) Twelfth Edition,  
Engineering Data Book

Figura 14. Factor de compresibilidad para gas natural



Fuente: GAS PROCESSORS SUPPLIERS ASSOCIATION (GPSA) Twelfth Edition, Engineering Data Book

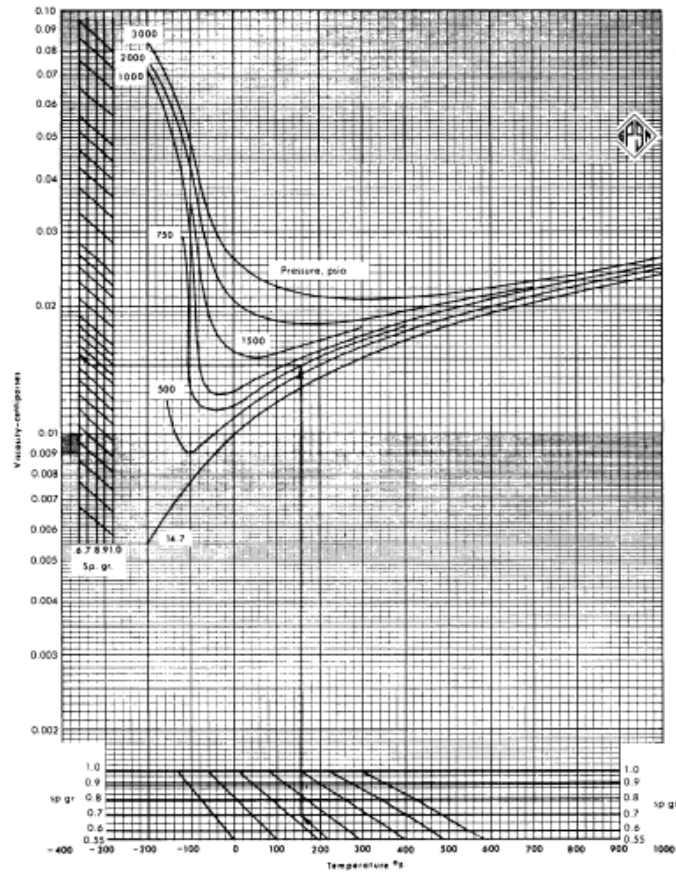
Figura 15. Viscosidad de distintos gases en función de la temperatura a 1 atm.

Teniendo en cuenta la temperatura del biogás a la salida de los gasómetros y la densidad específica calculada anteriormente, mediante las figuras 14 y 15, se establece la viscosidad de cada uno de los elementos involucrados en la mezcla, los cuales se recopilieron en la tabla 8.

**Tabla 8. Viscosidad y peso molecular de los componentes del biogás**

COMPONENTE	PESO MOLECULAR	VISCOSIDAD (Cp)
Sulfuro de hidrogeno	1306,5	0,013
Dióxido de Carbono	64,065	0,153
Oxigeno	32	0,021
Nitrógeno	28,013	0,0182
Metano	16,042	0,0112

Remplazando los términos de la tabla 7 en (6), tenemos que  $\mu_m = 0,055$  Cp.



Fuente: GAS PROCESSORS SUPPLIERS ASSOCIATION (GPSA) Twelfth Edition, Engineering Data Book

**Figura 16. Viscosidad de gases hidrocarbonados en función de la presión y temperatura**

## 3.2 DIMENSIONAMIENTO DE LA LÍNEA DE TRANSPORTE

### Selección del material

Es necesario que el material que se sugiera tenga las propiedades adecuadas, siendo la más importante la resistencia a la corrosión; esto debido al tipo de fluido a manejar.

Para poder efectuar una evaluación correcta de los materiales, es necesario disponer de la mayor información posible en lo que se refiere a las condiciones de proceso, dicha información, la podemos desglosar de acuerdo a su procedencia como sigue:

#### a. Características del fluido.

- **Composición:** Se requiere de un análisis químico para poder conocer la composición del fluido, y así determinar las características corrosivas de este.
- **Impurezas:** Dicho análisis, nos servirá para conocer tanto cualitativa como cuantitativamente el grado de impurezas del fluido, y de esta manera determinar si son corrosivas.
- **Temperatura:** Dicha condición es un factor que afecta directamente la corrosión, ya que con una variación de temperatura puede alterarse la velocidad de corrosión en ciertos casos.
- **pH:** Una sustancia es más corrosiva en la medida en que disminuye su pH (Aumento de Acidez).
- **Velocidad del fluido:** La erosión aumenta con un incremento de velocidad, debido a que el fluido tiende a ser más turbulento provocando con esto un desprendimiento de las partículas corrosivas y exponiendo nuevamente el material al contacto del fluido.

#### **b. Experiencia:**

- Si el material ha sido utilizado en servicios idénticos se deben revisar los reportes de inspección que se hayan efectuado al equipo para conocer los resultados que se tienen, y con esto saber si aún el equipo se encuentra en servicio.
- Si el material ha sido utilizado en situaciones similares ¿Qué diferencia existe entre la situación actual y la posibilidad de hacer una elección idéntica?
- Las experiencias vividas en planta, en plantas piloto, datos de prueba de corrosión en plantas y laboratorios así como literatura disponible, son las fuentes más confiables para formarse un criterio en la selección de los materiales.

Los materiales autorizados para la construcción de redes internas de gas son: Acero al carbono, cobre flexible o rígido, aleaciones de aluminio, acero inoxidable corrugado (CSST) y polietileno.

#### **3.2.1.1 Polietileno**

El polietileno es una resina termoplástica, semicristalina, perteneciente a la familia de las poliolefinas, que provienen de hidrocarburos simples. En su estructura contienen átomos de carbono e hidrógeno con dobles enlaces en los carbonos. Es un material altamente duradero que ofrece características excepcionales de ingeniería en aplicaciones en las que la facilidad de limpieza, la estabilidad, la resistencia al impacto, al desgaste, a los rayos UV, y al desgaste causado por el clima. Comercialmente existen diversos tipos de polietileno:

- Polietileno de Baja Densidad (LDPE)
- Polietileno de Media Densidad (MDPE)
- Polietileno de Alta Densidad (HDPE)
- Polietileno de Baja Densidad Lineal (LLDPE)
- Polietileno de Peso Molecular Ultra Alto (UHMWPE)

De los cuales el Polietileno de Media Densidad (MDPE), es el más comúnmente usado en las líneas de tuberías para transporte de biogás y gas natural, debido a que presenta las siguientes propiedades:

- Resistencia a la corrosión
- Resistencia a la electrólisis
- Paredes lisas
- Pérdidas mínimas por fricción
- Resistencia a la rotura
- Peso liviano
- Resistencia a los productos químicos
- Economía.
- Fácil transporte.
- Ausencia de toxicidad y olor.
- Fácil manejo e instalación.

El dimensionamiento de la línea de tubería es un proceso de prueba y error, para el cual, serán necesarios los siguientes parámetros:

✓ **Longitud real de un tramo de tubería.**

La longitud real de un tramo de tubería es la cantidad en metros de tubería instalada en dicho tramo. Cuando se tienen accesorios en el tramo, la

longitud considerada para el dimensionamiento tendrá en cuenta el efecto de los accesorios.

✓ **Longitud equivalente por accesorios.**

Al circular el biogás por la tubería se produce una caída de presión a través de ella y de los accesorios: válvulas, tes, codos, etc. Con el fin de facilitar los cálculos, se acostumbra reemplazar los accesorios por tramos de tubería de igual diámetro y que ocasionen una caída de presión igual a los accesorios. El parámetro utilizado para hacer esta sustitución es la relación longitud/diámetro, característica de cada accesorio. Conocido el diámetro de la tubería, la longitud equivalente del accesorio se calcula multiplicando dicho diámetro por la relación longitud/diámetro del mismo.

$$L_{eq} = \text{Diámetro de Tubería} \times \text{Relación Long/Diámetro} \quad (7)$$

Donde,

$L_{eq}$  = Longitud Equivalente por accesorio.

A continuación se presenta un listado de accesorios con su respectiva relación longitud/diámetro para el cálculo de longitudes equivalentes.

**Tabla 10. Relación longitud/diámetro**

<b>ACCESORIO</b>	<b>RELACIÓN LONGITUD/DIÁMETRO</b>
Codo a 45°	14
Codo a 90°	30
Te (con flujo a 90°)	60

✓ **Diámetro**

Para el diseño de la línea de transporte, una vez seleccionado el material de la tubería se tendrá en cuenta que los diámetros que se utilizan en las fórmulas sean diámetros internos. A continuación se presentan los distintos diámetros para tuberías de polietileno.

**Tabla 9. Diámetro para tubería de polietileno según norma NTC-1746**

<b>TUBERÍA DE POLIETILENO</b>		
<b>Diámetro Nominal (mm)</b>	<b>Diámetro Exterior (mm)</b>	<b>Diámetro Interior (mm)</b>
20	20	15.4
25	25	20.4
32	32	26.2
63	63	51.4
90	90	73.60
110	110	90.00
160	160	130.80
200	200	163.60

**Nota:** Se desprecia la caída de presión en reducciones, uniones rectas y válvulas esféricas de paso directo (sin reducción de sección).

✓ El **número de Reynolds**, que está dado por siguiente fórmula:

$$Re = \frac{\rho VD}{\mu} = \frac{VD}{\nu} \quad (8)$$

$$\nu = \frac{\mu}{\rho} \quad (9)$$

Donde

$\rho$  = Densidad del fluido.

$V$  = Velocidad característica del fluido.

$D$  = Diámetro de la tubería a través de la cual circula el fluido.

$\mu$  = Viscosidad dinámica del fluido.

$\nu$  = Viscosidad cinemática del fluido.

✓ **Ecuación de Bernoulli**, a saber:

$$\frac{V_1^2}{2g} + \frac{P_1}{\rho g} + Z_1 = \frac{V_2^2}{2g} + \frac{P_2}{\rho g} + Z_2 + h_L$$

$$P_1 = (Z_2 + h_L) * \rho g + P_2 \quad (10)$$

✓ La ecuación general de la pérdida de presión, conocida como la ecuación de Darcy, la cual se expresa en unidades de longitud de fluido, de la siguiente forma:

$$h_L = \frac{fLV^2}{2gD} \quad (11)$$

<sup>10</sup>Para flujo en régimen turbulento y tuberías lisas (la tubería de polietileno se considera lisa); mediante estudios teóricos y ajustando los coeficientes experimentales Kármán y Prandtl dedujeron:

---

<sup>10</sup>**CLAUDIO MATAIX**, Mecánica de fluidos y máquinas hidráulicas. Segunda edición. Ediciones del Castillo, 1993

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = 2 \cdot \log_{10}(Re\sqrt{f}) - 0.8 \quad (12)$$

La relación entre los parámetros que intervienen en el dimensionamiento de una tubería que transporta un fluido compresible, bajo condiciones isotérmicas y para tuberías horizontales, se encuentra expresada en la fórmula general, derivada de la aplicación de la ley de conservación de la energía:

Para el caso de presiones mayores a 70 mbar, sin superar la Máxima Presión de Operación Permisible según la NTC-3838, se aplica la fórmula de Müller:

$$Q = \frac{0.13}{G^{0.425}} * \left[ \frac{P_1^2 - P_2^2}{L} \right]^{0.575} * D^{2.725} \quad (13)$$

Donde:

Q = Caudal de gas [m<sup>3</sup>/h]. A condiciones estándar de presión y temperatura.

G = Gravedad específica del gas.

h = Caída de presión [mbar]

L = Longitud total de la red [m] (Longitud real + Longitud equivalente por accesorios)

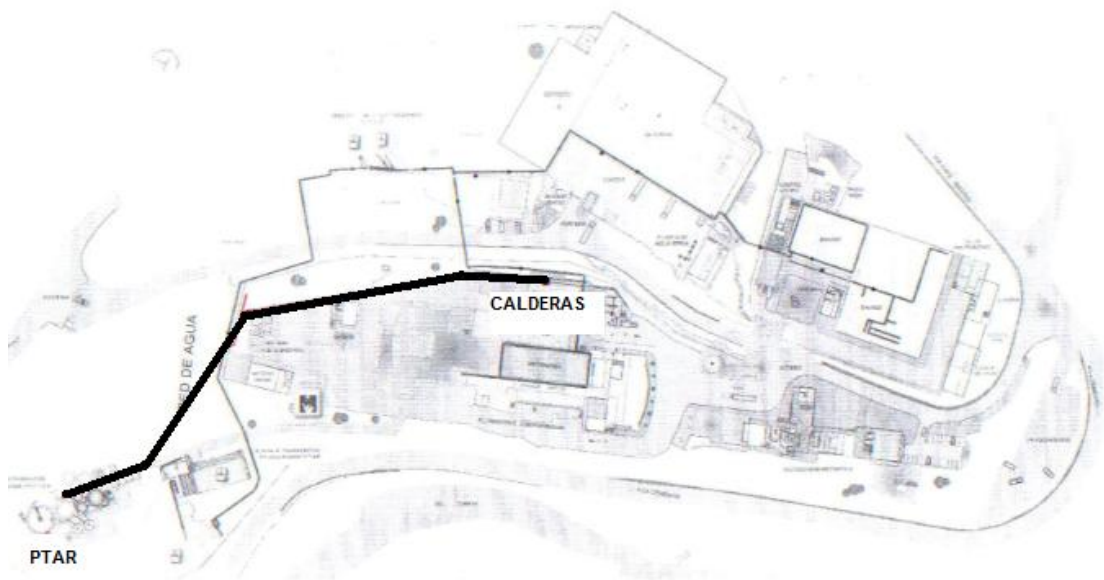
D = Diámetro de la tubería [mm]

### **3.3 Descripción del procedimiento de cálculo para una instalación interna**

En el cálculo de una instalación interna es conveniente seguir un proceso predefinido que facilite su realización.

A continuación sugerimos siguiente el procedimiento:

1. Elaborar el esquema de la línea de transporte tres dimensiones (figura 17).



**Figura 17. Plano instalación de la línea de transporte de biogás**

2. Tener en cuenta las longitudes reales de los tramos que componen la instalación.
3. Asumir los diámetros a utilizar (Tabla 9).
4. Determinar las longitudes equivalentes mediante la ecuación (7) y la Tabla 10.
5. Por medio de la ecuaciones 11 y 12 determinar las pérdidas en la tubería.
6. Calcular el caudal con la ecuación 13 y comprobar con el caudal de diseño ( $400 \text{ m}^3/\text{h}$ ).

### **3.3.1 Cálculo de la tubería**

Por su naturaleza el biogás se comporta como un fluido en régimen turbulento; por tanto, el número de Reynolds mínimo para que tenga dicho comportamiento deberá ser mayor a 4000. Como parámetro de diseño se

escogió la velocidad recomendada para el transporte de gases la cual es 5 m/s<sup>11</sup>.

Teniendo en cuenta que la línea de transporte ira desde los gasómetros (PTAR) hasta la válvula reductora de presión (calderas), llamaremos P<sub>1</sub> a la presión requerida por el soplador y P<sub>reduct</sub> a la máxima presión de salida de la válvula reductora la cual es 10 psia (1,03195 bar)

**Tabla 12. Parámetros de diseño utilizados en el dimensionamiento de la línea de transporte**

G	0,79
γ (N/m <sup>3</sup> )	9,4614507
ρ (m <sup>3</sup> /h)	0,96447
Z <sub>2</sub> (m)	15
P <sub>reduct</sub> (bar)	1,03195
μ (Pa s)	5,49864E-05

Los resultados obtenidos, se recopilaron en la tabla 13.

### Cálculo del diámetro óptimo<sup>12</sup>

$$D_{i_{opt}} = \left[ \frac{6.04 * 10^{-4} (0.0254)^n q_f^{2.84} \rho^{0.84} \mu^{0.16} K(1+J)H_y}{n(1+F)XEK_f} \right]^{\frac{1}{4.84+n}}$$

### Consideraciones

Los siguientes valores son los usados comúnmente en el diseño de plantas industriales.

<sup>11</sup> SEMINARIO SISTEMAS DE AIRE COMPRIMIDO

<sup>12</sup> **PETERS M., TIMMERHAUS K., WEST R.** Plant design and economics for chemical engineers. McGraw Hill, 5<sup>th</sup> Edition, New York 2003

$H_y$  = Horas de operación por año = 8760 h/año

$n$  = Cte. asociada al tipo de tubería = 1.5

$F$  = Relación del costo total por accesorios e instalación, al costo de compra de la tubería nueva = 1.4

$K_f$  = Cargos fijos anuales incluyendo mantenimiento, expresados una fracción del costo inicial = 0.2

Para nuestro caso los parámetros de diseño serán:

$q_f$  = Flujo volumétrico [ $m^3/h$ ] = 400  $m^3/h$

$\rho$  = Densidad [ $Kg/m^3$ ] = 0.96447  $Kg/m^3$

$\mu$  = Viscosidad [ $Pa \cdot s$ ] = 5,49864E-05  $Pa \cdot s$

$K$  = Costo de la energía eléctrica [ $$/Kw$ ] = 350.24  $$/Kw$  (ESSA)

$J$  = Pérdidas por fricción debida a accesorios y codos expresados como pérdidas por fricción equivalentes en tubería lisa. = 0

$X$  = Costo de la compra de una nueva tubería de diámetro interno 0.0254 m por metro de longitud de tubería = 10826 (Lista de precios PAVCO)

$E$  = Eficiencia del motor = 0.87 (Catalogo siemens -motor trifásico de 15 Kw-)

$$D_{i_{opt}} = 3.886 \text{ pulgadas}$$

Teniendo en cuenta lo anterior se determino utilizar tubería de polietileno de media densidad de 4 pulgadas.

**Tabla 13. Dimensionamiento de la tubería**

<b>D<sub>interno</sub> (mm)</b>	<b>Re</b>	<b>f</b>	<b>h<sub>L</sub> (m)</b>	<b>HC (m)</b>	<b>Q (m<sup>3</sup>/h)</b>	<b>P<sub>1</sub> (bar)</b>	<b>Longitud por accesorios (m)</b>	<b>Longitud real (m)</b>
15,4	1350,59	0,0564	1690,57	8795,13	6,08	1,864	2,49	362,49
20,4	1789,10	0,0513	1164,00	8268,57	10,48	1,814	3,30	363,30
26.2	2297,76	0,0473	838,07	7942,63	17,09	1,783	4,24	364,24
51.4	4507,82	0,0385	351,90	7456,47	65,10	1,737	8,33	368,33
73.60	6454,78	0,0348	224,02	7328,59	134,31	1,725	11,92	371,92
90.00	7893,07	0,0329	174,56	7279,12	202,38	1,721	14,58	374,58
130.80	11471,26	0,0298	110,64	7215,21	437,62	1,715	21,19	381,19
152,4	13365,60	0,0286	92,12	7196,68	602,20	1,713	24,69	384,69
163.60	14347,85	0,0281	84,67	7189,23	698,94	1,712	26,50	386,50

## **4 PROCESO DE DESHIDRATACIÓN DEL BIOGÁS**

El agua presente en las corrientes de gas es el causante más común de problemas dentro de una planta, esto debido, a que además de favorecer la formación de hidratos, inducir golpes de ariete en la tubería, el agua transportada en forma de gotas aumenta la erosión dentro del sistema e induce fallas prematuras en válvulas, tuberías y equipos; de aquí que sea necesaria su remoción.

Lo anterior indica la necesidad de someter al biogás a un proceso de deshidratación en el cual se remueve el vapor de agua asociado al mismo. La eficiencia de los procesos de deshidratación no alcanza el 100%, es decir, es imposible retirar completamente el contenido de agua presente. El nivel de deshidratación debe ser tal, que el punto de rocío del gas deshidratado, sea más bajo que la mínima temperatura a la cual el gas se someta en el transporte a través de la tubería.

### **4.1 DETERMINACIÓN DEL CONTENIDO DE AGUA DE UNA MEZCLA DE HIDROCARBUROS<sup>13</sup>**

La presencia de agua en la composición del biogás (16) tiene poco efecto sobre el comportamiento de fases del hidrocarburo pero tiene otros efectos importantes. El agua es prácticamente insoluble en hidrocarburos; como consecuencia de esto, se alcanza un equilibrio cuando la presión parcial del agua dentro de la fase gaseosa es igual a la presión de vapor del agua a la temperatura del sistema, de lo anterior se deduce que el punto de rocío del agua es diferente del punto de rocío del hidrocarburo. Donde el punto de rocío se define como la temperatura a la cual el vapor comienza a

---

<sup>13</sup> **MELVIN AROLD DURAN RINCÓN.** Modelamiento y simulación del proceso de deshidratación del gas natural con trietilenglicol. UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER 2002

condensarse. La disminución del punto de rocío en un gas es la diferencia en °C entre la temperatura del gas a la entrada y a la salida a la cual el vapor de agua comienza a condensar.

$$P_v^{14} = \varphi P_g = P_{sat@T} = 1 \cdot 5.0752 = 5.0752 \text{ Kpa} \quad (14)$$

$$R_{BG} = \frac{R}{M} = \frac{8.314}{21.662} = 0.3838 \text{ Kj/Kg.K} \quad (15)$$

$$w = \frac{R_{BG} \cdot P_v}{R_v \cdot (P_{BG} - P_v)} = \frac{0.3838 \cdot 5.0752}{0.4615 \cdot (94.32 - 5.0752)} = 0.04729 \frac{\text{Kg de vapor de agua}}{\text{Kg de biogás seco}} \quad (16)$$

$w$  = Cantidad de agua en el biogás [Kg de vapor de agua/Kg de biogás seco].

$P_v$  = Presión absoluta del vapor de agua [Kpa].

$\varphi$  = Humedad relativa del biogás.

$P_{BG}$  = Presión absoluta del biogás a la salida de los gasómetros [Kpa].

$R_{BG}$  = Constante del biogás, [Kj/Kg·K].

$R_v$  = Constante del vapor de agua, [Kj/Kg·K].

En un sistema para el aprovechamiento del biogás se debe remover el agua con el fin de evitar la formación de hidratos y de esta forma evitar el daño prematuro de los equipos e instalaciones. Aunque el contenido de agua en el gas depende de la composición, para los gases transportados por líneas, se puede decir que son función de la presión y la temperatura.

## 4.2 FACTORES QUE AFECTAN LA FORMACIÓN DE HIDRATOS

**4.2.1 Composición de la fase gaseosa.** Se ha demostrado que cuanto mayor sea la densidad del gas, más fácilmente se forman hidratos, es decir, en gases con alto contenido de compuestos intermedios (C3.

---

<sup>14</sup> Yunus Cengel and Michael Boles. Termodinámica, Cuarta Edición, McGraw Hill 2002

iC4, nC4). Los hidratos se forman a altas temperaturas y a bajas presiones.

**4.2.2 Salinidad del agua.** A medida que la salinidad aumenta, se reduce la temperatura de formación de hidratos a razón de -15 a -13.8 °C por cada cien mil partes por millón de sales disueltas. Este fenómeno es similar al descenso del punto de congelación del agua pura ocasionado por la presencia de un soluto. Lo anterior implica que para una composición y temperatura dada, un incremento en la salinidad aumentaría las presiones de equilibrio de hidratos.

**4.2.3 Presencia de una fase de hidrocarburo líquido.** La presencia de hidrocarburos líquidos junto con la mezcla gaseosa y el agua producen una disminución en la temperatura de formación de hidratos. Esta disminución parece depender del peso molecular de la fase hidrocarburo líquida para compuestos iso-alcanos, n-alcanos y aromáticos, esto se debe a la solubilidad selectiva de los hidrocarburos gaseosos dentro de los hidrocarburos líquidos. En la medida en que los gases que se disuelven en la fase hidrocarburo líquido sean formadores de hidratos, como el propano, el equilibrio ocurrirá a temperaturas más bajas.

Existe un efecto de saturación a medida que aumenta el volumen de la fase líquida de hidrocarburo, esta saturación depende de la sustancia líquida misma. La disminución en la temperatura de hidratos ocasionada por la fase hidrocarburo líquida es aproximadamente veinte veces menor que la producida por un inhibidor convencional. El valor de esta disminución aumenta el volumen del hidrocarburo líquido.

Para determinar la presión de formación de hidratos existen distintos métodos a saber:

- Método de la gravedad del gas.
- Método del factor K
- Método de Baillie - Wichert.

De los cuales para nuestro caso nos valdremos del método de la gravedad del gas, el cual nos da gran fiabilidad, además, de su sencilla aplicación.

### **Método de la gravedad del gas.**

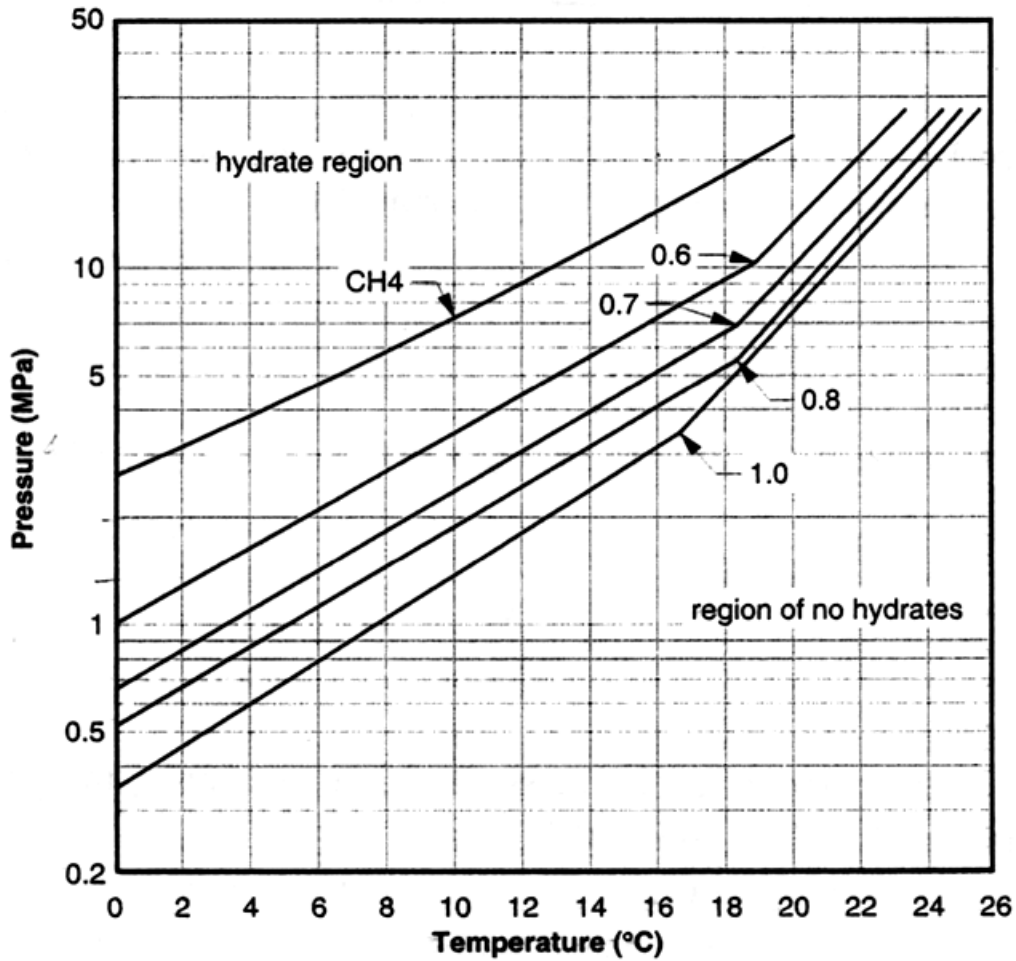
El método de la gravedad del gas fue desarrollado por el profesor Katz y sus colaboradores en el año 1940. La ventaja de este método es su simplicidad, involucrando solo una gráfica de presión vs temperatura (ver Figura 18), con la gravedad específica como un tercer parámetro.

Por medio de la figura 18 podemos concluir que las condiciones del biogás (temperatura del biogás a la salida de los gasómetros, 32 °C y la gravedad específica del mismo, la cual se cálculo en (5), 0.79) no permiten la formación de hidratos.

### **4.3 MÉTODOS DE DESHIDRATACIÓN**

Son tres los métodos comúnmente utilizados para deshidratar gas natural, los cuales son extensibles al biogás debido a que su componente principal es metano, a saber:

- Expansión-refrigeración
- Absorción
- Adsorción



Fuente: *Natural Gas Hydrates: Guide for Engineers*, Jhon J. Carroll

Figura 18. Localización de la región de formación de hidratos para gas natural dulce usando el método de la gravedad del gas

De los cuales se seleccionó para este caso la **adsorción**, ya que permite la remoción total de la humedad, además, de su facilidad de implementación y economía en su operación.

### **4.3.1 Deshidratación por adsorción**

En la adsorción, los compuestos se concentran sobre la superficie de un sólido donde se adsorben las impurezas, purificándose así el gas. En vista de que la cantidad de material adsorbido es proporcional al área de la superficie de adsorción, los adsorbentes comerciales generalmente son sólidos con grandes áreas superficiales por unidad de masa.

La naturaleza de las fuerzas que retienen ciertas moléculas sobre una superficie sólida no es del todo entendida, la teoría más aceptada es la propuesta por Langmuir, quien afirmó que tales fuerzas son similares en su naturaleza a aquellas involucradas en una combinación química. Se asume la existencia de vacíos sobre la superficie de los cristales sólidos. Cuando una molécula adsorbible de la fase gaseosa golpea un espacio desocupado se adhiere al sólido en lugar de redisolverse en el gas, generando un intercambio iónico entre dichos componentes. Cuando la adsorción empieza, existe un gran número de sitios activados y el número de moléculas que se adhiere supera al número de moléculas que abandonan la superficie. A medida que la superficie se ocupa, la probabilidad de encontrar un espacio vacío disminuye, hasta alcanzar un equilibrio, similar al que se logra cuando la velocidad de condensación se iguala a la de evaporación. Según Langmuir; solo una capa de moléculas se puede adherir a la superficie sólida; sin embargo, no se descarta la posibilidad que una primera capa de moléculas pueda atraer una segunda y así sucesivamente.

Aunque la adsorción puede llevarse a cabo mediante el uso de muchos materiales sólidos, la gran mayoría de adsorbentes se derivan de la sílica, la alúmina (incluyendo la bauxita) o el carbón activado; los adsorbentes más utilizados comúnmente son:

- Sílica gel.
- Alúmina activada.
- Sílica base
- Bauxita activada.
- Tamices moleculares

Las características que tiene un buen adsorbente pueden resumirse en:

- Fácil y económica regeneración.
- Alta velocidad de adsorción.
- Alta superficie de contacto.
- Baja resistencia del flujo de gas.
- Alta resistencia al aplastamiento y formación del polvo.
- Químicamente inerte, no corrosivo, no tóxico.
- Bajo cambio volumétrico con la temperatura.

La mayoría de las tareas de deshidratación de gases pueden cumplirse con la utilización de desecantes sólidos; no obstante, se prefieren los desecantes sólidos cuando se desea remoción casi completa del agua (se puede obtener gas hasta de menos de 1 ppm de agua), pequeño tamaño en las instalaciones y simplicidad en la operación.

En su forma más simple, una planta para remoción de vapor de agua por adsorción está constituida por dos o más torres empacadas con desecante granulado y un equipo auxiliar que permite la operación en continuo, alternando ciclos de adsorción, regeneración y enfriamiento del desecante.

En el ciclo de deshidratación, el gas húmedo pasa a través de un separador donde se remueven de forma preliminar partículas sólidas y líquidas libres. Inicialmente el lecho se satura con agua en el tope de la torre y a medida que

el flujo de gas continúa, el lecho se va saturando gradualmente hacia el fondo, desplazando el vapor de agua a los hidrocarburos que hayan sido adsorbidos por el lecho.

Antes que el lecho se sature totalmente, el gas húmedo debe enviarse a otra torre donde el material adsorbente se haya regenerado, mientras se procede a la regeneración de la torre saturada. El proceso de regeneración se basa en el flujo continuo de un gas caliente desde el fondo de la torre hacia el tope. Este gas debido a su alta temperatura produce evaporación del agua la cual se arrastra junto con los hidrocarburos adsorbidos. Este gas pasa por un enfriador donde el agua se condensa y se retira.

Un ciclo típico de regeneración requiere de 6 horas para el calentamiento; el lecho se enfriará haciendo fluir gas húmedo o gas que se haya deshidratado durante aproximadamente dos horas hasta que el lecho alcance una temperatura de 37,78 °C a 48,89 °C. En el caso de emplear gas húmedo, este debe enviarse a la torre adsorbedora.

Con todos los desecantes sólidos es esencial evitar el transporte de agua en forma líquida buscando prevenir su prematura degradación, pérdidas en capacidad y eficiencia. La sílica gel y la alúmina activada tienen desempeños similares logrando puntos de rocío entre -40 °C y -50°C; los tamices moleculares por su parte pueden lograr puntos de rocío extremadamente bajos.

Para poder lograr el punto de rocío requerido, se necesita que el desecante sea regenerado en forma efectiva. La regeneración de la sílica gel y la alúmina normalmente requieren de temperaturas entre 180 °C y 200 °C, mientras que los tamices moleculares requieren de 250 °C o más.

#### 4.3.1.1 Intercambio iónico<sup>15</sup>

La deshidratación por adsorción se produce básicamente por el intercambio iónico entre el biogás y un sólido; esta es una operación de separación basada en la transferencia de materia fluido-sólido. Implica la transferencia de uno o más iones de la fase fluida al sólido por intercambio o desplazamiento de iones de la misma carga, que se encuentran unidos por fuerzas electrostáticas a grupos funcionales superficiales. La eficacia del proceso depende del equilibrio sólido-fluido y de la velocidad de transferencia de materia. Los sólidos suelen ser de tipo polimérico, siendo los más habituales los basados en resinas cinéticas.

Una resina de intercambio iónico puede considerarse como una estructura de cadenas hidrocarbonadas a las que se encuentran unidos de forma rígida grupos iónicos libres. Estas cadenas se encuentran unidas transversalmente formando una matriz tridimensional que proporciona rigidez a la resina y donde el grado de reticulación o entrecruzamiento determina la estructura porosa interna de la misma. Como los iones deben difundirse en el interior de la resina para que ocurra el intercambio, la selección del grado de reticulación puede limitar la movilidad de los iones participantes.

Las cargas de los grupos iónicos inmóviles se equilibran con las de otros iones, de signo opuesto, denominados contraiones, que están libres y que son los que se intercambian realmente con los del electrolito disuelto. Cuando dichos iones son cationes, los cambiadores iónicos se denominan catiónicos y cuando son aniones se denominan aniónicos.

---

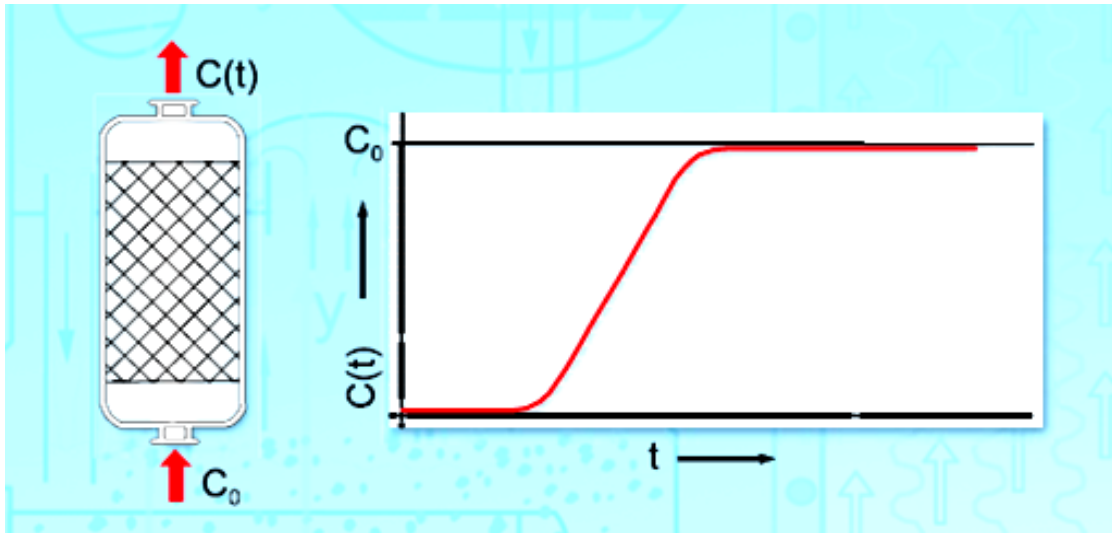
<sup>15</sup>[www.uam.es/personal\\_pdi/ciencias/mgilarra/experimentacionIQII/Intercambioionico2006.pdf](http://www.uam.es/personal_pdi/ciencias/mgilarra/experimentacionIQII/Intercambioionico2006.pdf)

## **Intercambio iónico en lecho fijo**

La operación de intercambio iónico se realiza habitualmente en semicontinuo, en un lecho fijo de resina a través del cual fluye una disolución. El régimen de funcionamiento no es estacionario por variar continuamente la concentración de los iones en cada punto del sistema.

Al inicio de la operación de un lecho, la mayor parte de la transferencia de materia tiene lugar cerca de la entrada del lecho donde el fluido se pone en contacto con intercambiador fresco. A medida que transcurre el tiempo, el sólido próximo a la entrada se encuentra prácticamente saturado y la mayor parte de la transferencia de materia tiene lugar lejos de la entrada. Debido a la resistencia que opone el sistema a la transferencia de iones desde el seno del líquido a los centros de intercambio, se establece un gradiente de concentración en el lecho (Figura 17). La región donde ocurre la mayor parte del cambio de concentración es la llamada zona de transferencia de materia, esta zona separa la zona virgen de la resina y la de saturación y sus límites frecuentemente se toman como  $c/c_0 = 0,95$  a  $0,05$ .

A medida que progresa el intercambio iónico la zona de transferencia de materia se traslada en el lecho hasta alcanzar su extremo inferior (Figura 18), instante a partir del cual la disolución de salida contendrá cantidades crecientes de los iones que se desea intercambiar.

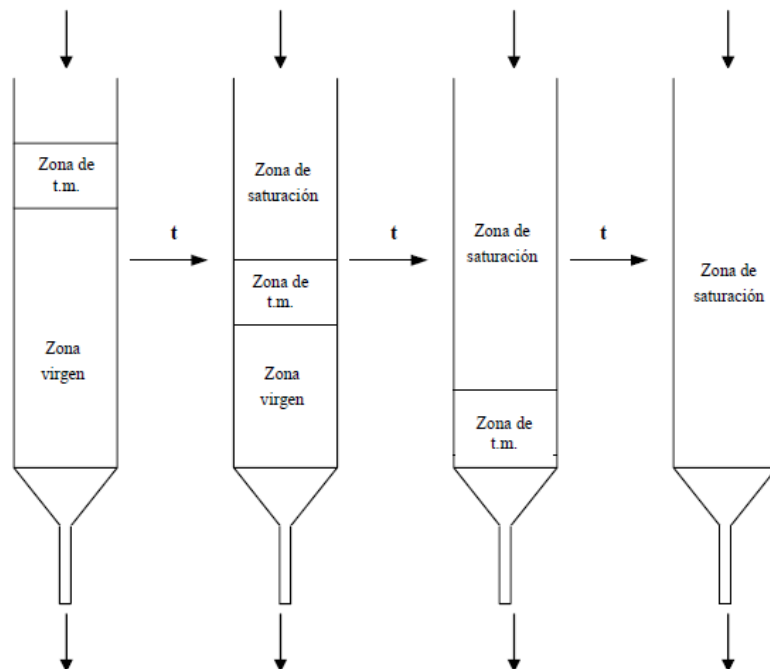


Fuente: [www.gunt.de/download/absorption\\_spanish.pdf](http://www.gunt.de/download/absorption_spanish.pdf)

**Figura 19. Esquema y Curva de ruptura ideal de un adsorbedor de lecho fijo**

$C_0$ : Concentración de entrada del adsorbato en el fluido

$C$ : Concentración de salida del adsorbato del fluido en la salida del adsorbedor



**Figura 20. Evolución de la concentración en un lecho de intercambio iónico**

El tiempo transcurrido desde el comienzo de la operación en el lecho, hasta que los iones de la disolución aparecen en la corriente de salida o más concretamente, cuando se alcanza la máxima concentración permisible en el efluente, se denomina Tiempo de ruptura ( $t_R$ ). En este momento, la corriente se desviaría a un segundo lecho, iniciando el proceso de regeneración del primero.

## **SÍLICA GEL<sup>16</sup>**

La Sílica gel, es Hidróxido de Sílice Deshidratada que permite la adsorción de líquidos, no es tóxica ni corrosiva.

La adsorción de líquidos en sólidos es el sistema más empleado para que cualquier gas, vapor, líquido o soluto adhiera la humedad contenida a una superficie sólida porosa a temperatura ambiente.

La estructura del adsorbente de la sílica gel es cristalina y las fuerzas de valencia que unen los átomos del enrejado están insatisfechas de agua en su superficie. Por lo tanto las moléculas de líquido son así atraídas a la superficie exterior y también a la interior a través de una amplia red de canales extremadamente finos y poros microscópicos.

El mismo tipo de fuerzas que causa la condensación están involucradas en este mecanismo de adsorción. La tendencia a adsorber líquidos aumenta con la presión y disminuye con el aumento de la temperatura a la que esté sometido y tiene la propiedad de adsorber en determinadas condiciones hasta un 40% de su propio peso en agua.

---

<sup>16</sup> [http://www.quimicasilicagel.com.ar/especificaciones\\_tecnicas\\_silica\\_gel.html](http://www.quimicasilicagel.com.ar/especificaciones_tecnicas_silica_gel.html)

La sílica gel puede también diferenciar ciertas moléculas, por lo que actúa como adsorbente selectivo. Los mejores adsorbentes son los gránulos de materiales porosos, como la sílica gel, cuyas superficies ocupan pequeños volúmenes, además, no restringen el flujo del aire a través del lecho de gránulos. Es una sustancia altamente polar y absorbe líquidos en mayor proporción que gases y vapores orgánicos.

### **Especificaciones técnicas**

El sílica gel se suministra bajo la forma de granos muy resistentes mecánicamente y de aspecto cristalino, presentándose en los distintos tipos y granulometrías que se detallan a continuación:

- **Sílica gel microporoso.**
- **Sílica gel macroporoso.**
- **Sílica gel con indicador.**

De los tipos anteriormente nombrados, se escogió el Silicagel microporoso, debido a que por su tamaño permite mayor adsorción de humedad.

- **Sílica gel microporoso.** Es el producto de aplicación más corriente, sus pequeños poros le confieren una gran capacidad de adsorción a bajas humedades relativas.



**Figura 21. Silicagel Microporoso sin indicador**

### Otras propiedades

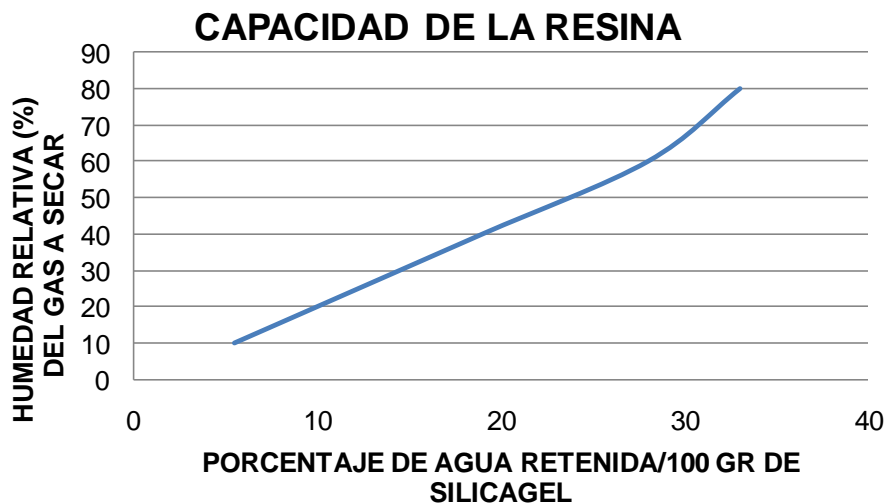
- **Densidad aparente para el tipo microporoso:** No menor de 700 Kg/m<sup>3</sup>.
- **Volátiles para todos los tipos:** No mayor de 6%
- **pH para los tipos microporoso y macroporoso:** De 4,6 a 8 unidades de pH.

**Capacidad de la sílica.** Esta curva es suministrada por el proveedor de la resina.

**Tabla 14. Capacidad de la sílica gel**

HUMEDAD RELATIVA DEL GAS A SECAR (%)	PORCENTAJE DE AGUA RETENIDA CADA 100 g. DE SILICA GEL
10	5,5
20	10
40	19
60	28
80	33

Fuente: [www.quimicasilicagel.com.ar/especificaciones\\_tecnicas\\_silica\\_gel.html](http://www.quimicasilicagel.com.ar/especificaciones_tecnicas_silica_gel.html)



**Figura 22. Isoterma de adsorción a 25 °C y presión atmosférica**

$$\text{Masa de silica} = w \cdot \text{flujo másico de biogás} \cdot t_R \cdot \text{Capacidad de la silica} \quad (17)$$

$$\text{Volumen de silica}^{17} = \frac{\text{Masa de la silica}}{\text{Densidad aparente de la silica}} \quad (18)$$

**Cantidad de agua presente en el biogás (w).** Se calculo en (16) obteniendo 0.04729 Kg de vapor de agua / Kg de biogás seco.

**Flujo de biogás.** Se tomará como flujo de diseño 400 m<sup>3</sup>/h (385.788 Kg/h).

**Tiempo de ruptura ( $t_R$ ).** El tiempo de ruptura seria de 1 día.

Reemplazando términos en (17) y (18) tenemos:

$$\text{Masa de silica} = 0.04729 \cdot 385.788 \cdot 1 \cdot 24 \cdot 2.857 = 1250.95 \text{ Kg silica}$$

$$\text{Volumen de silica} = \frac{1250.95}{700} = 1.79 \text{ m}^3 \text{ de silica gel}$$

$$\text{Volumen de la torre} = 1.2 \text{ Volumen de silica} = 2.14 \text{ m}^3$$

En [18] recomiendan que L / D este entre 3 - 6, por tanto tomaremos un valor de 4,5.

$$\frac{L}{D} = 4.5 \quad (19)$$

$$\text{Volumen de la torre} = \frac{\pi}{4} D^2 L = \frac{\pi}{4} \cdot 4.5 \cdot D^3 \quad (20)$$

---

<sup>17</sup> **Wallas, S.M.** Chemical Process Equipment. Selection and Design. Butterworth-Heinemann. Newton MA. 1990

Despejando (19) y reemplazando términos en (18), tenemos:

Diámetro de la torre = 0.846 m

Longitud de la torre = 3.81 m

## **5 SELECCIÓN DEL COMPRESOR**

### **5.1 COMPRESORES<sup>18</sup>.**

Los compresores también desplazan fluidos, pero éstos son máquinas térmicas, ya que su fluido de trabajo es compresible, sufre un cambio apreciable de densidad y, generalmente, también de temperatura; a diferencia de los ventiladores y los sopladores, los cuales impulsan fluidos compresibles, pero no aumentan su presión, densidad o temperatura de manera considerable.

La capacidad real de un compresor es menor que el volumen desplazado del mismo, debido a razones tales como:

- Caída de presión en la succión.
- Calentamiento del aire de entrada.
- Expansión del gas retenido en el volumen muerto.
- Fugas internas y externas.

### **5.2 CLASIFICACIÓN DE LOS COMPRESORES.**

#### **5.2.1 Compresores de desplazamiento positivo:**

---

<sup>18</sup> [www.elprisma.com](http://www.elprisma.com)

- Compresores de émbolo
- Ventiladores compresores
- Ventiladores no compresores

### **5.2.2 Compresores de desplazamiento no positivo, o dinámicos:**

- Ventiladores centrífugos de flujo radial.
- Compresor de flujo axial.
- Compresor de flujo mixto.

### **5.2.1 COMPRESORES DE DESPLAZAMIENTO POSITIVO**

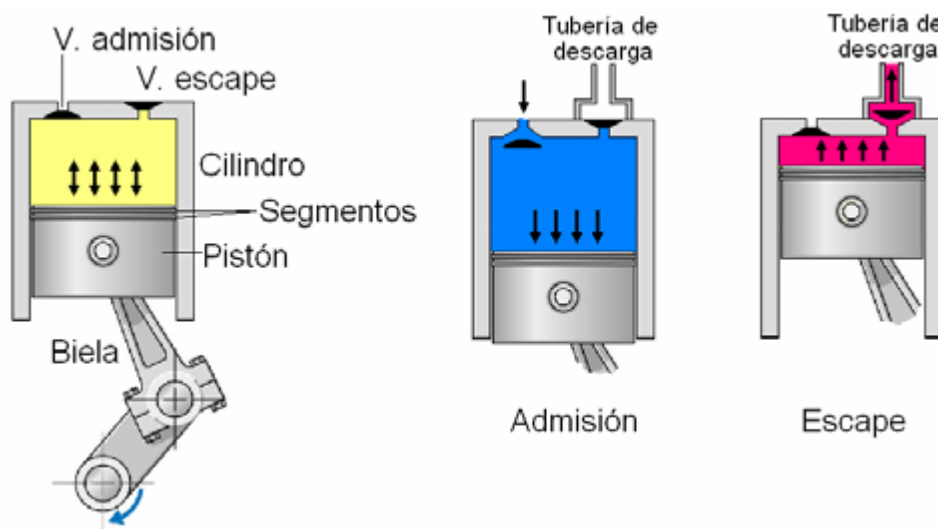
Los tipos de desplazamiento positivo son de dos categorías básicas: reciprocantes y rotatorias. Los compresores reciprocantes tienen uno o más cilindros en los cuales hay un pistón o émbolo de movimiento alternativo que desplaza un volumen positivo en cada carrera. Los rotatorios incluyen los tipos de lóbulos, espiral, aspas o paletas y anillo de líquido. Cada uno con una carcasa, o con más elementos rotatorios que se acoplan entre sí, como los lóbulos o las espirales, o desplazan un volumen fijo en cada rotación.

#### **5.2.1.1 Compresores reciprocantes**

Son los más antiguos y conocidos entre los compresores de desplazamiento positivo. En estos equipos el elemento principal de compresión es un pistón que se mueve alternativamente dentro de un cilindro, lográndose así la reducción del volumen del gas a comprimir.

Los compresores reciprocantes funcionan con el principio adiabático mediante el cual se introduce el gas en el cilindro por las válvulas de entrada, se retiene y comprime en el cilindro y sale por las válvulas de descarga, en

contra de la presión de descarga (Figura 22). Estos compresores rara vez se emplean como unidades individuales, salvo que el proceso requiera funcionamiento intermitente. Los compresores alternativos tienen piezas en contacto, como los anillos de los pistones con las paredes del cilindro, resortes y placas o discos de válvulas que se acoplan con sus asientos y entre la empaquetadura y la biela. Todas estas partes están sujetas a desgaste por fricción.



Fuente: [www.diee.unican.es/Neumática/T11%20COMPRESORES.pdf](http://www.diee.unican.es/Neumática/T11%20COMPRESORES.pdf)

**Figura 23. Principio de funcionamiento de un compresor recíprocante**

Los compresores de pistón pueden ser de simple o doble efecto, según si una o ambas caras del pistón realizan compresión sobre el fluido. Los de simple efecto comprimen el aire en la parte superior del cilindro y normalmente son del tipo entroncado. Los de doble efecto requieren un acople mediante crucetas, para procurar que el movimiento de vástago sea lineal, con lo cual puede lograrse una reducción en la longitud del pistón, creándose dos cámaras de compresión: una por arriba y otra por abajo del mismo.

### **5.1.2 Compresores rotativos**

Los sopladores, bombas de vacío y compresores rotatorios son todos de desplazamiento positivo, en los cuales un elemento rotatorio desplaza un volumen fijo con cada revolución.

#### **Principio de funcionamiento**

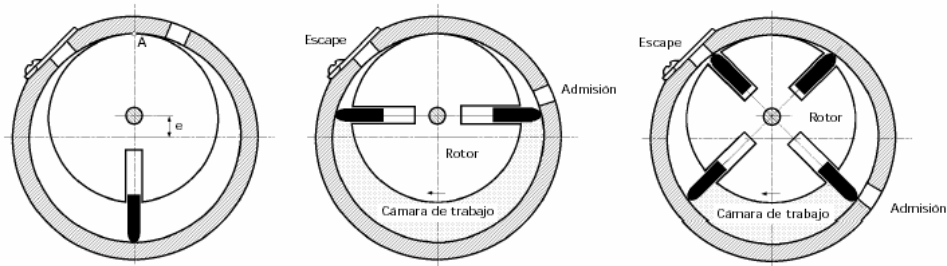
Los compresores rotativos pertenecen a la clase de máquinas volumétricas; por su principio de funcionamiento son análogos a las bombas rotativas. Al girar el rotor -situado excéntricamente en el cuerpo- se forman espacios cerrados, que trasladan el gas de la cavidad de aspiración a la cavidad de impulsión. Con esto se efectúa la compresión del gas.

#### **Clasificación de los compresores rotativos**

- Compresores de paletas deslizantes
- Compresores de lóbulos
- Compresores de tornillo

### **5.1.3 Compresores de paletas deslizantes**

Este tipo de compresores consiste básicamente de una cavidad cilíndrica dentro de la cual está ubicado en forma excéntrica un rotor con ranuras profundas, unas paletas rectangulares se deslizan libremente dentro de las ranuras de forma que al girar el rotor la fuerza centrífuga empuja las paletas contra la pared del cilindro (figura 24). El gas al entrar, queda atrapado en los espacios que forman las paletas y la pared de la cavidad cilíndrica es comprimida al disminuir el volumen de estos espacios durante la rotación.

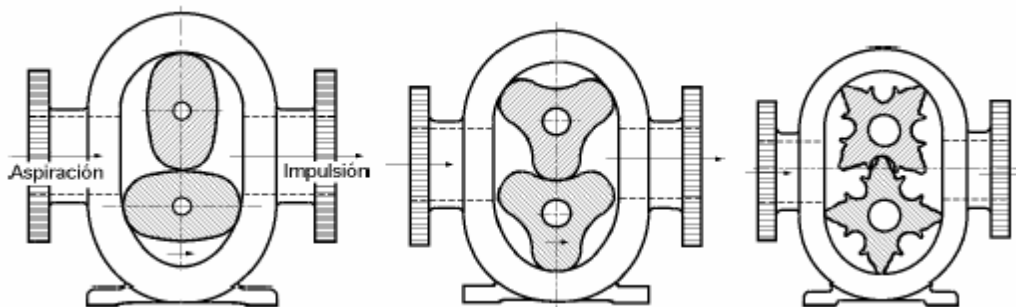


Fuente: [www.diee.unican.es/Neumática/T11%20COMPRESORES.pdf](http://www.diee.unican.es/Neumática/T11%20COMPRESORES.pdf)

**Figura 24. Principio de funcionamiento de un compresor de paletas deslizantes.**

### 5.1.4 Compresores de lóbulos

Es el más antiguo y conocido, en el cual dos o tres rotores montados sobre ejes paralelos, para una misma etapa de compresión; se acoplan entre sí y se impulsan con engranes de sincronización montados en cada eje. Dos rotores idénticos y usualmente simétricos, giran en direcciones opuestas, dentro de una carcasa cilíndrica, impulsando continuamente volúmenes iguales de aire (figura 25). La carcasa del compresor no está lubricada y su enfriamiento es por aire. Los rotores, por lo general, de dos o tres lóbulos están conectados mediante engranajes externos.

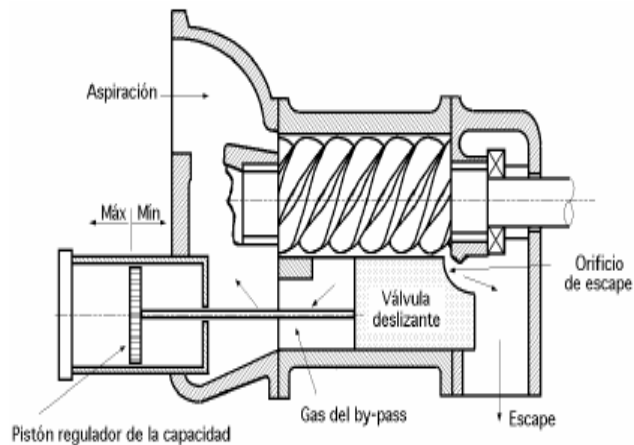


Fuente: [www.diee.unican.es/Neumática/T11%20COMPRESORES.pdf](http://www.diee.unican.es/Neumática/T11%20COMPRESORES.pdf)

**Figura 25. Principio de funcionamiento de un compresor de lóbulos.**

### 5.1.5 Compresores de tornillo

Esencialmente se componen de un par de motores que tienen lóbulos helicoidales de engrane constante (figura 24).



Fuente: [www.diee.unican.es/Neumática/T11%20COMPRESORES.pdf](http://www.diee.unican.es/Neumática/T11%20COMPRESORES.pdf)

**Figura 26. Principio de funcionamiento de un compresor de tornillos.**

La compresión se produce en el sentido axial con el uso de lóbulos en espira a la manera de un tornillo sinfín. Acoplando dos motores de este tipo, uno convexo y otro cóncavo, y haciéndolos girar en sentidos opuestos se logra desplazar el gas, paralelamente a los dos ejes, entre los lóbulos y la carcasa. Las revoluciones sucesivas de los lóbulos reducen progresivamente el volumen de gas atrapado y por consiguiente su presión, el gas así comprimido se fuerza axialmente por la rotación de los lóbulos helicoidales hasta la descarga.

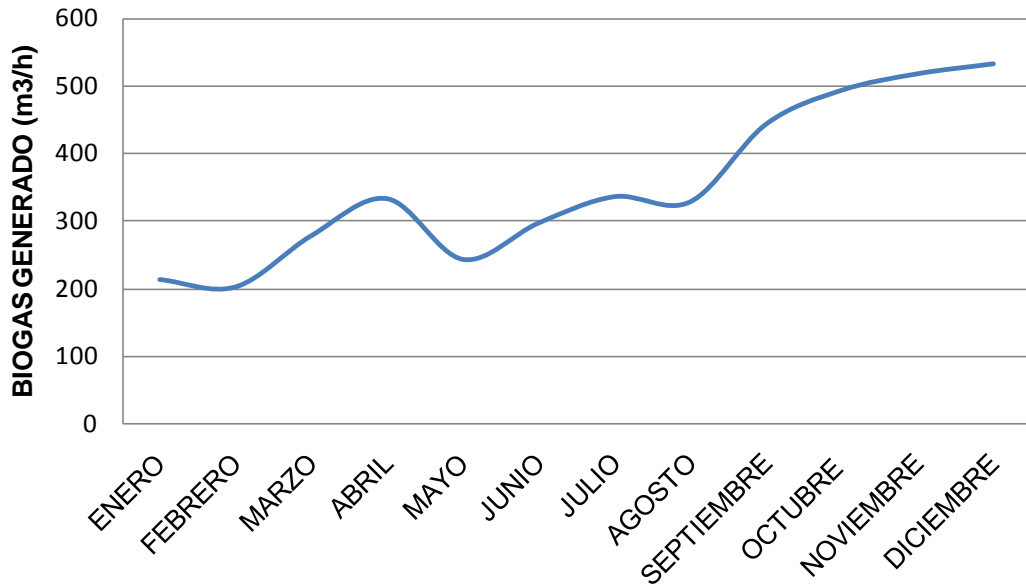
## Selección del compresor

A continuación se presentan las exigencias requeridas por el proceso de transporte de biogás desde su salida en los gasómetros hasta el tren de combustión combinado:

- **Tipo de fluido:** Biogás
- **Presión de succión:** Fue medida por un barómetro a la salida de los gasómetros, el cual arroja 0.3 psig
- **Presión de descarga:** Teniendo en cuenta el caudal de diseño, a través de la tabla (13) -dimensionamiento de ala tubería- encontramos la presión requerida en la descarga 11psig.
- **Caudal:** La figura 27, muestra la tendencia en la generación de biogás en el año 2008, en el cual el biogás generado estuvo entre 200 - 500 m<sup>3</sup>/h, con un promedio de 350, de dicho comportamiento podemos concluir que en gran parte del tiempo, la generación de biogás estuvo por debajo de 400 m<sup>3</sup>/h (235 cfm), razón por la cual tomaremos este valor como caudal de diseño.

Con las condiciones de operación antes mencionadas, se entra a la figura 28 -la cual nos muestra la cobertura de los compresores- mediante la cual se escoge el tipo de compresor, para posteriormente, seleccionar en el catálogo de TUTHILL *Vacuum and blowers system*.

## BIOGAS GENERADO AÑO 2008



**Figura 27. Generación de biogás año 2008.**



Fuente: GAS PROCESSORS SUPPLIERS ASSOCIATION (GPSA) Twelfth Edition,  
Engineering Data Book

**Figura 28. Cobertura del Compresor**

El compresor para baja presión seleccionado marca TUTHILL, modelo 5006 (ver anexos), es un soplador bilobular de desplazamiento positivo, el cual cuenta con las siguientes características, a saber:

**Presión mínima de succión:** Presión ambiental

**Presión de descarga:** 12 psig

**Potencia:** 206 KW (21 BHP)

**Velocidad:** 1760 rpm.

**Flujo:** 380 m<sup>3</sup>/h (224 cfm)

**Diámetro de en la descarga:** 4 pulg.

## **6 DISEÑO DEL SISTEMA DE COMBUSTION COMBINADO**

### **6.1 Propiedades físicas**

Para el aprovechamiento del biogás en la producción de vapor en las calderas de la Cervecería Bavaria, se diseñó un sistema de combustión combinado biogás - gas natural, en las figuras 29 y 30 se muestra el comportamiento de las temperaturas en la caldera operando con gas natural y biogás respectivamente; los balances de masa y energía asociados a los equipos pertenecientes al sistema de aprovechamiento de biogás se elaboraron con ayuda de HYSYS, el cual es un software confiable a nivel industrial.

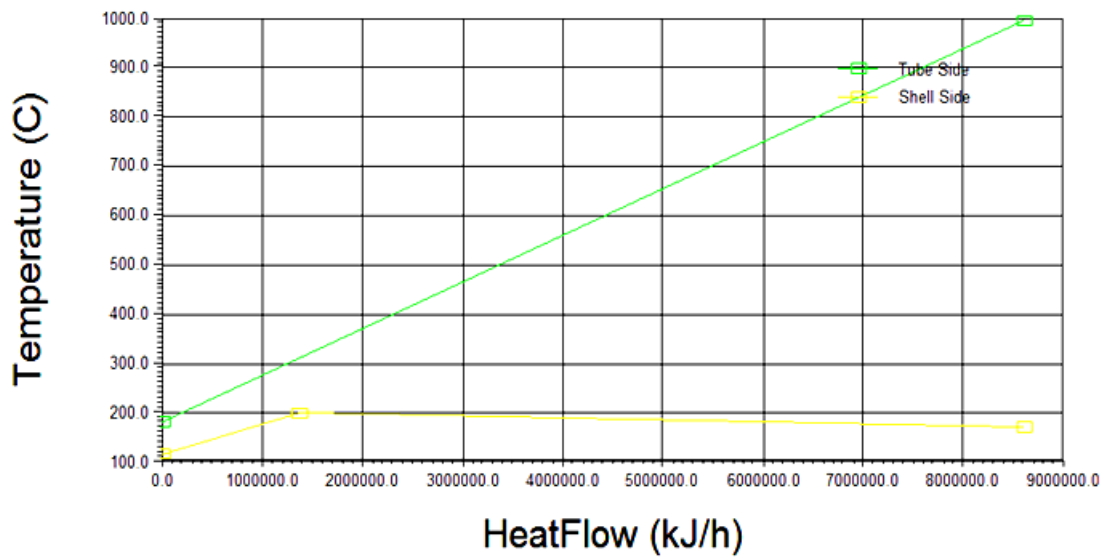


Figura 29. Gráfica de temperatura vs flujo de calor, con las condiciones de operación actuales de la caldera (gas natural)

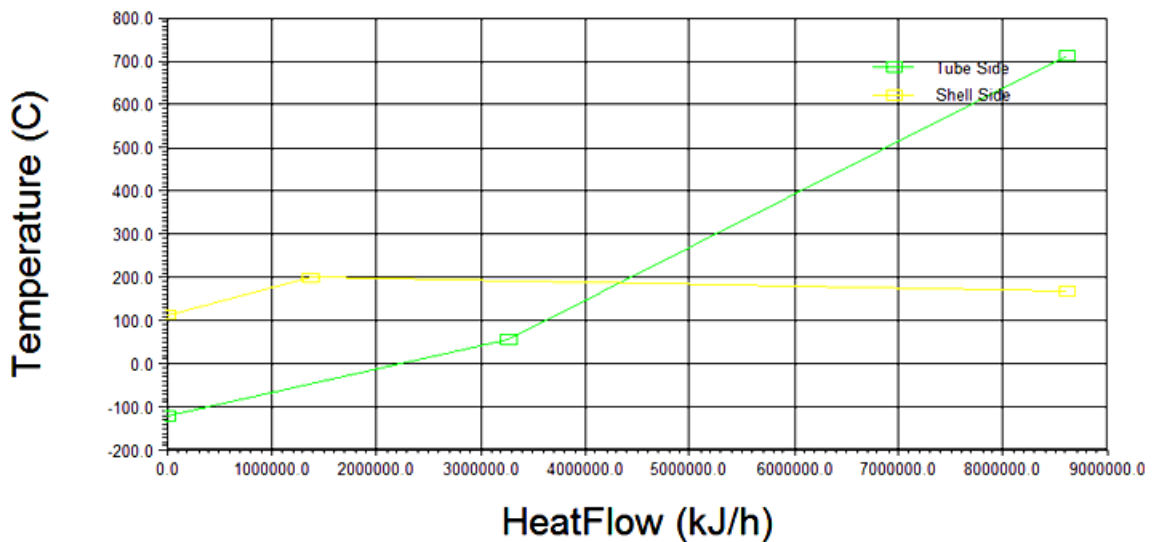
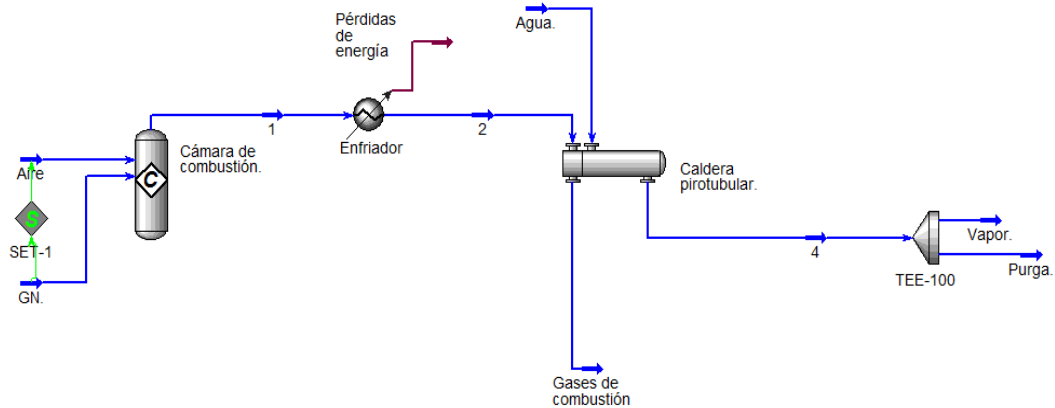


Figura 30. Gráfica de temperatura vs flujo, con las condiciones de operación actuales de la caldera alimentada con máximo flujo de biogás (500 m<sup>3</sup>/h)

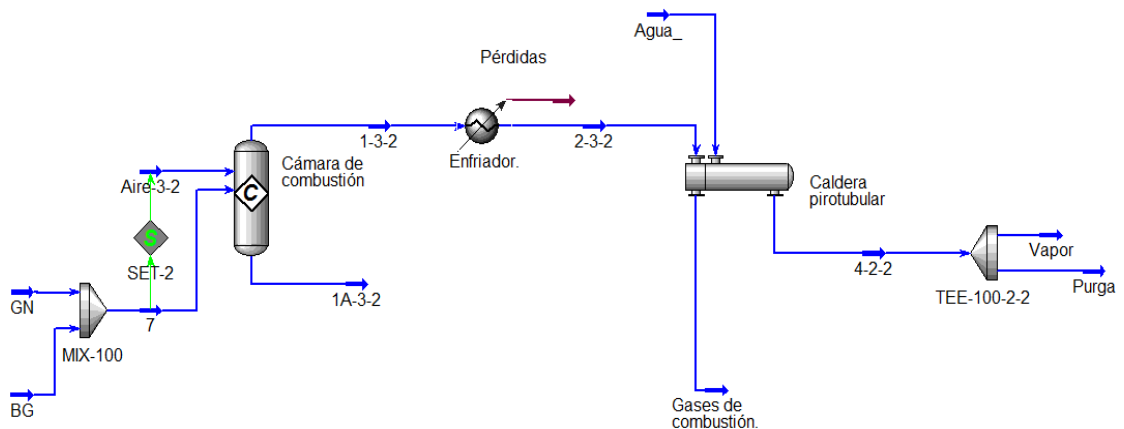
Como se puede observar, en la operación de la caldera con el máximo flujo de biogás generado (500 m<sup>3</sup>/h), se presenta un cruce de temperaturas, esto se debe a que dicho flujo no permite el suficiente desprendimiento de calor

para mantener la producción de vapor actual; razón por la cual se hace necesario llevar a cabo la mezcla de combustibles anteriormente nombrada.

Para el sistema de combustión combinado se pretende mantener el tren de combustión actual, adaptándolo para que opere mediante la alimentación de una mezcla de combustibles gaseosos, adicionando a éste una cámara de mezclado. En la figura 31 se muestra el montaje mediante el cual se efectuó la simulación del tren de combustión actual y en la figura 32 la adaptación del mismo para una alimentación de mezcla de combustibles.



**Figura 31. Esquema de la simulación del tren de combustión actual**



**Figura 32. Esquema de la simulación del tren de combustión combinado**

Para la simulación del tren de combustión combinado se requiere de los siguientes componentes:

1. Mezclador o cámara de mezcla.
2. Cámara de combustión.
3. Enfriador.
4. Caldera pirotubular.

**1. Mezclador o cámara de mezcla.** Esta aplicación me permite simular la mezcla biogás - gas natural y de paso encontrar la composición química de los reactivos que entran a la cámara de combustión, para los cálculos respectivos, se empleó la ecuación de estado de Peng –Robinson.

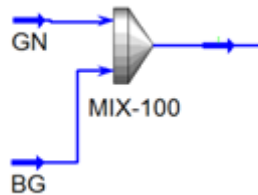


Figura 33. Esquema de la cámara de mezcla

### Ecuación de estado de Peng Robinson

Esta ecuación, propuesta en 1976, es una modificación de la ecuación de estado de Soave, Redlich y Kwong. Este modelo presenta una ventaja sobre los trabajos anteriores, como son un mejor desempeño en la vecindad del punto crítico, particularmente para el cálculo de  $Z_c$  y densidad del líquido; es una regla de mezclas que únicamente emplea los coeficientes de interacción binaria y que son independientes de la presión, temperatura y composición. Actualmente es la ecuación más empleada en la industria de los hidrocarburos.

La ecuación planteada por Peng Robinson, es la siguiente:

$$P = \frac{RT}{V_m - b} - \frac{a\alpha}{V_m^2 + 2bV_m - b^2} \quad (21)$$

Donde:

R = Constante de los gases (8.31451 J/mol·K)

$V_m$  = Volumen de la mezcla

$$\alpha = \left(1 + (0.37464 + 1.5422\omega - 0.26992\omega^2)(1 - T_r^{0.5})\right)^2 \quad (22)$$

$$T_r = \frac{T}{T_c} \quad (25)$$

$\alpha$  Es el factor de corrección por temperatura (cuando  $T = T_c$ ,  $\alpha = 1$ ), está definido como:

$$\alpha = \left[1 + (0.37464 + 1.5422\omega - 0.26992\omega^2)(1 - T_r^{0.5})\right]^2 \quad (23)$$

$\omega$  = Factor acéntrico.

Si  $\omega \leq 0.49$ , o como:

$$\alpha = \left[1 + (0.379642 + 1.48503\omega - 0.164423\omega^2 + 0.016666\omega^3)(1 - T_r^{0.5})\right]^2 \quad (28)$$

Si  $\omega > 0.49$

Al igual que las anteriores ecuaciones de estado, ésta tiene una forma polinomial en Z:

$$Z^3 - (1 - B)Z^2 + (A - 3B - 2B)Z - (A - B^2 - B^3) = 0 \quad (24)$$

**Parámetros para sustancias puras.** Cuando se analizan sustancias puras o mezclas, se deben calcular los parámetros para cada componente mediante las siguientes ecuaciones:

$$a = \frac{0.45724R^2T_C^2}{P_C} \quad (25)$$

$$b = \frac{0.07780RT_C}{P_C} \quad (26)$$

$$A = \frac{a\alpha^P}{R^2T^2} \quad (27)$$

$$B = \frac{bP}{RT} \quad (28)$$

**Parámetros para mezclas.** Teniendo los parámetros correspondientes para las sustancias puras que componen la mezcla, se pueden obtener los parámetros de esta última a partir de los primeros.

$$a\alpha = \sum \sum y_i y_j (a\alpha)_{ij} \quad (29)$$

$$b = \sum y_i b \quad (30)$$

$$A = \sum \sum y_{ij} A_{ij} \quad (31)$$

$$B = \sum y_i B_i \quad (32)$$

Para determinar estos parámetros se utilizan dos reglas de combinación, las cuales son:

$$(\alpha\alpha)_{ij} = (1 - k_{ij})\sqrt{(\alpha\alpha)_i(\alpha\alpha)_j} \quad (33)$$

$$A_{ij} = (1 - k_{ij})\sqrt{A_i A_j} \quad (34)$$

Los datos de entrada requeridos por esta aplicación son:

### **Gas natural**

- Composición.
- Flujo.
- Temperatura.
- Presión

**Composición del gas natural.** En la tabla 15 se presenta la composición del gas natural, la cual fue brindada por Gasorient, empresa a la cual se le compra el mismo. Solo se tuvieron en cuenta los componentes más representativos de la muestra, a saber:

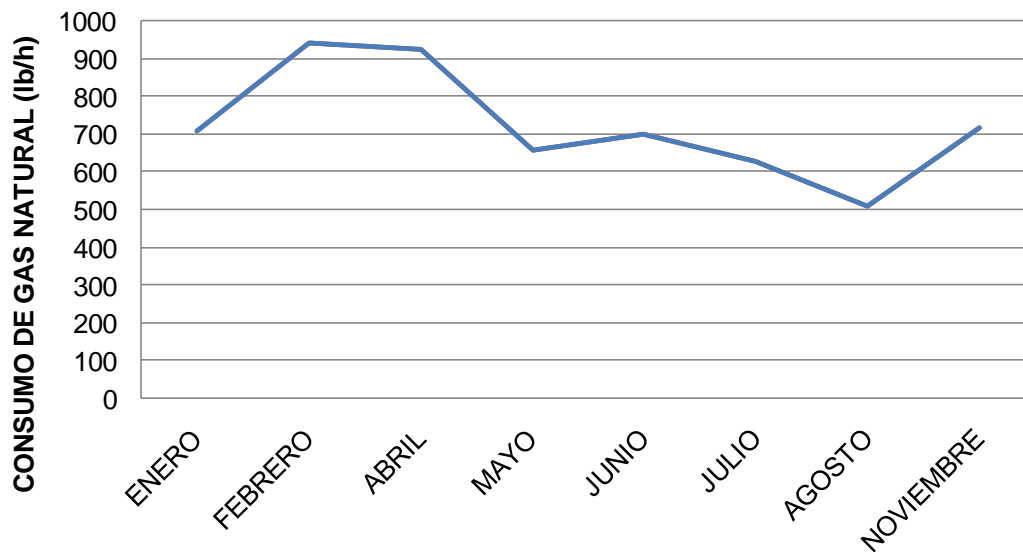
- Metano
- Etano
- Propano
- Nitrógeno
- Dióxido de carbono

**Flujo de gas natural.** La figura 34 representa la tendencia del consumo de gas natural en el año 2008, del cual se tomó el valor pico 940 Lb/h, para efectuar la simulación del tren de combustión actual.

**Tabla 15. Composición química del gas natural suministrada por Gasoriente.**

Componente	Fracción másica
PROPANO	0,73307
i-BUTANO	0,02784
n-BUTANO	0,02445
NEOPENTANO	0,00000
i-PENTANO	0,00668
n-PENTANO	0,00328
NITROGENO	1,03971
METHANO	93,47250
DIOXIDO DE CARBONO	0,77783
ETHANO	3,89717
Total	100

### FLUJO DE GAS NATURAL AÑO 2008



**Figura 34. Consumo de gas natural año 2008**

**Temperatura.** Debido a que el gas natural va transportado por un gasoducto expuesto al medio ambiente, se tomo la temperatura ambiente promedio, la cual arrojo un valor de 27 °C, teniendo los datos de presión y temperatura del gas natural al llegar a la válvula reductora de presión y la presión de salida

de la misma (10 psig), se simuló su paso por esta (figura 35), determinándose la temperatura de salida de la misma (26 °C).

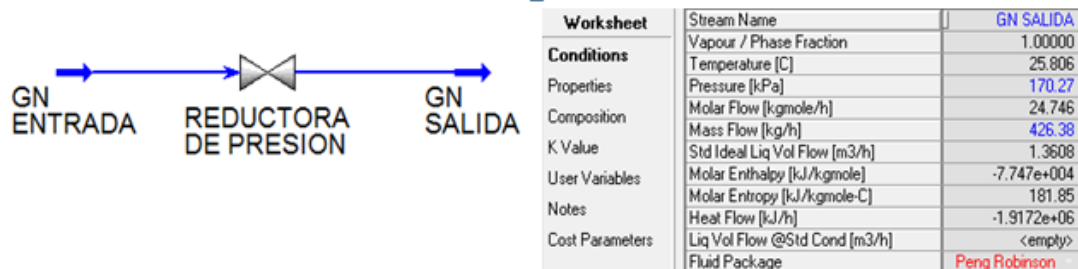


Figura 35. Simulación del paso del gas natural por la válvula reductora de presión

**Presión.** Con el fin de optimizar el proceso y ahorrar energía, se instalara la cámara de mezcla a la salida de la válvula reductora de presión (figura 36), la cual permite que el gas natural que entra a 43 psig aproximadamente, salga máximo a 10 psig con un promedio de 7 psig, razón por la cual para la simulación se tomo la máxima presión a la cual saldría el gas natural (10 psig)

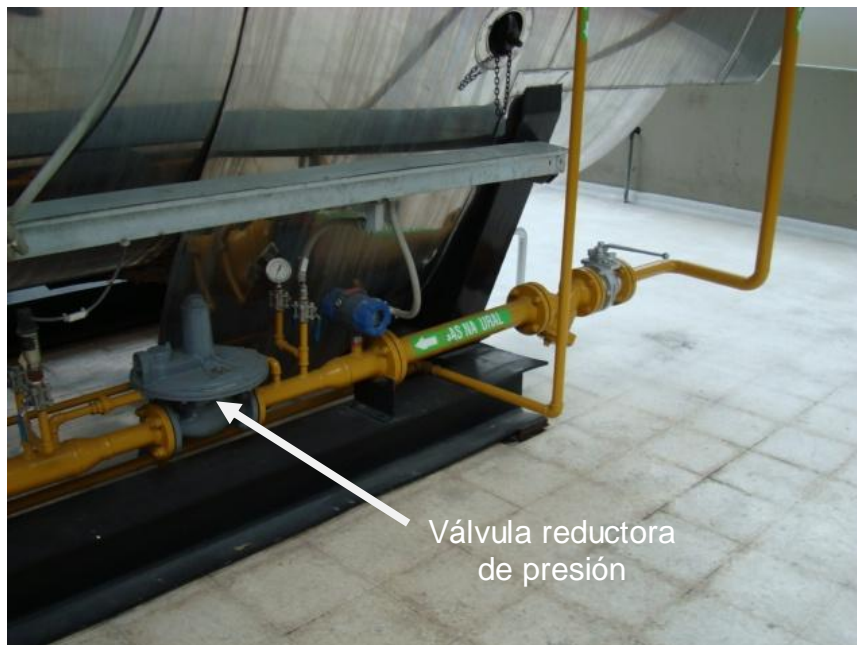


Figura 36. Válvula reductora de presión

## Biogás

**Temperatura.** Teniendo las condiciones de presión y temperatura del biogás a la salida de los gasómetros y la presión de succión requerida, se simuló su paso por el compresor (figura 37), determinándose la temperatura de entrada a la cámara de mezcla, 80 °C.

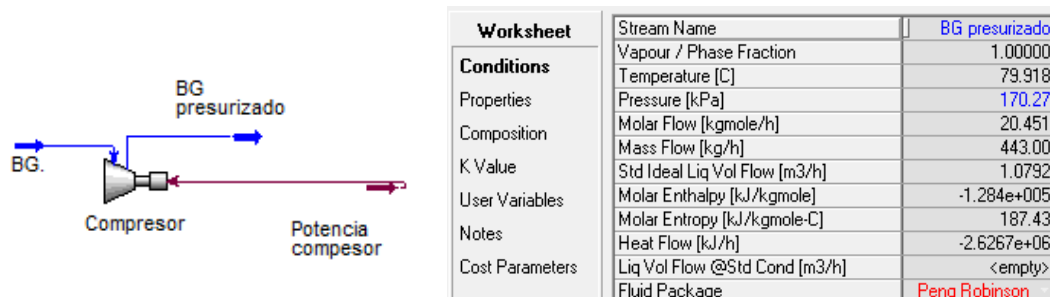


Figura 37. Esquema de la simulación del paso de biogás por el compresor

**Presión.** La presión del biogás deberá ser igual a la del gas natural saliendo de la válvula reductora de presión, o sea, 10 psig.

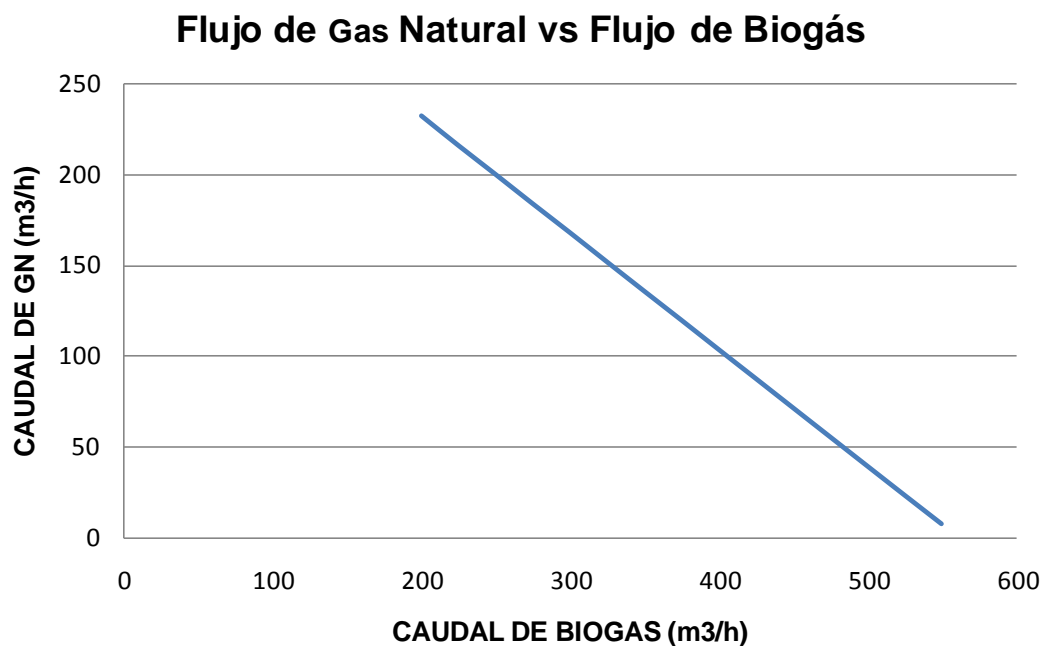
**Flujo.** Debido a la variación constante de generación de biogás por parte de los reactores, es necesario, analizar el comportamiento del tren de combustión combinado, con distintos flujos de biogás de alimentación. Para llevar a cabo dicho análisis se necesitó ayuda de la simulación, en la cual - una vez hecho el montaje en el software HYSYS- operando la caldera con gas natural, la cual presentaba unas condiciones de generación de vapor, temperatura de salida de los gases, agua de entrada, entre otras.

Posteriormente se hizo montaje del tren de combustión combinado; donde se fijó el flujo de biogás y en un proceso de prueba y error, se fue adicionando progresivamente gas natural, hasta lograr conseguir las mismas condiciones

de operación que tenía inicialmente la caldera cuando era alimentada con gas natural.

En la tabla 16 se presentan los datos obtenidos en la simulación de la mezcla biogás - gas natural, mediante la cual, se determinó el flujo de gas natural necesario para mantener las condiciones de la caldera, al variar el flujo de biogás y los reactivos de la cámara de combustión.

En la figura 38 se puede apreciar la relación entre el consumo de gas natural y el biogás aprovechado.



**Figura 38. Caudal de gas natural vs caudal de biogás**

**Tabla 16. Resultados de la mezcla biogás - gas natural.**

CAUDAL DE BIOGAS (m <sup>3</sup> /h)	CAUDAL DE GAS NATURAL (m <sup>3</sup> /h)	REACTIVOS
200	231,84	0,8653CH <sub>4</sub> +0,021277N <sub>2</sub> +0,0014678O <sub>2</sub> +0,082304CO <sub>2</sub> +0,02524059C <sub>2</sub> H <sub>6</sub> +0,00436028C <sub>3</sub> H <sub>8</sub>
225	215,46	0,858143CH <sub>4</sub> +0,022481N <sub>2</sub> +0,00163195O <sub>2</sub> +0,090557CO <sub>2</sub> +0,023182C <sub>2</sub> H <sub>6</sub> +0,00400466C <sub>3</sub> H <sub>8</sub>
250	199,55	0,8654CH <sub>4</sub> +0,02364N <sub>2</sub> +0,00179O <sub>2</sub> +0,098516CO <sub>2</sub> +0,0211967C <sub>2</sub> H <sub>6</sub> +0,0036617C <sub>3</sub> H <sub>8</sub>
275	183,42	0,84437CH <sub>4</sub> +0,02478179N <sub>2</sub> +0,0019455O <sub>2</sub> +0,1063247CO <sub>2</sub> +0,0192489C <sub>2</sub> H <sub>6</sub> +0,0033252C <sub>3</sub> H <sub>8</sub>
300	167,57	0,83777CH <sub>4</sub> +0,02588N <sub>2</sub> +0,002096O <sub>2</sub> +0,11388CO <sub>2</sub> +0,01736C <sub>2</sub> H <sub>6</sub> +0,0029996C <sub>3</sub> H <sub>8</sub>
325	151,41	0,83127CH <sub>4</sub> +0,02697N <sub>2</sub> +0,0022438O <sub>2</sub> +0,121325CO <sub>2</sub> +0,0155071C <sub>2</sub> H <sub>6</sub> +0,0026788C <sub>3</sub> H <sub>8</sub>
350	135,36	0,82495CH <sub>4</sub> +0,02803N <sub>2</sub> +0,002388O <sub>2</sub> +0,12857CO <sub>2</sub> +0,013699C <sub>2</sub> H <sub>6</sub> +0,00236657C <sub>3</sub> H <sub>8</sub>
375	119,43	0,818798CH <sub>4</sub> +0,029055N <sub>2</sub> +0,00252792O <sub>2</sub> +0,1356128CO <sub>2</sub> +0,01194316C <sub>2</sub> H <sub>6</sub> +0,0020632C <sub>3</sub> H <sub>8</sub>
400	103,32	0,82495CH <sub>4</sub> +0,02803N <sub>2</sub> +0,002388O <sub>2</sub> +0,12857CO <sub>2</sub> +0,013699C <sub>2</sub> H <sub>6</sub> +0,00236657C <sub>3</sub> H <sub>8</sub>
425	87,33	0,80686CH <sub>4</sub> +0,0310487N <sub>2</sub> +0,0027997O <sub>2</sub> +0,149279CO <sub>2</sub> +0,008534276C <sub>2</sub> H <sub>6</sub> +0,00147428C <sub>3</sub> H <sub>8</sub>
450	71,28	0,8010977CH <sub>4</sub> +0,032012N <sub>2</sub> +0,00293O <sub>2</sub> +0,155882CO <sub>2</sub> +0,006887C <sub>2</sub> H <sub>6</sub> +0,0011897C <sub>3</sub> H <sub>8</sub>
475	55,26	0,795469CH <sub>4</sub> +0,03295N <sub>2</sub> +0,00305916O <sub>2</sub> +0,162328CO <sub>2</sub> +0,005279C <sub>2</sub> H <sub>6</sub> +0,000912C <sub>3</sub> H <sub>8</sub>
500	39,24	0,78996CH <sub>4</sub> +0,033872N <sub>2</sub> +0,003184O <sub>2</sub> +0,1686297CO <sub>2</sub> +0,003707C <sub>2</sub> H <sub>6</sub> +0,000640C <sub>3</sub> H <sub>8</sub>
525	23,26	0,784595CH <sub>4</sub> +0,034769N <sub>2</sub> +0,0033068O <sub>2</sub> +0,17478CO <sub>2</sub> +0,0021729C <sub>2</sub> H <sub>6</sub> +0,00037537C <sub>3</sub> H <sub>8</sub>
550	7,38	0,779375CH <sub>4</sub> +0,035641N <sub>2</sub> +0,0034257O <sub>2</sub> +0,18075835CO <sub>2</sub> +0,00068185C <sub>2</sub> H <sub>6</sub> +0,0001178C <sub>3</sub> H <sub>8</sub>

2. **Cámara de combustión.** Para simular la cámara de combustión (figura 39) se utilizó un reactor adiabático, en el cuál se lleva a cabo la mezcla aire - combustible, además de la combustión; mediante esta aplicación se podrá determinar:

- Composición de los productos de la combustión.
- Temperatura de llama adiabática.
- Entalpía de combustión.

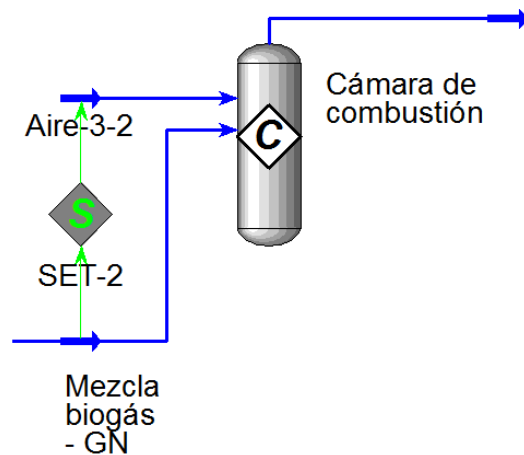


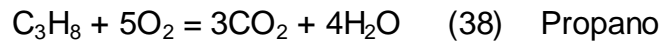
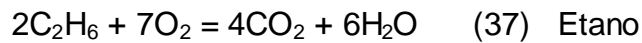
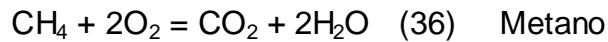
Figura 39. Esquema del montaje para la simulación de la cámara de combustión

Los datos requeridos para poder llevar a cabo esta aplicación son:

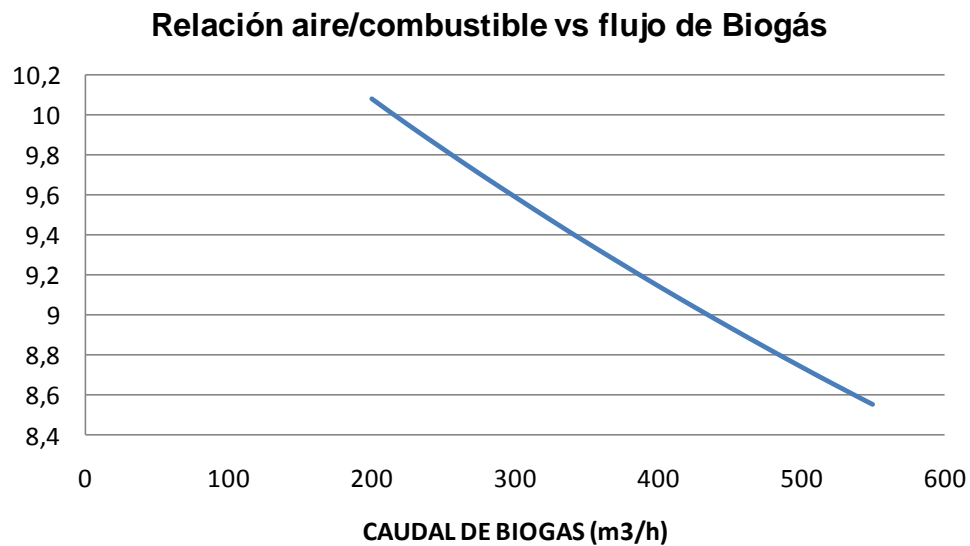
- **Composición de la mezcla biogás - gas natural** (Suministrada por la cámara de mezclado).
- **Relación aire combustible.** La relación aire combustible está definida como:

$$AC = \frac{m_{aire}}{m_{combustible}} \quad (35)$$

La mezcla aire combustible se determino con un exceso del 15% de aire el cual es el recomendado<sup>19</sup>, el balance de masa de los gases combustibles es:



En la tabla 16 se muestra la relación aire/combustible calculada para las distintas mezclas efectuadas y en la figura 40 se puede apreciar el efecto del caudal de biogás en la relación aire/combustible.



**Figura 40. Curva Relación aire/combustible vs Caudal de biogás**

<sup>19</sup> **GONZALO RODRIGUEZ GUERRERO.** Operación de calderas industriales, tratado práctico operacional, primera edición, Ecoe ediciones 2000.

**Temperatura de llama adiabática.** Como la aplicación utilizada para la representación de la cámara de combustión es adiabática, la temperatura resultante de los productos sería nuestra temperatura adiabática, en la tabla 17 se muestran los resultados obtenidos para cada uno de los flujos de biogás analizados.

**Entalpia de combustión.** Representa la cantidad de calor liberada durante un proceso de combustión de flujo estable cuando 1 kmol (o kg) de combustible se quema por completo a una temperatura y presión específicas.

En la ecuación 44 podemos ver que la entalpia de combustión, está definida como la diferencia entre la entalpia de los productos en un estado específico y la entalpia de los reactivos en el mismo estado para una reacción completa. Las entalpias de combustión resultantes de la combustión de las mezclas respectivas, se recopilaron en la tabla 17

$$h_c = H_{prod} - H_{reac} \quad (\text{KJ/Kg combustible}) \quad (39)$$

$h_c = \text{Entalpia de combustión.}$

**3. Enfriador.** El software HYSYS tiene dos tipos de corrientes, unas que son de masa en las cuales vienen representadas las propiedades físicas de los fluidos como flujo, presión, temperatura, etc. y otras que son de energía, que tienen solo valor matemático, es decir, que intervienen solo en los balances de energía; razón por la cual se implementó esta aplicación, con el fin de considerar las pérdidas de energía presentes en la generación de vapor.

**Tabla 17. Temperatura de llama adiabática y Entalpia de combustión de la mezcla biogás - gas natural**

<b>CAUDAL DE BIOGAS (m<sup>3</sup>/h)</b>	<b>CAUDAL DE GAS NATURAL (m<sup>3</sup>/h)</b>	<b>RELACIÓN AIRE / COMBUSTIBLE</b>	<b>ENTALPIA DE COMBUSTION (KJ/kg)</b>	<b>TEMPERATURA DE LLAMA ADIABATICA (°C)</b>
200	231,84	10,08	-4860,89	1820,76
225	215,46	9,95	-4917,82	1818,71
250	199,55	9,83	-4971,09	1816,69
275	183,42	9,71	-5021,82	1814,65
300	167,57	9,59	-5069,49	1812,64
325	151,41	9,48	-5115,13	1810,62
350	135,36	9,36	-5158,30	1808,60
375	119,43	9,25	-5199,08	1806,60
400	103,32	9,15	-5238,12	1804,58
425	87,33	9,04	-5275,02	1802,59
450	71,28	8,94	-5310,22	1800,59
475	55,26	8,84	-5343,65	1798,60
500	39,24	8,74	-5397,55	1796,61
525	23,26	8,65	-5405,70	1794,63
550	7,38	8,55	-5434,31	1792,67

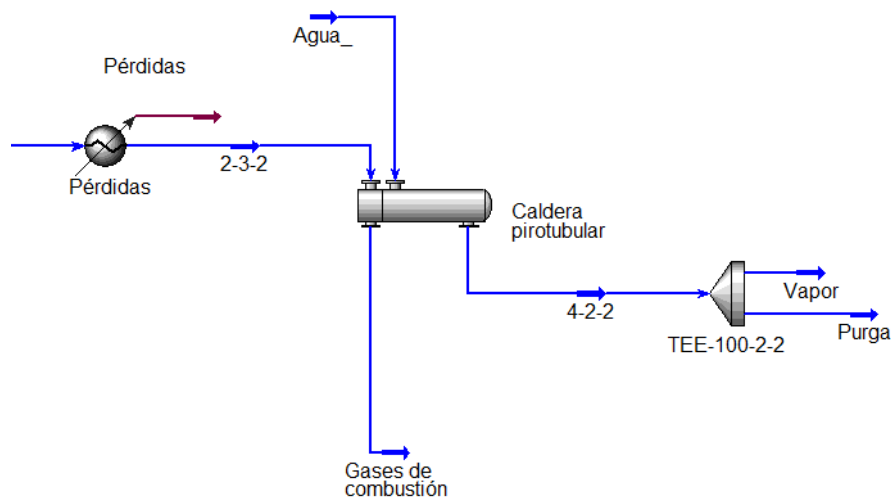
**4. Caldera pirotubular.** Para la simulación de este proceso se hizo uso de un intercambiador de casco y tubos, para el cual el software posee dos formas de configuración, a saber:

- a. Mediante la asignación de los datos de entrada y de salida el software configura dicha aplicación (coeficiente global de transferencia de calor y caída de presión en el intercambiador), efectuando los balances de masa y energía correspondientes, en el intercambiador.

- b. Con los parámetros de diseño de la caldera, como número de tubos, diámetro de los tubos, etc., el software configura esta aplicación.

Debido a que la simulación está basada en datos operativos, para esta aplicación se utilizó la configuración (a).

A continuación se muestra el montaje de la simulación de la caldera pirotubular.



**Figura 41. Esquema del montaje de la simulación de la caldera pirotubular.**

La caldera marca DISTRAL con que cuenta la Cervecería Bavaria Bucaramanga (figura 42), mediante la cual se va a aprovechar el biogás es de tipo pirotubular, con una capacidad de 500 BHP, una presión de diseño de 135 psia, fue construida en 1986 y actualmente funciona con gas natural.

Con el fin de que la mezcla a efectuar, no afecte la capacidad de la caldera, se recolectaron los parámetros de operación, los cuales se pueden apreciar en la tabla 19 y en base a estos, se llevó a cabo la configuración de los componentes de la simulación.

**Purga continua.** Se tomo la purga máxima permitida 590 kg/h, según el catalogo del sistema de control de purga spirax sarco 3200.



**Figura 42. Caldera pirotubular**

**Agua de alimentación.** Este dato lo configura HYSYS mediante un balance de masa, con los datos de vapor generado y la purga de alimentación.

La temperatura será el promedio del registrado durante su operación, siendo esta de 116 °C y del mismo modo su presión será de 232.08 psig.

**Gases de combustión.** La temperatura a la cual salen los gases de combustión es el promedio de la registrada durante su operación en el año 2008, la cual es 181.3 °C

**Tabla 19. Parámetros operativos año 2008**

MES	VAPOR				GAS NATURAL				GASES	
	FLUJO DE VAPOR (Lb/h)	PRESIÓN DOMO (psi)	TEMPERATURA DISTRIBUIDOR (°C)	PRESIÓN DISTRIBUIDOR (PSI)	FLUJO (Lb/h)	PORCENTAJE APERTURA VÁLVULA	PRESIÓN DE ENTRADA	PRESIÓN DEL QUEMADOR	PRESIÓN SALIDA CALDERA	TEMPERATURA SALIDA DE LOS GASES
ENERO	6584,55	116,37	160,71	106,92	704,16	61,66	52,67	2,96	0,90	166,88
FEBRERO	8954,95	121,20	163,27	112,17	937,15	74,11	50,95	3,01	1,34	184,44
ABRIL	9441,72	117,27	161,36	106,95	918,78	75,29	45,42	3,11	1,24	181,00
MAYO	6318,11	117,27	162,40	108,76	653,81	57,33	46,58	2,56	0,90	178,73
JUNIO	6717,70	117,27	163,99	108,69	695,89	56,28	47,79	3,02	0,90	179,19
JULIO	5516,75	117,27	161,00	110,83	624,94	58,17	51,45	2,61	0,90	181,22
AGOSTO	5210,90	117,27	161,06	108,63	507,17	52,20	46,55	2,51	0,89	178,42
NOVIEMBRE	5891,32	117,27	160,13	98,36	713,26	62,73	48,43	2,76	0,89	205,71

**Vapor generado.** De los datos recolectados de la operación de la caldera, para la simulación se tomo la media del vapor generado en el año 2008 (ver figura 43) cuyo valor es 3141 kg/h.

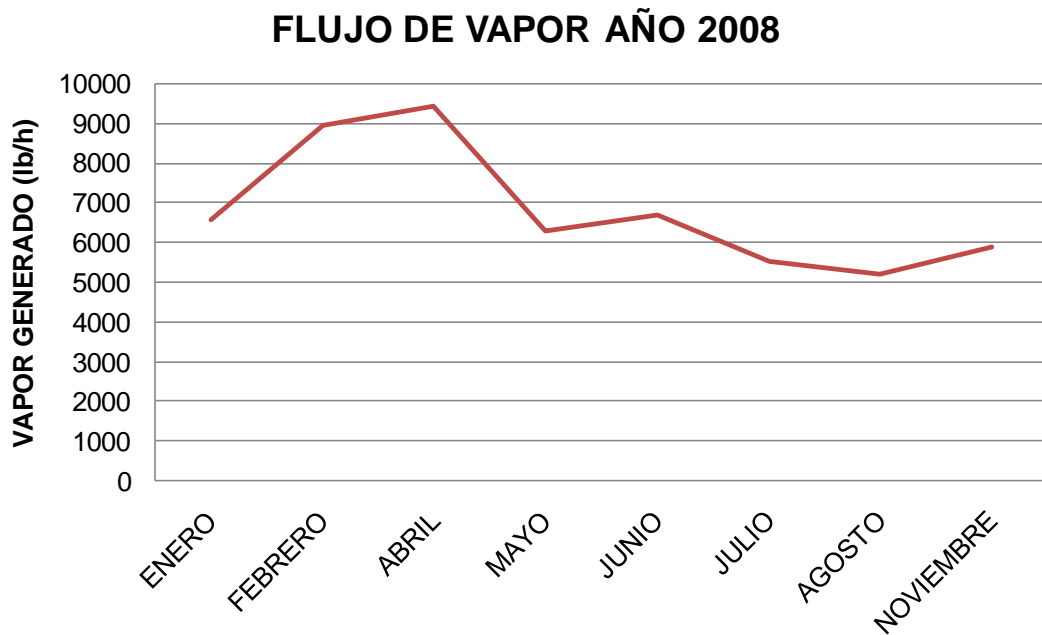


Figura 43. Flujo de vapor generado año 2008

## 6.2 Diseño de la cámara de mezcla

### **CODIGO ASME SECCION VIII DIVISION 1**

En esta parte del código se establecen los requerimientos mínimos para el diseño, fabricación e inspección y para obtener la certificación autorizada de la ASME para los recipientes a presión.

Con base en esto se ha dividido en:

- Subsección A. Parte UG que cubre los requerimientos generales.
- Subsección B. Requerimientos de fabricación
- Subsección C. Requerimientos de materiales

- Parte UCS.- Para recipientes construidos con acero al carbón y de baja aleación.
- Parte UNF.- Para los construidos con materiales no ferrosos.
- Parte UCI.- Para los construidos con hierro fundido.
- Parte UCL.- Para los construidos con una placa "clad" integral o con recubrimiento tipo "lining".
- Parte UCD.- Para los construidos con hierro fundido dúctil.
- Parte UNT.- Para los construidos con aceros ferríticos con propiedades de tensión mejoradas por tratamiento térmico.
- Parte ULW.- Para los fabricados por el método de multicapas.
- Parte ULT.- Para los construidos con materiales con esfuerzos permisibles más altos a bajas temperaturas.

### **Corrosión - UG 25**

- Los recipientes que estén supeditados a adelgazamiento por corrosión, erosión, o abrasión mecánica tendrán que ser protegidos para lograr la vida útil deseada, mediante un incremento adecuado en el espesor del material sobre el calculado mediante el uso de éstas fórmulas de diseño, o usando algún otro método adecuado de protección.
- El material utilizado para estos propósitos no deberá ser del mismo espesor para todas las partes del recipiente, se espera que allá diferentes tasas de ataque corrosivo para las partes del recipiente.
- El espesor adicional varía de acuerdo a la proporción de ataque esperada.
- Puede omitirse el espesor adicional si experiencias anteriores aseguran la ausencia o debilidad de corrosión en ciertas partes.

- Por medio de agujeros perforados externamente pero que no traspasan el casco, se puede saber el momento en que la corrosión ha rebajado el espesor a un nivel inaceptable, pues se hará notable un escape a través del agujero.

Debido a que el material del recipiente sometido a presión interna, va a estar sometido a sustancias corrosivas, se determino utilizar para este fin un acero inoxidable AISI 304 recocido (S30400)<sup>20</sup>, con las siguientes características:

Resistencia a la tracción = 586 Mpa =85 Ksi

Resistencia a la fluencia = 241 Mpa = 35 Ksi

### **Espesor del recipiente sometido a presión interna UG – 27**

Para cascos sometidos a presión interna, el espesor no será menor al calculado por medio de las siguientes fórmulas, cuya simbología está representada por:

t = Espesor mínimo requerido para el casco sin incluir tolerancia a la corrosión, en pulgadas (mm)

P = Presión de diseño, psi (KPa) = 10 psi

R = Radio interior del casco sin incluir tolerancia a la corrosión, en pulgadas (mm) = 150 mm = 6 pulg (asumido).

L = Radio interior de la tapa semiesférica, mm = 150 mm. = 6 pulg

---

<sup>20</sup> **ROBERTH L. MOTT** Diseño de elementos de máquinas, segunda edición, apéndice 6. Prentice Hall

H = Distancia entre tapas, 500 mm (20 pulg).

S = Máximo valor de esfuerzo admisible, psi (KPa) = 85 Ksi

E = Eficiencia de la junta = 0.45 (uw-12 maximum allowable joint efficiencies 1,5 for arc and gas welded joints -ver anexos-)

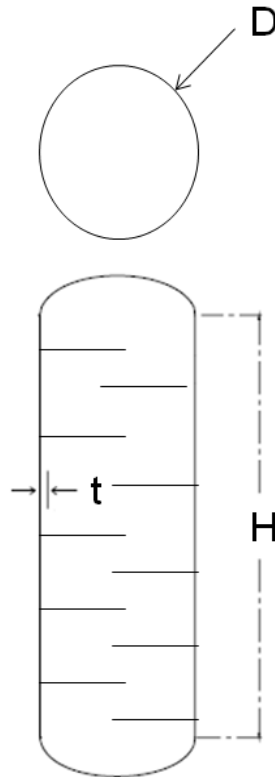


Figura 44. Esquema del recipiente a presión (Cámara de mezcla)

### Recipientes cilíndricos

El espesor del recipiente sometido a presión interna no será menor al encontrado por medio de las siguientes formulas. Además, esto aplicara para cualquiera de las cargas listadas en UG-22: El espesor mínimo o la máxima presión de trabajo admisible en el recipiente cilíndrico serán: el espesor de más grande o la presión inferior dado por (1), (2) o (3).

**Esfuerzo circunferencial:** Las siguientes fórmulas se aplican si el espesor no excede la mitad del radio interior o P no excede 0.385 SE

$$t = \frac{PR}{SE-0.6P} \quad O \quad P = \frac{SEt}{R+0.6t} \quad (40)$$

Reemplazando términos tenemos:

$$t = 0.001 \text{ mm}$$

**1. Esfuerzo longitudinal:** Las siguientes fórmulas se aplican si el espesor no excede la mitad del radio interior o P no excede 1.25 SE:

$$t = \frac{PR}{2SE+0.4P} \quad O \quad P = \frac{2SEt}{R-0.4t} \quad (41)$$

Reemplazando términos tenemos:

$$t = 0.00077 \text{ mm}$$

## **UG-32 FORMA DE CABEZAS, Y SECCIONES, EJERCIENDO PRESIÓN SOBRE EN LADO CÓNCAVO**

**2. Cabezal semiesférico:** Cuando el espesor de un cabezal semiesférico no exceda 0.356L, o P no exceda 0.665SE, se aplicarán las siguientes fórmulas:

$$t = \frac{PL}{2SE+0.2P} \quad O \quad P = \frac{2SEt}{L-0.2t} \quad (42)$$

Reemplazando términos tenemos:

$$t = 0.000771 \text{ mm}$$

Buscando tener el tiempo necesario de residencia de la mezcla en el recipiente a presión y teniendo en cuenta que la altura disponible para la instalación de la cámara de mezcla son 105 cm (ver figura 45), se dispuso de las siguientes características:

$$D = 300 \text{ mm.}$$

$$H = 500 \text{ mm.}$$

$$t = 0.75 \text{ mm (calibre 22)}$$



Figra 45. Lugar de instalación cámara de mezcla

## 7 ANÁLISIS DE LAS EMISIONES

Las principales características de la biomasa radican en que son compuestos orgánicos formados por carbono reducido, poseen carácter energético, no son de origen fósil y son una fuente renovable. Como fuente de energía presenta una enorme versatilidad, permitiendo obtener mediante diferentes procedimientos tanto combustibles sólidos como líquidos o gaseosos.

Para comprender la ventaja del uso de la biomasa -en nuestro caso básicamente cebada- como fuente alternativa de energía es importante comprender el ciclo del carbono. Por medio de la fotosíntesis las plantas captan  $\text{CO}_2$  y fijan carbono; pero al mismo tiempo los árboles en su respiración eliminan también al medio ambiente  $\text{CO}_2$ .

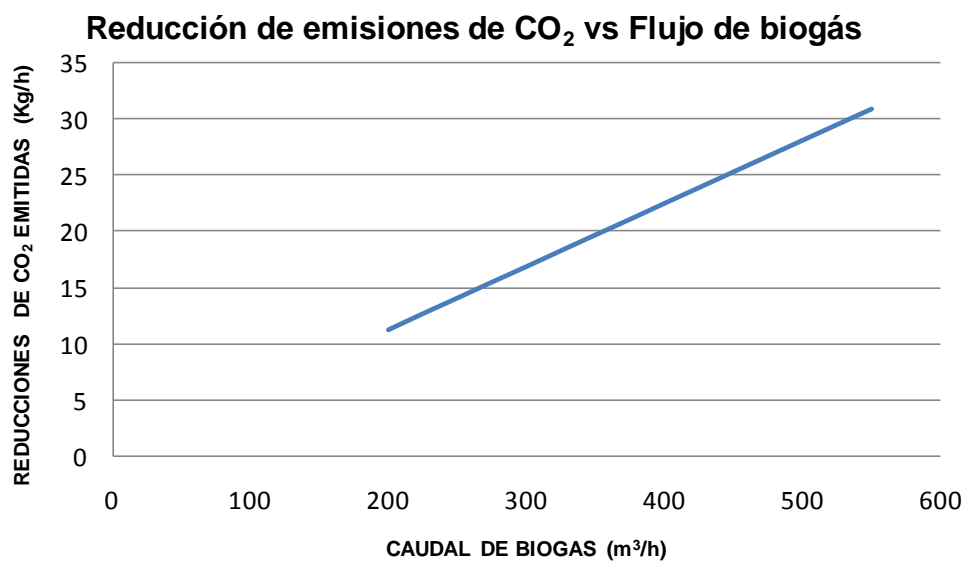
La energía que tiene la biomasa es energía captada del sol. Cuando los árboles mueren o se talan y se dejan a la intemperie, sufren un proceso de descomposición que genera fundamentalmente  $\text{CH}_4$  y  $\text{CO}_2$ . Si el material producido por la fotosíntesis se emplea como combustible genera,  $\text{CO}_2$  cuando la combustión es completa, pero cuando la combustión es incompleta los gases de escape tienen un alto grado de  $\text{CO}$  y  $\text{CH}_4$ . En términos generales, puede observarse que quemar o dejar que la biomasa forestal se descomponga produce sobre el medio ambiente el mismo efecto en cuanto al balance de carbono.

Teniendo en cuenta el consumo de gas natural actual (426,38 Kg/h) junto con los últimos tres muestreos isocinéticos efectuados (tabla 20), podemos decir, que el promedio de la cantidad de  $\text{CO}_2$  emitido a la atmósfera es 31,455 Kg/h.

**Tabla 20. Resultados del muestreo isocinético**

	Prueba 1	Prueba 2	Prueba 3
O <sub>2</sub>	3,60%	15,60%	4,20%
CO <sub>2</sub>	9,80%	3,00%	9,40%
CO	1 ppm	682 ppm	1 ppm
EXCESO DE AIRE	18,52	260,84	22,38

La figura 42 nos muestra el estimativo de la reducción de emisiones de CO<sub>2</sub>, según el flujo de biogás aprovechado.



**Figura 46. Tendencia de la reducción de emisiones en función del biogás aprovechado**

## CONCLUSIONES

Mediante el **Diseño de un sistema para el aprovechamiento del biogás aplicada a la producción de vapor** se consiguen:

- Aprovechar la energía desperdiciada durante la quema del biogás a la atmósfera, lo cual redundara en una disminución en el consumo de gas natural, el cual estaría entre 35% - 97%, según sea el biogás generado en los reactores.
- Las emisiones de CO<sub>2</sub> fósil emitido a la atmosfera, que actualmente son 31,455 Kg/h, se reducirán entre 11,000 y 30,000 Kg/h, según sea el biogás generado.

Para la implementación de dicho sistema será necesario:

- 350 m de tubería de 4 pulgadas de polietileno de media densidad.
- Un soplador bilobular marca TUTHILL, modelo 5006, el cual presenta las siguientes características:

**Presión mínima de succión:** Presión ambiental

**Presión de descarga:** 12 psig

**Potencia:** 15.75 KW (21 BHP)

**Velocidad:** 1760 rpm.

**Flujo:** 380 m<sup>3</sup>/h (224 cfm)

**Diámetro de en la descarga:** 4 pulg.

- Un sistema de deshumidificación por adsorción, el cual cuenta con una torre de sílica gel con 0.846 m de diámetro y una altura de 3.81 m;

mediante la cual se secará un flujo de biogás saturado de  $400 \text{ m}^3/\text{h}$ , con una densidad de 0,96447.

- Una cámara de mezclado en acero inoxidable AISI 340, con un diámetro de 300 mm, una altura de 500 mm y un espesor calibre 22, además, se le instalarán unas placas en su interior, con el fin de aumentar el tiempo de residencia de los gases combustibles y poder obtener una mezcla más homogénea.

## RECOMENDACIONES

- No es necesaria la implementación de un sistema de purificación de biogás, debido a la baja concentración de  $H_2S$ , sin embargo, una vez hecho el montaje de dicho diseño, se recomienda implementar una rutina de mantenimiento preventivo al soplador, con el fin de corroborar que la concentración de  $H_2S$  no afecta su normal funcionamiento.
- Si se perciben síntomas de corrosión en el soplador o un aumento en las incrustaciones en la caldera, implementar un sistema de purificación de  $H_2S$  de absorción en base líquida.
- Mejorar la instrumentación del proceso de tratamiento secundario.
- Revisar el sistema de control de la mezcla aire combustible de la caldera, debido a que presenta excesos de aire considerables.
- Instalar un variador de velocidad en el soplador con el fin de economizar energía.
- Implementar un sistema de control de flujo en la cámara de mezcla, con el fin de mantener la producción de vapor requerida por el sistema.

## BIBLIOGRAFÍA

- **Kohl, A y Neilsen, R. Gas purification.** Golf Publishing Company, Houston, Texas, 1997.
- **JOHN M. CAMPBELL. Gas conditioning and processing,** seventh edition, volume I, Campbell Petroleum Series 1994
- **GAS PROCESSORS SUPPLIERS ASSOCIATION (GPSA)** Twelfth Edition, Engineering Data Book
- **CLAUDIO MATAIX, Mecánica de fluidos y máquinas hidráulicas** Ediciones del Castillo S.A
- **Yunus Cengel and Michael Boles. Termodinámica,** Cuarta Edición, McGraw Hill 2002
- **Jhon J. Carroll Natural Gas Hydrates:** Guide for Engineers Golf Publishing Company, Houston
- **Wallas, S.M. Chemical Process Equipment. Selection and Design.** Butterworth-Heinemann. Newton MA. 1990
- **GONZALO RODRIGUEZ GUERRERO. Operación de calderas industriales,** tratado práctico operacional, primera edición, Ecoe ediciones 2000
- **CODIGO ASME SECCION VIII DIVISION 1**

- **ROBERTH L. MOTT** **Diseño de elementos de máquinas**, segunda edición. Prentice Hall.