



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO**

---

---

**FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES**

**ZARAGOZA**

**Propuesta de una Planta de Producción de  $\text{CH}_4$  por Metanación de  $\text{CO}_2$  a Través de recolección de Biogás en Sitios de Disposición Final Clausurados para Producir Energía.**

**T E S I S**

**QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:**

**“INGENIERO QUÍMICO”**

**P R E S E N T A N:**

**Pablo Reyes Mendoza**

**Ian Tapia Pérez**

**Director de tesis: I.Q. David Salazar Macias**

**Asesores de tesis: M. en C. Francisco Javier Almazán Ruiz**

**Dr. Luís Alberto Verduzco Mora**

**México, Ciudad de México, 2022**



Universidad Nacional  
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

**Biblioteca Central**



**UNAM – Dirección General de Bibliotecas**  
**Tesis Digitales**  
**Restricciones de uso**

**DERECHOS RESERVADOS ©**  
**PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL**

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

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

## AGRADECIMIENTOS

### DE PABLO REYES MENDOZA:

Es para ti que fuiste mi inspiración, siempre te pensé. Al escuchar que nada ni nadie pudo detener el camino a tus sueños, las batallas solo fueron experiencias para mejorar en éste efímero mundo. Siempre existes en mis memorias.

Sería una tesis, el agradecimiento a las personas que estoy pensando, porque tú sabes que estuviste en este recorrido, si leen las líneas mencionadas se darán cuenta de que se encuentran en ellas.

**¡Muchas Gracias!**

### DE IAN TAPIA PÉREZ

A mis padres por haberme forjado en la persona que soy en la actualidad, por haberme apoyado en cada decisión que me permitió llegar a este momento, orientándome y ayudándome para ser un ser humano responsable y con principios.

A mi hermano Osmar por motivarme a formarme como un profesional y a mi hermano Jesús que desde el cielo me ha apoyado en todo.

A toda mi familia por haberme apoyado, orientado y motivarme a salir adelante a pesar de los obstáculos que he tenido y tendré en el futuro, que a pesar de las adversidades me han demostrado que, con suficiente fuerza de voluntad, se puede salir adelante y dejar algo mejor para los más jóvenes que en su respectivo tiempo, tendré la obligación de ayudar y orientar para ser mejores cada vez.

Y un especial agradecimiento a mi Universidad, que me dio la oportunidad de formarme desde hace tantos años, de haber conocido a unos excelentes futuros profesionistas, los cuales me han ayudado y apoyado para ser cada vez mejor en lo que hago; así como de haberme dado la oportunidad de conocer a unos excelentes profesores que me dieron la formación y los motivos suficientes para decir con orgullo **“Por mi raza hablará el espíritu”**.

## INDICE

LISTA de ABREVIATURAS DE UNIDADES Y SIGLAS.....	6
RESUMEN.....	8
INTRODUCCIÓN.....	9
OBJETIVOS.....	11
CAPÍTULO I: ANTECEDENTES.....	12
1.1. Prados de la Montaña.....	13
1.2. Monitoreo de Biogás.....	16
1.3. Características del Sitio de Disposición Final.....	17
1.4. Metanación.....	18
1.5. Catalizadores.....	19
1.6. Técnicas de caracterización para los catalizadores.....	20
1.7. Catalizadores propuestos.....	25
CAPITULO II: FACTORES SOCIALES E IMPACTO AMBIENTAL.....	27
2.1. Factores sociales.....	27
2.2. CO <sub>2</sub> y cambio climático.....	28
2.3. Energías renovables.....	28
CAPITULO III: PRUEBAS DE CAMPO Y LABORATORIO.....	33
3.1. Medición y monitoreo de Biogás.....	33
3.2. Muestreo de Biogás.....	37
3.3. Obtención de O <sub>2</sub> por electrólisis.....	40
3.4. Oxidación de Biogás y su caracterización.....	43
3.5. Obtención de H <sub>2</sub> para Metanación.....	47
3.6. Elaboración de diseño del Reactor de lecho fluidizado.....	48
3.6.1 Comportamiento hidrodinámico.....	53
3.6.2 Desactivación del catalizador.....	54

CAPÍTULO IV. INGENIERÍA BÁSICA.....	56
4.1. Ubicación del proyecto.....	56
4.2. Bases de diseño.....	57
4.2.1. Generalidades.....	57
4.2.2. Capacidad de la planta y factor de servicio.....	57
4.2.3. Previas expansiones futuras.....	58
4.2.4. Condiciones de alimentación a Turbina GT-01.....	58
4.2.5. Condiciones de alimentación al Reactor DC-01.....	59
4.2.6. Condiciones de productos.....	59
4.2.7. Eliminación de desechos.....	60
4.2.8. Condiciones climatológicas.....	60
4.3. Criterios de diseño.....	60
4.3.1. Criterios básicos de diseño de procesos.....	61
4.3.2. Criterios de diseño de equipo.....	62
4.3.3. Criterios generales de diseño.....	63
4.4. Modelo mexicano del Biogás.....	63
4.5. Balances de masa.....	70
4.6. Descripción del proceso.....	72
4.6.1. Etapa I Generación de energía.....	72
4.6.2. Etapa II Metanación.....	72
4.7. Requerimientos de servicios auxiliares.....	73
4.8. Equipo de proceso.....	75
4.9. Líneas del proceso.....	75
4.10. Diagrama de flujo del proceso.....	77
4.11. Diagrama de tuberías e instrumentación.....	78
4.12. Filosofías de operación del proceso.....	81

4.13.1. Filosofías de operación para remoción de H <sub>2</sub> S.....	81
4.13.2. Filosofías de operación para Combustión de Biogás.....	82
4.13.3. Filosofías de operación para tanques de almacenamiento en general. ....	84
4.13.4. Filosofías de operación para el Reactor de Metanación.....	84
4.13.5. Recuperación de Fe(OH) <sub>3</sub> .....	85
4.14. Especificaciones de energía.....	85
CAPÍTULO V. NORMATIVIDAD Y FILOSOFÍA DE CALIDAD.....	90
5.1. Identificación de riesgos.....	90
5.2. Responsabilidad ambiental.....	91
5.3. Normatividad aplicable.....	93
RESULTADOS.....	98
CONCLUSIONES.....	98
GLOSARIO.....	99
Bibliografía.....	102
ANEXOS.....	105
Sección A Balance de masa.....	105
Sección B Diseño de equipos.....	109
Sección C Perfil Hidráulico.....	121

## LISTA de ABREVIATURAS DE UNIDADES Y SIGLAS.

*°C: Grados centígrados*

*°F: Grados Fahrenheit*

*°R: Grados Rankine*

*K: Grados Kelvin*

*Kg: Kilogramos*

*g: Gramos*

*nm: Nanómetros*

*m: Metros*

*m<sup>3</sup>: Metros cúbicos*

*cm: Centímetros*

*mM: Milímetros*

*cm<sup>3</sup>: Centímetros cúbicos*

*V: Volumen*

*ft: Pies*

*L: Litros*

*mL: Mililitros*

*h: Horas*

*atm: Atmosfera*

*“: in: Pulgadas*

*N°: Número de Tapón de matraz*

*%: Porcentaje*

*%V: Porcentaje Volumen*

*ppm: Partes por millón*

*rpm: Revoluciones por minuto*

*N: Normatividad*

*MNM: Metros sobre el Nivel del Mar*

*c/u: Cada uno*

*Volt: Unidad de energía*

*kJ/mol: Kilojulios por hora*

*Kg/m<sup>3</sup>: Kilogramo por metro cubico*

*Kg/Día: Kilogramo por día*

*g/mol: Gramos por mol*

*g/cm<sup>3</sup>: Gramos por centímetros cúbicos*

*g/h: Gramos por hora*

*mol/h: Mol por hora*

*kW/h: Kilovatios por hora*

*ppm/año: partes por millón al año*

*m<sup>3</sup>/año: metros cúbicos por año*

*m<sup>3</sup>/Día: Metros cúbicos por día*

*m<sup>3</sup>/h: Metros cúbicos por hora*

*Ton/año: Toneladas por año*

*Km/h: Kilómetros por hora*

*Kg/cm<sup>2</sup>: Unidad de presión*

*ft/s: Unidad de velocidad de flujo*

*μs/cm: Conductividad eléctrica*

*Θ: Angulo theta de orbital atómico*

*MMB: Modelos Mexicano del Biogás*

*SDFC: Sitio de Disposición Final*

*Clausurado*

*TEMA: Tubular Exchanger Manufacturers Association*

*ASME: The American Society of Mechanical Enngineers*

*PLG: Plano de Localización General*

*CFE: Comisión Federal de Electricidad*

*PEMEX: Petróleos Mexicanos*

### Alfabeto griego

alfa	A α	iota	I ι	rho	P ρ
beta	B β	kappa	K κ	sigma	Σ σ ζ
gamma	Γ γ	lambda	Λ λ	tau	T τ
delta	Δ δ	mi	M μ	ípsilon	Υ υ
épsilon	E ε	ni	N ν	fi	Φ φ φ
dseta	Z ζ	xi	Ξ ξ	ji	X χ
eta	H η	ómicron	O o	psi	Ψ ψ
theta	Θ θ	pi	Π π	omega	Ω ω

## RESUMEN.

En este trabajo se propone el desarrollo de una planta modular, tomando en cuenta dos procesos principales, primero; la generación de energía eléctrica en una microturbina a partir de la combustión de los gases producidos de manera natural de los Residuos Sólidos Urbanos en un Sitio de Disposición Final Clausurado, segundo: con los gases de la Combustión salientes de la turbina producir Metano en un Reactor catalítico.

La primera etapa consiste en la selección de un Sitio de Disposición Final Clausurado que produzca Biogás con las características necesarias para producir energía eléctrica, el Biogás que se recolecta se tiene que filtrar para quitar el contenido de ácido sulfhídrico, ya que éste es corrosivo para los equipos, tuberías e instrumentos y así poder entrar a la Turbina.

El Biogás tiene las características del gas Metano, teniendo las concentraciones del Biogás se realizó la Combustión en laboratorio para determinar también la concentración del gas después de la quema y la reacción fue completa. Determinando que es posible generar energía eléctrica con el Biogás.

Segundo, los gases de Combustión a la salida de la Turbina pasan al Reactor catalítico, donde se lleva a cabo la reacción de Metanación para producir Metano a condiciones de operación adecuadas para enviar el producto a la Turbina.

De la reacción de Metanación se obtuvo una conversión aceptable de  $\text{CO}_2$  a  $\text{CH}_4$  utilizando los catalizadores  $\text{Nu-Ru/Al}_3\text{O}_4$  a las condiciones de operación del presente trabajo.

Esto permite que el proyecto genere una propuesta benéfica tanto para la población local, como para ayudar a reducir las emanaciones de gases de efecto invernadero, esto mientras se contribuye a la generación de energía eléctrica para uso público al poniente de la Ciudad de México, con posibilidades de replicar o mover esta planta de carácter modular a varios Sitios dentro del país, esto para dar un uso útil al combustible generado en ellos.

## INTRODUCCIÓN.

En la actualidad las emisiones antropogénicas generan Gases de Efecto Invernadero (GEI) entre los cuales destacan algunos gases como Dióxido de Carbono ( $\text{CO}_2$ ), Monóxido de Carbono (CO), Metano ( $\text{CH}_4$ ) y Ozono ( $\text{O}_3$ ), estas son una de las principales causas de contaminación atmosférica, que con el paso del tiempo han contribuido al aumento de la temperatura del planeta, por lo que se creó que para el año 2036 la tierra podría cruzar un umbral de cambio climático peligroso en la temperatura, que será de  $2^\circ\text{C}$  ocasionando daño tanto a los habitantes como a los ecosistemas, para evitar esto las naciones deben de mantener los niveles de  $\text{CO}_2$  por debajo de las 405 partes por millón en la atmósfera terrestre. (Change, 2020)<sup>1</sup>

Un porcentaje de estos GEI son generados dentro de los Sitios de Disposición Final Clausurados (SDFC) existentes en las concentraciones urbanas de todo el mundo, estos Sitios son consecuencia de la generación de Residuos Sólidos Urbanos (RSU) y la necesidad humana de depositarlos en un Sitio adecuado para evitar el acumulamiento de estos, actualmente cada ser humano produce entre 0.5-1 Kg per cápita, en países desarrollados 1 Kg y en países en vías de desarrollo 0.4-0.7 Kg. (Silpa Kaza, 2018)<sup>2</sup>

En algunos de los SDFC existentes en la Ciudad de México (CDMX), los gases producidos son generalmente quemados para evitar la migración de  $\text{CH}_4$  a la periferia de estos, donde puede existir riesgo a la salud de la población o algún incidente relacionado a este Biogás, sin embargo, al quemarlo se generan contaminantes en estado gaseoso con una alta concentración de  $\text{CO}_2$ . En los SDFC donde se quema el Biogás, es necesario realizar una investigación con el fin de proponer un proceso eficiente para darle uso adecuado al mismo, con esto se pueden reducir los niveles de GEI a la atmósfera.

Por esto, se propone un proceso que pueda integrar la recolección del Biogás producido naturalmente en los SDFC, haciendo una reacción de Combustión y producir energía eléctrica, los gases de la Combustión no serán liberarlos al ambiente; se harán reaccionar para producir nuevamente  $\text{CH}_4$  donde esté será recirculado y utilizado para producir energía realizando un círculo virtuoso.

El presente trabajo propone un proceso de producción de energía y gas, utilizando como materia prima Biogás y reducir las emisiones de  $\text{CO}_2$ ,  $\text{CO}$  y  $\text{CH}_4$ .

Es importante entender que, el origen del Biogás se encuentra en la descomposición anaeróbica de los residuos sólidos, y que su contenido en  $\text{CH}_4$  presenta un amplio rango de concentración, que oscila básicamente entre 35-70%, aunque puede inclusive ser menor al 10%, esto depende en gran medida de su método de producción y tipos de materia involucrada. La concentración en  $\text{CH}_4$  le otorga al Biogás su característica como combustible. Este gas, si se liberara a la atmósfera contribuiría al aumento del efecto invernadero, ya que el  $\text{CH}_4$  es 21 veces más contaminante que el  $\text{CO}_2$ . (S. Solomon, 2007)<sup>3</sup>

En este sentido, el aprovechamiento del Biogás como combustible o materia prima para la producción de otros productos es la mejor opción e implica un beneficio para el medio ambiente, como fuente de energía renovable, el Biogás es una fuente inagotable, limpia y que se puede utilizar de forma autogestionada. Es una de las energías renovables más accesible, dada la facilidad de su obtención. Así mismo, constituye una alternativa viable al agotamiento de energías fósiles como el gas natural y el petróleo, donde se viene observando un incremento de los precios durante los últimos años.

En la actualidad se están trabajando con reacciones que producen nuevamente gas  $\text{CH}_4$  y  $\text{CH}_3\text{OH}$  a través de  $\text{CO}_2$ . (Urakawa, 2013)<sup>4</sup>

## **OBJETIVOS.**

Objetivo general:

- Proponer un Proyecto Sustentable para la Generación de Energía a Partir del Biogás Generado por un Sitio de Disposición Final Clausurado y Disminuir la Contaminación a la Atmosfera.

Objetivos particulares:

- Proponer el catalizador adecuado para efectuar la Metanación.
- Proponer una planta generadora de  $\text{CH}_4$  empleando el  $\text{CO}_2$  producto de la Combustión de Biogás como reactivo;
- Diseñar de forma Modular las Plantas Generadoras de Energía y Metano.
- Unificar las plantas de generación de energía y Metano de manera modular formando un círculo virtuoso para que este proyecto sea sustentable:
- Proponer una alternativa al uso del Biogás para disminuir incidentes en las zonas periféricas al SDFC como consecuencia de la migración o fuga de los sistemas de control ya existentes.

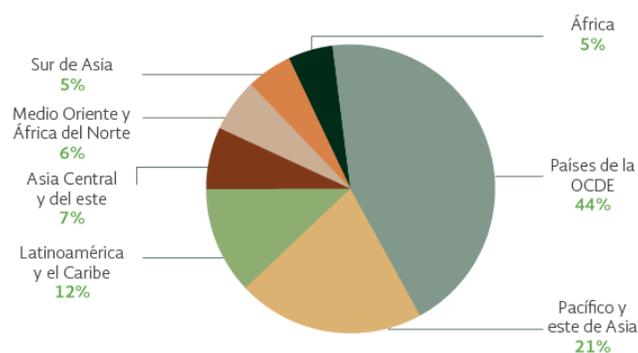
## CAPÍTULO I: ANTECEDENTES.

### Antecedentes Nacionales.

Existen en el país cerca de 40 Sitios de Disposición Final, de los cuales en la Ciudad de México se encuentran 7 SDFC; Prados de la Montaña, Bordo Poniente, Alameda Poniente, Parque Cuitláhuac, Santa Catarina, San Lorenzo Tezonco y Tlalpan, de los cuales los que más producen CH<sub>4</sub> con mayor porcentaje son; Prados de la Montaña, Santa Catarina y Tlalpan. (Servicio, 2019)<sup>5</sup>

### Antecedentes Internaciones.

En 2012 la producción mundial de RSU se calculó en alrededor de 1300 millones de toneladas diarias y se estima que podría crecer hasta los 2 200 millones en el año 2025. La generación global de Residuos Sólidos Urbanos (RSU) muestra una disparidad regional en cuanto a su volumen en general, por el desarrollo económico y la proporción de la población urbana. En el año 2010, cerca del 44 % de los RSU producidos en el planeta correspondieron a los países con las economías más desarrolladas de la Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económicos (OCDE; Ilustración 1). En el caso de Latinoamérica y el Caribe, contribuyeron con el 12% del total, detrás de los países que integran las regiones del Pacífico y del este de Asia. Con ello se genera Biogás en distintos SDF en diferentes partes del mundo con el cual se puede producir energía. (Silpa Kaza, 2018)



Fuente:  
Hoorweg, D. y P. Bhada-Tata. Waste generation. In: What a Waste. A Global Review of Solid Waste Management. Urban Development Series. World Bank. Washington, D.C. 2012. Disponible en: <http://siteresources.worldbank.org/INTURBANDEVELOPMENT/Resources/336387-1334852610766/Chap3.pdf>.  
Fecha de consulta: diciembre de 2015.

*Ilustración 1. Gráfico de RSU producidos a nivel Mundial.*

## **1.1. Prados de la Montaña.**

Este SDF se ubica al poniente de la Ciudad de México, en la Av. Carlos Lazo S/No. Col. Santa Fe, Alcaldía Álvaro Obregón.

En 1982 existían sólo tiraderos a cielo abierto en la Ciudad de México, en el periodo de 1985 a 1987, la Dirección General de Servicios Urbanos (DGSU) del entonces Departamento del Distrito Federal (DDF) inició varias acciones para cerrar, clausurar y sanear los tiraderos de residuos sólidos que operaban hasta el momento. El DDF inició simultáneamente la construcción y puesta en operación de los primeros rellenos sanitarios, ubicando uno de ellos en la zona de Santa Fe al poniente de la Ciudad denominado Prados de la Montaña.

El cierre del tiradero de Santa Fe en 1987 se llevó a cabo en paralelo con el inicio de las operaciones del Sitio Prados de la Montaña. En este Sitio se realizaba pepena controlada durante el día y por la tarde y noche se realizaban las labores propias de la operación técnica del relleno sanitario.

Tuvo una vida útil confirmada de 7.4 años, recibiendo un aproximado de 5, 635,000 toneladas de residuos sólidos principalmente de tipo municipal.

El sitio se encuentra en la zona de Santa Fe, una zona de gran desarrollo habitacional y comercial. En la periferia del Sitio se encuentra la zona Residencial La Loma, escuelas de importancia como son Instituto Tecnológico de Estudios Superiores de Monterrey Campus Santa Fe, Universidad West Hill, Colegio Eton, así como el Centro de Exposiciones México BBVA Bancomer. Lo anterior marca la pauta para verificar la condición que presenta el Sitio para la seguridad de la zona.

Actualmente Prados de la Montaña es un Sitio que se conserva como área verde sin acceso al público hasta que se abata la generación de biogás, así como se observa en la Ilustración 1.1. Se observa que se ha ido disminuyendo progresivamente la generación de Metano en el Sitio.



*Ilustración 1.1. Sitio de Disposición Final Clausurado de PRADOS DE LA MONTAÑA, Cuajimalpa, CDMX.*

Prados de la Montaña genera contaminación al ambiente debido a sus emisiones de Biogás, la cual es mitigada por la quema de éste, ya que son más contaminantes las emisiones de Metano a la atmósfera por su efecto invernadero que emitir Dióxido de Carbono como resultado de la quema de el mismo, sin embargo, es necesario generar una propuesta para disminuir las emisiones a su punto más bajo posible. Por otra parte, los lixiviados no representan riesgo sanitario debido a que se encuentran atrapados aproximadamente a 10m de profundidad al interior del Sitio.

La Ilustración 1.1.1 muestra un plano de localización de los distintos posos que conforman el SDFC.

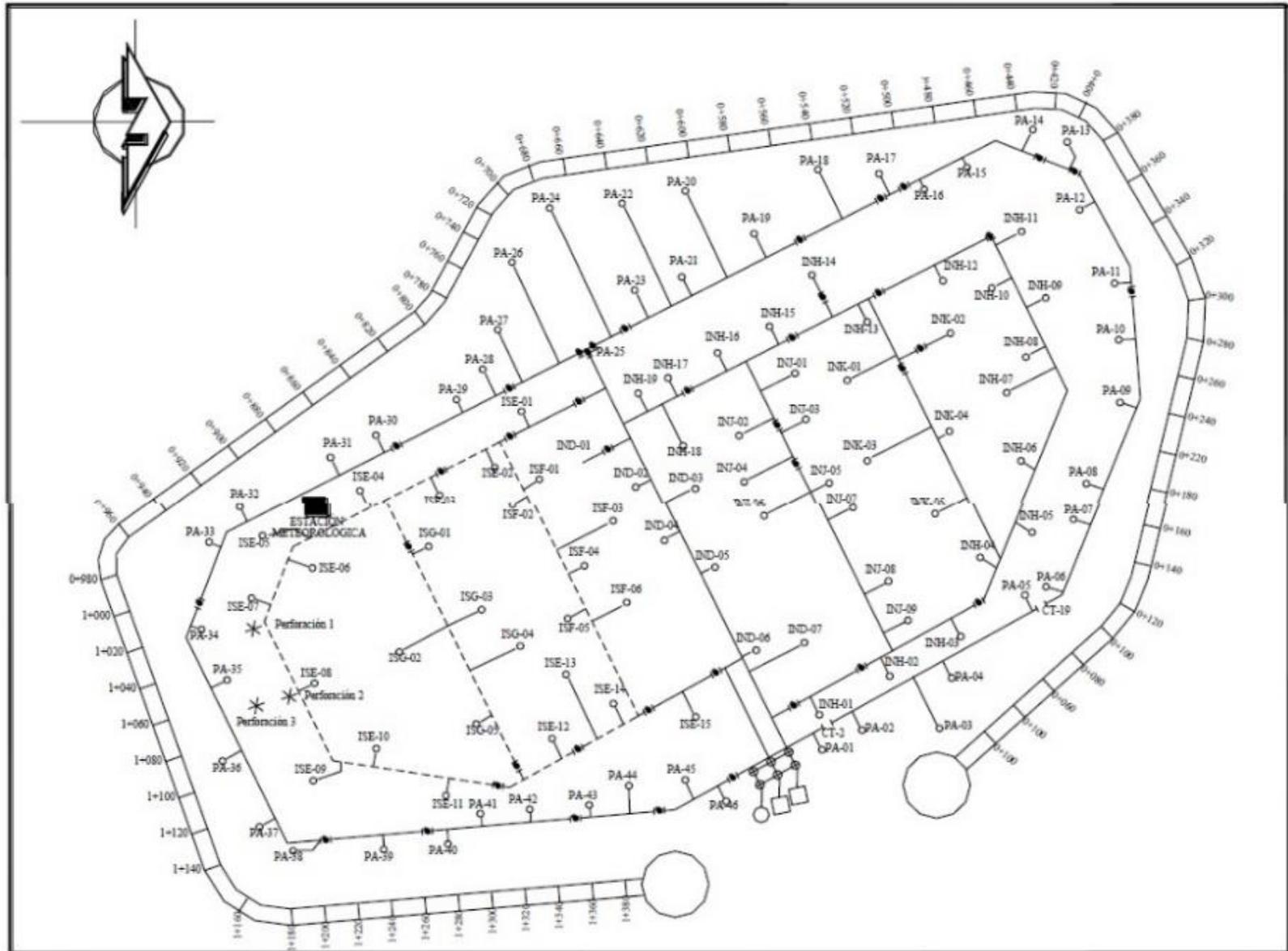


Ilustración 1.1.1. Plano de localización de pozos de extracción y monitoreo de Biogás del SDFC de Prados de la Montaña.

## 1.2. Monitoreo de Biogás.

Como parte del Programa de Monitoreo Ambiental de la Secretaría de Obras y Servicios de la Ciudad de México, el cual tiene como uno de sus objetivos llevar un control ambiental por riesgos para la salud por Biogás que se presenta inadvertidamente, se lleva a cabo la tarea de realizar mediciones de Biogás utilizando diferentes equipos portátiles para su detección y medición de gases que lo componen.

Estas mediciones al ser parte del monitoreo se realizan en los 7 SDFC de la Ciudad, los cuales son; Prados de la montaña; Alameda poniente; Tlalpan; Sta. Catarina; Santa Cruz Meyehualco (hoy renombrado como Parque Cuitláhuac); San Lorenzo Tezonco; Bordo Pte. Etapas I, II, III y IV; para este programa de monitoreo se realizan de manera constante las mediciones de Biogás y lixiviados cada cierto tiempo dependiendo del Sitio, específicamente para Prados de la Montaña se realiza el monitoreo durante una semana para biogás, cada 15 días. (Federal, 2017)<sup>6</sup>

En Ilustraciones 1.2 muestra la unidad de transporte utilizado para llevar los equipos portátiles y para trasladarse a cada SDFC y hacer las mediciones correspondientes.



*Ilustración 1.2. Unidad satélite de Monitoreo Ambiental de la Secretaría de obras y servicios de la CDMX.*

### **1.3. Características del Sitio de Disposición Final.**

El subsuelo donde se localiza el Sitio está constituido por rocas ígneas extrusivas piroclásticas cubiertas parcialmente de suelos de la misma naturaleza que en ellas se han derivado, estratos integrados por fragmentos de tamaño de las gravas, arenas, limos y arcillas, la cual en ocasiones se encuentran fracturadas.

Este Sitio funcionó como un vertedero que, bajo ciertas consideraciones o estudios de tipo económico, social y ambiental, era destinado con el fin de servir como un lugar de depósito de los residuos sólidos generados por la población capitalina, este fin fue aprobado por el gobierno del Distrito Federal (como en ese entonces se le conocía a la CDMX). Los SDF de este tipo también son conocidos como "vertederos controlados" o "rellenos sanitarios".

A los vertederos tradicionales como Prados de la Montaña, es destinado para depositar los residuos sólidos generados por un grupo o asentamiento humano. Esta contiene de forma revuelta restos orgánicos, plásticos, papel, vidrio, metales, pinturas, tela, pañales, baterías, y una gran diversidad de objetos y sustancias consideradas indeseables. Es importante recordar que para la década de 1980 aún no existía una cultura de reciclaje y separación de los residuos como se tiene en la actualidad.

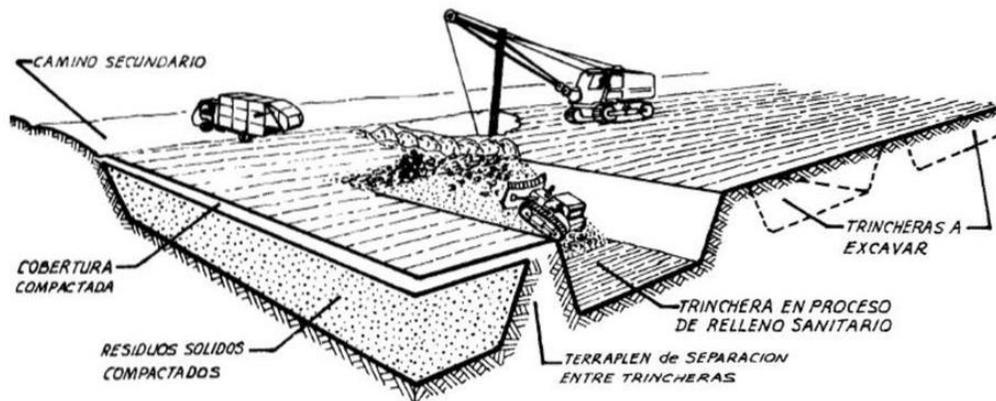
En el proceso de descomposición de la materia en los vertederos, se forman lixiviados que arrastran los productos tóxicos presentes en la basura, y contaminan las aguas subterráneas, que en ocasiones se utilizan para consumo humano y riego.

Debido a que la basura orgánica se descompone bajo tierra, sin exposición al Oxígeno, metanógenos y otros microorganismos, estos producen importantes cantidades de gases de efecto invernadero como  $\text{CH}_4$ ,  $\text{CO}_2$ , o gases tóxicos como el  $\text{H}_2\text{S}$ , Benceno, Tricloroetileno, etc., que pueden agravar el efecto invernadero y el cambio climático global.

Además, como forma de minimizar el impacto ambiental y como implementación del Protocolo de Kioto (1997), los rellenos sanitarios incluyen tratamiento de lixiviados, que son los líquidos producidos por la basura, quema de gases de descomposición, principalmente el Metano, planes de reforestación en el área del relleno sanitario y control de olores. Debido a que los residuos confinados sin tratamiento contienen un alto potencial de peligro para el medio ambiente (daños en la impermeabilización en el transcurso de tiempo), en Europa ya tienen

normas que exigen un tratamiento de los Residuos antes de confinar para eliminar su potencial peligro tanto para el ambiente como la salud humana.

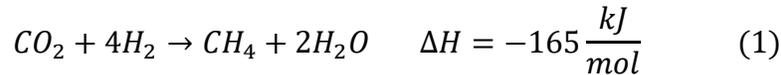
En la ilustración 1.3. se puede observar un diagrama de la estructura general de los SDF, en el cual se realizan estudios técnicos, geológicos y de impacto ambiental, se escarba una perímetro acordado por autoridades locales, posteriormente se recubre con una geomembrana, en la mayoría de los caso está hecha de polietileno, aunque puede ser de otros materiales ,una vez realizada esta estructura, inicia el depósito de residuos, por lo que se estima una vida útil en función a las toneladas recibidas o al impacto que tenga en zonas cercanas, a partir del primer año de operaciones, se puede percibir generación de Biogás y lixiviados, por lo que es importante su monitoreo constante, una vez determinado que la vida útil del Sitio se encuentra próxima a concluir, se recubre la superficie con tierra y se establece la ubicación definitiva de pozos para el monitoreo de Biogás y lixiviados, los cuales se monitorearán de manera constante por las autoridades locales correspondientes.



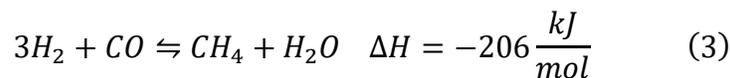
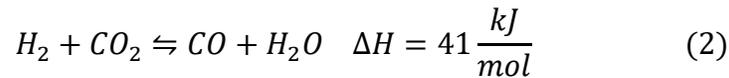
*Ilustración 1.3. Estructura de un Sitio de Disposición Final.*

#### **1.4. Metanación.**

La reacción de Metanación también conocida como reacción de Sabatier tiene su origen en 1910. Sin embargo, es en la actualidad cuando está teniendo mayor importancia debido a la necesidad de impulsar la obtención de energía a partir de fuentes renovables. La reacción de Metanación de  $\text{CO}_2$  es la siguiente:



El mecanismo de reacción por el que ocurre consiste en dos etapas: una reacción de Water Gas Shift Inversa (RWGS) y la Metanación de CO. (Martínez Román, 2017)<sup>7</sup>

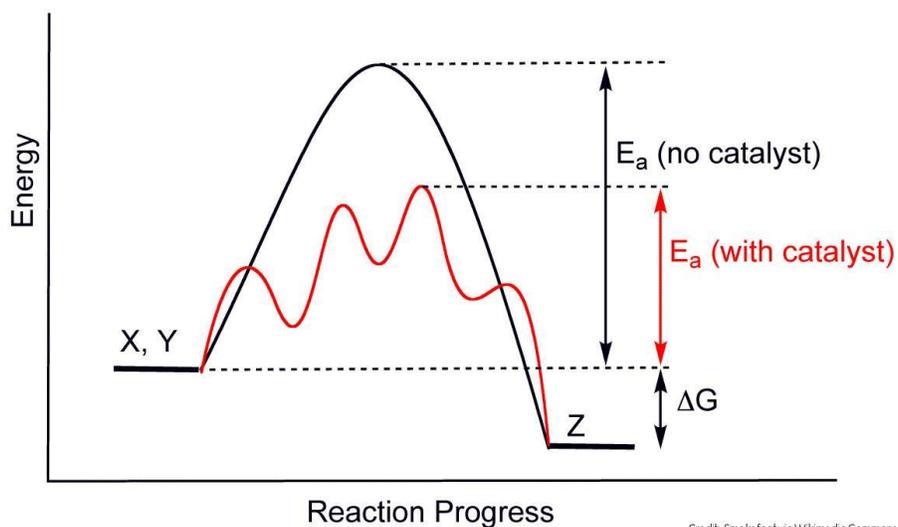


La reacción (1) es fuertemente exotérmica y por lo tanto resulta favorecida a bajas temperaturas. Sin embargo, a menor temperatura, menor es la velocidad de reacción. Por otro lado, el número de moles de productos es menor que el de reactivos por lo que el equilibrio termodinámico se favorece a elevadas presiones. No obstante, trabajar a presiones elevadas implica un elevado coste económico por lo que se suele trabajar a presión atmosférica (Kangas y cols., 2017). Además, cabe destacar que la reducción completa del CO<sub>2</sub> (estado de oxidación +4) a CH<sub>4</sub> (estado de oxidación -4) implica la cesión de 8 electrones, es decir, es necesario superar una elevada barrera cinética. Por lo tanto, la utilización de catalizadores resulta imprescindible (Ghaib, 2018)<sup>8</sup>. (Echaide, 2017)<sup>9</sup>

### 1.5. Catalizadores.

Un catalizador es una sustancia que modifica la velocidad de una reacción, pero al final del proceso permanece sin cambio. El catalizador generalmente modifica la velocidad de reacción promoviendo una ruta molecular distinta (“mecanismo”) para la reacción. (Scott Fogler, 2008)<sup>10</sup>.

Catalizador del Griego; Kata: Matiz de intensidad o Totalidad; Lisis: Rompimiento. Su papel es el reducir la necesidad de la energía inicial para activar las reacciones buscadas y modificar la velocidad de reacción como se muestra en la ilustración (1.5). (Navarro, 1997)<sup>11</sup>. Contiene tres principales características; Actividad: Capacidad Para lograr la conversión a condiciones operacionales; Selectividad: Requerimiento de los productos a la conversión dada; Estabilidad: Capacidad para mantener la actividad y la selectividad a lo largo del tiempo.



*Ilustración 1.5 Energía & Progreso de reacción.*

### 1.6. Técnicas de caracterización para los catalizadores.

La caracterización de un sólido mediante distintos métodos tiene como finalidad conocer cualitativa y cuantitativamente como está constituido el catalizador tanto en la estructura como en la superficie y qué transformaciones sufre como consecuencia de un tratamiento térmico, por ejemplo, una reacción química. La caracterización de un catalizador nos proporciona tres tipos de información:

- Composición química, estructura y superficial.
- Textura y propiedades mecánicas.
- Actividad y selectividad catalítica.

Para una mejor comprensión de este tema, es necesario definir los siguientes conceptos:

- Composición química y estructura. Se refiere al estudio de la composición, estructura y proporciones de las fases individuales presentes; la naturaleza y proporciones de los grupos funcionales que pueden estar presentes.

- Textura y propiedades mecánicas. Trata de la forma y tamaño de las unidades de catalizador, estructura de poro, área superficial total, disposición de las fases individuales entre sí. El estudio de las propiedades mecánicas se refiere a aquellas que son de importancia a nivel industrial, tales como: resistencia a la abrasión, dureza, resistencia al choque térmico, etc.
- Actividad catalítica. Es una medida cuantitativa de la habilidad de un catalizador de acelerar una reacción química bajo condiciones específicas. Se habla entonces de velocidad de reacción, o alguna cantidad relacionada con la velocidad de reacción por unidad de cantidad de catalizador, además de incluir selectividad a productos.

Algunas técnicas teóricas para que se emplean en las caracterizaciones de los catalizadores son las siguientes;

- Termogravimetría (TG): La técnica se fundamenta en el estudio de la variación de la masa en función de la temperatura. Esta técnica consiste en someter una muestra, en este caso sólida, a un tratamiento térmico bajo una atmósfera determinada. Esta técnica de caracterización permite la observación de los cambios químicos que sufre el catalizador en referencia a la descomposición de la materia orgánica o de los nitratos. También permite el análisis de fenómenos físicos de desorción de agua.
- Fisisorción-Adsorción física de  $N_2$ : Esta técnica tienen como objetivo la determinación del tamaño del poro del catalizador empleado. Se fundamenta en la formación de una película del gas empleado como adsorbato sobre la superficie del material en estudio, en este caso alúmina (sólido poroso). Este fenómeno se produce debido a que las moléculas de la superficie del sólido se encuentran descompensadas en cuanto a enlaces se refiere. Es por ello, que, al circular un gas por la superficie del material, las moléculas del gas quedan adsorbidas físicamente por fuerzas de Van der Waals, neutralizando así las fuerzas atómicas superficiales. Se forma así una monocapa y a medida que circula el gas, capas sucesivas llegando a formar finalmente un sistema multicapa. Se debe destacar el hecho de que la formación de estos enlaces es un proceso exotérmico por lo

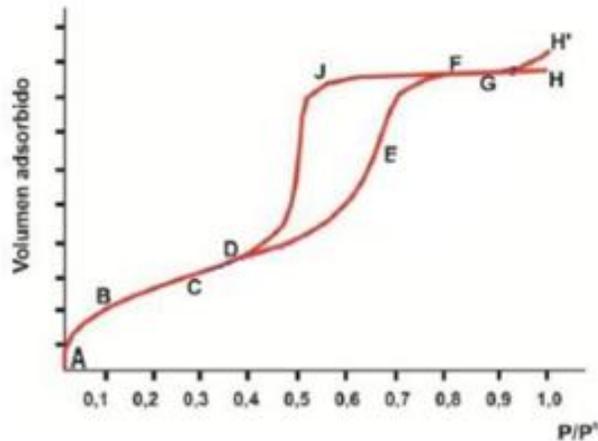
que resultará favorable al disminuir la temperatura o al producirse un incremento en la presión.

Como sustancia adsorbida en la superficie de un adsorbente (adsorbato) se utiliza N<sub>2</sub> debido a que es un gas inerte con el catalizador empleado así también su presión de saturación a la temperatura a la que se realizarán los experimentos es elevada por lo tanto se puede realizar una medición precisa de la presión relativa.

Una vez realizado el experimento se representarán los datos de la cantidad de N<sub>2</sub> adsorbida frente a la presión relativa. La cantidad de gas adsorbida por masa de catalizador es dependiendo la presión de equilibrio, de la temperatura y del sistema gas-sólido del que se dispone:

$$\frac{n}{m} = f\left(\frac{P}{P_0}\right)T \quad (4)$$

Existen seis tipos de isotermas y cada una de ellas hace referencia a un tipo de sólido poroso. La alúmina es un sólido que contiene poros con diámetros entre 2 y 50 *nm* en el que la adsorción del gas se produce en un proceso multicapa y el tipo de isoterma que le corresponde es de tipo *IV*. como se muestra en la Ilustración 1.6. El primer ascenso pronunciado (A-B) de la curva corresponde con la formación de la primera monocapa. Al seguir aumentando la presión relativa se forman capas sucesivas de adsorbato (C-D-E) hasta que se alcanzan presiones próximas a la presión de saturación dónde la pendiente disminuye (F-G-H) debido a que ya se ha alcanzado el espesor máximo. En algunos casos, en la última etapa se puede observar un aumento en la pendiente (G-H'). Se observa un ciclo en la tendencia del material a conservar una de sus propiedades en la ausencia su estímulo (histéresis), característico de este tipo de isotermas que indica que el proceso de desorción difiere del proceso de adsorción.



*Ilustración 1.6. Isoterma tipo IV Adsorción- Desorción.*

- Difracción de rayos X: La aplicación de los rayos X en el estudio de la estructura de los materiales comenzó a partir de 1912. Asimismo, las técnicas de difracción permitieron la observación en el rango atómico lo que resulta de gran utilidad para la caracterización e identificación de muestras cristalinas en el ámbito de la catálisis.

En una técnica de caracterización que se basa en la incisión de una radiación monocromática sobre la muestra a estudiar y dependiendo de la estructura cristalina presente y su correspondiente ordenación y distribución, el haz aplicado difractará con un ángulo  $\Theta$  determinado. Cabe destacar que el alcance de la radiación emitida es de 1000 nm desde la superficie del sólido a estudiar y que la adsorción del rayo y su posterior re-emisión se produce en un sistema de capas, esto es, la radiación no re-emitida en una primera capa pasa a una segunda capa de átomos siendo re-emitida, parte de esta radiación y otra parte siendo penetrada a la siguiente capa. Como resultado de este análisis se obtienen una serie de difractogramas que ofrecen información sobre la fase metálica presente en el soporte del catalizador, así como su correspondiente tamaño.

El equipo empleado en esta técnica es un difractómetro PANalytical Xpert PRO de la Unidad de Análisis de Rocas y Minerales del Servicio General de Rayos X que se encuentra en los servicios generales de SGiker de la UPV/EHU.

- Quimisorción: La Quimisorción se basa en la interacción química entre el adsorbente y el adsorbato y la correspondiente formación de un enlace químico de elevada energía. Esta técnica de caracterización permite la medida de la fase activa presente en el catalizador en tanto que permite la obtención de la superficie metálica, así como la dispersión de ésta y el tamaño de cristalito metálico de los metales presentes sobre el soporte del catalizador.

La estequiometría de la quimisorción hace referencia al número de moléculas o átomos quimisorbidos sobre un centro o átomo metálico. El gas empleado para la quimisorción en Hidrógeno y la estequiometría con la fase metálica del catalizador, éste es, rutenio es de 1. La principal ventaja de la utilización de Hidrógeno podría considerarse la poca adsorción física que presenta. (Echaide, 2017)

- Microscopía electrónica de transmisión (TEM): Se utiliza un microscopio electrónico de transmisión en el que se consigue un aumento de la superficie a observar de 1000 veces y una resolución de 5 *nm*. Esta técnica de caracterización permite el conocimiento del catalizador a observar en este caso.

El fundamento de la microscopia por TEM es la iluminación de la muestra por un haz de electrones producidos por el cañón que se encuentra en la parte superior de éste. A continuación, dichos electrones pasan por una zona con gran diferencia de potencial que los confiere una determinada energía cinética y son focalizados sobre una muestra delgada mediante dos lentes condensadoras. Cabe destacar que la muestra es transparente a los electrones. Una vez que los electrones dan la muestra éstos son recogidos y focalizados por otro lente objetivo que genera una imagen intermedia, dicha imagen es amplificada aún más por unas lentes proyectoras que se encuentran localizadas debajo de las anteriores y son encargadas de controlar la ampliación de la imagen generada en la pantalla fluorescente. (Echaide, 2017)

- Por otro lado, la formación de imagen se puede producir por dos métodos. Uno de ellos consiste en la obtención de la imagen a partir de haz de electrones que ha sido transmitido pero que no ha sufrido dispersión alguna tras haber incidido en la muestra. De esta forma, la imagen generada es oscura encontrándose sobre un fondo brillante y

a este método se le conoce como formación de imagen en campo claro. En el caso contrario, formación de imagen en campo oscuro la imagen se genera a partir de los electrones dispersados apareciendo estos brillantes sobre un fondo oscuro.

- Reducción a la temperatura programada (TPR): En esta técnica de caracterización se mide la reducción de la fase activa, así como del promotor y su correspondiente interacción con el soporte (alúmina). Se hace pasar un gas reductor y con un aumento literal de la temperatura, se estudia el cambio de composición que sufren las especies del catalizador mediante el análisis de los gases de salida del reactor. (Echaide, 2017)

### 1.7. Catalizadores propuestos.

El material elegido como catalizador debe reunir las características siguientes:

- Alta actividad.
- Precio moderado.
- Poder soportar cambios de temperatura bruscos en pocos segundos.

Los catalizadores propuestos son Ni-Ru/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, ya que cumplen con las características mencionadas.

La Alúmina es un soporte que se utiliza en muchas reacciones heterogéneas. Presenta distintas modificaciones cristalográficas ( $\gamma$ , K,  $\alpha$ ,  $\theta$ ,  $\delta$ ) siendo  $\gamma$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> la más empleada por su elevada superficie específica, la estructura de los poros, su estabilidad mecánica y bajo coste. El inconveniente de este soporte se encuentra en la baja estabilidad térmica que presenta ya que cambia la estructura cristalina y pasa a  $\theta$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> o  $\delta$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> a temperaturas superiores a los 500 °C. Sin embargo, en la reacción de Metanación no se alcanzan temperaturas superiores por lo que se mantiene la estructura de  $\gamma$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>. Cabe destacar que en procesos que requieran trabajar a temperaturas superiores 500°C, se puede mantener la estructura cristalina de  $\gamma$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> mediante la adición de metales alcalinos. (Sepehri, 2016)<sup>12</sup>

Los catalizadores soportados de níquel son unos de los más utilizados para llevar a cabo la Metanación de CO<sub>2</sub> debido a la elevada actividad que presenta, así como a la abundancia de este metal y su correspondiente bajo coste. La principal desventaja es que los catalizadores

monometálicos de Níquel se desactivan por compactar a alta presión polvos metálicos a temperaturas elevadas. (Li, 2017)<sup>13</sup>

Los catalizadores con Rutenio como fase activa presentan una elevada selectividad hacia la formación de Metano. No obstante, el coste es muy elevado por lo que se debe tratar de minimizar la carga de este metal. Como alternativa se puede optar por catalizadores bimetálicos en los que el Níquel se encuentre en una mayor proporción mientras que el Rutenio en una proporción mucho menor. En este tipo de catalizadores bimetálicos, se modifica la estructura electrónica de los metales modificando a su vez la estabilidad, selectividad y durabilidad (Shadravan, 2019).<sup>14</sup>

Además, la interacción entre ambos metales mejora la dispersión del Níquel aumentando así la superficie específica de los centros activos. La utilización de Rutenio permite aumentar la estabilidad térmica del catalizador. Del mismo modo, le aporta al catalizador una mayor tolerancia al sulfuro de Hidrógeno presente en las corrientes de salida de los procesos de combustión (Yuan, 2015).<sup>15</sup>

Tanto el Níquel como el Rutenio han sido metales muy empleados en el ámbito de la catálisis y por ello se quiere estudiar la influencia de éstos en la Metanación de CO<sub>2</sub>. Además, la actividad de ambos metales se ha estudiado de forma separada en esta reacción por distintos grupos de investigación. Para ello, se debe lograr que la dispersión de la fase activa sea máxima y por este motivo se estudiará la influencia del método de preparación. (Echaide, 2017)

Por ello se toman en cuenta estos catalizadores para la reacción de Metanación de CO<sub>2</sub>, ya que se ha registrado una conversión aceptable por los investigadores.

## **CAPITULO II: FACTORES SOCIALES E IMPACTO AMBIENTAL.**

### **2.1. Factores sociales.**

Ante la necesidad de controlar las emisiones de GEI, la búsqueda de fuentes alternativas de energía es fundamental para la sustentabilidad de nuestra sociedad, por lo que al tener un problema de generación de RS producto de la actividad urbana es necesario atender este problema también, sin embargo al existir degradación de la materia la cual produce gases de descomposición con cierto contenido de gases combustibles, se obtiene una alternativa de uso de estos residuos generados, entonces es donde la Ingeniería Ambiental puede ser la opción adecuada para coordinarse junto con la Ingeniería de Proyectos para poder obtener un uso factible de estos productos, mientras que se obtiene un doble beneficio al tratar los desechos producidos por una población constantemente en crecimiento y tratando los residuos que se producen.

Este Proyecto es una propuesta específica para dar un uso adecuado al Biogás generado en el SDFC de Prados de la Montaña, es una propuesta alternativa a el destino actual de éste recurso, el cual es sólo de la quema de éste para el control del Biogás generado que produce efectos invernaderos al ambiente, además de ser un control que da el gobierno de la Ciudad para evitar la migración de Biogás a las zonas periféricas, lo cual puede generar impacto a la salud de los capitalinos y por ser un combustible podría generar un riesgo de explosión y daño a la infraestructura de los comercios e instituciones que se encuentran en esta zona.

Es importante recordar que Prados de la Montaña no es el único SDFC en la zona de Santa Fe, también muy cerca se encuentra Alameda Poniente, que aunque no produce un Biogás tan rico en Metano como en Prados de la Montaña, también tiene un cierto contenido de este combustible, por lo que en cuestiones de ampliaciones futuras sería necesario considerar a Alameda Poniente como una opción próxima de ampliación del proyecto dentro de la Alcaldía de Cuajimalpa de la CDMX, además de que por las características de los Sitios de Tlalpan y de Santa Catarina, también podrían ser una opción viable para ampliar éste proyecto y controlar de la mejor manera los gases de efecto invernadero producidos dentro de la CDMX.

## **2.2. CO<sub>2</sub> y cambio climático.**

En primer lugar, es necesario aclarar dos conceptos que, si bien están estrechamente relacionados con frecuencia se toman de manera errónea como sinónimos: el cambio climático y el calentamiento global. Existe una importante diferencia y es que el calentamiento global es la causa del cambio climático, es decir, el aumento de la temperatura del planeta provocado por las emisiones a la atmósfera de gases de efecto invernadero derivadas de la actividad del ser humano, están provocando variaciones en el clima que de manera natural no se producirían.

La Tierra ya se ha calentado y enfriado en otras ocasiones de forma natural, pero lo cierto es, que estos ciclos siempre habían sido mucho más lentos, necesitando millones de años, mientras que ahora y como consecuencia de la actividad humana estamos alcanzando niveles que en otras épocas trajeron consigo extinciones, en apenas doscientos años.

Por otra parte, las emisiones de Dióxido de Carbono tienen dos orígenes, naturales y antropogénicas, teniendo estas últimas un fuerte crecimiento en las últimas décadas. La concentración actual de CO<sub>2</sub> en el aire oscila alrededor de 415 *ppm* (2019), o 0,0415%, con algunas variaciones día-noche, estacionales y con picos de contaminación localizados. El contenido de CO<sub>2</sub> nunca ha sido tan elevado desde hace 2,1 millones de años. (Lamont-Doherty Earth observatory, 2009)<sup>16</sup>

La concentración de CO<sub>2</sub> en la atmósfera está aumentando desde finales del siglo XIX y el ritmo de aumento se aceleró a finales del siglo XX, pasando de 0,5 *ppm/año* en 1960 a 2 *ppm/año* desde el año 2000. (Bleicher, 2018)<sup>17</sup>

## **2.3 Energías renovables.**

Las energías renovables son aquellas que se obtienen de fuentes naturales virtualmente inagotables, ya sea por la inmensa cantidad de energía que contienen, o porque son capaces de regenerarse por medios naturales, la energía renovable suele suministrar energía en cuatro áreas importantes: generación de energía, calefacción/refrigeración de aire y agua, transporte y servicios energéticos rurales.

El término energía renovable se refiere a formas de energía que se regeneran rápidamente en comparación con los tiempos característicos de la historia humana. Las fuentes de estas formas de energía se denominan recursos energéticos renovables. (González, 2009)<sup>18</sup>

Algunos tipos de energías renovables son:

- Energía solar:

La energía solar es una fuente de energía de origen renovable, obtenida a partir del aprovechamiento de la radiación electromagnética procedente del Sol.

Hay tres tipos de energía solar: pasiva, térmica y fotovoltaica.

- La energía solar fotovoltaica es una fuente de energía de origen renovable, obtenida directamente a partir de la radiación solar mediante un dispositivo semiconductor denominado célula fotovoltaica.
- Una central térmica solar o central termo solar es una instalación industrial en la que, a partir del calentamiento de un fluido mediante radiación solar y su uso en un ciclo termodinámico convencional, se produce la potencia necesaria para mover un alternador para generación de energía eléctrica como en una central térmica clásica. Consiste en el aprovechamiento térmico de la energía solar para transferirla y almacenarla en un medio portador de calor, generalmente agua.
- La tecnología solar pasiva es el conjunto de técnicas dirigidas al aprovechamiento de la energía solar de forma directa, sin transformarla en otro tipo de energía, para su utilización inmediata o para su almacenamiento sin la necesidad de sistemas mecánicos ni aporte externo de energía, aunque puede ser complementada por ellos, por ejemplo, para su regulación.
- Energía eólica:

La energía eólica es la energía obtenida a partir del viento, es decir, la energía cinética generada por efecto de las corrientes de aire, y que es convertida en otras formas útiles de energía para las actividades humanas.

Para obtener electricidad, el movimiento de las aspas acciona un generador eléctrico (alternador o dinamo) que convierte la energía mecánica de la rotación en energía eléctrica. La electricidad puede almacenarse en baterías o ser vertida directamente a la red. La velocidad de giro del aspa es de 12 a 19 *rpm*.

Dentro de este grupo podemos destacar la energía eólica marina, en auge en los últimos tiempos. Una de sus ventajas es la frecuencia del viento ya que en alta mar suele aumentar en un 40% y son mucho más regulares que en tierra. Esto implica que la energía eólica en alta mar es mucho más productiva que los parques eólicos terrestres.

- Energía hidráulica:

La energía hidráulica, energía hídrica o hidroenergía es aquella que se obtiene del aprovechamiento de la energía cinética y potencial de la corriente del agua, saltos de agua o mareas.

- Energía geotérmica:

La energía geotérmica es aquella energía que puede obtenerse mediante el aprovechamiento del calor del interior de la Tierra.

Las posibilidades que ofrece la geotermia para los hogares son múltiples y útiles en todas las dependencias de la vivienda. Con la energía geotérmica disfrutará del máximo confort reduciendo al mínimo su gasto energético y económico.

- Biomasa, Residuos Sólidos:

La biomasa es una de las principales fuentes de energía renovable en muchas zonas del planeta. La Biomasa tiene carácter de energía renovable ya que su contenido energético procede en última instancia de la energía solar fijada por los vegetales en el proceso fotosintético. Esta energía se libera a romper los enlaces de los compuestos orgánicos en el proceso de Combustión, dando como productos finales Dióxido de Carbono y Agua.

Es una de las fuentes energéticas renovables con más potencial de crecimiento. Su uso pasa desde la generación de energía térmica, eléctrica, biocombustibles o Biogases. (Sebastián, 2010)<sup>19</sup>

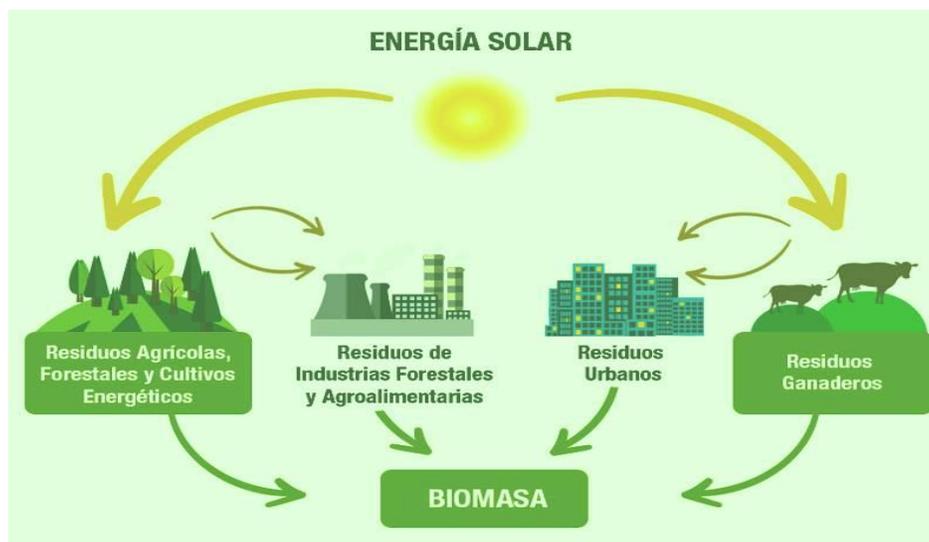
Algunos de los principales desafíos que existen para el uso adecuado de este tipo de energía renovable son:

- Dosificación del combustible: La biomasa ya tratada llega hasta la caldera por dosificadores que regulan la entrada de combustible para mantener siempre las condiciones de Combustión adecuadas (temperatura, exceso de aire, etc.).
- Combustión: La biomasa se quema en la caldera elevando la temperatura y convirtiendo el agua de las tuberías en vapor. Este circuito pasa primero por un economizador que comienza a calentar el agua antes de entrar en la caldera, optimizando el proceso.
- Eliminación de residuos: Las cenizas que quedan de la combustión llegan hasta un cenicero situado debajo de la caldera, y de ahí se reutilizan para posteriormente ser utilizadas en otros procesos. Los gases resultantes son filtrados para evitar la contaminación del aire.
- Recuperación del agua: El agua, tras pasar por la caldera, convertirse en vapor y mover la turbina, vuelve a condensarse y llega a un depósito. Allí comienza de nuevo el ciclo con el tratamiento del agua de alimentación a la caldera mediante sistemas como el de ósmosis inversa.
- Turbina de vapor. El vapor de agua pasa por unas toberas que reducen su presión, aumentando la velocidad. Este flujo hace girar los álabes de la turbina y transforma la energía del vapor en energía mecánica. Un generador aprovecha esta fuerza para convertirla en electricidad.
- Electricidad de alta tensión. La energía eléctrica del generador pasa al transformador, que aumenta el voltaje de la corriente por medio de inducción electromagnética. El transformador se conecta a la red eléctrica convencional. (González, 2009)

Es importante mencionar que la gestión de residuos sólidos es un problema social con un impacto significativo al medio ambiente, e incluso con algunas consecuencias considerables a la salud de la población, especialmente a la cercana a los sitios destinados para el depósito de

estos residuos, por lo que la propuesta del presente proyecto trata de obtener resultados a través del aprovechamiento de uno de los efluentes generados en esta clase de Sitios, el Biogás, aunque es conocido que otra propuesta para la obtención de energía es por medio de los lixiviados generados por la actividad biológica presente en el SDFC.

En la Ilustración 2.2. se puede apreciar de manera breve la generación de biomasa, la cual se puede resumir en la frase “la materia no se crea ni se destruye, solo se transforma”, esto quiere decir que los residuos producto de la actividad humana tienden a ser depositados en los SDF, aquí se degradarán en diferente tiempo según los diferentes materiales que se encuentren en ellos, estos generarán principalmente Biogás, el cuál sus principales componentes son Metano, Sulfuro de Hidrógeno (Haluro no disociado), Dióxido de Carbono y Monóxido de Carbono.



*Ilustración 2.3. Generación de biomasa.*

## CAPITULO III: PRUEBAS DE CAMPO Y LABORATORIO.

### 3.1. Medición y monitoreo de Biogás.

Como parte de monitoreo en campo bajo la supervisión de la brigada de monitoreo comisionada a éste Sitio, se empleó un Explosímetro Modelo GEM5000, marca LANDTEC, los pozos de extracción ubicados dentro del Sitio son en total 126, además de 54 pozos periféricos de monitoreo para verificar que no exista migración de Biogás.

En la Tabla 3.1. se muestran los resultados de composición de Biogás obtenidos en los pozos de extracción de Prados de la Montaña en un periodo de monitoreo del 09/03/2020 al 13/03/2020, en la primer columna se menciona el pozo monitoreado, en la segunda, tercera y cuarta columna se muestra el porcentaje de volumen registrado por el Explosímetro de CH<sub>4</sub>, CO<sub>2</sub> y O<sub>2</sub> respectivamente; en la quinta y sexta columna se muestran las partes por millón registradas de Monóxido de Carbono y Sulfuro de Hidrógeno respectivamente por el explosímetro.

*Tabla 3.1.: Resultados de composición de Biogás obtenidos en los pozos de extracción de Prados de la Montaña en un periodo de monitoreo del 09/03/2020 al 13/03/2020.*

# POZO	POZO	%Vol. CH <sub>4</sub>	%Vol. CO <sub>2</sub>	%Vol. O <sub>2</sub>	ppm CO	ppm H <sub>2</sub> S
1	PA-01	44.3	17.0	7.7	0	13
2	PA-02	56.7	34.2	0.6	0	4
3	PA-03	34.1	16.5	8.4	0	3
4	PA-04	72.2	27.6	0.2	0	39
5	PA-05	45.5	19.5	3.0	0	13
6	PA-06	72.5	27.2	0.2	0	326
7	PA-07	70.2	29.8	0.0	0	68
8	PA-08	72.4	23.7	1.0	1	16
9	PA-09	65.4	29.7	0.2	1	42
10	PA-10	54.9	16.9	0.9	2	35
11	PA-11	70.5	29.4	0.2	1	545
12	PA-12	46.6	29.2	0.3	3	66
13	PA-13	55.9	30.7	0.5	3	19
14	PA-14	57.3	42.2	0.2	1	36
15	PA-15	57.2	42.6	0.2	1	41
16	PA-16	62.8	36.6	0.7	3	32
17	PA-17	56.9	42.8	0.2	1	121
18	PA-18	74.0	35.0	0.3	1	14
19	PA-19	52.6	26.3	0.3	2	45
20	PA-20	58.3	41.5	20.2	1	42
21	PA-21	58.2	41.5	0.2	1	22
22	PA-22	51.8	37.9	0.2	2	5
23	PA-23	0.0	0.3	2.2	1	15
24	PA-24	48.9	37.0	0.2	1	8

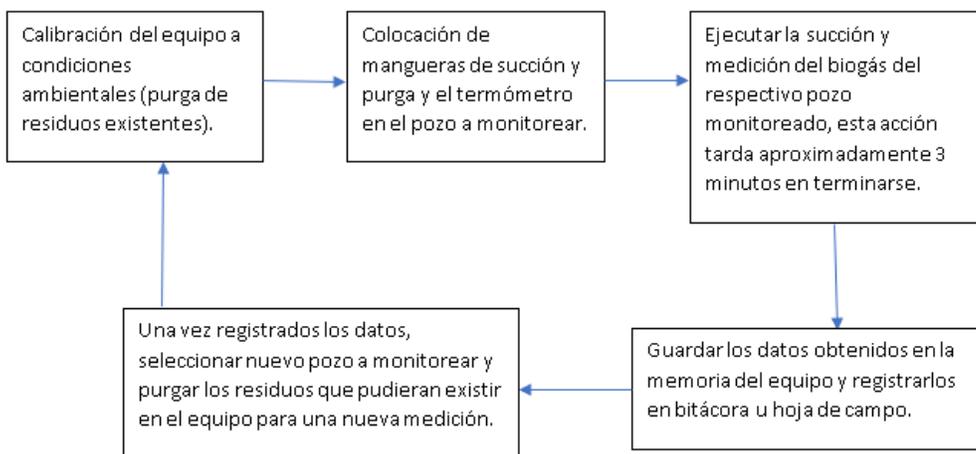
25	PA-25	35.4	23.7	20.6	1	26
26	PA-26	51.7	33.1	0.3	1	28
27	PA-27	46.2	28.5	0.2	1	7
28	PA-28	0.0	0.1	2.2	1	59
29	PA-29	69.1	35.6	1.7	2	85
30	PA-30	58.9	34.8	20.7	2	37
31	PA-31	50.3	32.4	0.7	2	39
32	PA-32	53.8	33.8	0.2	2	8
33	PA-33	0.0	0.2	1.5	1	23
34	PA-34	68.0	26.5	20.9	2	78
35	PA-35	72.3	21.8	0.2	1	41
36	PA-36	59.9	35.0	0.2	2	9
37	PA-37	0.0	0.1	0.2	3	33
38	PA-38	42.7	28.7	0.5	2	32
39	PA-39	50.3	21.5	0.2	2	37
40	PA-40	58.1	21.9	0.2	2	51
41	PA-41	66.2	22.1	0.3	2	54
42	PA-42	53.3	33.4	0.7	3	77
43	PA-43	28.9	25.3	2.1	3	3
44	PA-44	72.0	27.8	0.0	1	52
45	PA-45	58.1	0.2	0.1	3	78
46	PA-46	50.3	35.1	1.3	2	13
47	NH-01	42.4	15.8	6.7	1	13
48	NH-02	64.4	35.0	0.5	0	20
49	NH-03	7.8	4.8	16.9	1	4
50	NH-04	71.3	28.2	0.3	1	38
51	NH-05	74.2	19.0	0.7	1	11
52	NH-06	67.7	25.4	0.4	1	182
53	NH-07	69.9	29.9	0.2	1	46
54	NH-08	36.5	30.0	0.3	1	14
55	NH-09	57.9	28.3	0.2	1	29
56	NH-10	45.4	15.4	3.2	1	11
57	NH-11	69.7	30	0.3	1	186
58	NH-12	44.6	29.4	0.1	1	30
59	NH-13	24.8	15.4	8.3	1	29
60	NH-14	37.9	27.5	5.3	1	26
61	NH-15	53.9	43.8	1.9	0	47
62	NH-16	53.1	38.5	0.2	0	15
63	NH-17	56.5	43.3	0.2	2	32
64	NH-18	71.3	28.3	0.1	2	112
65	NH-19	59.6	37.8	0.6	0	11
66	SE-01	57.9	41.6	0.5	1	40
67	SE-02	48.8	34.6	2.8	1	37
68	SE-03	47.6	44.6	0.8	1	6
69	SE-04	51.3	35.2	3.3	1	26
70	SE-05	24.2	16.6	9.1	0	12
71	SE-06	2.3	1.8	18.7	1	8
72	SE-07	59.0	49.9	0.1	2	37
73	SE-08	0.2	0.3	20.0	1	7
74	SE-09	60.1	30.2	0.2	1	33
75	SE-10	63.8	35.6	2.5	1	22
76	SE-11	55.0	34.6	0.1	2	12
77	SE-12	57.5	36.6	0.1	2	18

78	SE-13	28.2	25.6	2.5	2	17
79	SE-14	57.8	29.0	0.3	1	13
80	SE-15	67	26.8	0.2	2	50
81	NK-01	64.7	26.2	0.1	2	96
82	NK-02	48.8	27.3	0.1	2	34
83	NK-03	62.4	37.1	0.4	2	32
84	NK-04	38.9	26.9	0.1	2	35
85	NK-05	44.8	27.8	0.9	7	9
86	NJ-01	65.4	29.7	0.1	3	8
87	NJ-02	37.5	28.1	0.1	2	19
88	NJ-03	58.3	33.6	0.0	2	90
89	NJ-04	50.1	23.7	6.2	2	61
90	NJ-05	70.5	29.5	0.1	3	26
91	NJ-06	64.4	35.6	0.0	2	180
92	NJ-07	54.8	32.6	1.3	2	71
93	INH-01	68.0	26.5	20.9	2	78
94	INH-02	72.3	21.8	0.2	1	41
95	INH-03	59.9	35.0	0.2	2	9
96	INH-04	0.0	0.1	0.2	3	33
97	INH-05	42.7	28.7	0.5	2	32
98	INH-06	50.3	21.5	0.2	2	37
99	INH-07	58.1	21.9	0.2	2	51
100	INH-08	66.2	22.1	0.3	2	54
101	INH-09	53.3	33.4	0.7	3	77
102	INH-10	28.9	25.3	2.1	3	3
103	INH-11	72.0	27.8	0.0	1	52
104	INH-12	58.1	0.2	0.1	3	78
105	INH-13	50.3	35.1	1.3	2	13
106	INH-14	42.4	15.8	6.7	1	13
107	INH-15	64.4	35.0	0.5	0	20
108	INH-16	7.8	4.8	16.9	1	4
109	INH-17	71.3	28.2	0.3	1	38
110	INH-18	68.0	26.5	20.9	2	78
111	INH-19	72.3	21.8	0.2	1	41
112	ISE-01	59.9	35.0	0.2	2	9
113	ISE-02	0.0	0.1	0.2	3	33
114	ISE-03	42.7	28.7	0.5	2	32
115	ISE-04	50.3	21.5	0.2	2	37
116	ISE-05	58.1	21.9	0.2	2	51
117	ISE-06	66.2	22.1	0.3	2	54
118	ISE-07	44.3	17.0	7.7	0	13
119	ISE-08	56.7	34.2	0.6	2	4
120	ISE-09	34.1	16.5	8.4	3	3
121	ISE-10	72.2	27.6	0.2	2	39
122	ISE-11	45.5	19.5	13.0	0	13
123	ISE-12	72.5	27.2	0.2	0	35
124	ISE-13	70.2	29.8	0.0	0	68
125	ISE-14	72.4	23.7	1.0	1	16
126	ISE-15	65.4	29.7	0.2	1	42

Es importante mencionar que el equipo presenta un porcentaje de error del 3.5% en cada parámetro monitoreado, según lo mencionado por el personal de monitoreo ambiental, esto es por parte del mantenimiento preventivo que no se realiza con tanta frecuencia como debería, por algunas limitaciones de presupuesto por parte de la Secretaría de Obras y Servicios, sin embargo, por fines académicos se emplearan las cifras registradas en el equipo. En la Ilustración 3.1. de muestra el Explosímetro GEM5000 Marca LANDTEC, empleado para la medición y monitoreo de los pozos de Biogás.



*Ilustración 3.1. Explosímetro GEM5000.*



*Ilustración 3.1.2. Diagrama de flujo correspondiente al procedimiento de uso del Explosímetro GEM5000 LANDTEC.*

En la Ilustración 3.1.3 se puede observar cómo opera el Explosímetro empleado, siguiendo el procedimiento explicado en el diagrama de flujo de la Ilustración 3.1.2.



*Ilustración 3.1.3. Explosímetro conectado a un pozo de Biogás para su monitoreo.*

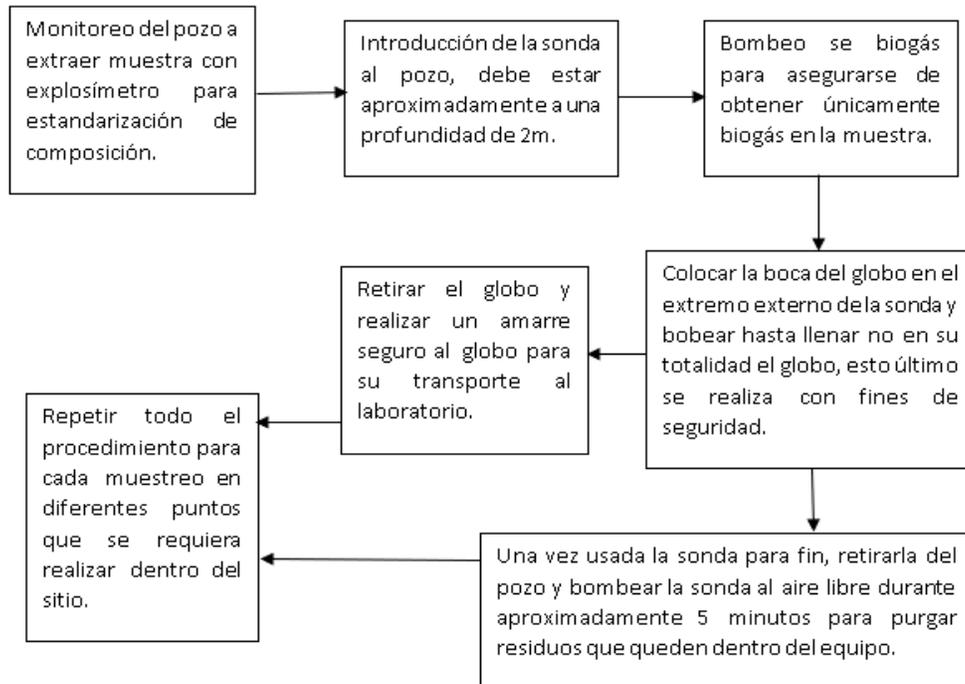
### **3.2. Muestreo de Biogás.**

Respecto al muestreo de Biogás se empleó la técnica empleada por monitoreo ambiental, la cual consiste; en extraer el Biogás, bombeando con ayuda de una sonda el Biogás dentro de un globo metálico, estas muestras se extraen por el programa de monitoreo ambiental como complemento a los datos obtenidos por los Explosímetros, dichas muestras se envían a un laboratorio de cromatografía de gases dentro de las instalaciones de la estación de transferencia ubicada en San Juan de Aragón.

Para fines de investigación propios del proyecto, se solicitó permiso de extraer unas muestras de Biogás cercanas a la alimentación del quemador del Sitio, para estimar la composición inicial al límite de batería de nuestro proceso de deshidrosulfuración, se midió *in situ* la composición del Biogás muestreado con el Explosímetro GEM5000 LANDTEC para poder obtener datos iniciales de balances de masa y energía, la composición del Biogás extraído es el siguiente:

- $CH_4$ : 60.7 %vol
- $CO_2$ : 34.8%vol
- $O_2$ : 0.9 %vol
- $CO$ : 2 ppm
- $H_2S$ : 53 ppm

A continuación, se muestra el procedimiento empleado por el personal de monitoreo ambiental, el cual se realizó de igual manera bajo supervisión del mismo personal para registro propio del presente trabajo:



*Ilustración 3.2. Diagrama de flujo correspondiente al procedimiento empleado por monitoreo ambiental para toma de muestras de Biogás, destinado para su transporte y posterior estudio en laboratorio.*

En la Ilustración 3.2.1 se muestra la sonda empleada en el proceso de muestreo de Biogás mencionado en el diagrama de flujo de la Ilustración 3. 2, así como también se muestra el globo utilizado para contener las muestras extraídas de Biogás en la Ilustración 3.2.2, y en la Ilustración 3.2.3. se muestra al personal técnico de monitoreo ambiental realizando las tareas de monitoreo y extracción de una muestra de Biogás.



*Ilustración 3.2.1. Sonda empleada para la extracción de Biogás.*



*Ilustración 3.2.2. Globo metálico empleado para extracción y transporte de muestras de Biogás.*

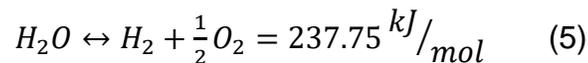


*Ilustración 3.2.3. Personal técnico de monitoreo ambiental realizando las tareas de monitoreo y extracción de una muestra de Biogás.*

### 3.3. Obtención de O<sub>2</sub> por electrólisis.

Hay múltiples procesos para obtener O<sub>2</sub> a partir de la materia, una de ellas es la electrólisis del agua, de ella se separa el Oxígeno y el Hidrógeno, esta es una forma de obtener O<sub>2</sub> con una alta pureza. Si el agua no es destilada, la electrólisis no sólo separa el H<sub>2</sub> y O<sub>2</sub>, sino que también las sales y minerales, que en ella se encuentran, y estos son que hacen que se conduzca la electricidad.

A continuación, se muestra la ecuación química empleada como criterio para dicho proceso:



Mediante la reacción anterior se obtiene un Hidrógeno de levada pureza (99.5%) destacando que como subproducto se produce únicamente Oxígeno. Esta reacción se produce en electrolizadores alcalinos que permiten una buena conducción de electrones. (Echaide, 2017)

Si el agua estuviera destilada no tendría conductividad, por ellos algunas veces para que esto ocurra se utilizan Hidróxido de Sodio (NaOH) como base química.

El objetivo de realizar esta prueba en laboratorio es determinar si es posible llevar a cabo la combustión del Biogás obtenido, esto dentro de un sistema cerrado a pesar de que en el proyecto propuesto se llevara a cabo a condiciones atmosféricas, con esto se comprobaría de manera experimental si es realmente posible quemar este Biogás fuera del Sitio en caso de requerir almacenamiento de este o su transporte a otra instalación donde se requiera del combustible, dicho transporte sería posterior a su tratamiento de Hidro-desulfuración.

De manera experimental, se empleó este procedimiento en el laboratorio a pequeña escala donde el equipo empleado fue el siguiente:

- Un regulador de voltaje BK PRECISION.
- Un par de caimanes de cobre calibre 12 AWG (standard).
- Un recipiente de plástico con una capacidad volumétrica aproximada de 10 L.
- Un soporte universal
- Pinzas de 3 dedos

- Una probeta graduada de 100 *ml*.
- Equipo de venoclisis.
- Un globo metálico similar al empleado previamente para toma de muestras de Biogás.
- Una barra de grafito ( 1/4” de diámetro, 2” de largo).
- Un pequeño pedazo de lámina de acero.

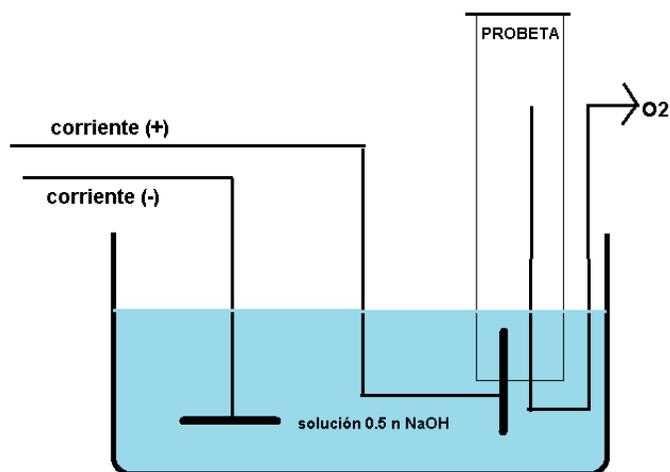
El procedimiento empleado consiste en preparar una solución 0.5 *N* de NaOH de 6 *L* aproximadamente, posteriormente se coloca de cabeza la probeta sujeta por el soporte universal y las pinzas de 3 dedos, para obtener los flujos de gases, el equipo de venoclisis fue dividido en 2 mangueras de aproximadamente 30 *cm* cada una, una de estas mangueras se introdujo un extremo dentro de la probeta con el fin de extraer el Oxígeno recolectado, el otro extremo fue introducido en el globo para recolectar el Biogás obtenido.

Para llevar a cabo esta reacción, se empleó el regulador de corriente mostrado en la Ilustración 3.3, donde se conectaron un extremo de cada caimán a la fuente, posteriormente los extremos no conectados a la corriente se conectaron a la barra de grafito y al pedazo de acero, fueron conectados a estos extremos las corrientes positiva al acero y la negativa al grafito, esto se realizó de esta manera debido a que del lado de la corriente positiva se extraería el Oxígeno y de lado de la corriente negativa el Hidrógeno.



*Ilustración 3.3. Regulador de corriente durante las pruebas realizadas, donde se contempla el voltaje empleado.*

La corriente positiva fue sumergida en la solución de NaOH de manera que el grafito se encontrara en la boca de la probeta, así al generar la separación de gases el Oxígeno es concentrará dentro de la probeta, el cual físicamente es el único en la parte superior, el Oxígeno se extrae y se alimenta en el globo de recolección, en la Ilustración 3.3.1 se ejemplifica este arreglo empleado y en la Ilustración 3.3.2 se muestra el equipo armado en laboratorio.

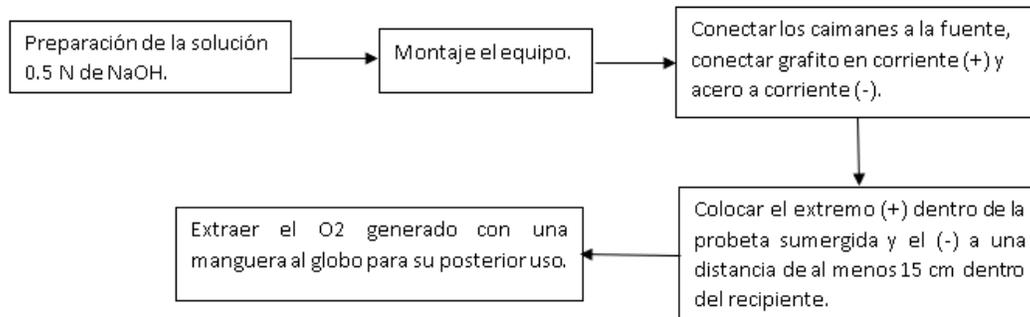


*Ilustración 3.3.1 Esquema de obtención de O<sub>2</sub> de manera experimental por electrólisis.*



*Ilustración 3.3.2. Montaje del equipo de electrólisis.*

Después de realizar el experimento en laboratorio por un tiempo aproximado a una hora y media, se obtuvieron aproximadamente 270 cm<sup>3</sup> del Oxígeno, el cual se empleó posteriormente en la simulación de Combustión de Biogás.



*Ilustración 3.3.3. Diagrama de flujo correspondiente al procedimiento empleado para obtención de O<sub>2</sub> por electrólisis.*

### 3.4. Oxidación de Biogás y su caracterización.

La Combustión es un conjunto de procesos químico-físicos, por los cuales se libera energía interna del combustible (Biogás) que se libera en forma de calor, para el aprovechamiento dentro de un horno, calderas o turbinas. La reacción de produce con presencia de Oxígeno.



Esta puede ser en presencia de aire (Combustión) o solo con Oxígeno (Oxidación). La oxidación permite temperaturas de llama más altas que la que se logra con Combustión del aire, está también produce una alta eficiencia en la disminución de gases de escape que consisten en CO<sub>2</sub> y H<sub>2</sub>O, lo que ayuda a que los procesos sean más eficientes, mientras que en hornos de gas natural la aplicación de aire enriquecido con hasta 30% de oxígeno con membranas poliméricas permite ahorros de combustible hasta del 18%, con temperaturas de horno de 1644 K. El alto índice de emisiones de CO<sub>2</sub> ha convertido la Combustión con aire enriquecido en una alternativa efectiva para mitigar este efecto, donde esta técnica combinada con recuperación de calor, reducción en la ventilación y aprovechamiento de la transferencia de calor por radiación puede aumentar la eficiencia térmica por encima del 70%. Sin embargo, la implementación de la Combustión (oxidación) en plantas existentes exige algunas adecuaciones, como la instalación de dispositivos de producción de O<sub>2</sub> y equipos para la recirculación de gases, por lo que esta tecnología es más susceptible de aplicarse en plantas nuevas. (Herrera-Múnera, 2013)<sup>20</sup>

Para las pruebas realizadas en laboratorio, se empleó el Biogás recolectado y el Oxígeno generado por electrólisis, para poder determinar de manera cualitativa que tan viable sería emplear este combustible, se usó una muestra del Biogás del Sitio donde se espera realizar el presente proyecto, sin embargo, para determinar si es posible realizar la Combustión a condiciones atmosféricas o en un sistema cerrado se empleó de la muestra mencionada y el Oxígeno previamente generado.

Para armar un pequeño sistema piloto de Combustión en el laboratorio, fueron requeridos los siguientes equipos:

- Un equipo de venoclisis (importante, no usar el mismo que se usó para la generación de  $O_2$ ).
- Un catéter (no importa el número de calibre para esta prueba).
- Pinzas para cortar mangueras y agujas.
- Un soporte universal.
- Unas pinzas de 3 dedos.
- Un matraz Kitasato de 250 *ml*.
- Dos matraces de 100 *ml c/u*.
- Dos tapones *No. 6*.
- Una fuente de fuego (encendedor).

Para generar el equipo de Combustión se coloca un extremo recortado del equipo de venoclisis para la alimentación del combustible a sistema piloto, es importante mencionar que se conservó la válvula propia del equipo de venoclisis para poder controlar los flujos de gas destinados a la Combustión.

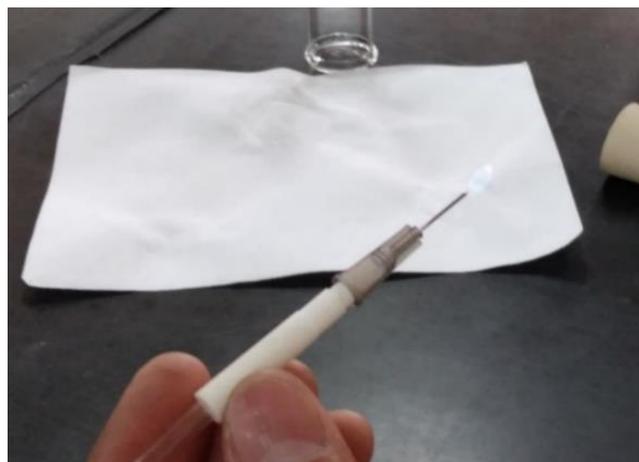
Posteriormente, se colocan los 2 matraces con 100 *ml* de agua destilada, donde con los tapones se alimenta el gas combustible a un primer matraz, con un tramo de 15 *cm* de manguera se coloca un segundo paso de gas al segundo matraz, finalmente se colocó el catéter a su extremo destinado a este fin del equipo médico, esa punta se recortó para fines prácticos en laboratorio, y así poder observar la presencia de una flama confirmando el fenómeno de Combustión.

Primero se realizó una prueba piloto empleando un tanque de gas butano empleado para tareas de plomería o herrería, esto con la finalidad de observar si este sistema pudiera generar una flama y que no existieran fugas como se muestra en la Ilustración 3.4.



*Ilustración 3.4. Prueba preliminar del sistema de Combustión.*

Una vez comprobado que no existieran fugas y que el sistema funcionaba, se realizó una segunda prueba donde esta vez sí se usó Biogás recolectado del Sitio, esta prueba al igual que la primera se realizó a condiciones atmosféricas, esta vez se comprobó que, debido a la concentración de Metano, es posible generar una flama aunque poco visible como se muestra en la Ilustración 3.4.1, sin embargo este fenómeno ocurre al igual que en el Sitio con el quemador existente en las instalaciones de extracción propias del Biogás.



*Ilustración 3.4.1. Flama generada por pruebas preliminares de Combustión.*

Sin embargo, a pesar de que ambas pruebas fueron consideradas como exitosas, fue necesario realizar una tercer prueba, la cual consistía en generar Combustión del Biogás en un sistema cerrado y controlado, esto se realizaría con fines de diseño para una turbina que opere a condiciones similares o a condiciones atmosféricas, pero al ser requerido cuantificar la composición del Biogás post Combustión, es necesario recolectar estos gases para su posterior medición en el mismo Explosímetro empleado para monitoreo.

Para poder recolectar estos gases posteriores a la Combustión, es necesario generar vacío en un matraz Kitasato, donde se sumergiría la boca en agua para asegurar que no existan impurezas del aire, posteriormente el matraz se alimentó con el Oxígeno generado anteriormente, una vez teniendo un sistema lleno sólo con el comburente, se retiró cuidadosamente del agua para generar de manera individual una flama con el sistema de Combustión, empleando Biogás como combustible, esta Combustión fue realizada completamente en el matraz, el cuál al término de la Combustión fue sellado para su posterior análisis con el equipo Explosímetro.

Los datos de composición de gases post Combustión fueron los siguientes:

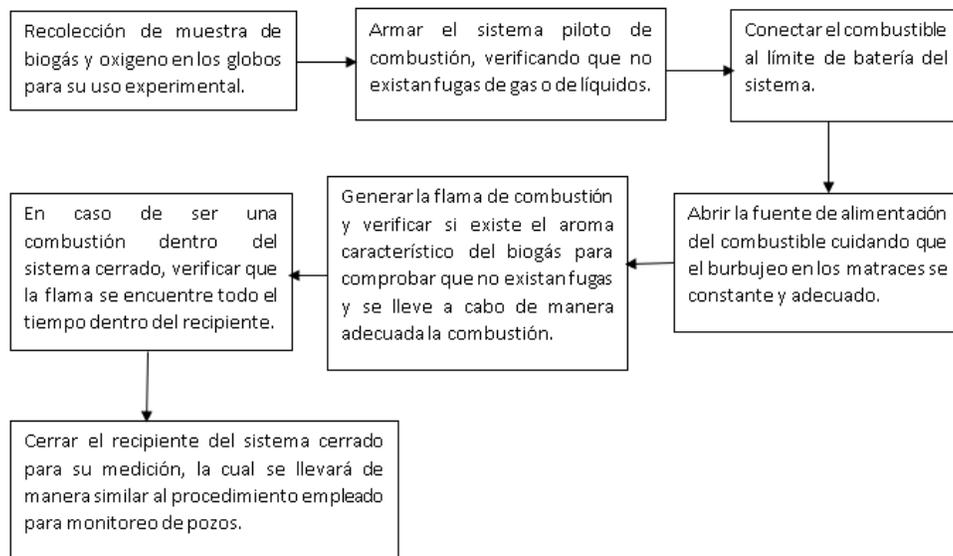
- $CH_4$ : 0.3 %vol
- $CO_2$ : 78.8%vol
- $O_2$ : 0 %vol
- $CO$ : 112 ppm
- $H_2S$ : 51 ppm

El  $H_2S$  es corrosivo en tuberías y pueda dañar los equipos en poco tiempo que este en contacto, por ello se tienes que bajar las concentraciones en ppm que nos ha arrojado el análisis del explosímetro. El hidrógeno de sulfuro ( $H_2S$ ) es un gas incoloro con un olor distintivo a huevo podrido. La percepción del olor del  $H_2S$  varía dentro de la población humana, en un rango de 0.008 – 0.2 ppm (Amoore, 1983; Beauchamp, 1984).

Los resultados son favorables ya que si hay combustión del 99.5% respecto al Biogás, con ellos se concluye esta prueba en laboratorio y podemos mencionar lo siguiente:

- La Combustión de este gas puede producirse tanto a condiciones atmosféricas como a condiciones controladas.
- El H<sub>2</sub>S presenta cierta solubilidad en agua, sin embargo, es considerable por lo que se necesita un equipo hidrodesulfurador.
- Es fundamental la presencia del O<sub>2</sub> para que se lleve a cabo la Combustión, si se realiza a condiciones controladas, es necesario realizar el balance de masa para determinar el volumen requerido en un día normal de operación, esto se puede omitir al llevarse a cabo la Combustión a condiciones atmosférica, de manera similar a como opera el actual quemador del Sitio.

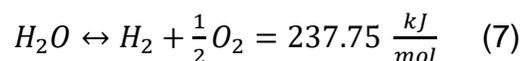
A continuación, se muestra la metodología empleada para realizar la prueba de Combustión y su respectiva medición en un diagrama de bloques de la Ilustración 3.4.2:



*Ilustración 3.4.2. Diagrama de flujo correspondiente al procedimiento piloto de Combustión.*

### 3.5. Obtención de H<sub>2</sub> para Metanación.

Hay múltiples procesos para obtener H<sub>2</sub> a partir de la materia, una de ellas es la electrolisis del agua, de ella se separa el Oxígeno y el Hidrógeno, esta es una forma de obtener H<sub>2</sub> con una alta pureza de 99.5%.



Si el almacenamiento se realiza en forma líquida ( $-253\text{ }^{\circ}\text{C}$ ), los costes de licuación son muy elevados tanto por los requerimientos energéticos como por el tiempo necesario (Barthelemy y cols.,2016). Si se opta por la compresión del Hidrógeno, se debe comprimir hasta una presión de  $200\text{ atm}$  aproximadamente. Del mismo modo, el Hidrógeno es muy reactivo por lo que el material de los recipientes deben ser inerte. (Abdalla y cols.,2018).

Las desventajas que presenta este método de almacenamiento llevan a la búsqueda de nuevos métodos que no impliquen costes tan elevados. Por estos motivos, se opta por la obtención de Hidrógeno y su posterior utilización en Metanación. (Echaide, 2017)

Para fines experimentales no fue necesario realizar esta prueba por separado, sin embargo para fines de diseños de equipos posteriores se contempla esta reacción química, donde el procedimiento de generación sería al mismo usado para generación de  $\text{O}_2$ , por lo que la metodología experimental y de diseño se tomarían de la misma fuente, de tal manera que se obtendrían 2 productos requeridos para esta operación, dichos productos ( $\text{O}_2$  y  $\text{H}_2$ ) son requeridos en el proceso principal en diferentes etapas, solo sería importante recordar que en la electrolisis el Hidrógeno se obtiene de la corriente negativa del sistema.

Otra opción para el uso de este gas requerido como reactivo en el proceso de Metanación, es la adquisición en el mercado, se puede considerar debido a que al realizar la Combustión de Biogás a condiciones atmosféricas, no sería necesario producir o adquirir Oxígeno, por lo que al no tener la necesidad de producirlo, puede ser una opción más económica el adquirir Hidrógeno de manera particular, sin embargo la opción de producirlo por electrolisis no se descarta para fines técnicos y de diseño.

### **3.6. Elaboración de diseño del Reactor de lecho fluidizado.**

Como se mencionó anteriormente, reacción de Sabatier es una reacción catalítica que busca obtener Metano a partir de  $\text{CO}_2$  en condiciones cercanas a las atmosféricas.

Para fin del trabajo los catalizadores son:  $12\%\text{Ni}-1\%\text{Ru}/\text{Al}_2\text{O}_3\text{-IGR}$ . En esta sección solo se mencionan las ecuaciones más importantes, en el Apéndice B se mencionan a detalle el diseño del Reactor.

Para el diseño del Reactor de Lecho fluidizado es necesario dar seguimiento a una serie de pasos que son los siguientes como se muestra en la ilustración:

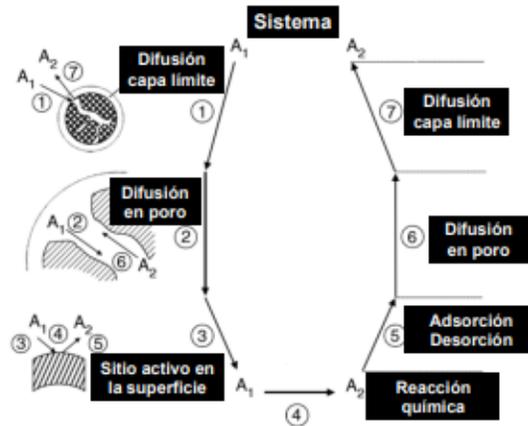
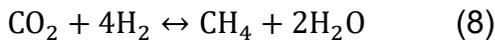


Ilustración 3.6 Esquema general en un sistema catalítico.

1. Desarrollar una ley de velocidad congruente con las referencias citadas, como se muestran en las ec 8, 9 y 10.



$$-r_s = k_s C_{\text{CO}_2 \cdot s} - k_{-s} P_{\text{H}_2\text{O}} C_{\text{CH}_4} \quad (9)$$

$$r_s = k_s \left( C_{\text{CO}_2 \cdot s} - \frac{P_{\text{H}_2\text{O}} C_{\text{CH}_4}}{K_s} \right) \quad (10)$$

2. Analizar la ley de velocidad de manera que los parámetros; constante de velocidad de reacción específica y constante de equilibrio ( $k, K$ ) puedan extraerse fácilmente de datos experimentales.

Tomando referencia de (Froment, Methane Steam Reforming, Methanation and Water-Gas Shift: 1. Intrinsic Kinetics , 1989)<sup>21</sup> las ecuaciones para calcular los parámetros a condiciones de operación en dicho proyecto fueron los siguientes:

El CO<sub>2</sub> y H<sub>2</sub> reaccionan formando CH<sub>4</sub>, sobre catalizador 12%Ni-1%Ru/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-IGR. A razón de 698.14 mol/h, las composiciones de alimentación son: CO<sub>2</sub>: 60.9%, H<sub>2</sub>: 38.8%, T: 600 K, P: 1.24 atm.

A medida que la temperatura incrementa, la constante de equilibrio disminuye en consideración, esto también ocasiona que la  $X_{eq}$  también decrezca con el aumento de la temperatura ya que están en relación directa, como se muestra en la Grafica 3.6. de (Hidalgo, Estrategias de operación para la gestión del calor en la reacción de metanación de CO2, 2019)<sup>22</sup>

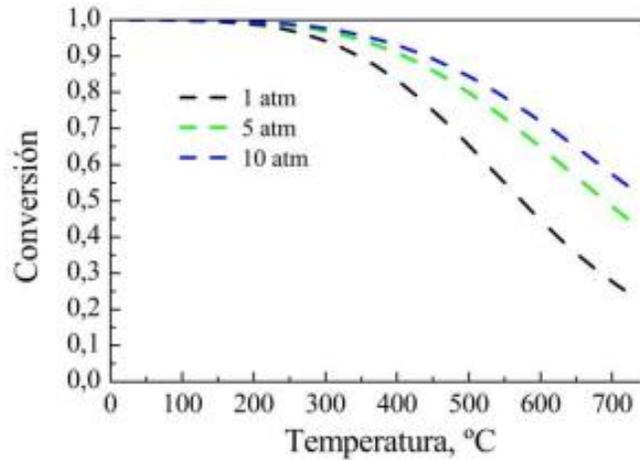


Ilustración 3.6.1  $X_{eq}$  Vs  $Tem$  a diferentes presiones.

La constante de equilibrio se puede relacionar con el número de moles de cada componente las cuales están vinculadas.

Para el cálculo de  $X_{eq}$  se despeja de la ec de  $K_{eq}$  (11).

$$K_{eq} = \frac{n_{CH_4}(1-X) * (n_{H_2O}(1-X))^2 * n_T^2}{n_{CO_2}(1-X) * (n_{H_2}(1-X))^4 * P^2} \quad (11)$$

$$X_{CO_2} = 1 - \frac{n_{CH_4}(1-X) * (n_{H_2O}(1-X))^2 * n_T^2}{K_{eq} * n_{CO_2} * (n_{H_2}(1-X))^4 * P^2} = 0,99 \quad (12)$$

La constante de equilibrio se puede relacionar con la presión parcial de cada compuesto ec. (14), ya que están también vinculadas con la conversión del CO2.

$$P_{CO_2} = C_T RT = P_{Tot} \left( \frac{1-X}{1+\epsilon X} \right) \left( \frac{P}{P_0} \right) \quad (13)$$

$$K_{eq} = \frac{\frac{c}{P_C} \frac{d}{P_D}}{P_A \frac{a}{P_B}} = 10719.0404 \quad (14)$$

Los valores de  $K$  de adsorción de cada componente fueron calculados con los parámetros de Xu & Froment.

*K Constante de adsorción:*

$$K_{CO_2} = 8.305 \times 10^{-11} \frac{1}{bar} \quad (15)$$

$$K_{H_2} = 5.637 \times 10^{-16} \frac{1}{bar} \quad (16)$$

$$K_{CH_4} = 3.74 \times 10^{-7} \frac{1}{bar} \quad (17)$$

$$K_{H_2O} = 5.94 \times 10^{+12} \frac{1}{bar} \quad (18)$$

*k Constante de velocidad de reacción:*

$$k = 1.99 \times 10^{-6} \frac{Kmol}{Kgcatal \cdot h \cdot bar^2} \quad (19)$$

3. Encontrar el mecanismo y un paso limitante de la velocidad congruente con los datos experimentales.

Ya que más de 75% de todas las reacciones heterogéneas no limitadas por la difusión son limitadas por la reacción superficial. (Scott Fogler, 2008) ec. (20)



4. Diseñar un reactor catalítico para lograr una conversión específica.

Con los valores antes mencionados se ha calculado  $-r_{CO_2}$  haciendo que la reacción es reversible e irreversible para ver el comportamiento de la  $K_{eq}$ , analizando los valores se prefirió el valor de la ec. (22) de forma irreversible.

La temperatura tiene influencia en la conversión de  $CO_2$  en catalizadores preparados por impregnación a humedad incipiente ya que a temperaturas mayores de  $700 K$  se empieza a

formar CO (Echaide, 2017), se ha tomado el valor de conversión de  $X= 0.75$  a una  $T=615 K$  como se muestra en la Ilustración 3.6.1, ya que es la temperatura a la cual el  $CO_2$  llega al Reactor por ello se hará el diseño de éste tomando en cuenta esos parámetros.

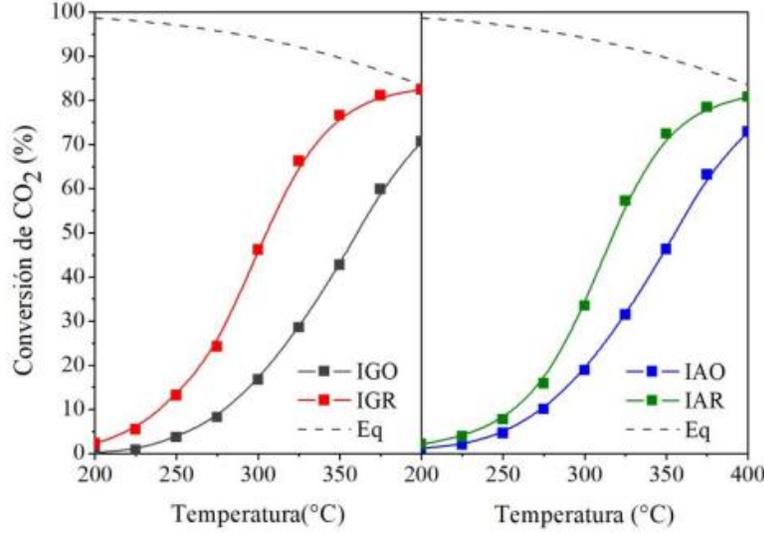


Ilustración 3.6.2 Influencia de la temperatura en la conversión de  $CO_2$  (a) en catalizadores preparados por impregnación a humedad incipiente, (b) en catalizadores preparados por impresión húmeda (Echaide, 2017).

$$-r_{CO_2} = r_s = \frac{k_s K_{CO_2} C_t \left( P_{CO_2} P_{H_2} - \frac{P_{H_2O} P_{CH_4} K_{CH_4}}{K_s} \right)}{\left( 1 + P_{CO_2} K_{CO_2} + K_{CH_4} P_{CH_4} \right)} \quad (21)$$

$$k_s K_{CO_2} C_t = k$$

$$-\frac{P_{H_2O} P_{CH_4} K_{CH_4}}{K_{s eq}} \quad \therefore \text{Se desprecia por Reacción Irreversible.}$$

Se desprecia el término ya que la  $K_{eq}$  de una reacción irreversible es muy grande y en su conjunto el término tiende a cero, considerando que la reacción es completa hacia los productos.

$$-r_{CO_2} = r_s = \frac{k(P_{CO_2} P_{H_2})}{1 + P_{CO_2} K_{CO_2} + K_{CH_4} P_{CH_4}} \quad (22)$$

$$-r_{CO_2} = r_s = \frac{1.99 \times 10^{-6} \left[ 0.61 \left( \frac{1-X}{1+1.22X} \right) * 0.61 \left( \frac{0.62-4X}{1+1.22X} \right) \right]}{1 + 8.3 \times 10^{-11} \left[ 0.61 \left( \frac{1-X}{1+1.22X} \right) \right] + 3.74 \times 10^{-7} \left[ 0.61 \left( \frac{X}{1+1.22X} \right) \right]} = 0.00006113 \frac{kmol}{Kgcatal \cdot h} \quad (23)$$

Aplicando la densidad del catalizador de  $4638.73 \text{ Kg/m}^3$  se calculó la masa del catalizador ec. (24) y el volumen del reactor ec. (25)

$$W = \frac{F_{A_0} X}{-r_{CO_2}} = \frac{(0.69814 \frac{\text{kmolCO}_2}{\text{h}})(0.75)}{0.00006113 \frac{\text{kmolCO}_2}{\text{Kgcat}\cdot\text{h}}} = 8565.43 \text{Kgcat} \quad (24)$$

$$V = \frac{W}{\rho} = \frac{8565.43 \text{Kgcat}}{4638.73 \frac{\text{Kg}}{\text{m}^3}} = 1.85 \text{m}^3 \quad (25)$$

### 3.6.1 Comportamiento hidrodinámico.

Un lecho fluidizado es un lecho de partículas sólidas en suspensión por efecto del flujo ascendente de un fluido. Pueden ser líquido-sólido o gas-sólido, en la mayoría de las aplicaciones comerciales el enfoque se relaciona gas-sólido como en el presente trabajo.

La predicción del lecho fluidizado depende de algunos parámetros hidrodinámicos como son la conversión en el efluente, las partículas del lecho que están relacionadas con la concentración y la temperatura, la desactivación y regeneración del catalizador, transferencia de calor, elecciones de dispositivos internos, pérdidas de catalizador por arrastre, elección del tamaño de partículas y la distribución del gas. En lechos fluidizados se trabaja a presión cercana a la atmosférica y algunos llegan a trabajar cerca de los  $20 \text{ bar}$  ya que esto puede mejorar el comportamiento del reactor.

El lecho fluidizado para reacciones catalíticas se utiliza solamente cuando la reacción es muy exotérmica y el catalizador es muy activo, circunstancia que suele coincidir con partículas de reducido tamaño, lo que significa que es baja y el comportamiento del lecho corresponde a burbujas rápidas. (MONTSERRAT IBORRA, 2013)<sup>23</sup>

La velocidad mínima de fluidización se estima utilizando la expresión de Ergun para la pérdida de presión de un fluido que circula a través de un lecho de sólidos, ya que este es un parámetro importante dentro del comportamiento hidrodinámico. En el momento de la fluidización incipiente, la pérdida de presión se hace independiente de la velocidad de paso y se compensa con el empuje y la fuerza gravitatoria. Considerando que las partículas no se apoyan unas en otras justo en el momento de tránsito de lecho fijo a lecho fluidizado se puede aplicar la ecuación de Ergun para describir la pérdida de presión por unidad de longitud de lecho fijo a partir de las propiedades del fluido y del sólido. Así se tiene (26):

$$\Delta PA = M_p g = (\rho_p - \rho_f) \varepsilon_{PM} A L_M g \quad (26)$$

$$\frac{\Delta P}{L_M} = A' \left[ \frac{\varepsilon_{PM}^2}{(1 - \varepsilon_{PM})^2} \right] \left[ \frac{\mu_F U_{FM}}{d_p^2} \right] + B \left[ \frac{\varepsilon_{PM}}{(1 - \varepsilon_{PM})} \right] \frac{\rho_F U_{MF}^2}{dp} = (\rho_p - \rho_f) \varepsilon_{PM} g \quad (27)$$

Siendo:

$\varepsilon_{MP}$  = fracción de volumen de lecho ocupada por las partículas en la fluidización  $\left( \frac{m^3 \text{ sólido}}{m^3 \text{ reactor}} \right)$

$\rho_p$  = densidad de la partícula

$$dp = \left[ \sum \frac{\Delta X_i}{\frac{d_{i-1} - d_i}{2}} \right]^{-1} \text{ de la curva acumulada} \quad (28)$$

$\Delta X_i$  = fracción másica entre dos tamaños

### 3.6.2 Desactivación del catalizador.

La pérdida de actividad catalítica o desactivación del catalizador puede ocurrir de tres formas principalmente: Tratamiento térmico (sinterización) o envejecimiento; ensuciamiento o coquización; contaminación.

La principal desventaja es que los catalizadores monometálicos de níquel se desactivan por sinterización a temperaturas elevadas. (Shuangshuang y cols., 2017). Está puede ser despreciable a temperaturas por dejado del 40% o de 0.3 a 0.4 veces la temperatura de fusión.

Es por ello, que en (Echaide, 2017) se opta por el estudio de catalizadores bimetálicos de Níquel-Rutenio en los que se espera aumentar la conversión de CO<sub>2</sub> respecto a los catalizadores monometálicos de níquel tratando de utilizar el menor contenido de Rutenio.

Para el caso de coquización en la reacción de metanación por arriba de temperaturas mayores a 700 K empieza la formación de coque y es común en reacciones de hidrocarburos, donde el coque queda impregnado en la superficie del catalizador y sigue la ec (29)

$$C_c = At^n \quad (29)$$

Donde:

$C_c =$  concentración del carbono en la superficie  $\frac{g}{m^2}$

$n$  y  $A =$  parámetros de ensucamiento.

La desactivación por envenenamiento suele suceder por la alimentación de reactivos o la formación de productos, ya que en la corriente de alimentación pueda haber una impureza.

La ley de desactivación en un lecho fluidizado puede ser la siguiente ec. (30) para calcular la cinética de desactivación.

$$\frac{d_a}{d_t} = k_d a C_A \quad (30)$$

## CAPÍTULO IV. INGENIERÍA BÁSICA.

### 4.1. Ubicación del proyecto.

El proyecto se ubicará en el SDFC de Prados de la Montaña (Zona Federal), el cual se encuentra ubicado al poniente de la Ciudad de México en la zona de Santa Fe dentro de la alcaldía de Cuajimalpa (san Mateo 05600, coordenadas: 9P4P+85 CDMX). (Google Maps, s.f.)<sup>24</sup>

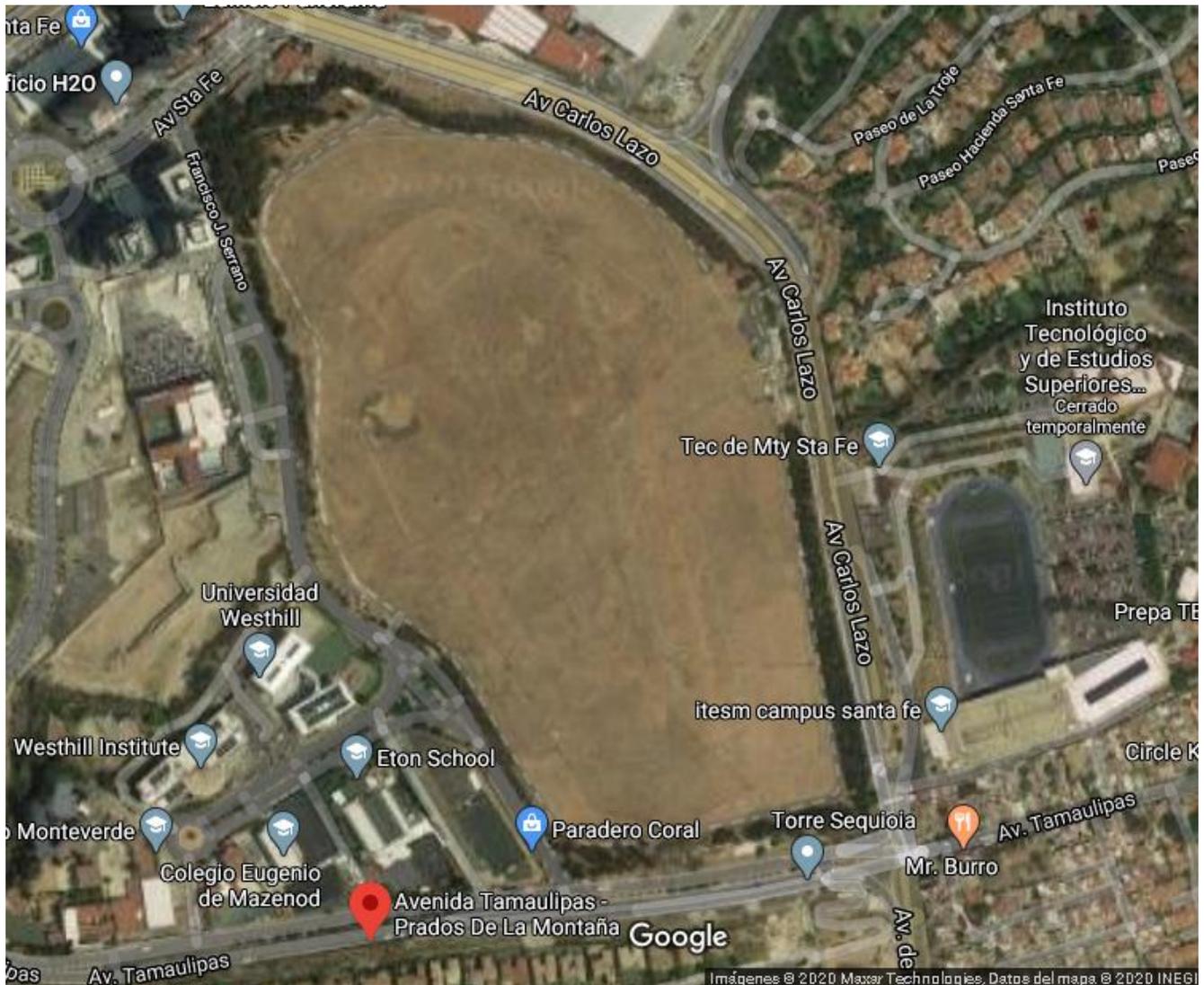


Ilustración 4.1. Ubicación geográfica del sitio.

## 4.2. Bases de diseño.

Antes de que un diseño pueda iniciarse correctamente, se debe de contener un conjunto de información en el diseño de la planta propuesta, la base de diseño establece que se debe hacer, cuando se debe hacer, donde se debe hacer y cuáles son las materias primas. Las distinciones también deben ser claras entre las instalaciones de base, las instalaciones con el límite de batería, las expansiones futuras de la planta (si las hay) y las modernizaciones de la planta. Los datos requeridos pueden clasificarse en diseño básico y diseños específicos. (Walas, 1999)<sup>25</sup>

Estos datos forman la base para el alcance del proyecto, que es esencial para cualquier diseño y el alcance incluye lo siguiente:

### 4.2.1. Generalidades.

Esta planta será diseñada para la producción de energía, a través de la Combustión de CH<sub>4</sub> recolectado en los SDFC, los gases exhaustos, principalmente el CO<sub>2</sub> será utilizado para producir nuevamente CH<sub>4</sub> a través de la reacción de Metanación, nuevamente para generar energía a través de un círculo virtuoso.

La energía total producida será de 468.72 kW/h, de acuerdo con la especificación de energía mostrada en la sección 4.14.

### 4.2.2. Capacidad de la planta y factor de servicio.

La capacidad de procesamiento de Biogás será de 29539.45 m<sup>3</sup>/Año = (35.4415 Ton/Año), esto en el SDFC Prados de la Montaña con un factor de 0.90, considerando un 10% de sobre diseño, esto en una capacidad máxima o mínima al Biogás que se estimada procesar al día. Tabla 4.2.2.

*Tabla 4.2.2. Capacidad de la planta.*

Diseño	Máximo	Normal	Mínimo
Ton/Día	0.1213	0.0971	0.0728

#### 4.2.3. Previas expansiones futuras.

Se prevé que aumenten las plantas en producción de energía en tamaño modular en cada SDFC de la CDMX que tenga una producción de CH<sub>4</sub> adecuado al proceso.

Esta característica se considera debido a que es posible una reubicación en otros Sitios según se requiera, el Sitio pueden ser alguno de los 6 de la Ciudad de México o algún Sitio Clausurado o activo en la República Mexicana, para instalar una planta modular se requiere que el SDF tenga como mínimo un año de vida para la producción de Biogás.

#### 4.2.4. Condiciones de alimentación a Turbina GT-01.

Las composiciones de Biogás a la alimentación del quemador fueron tomadas con un explosímetro LANDTEC tipo GEM el día 17/01/2020. Es necesario saber las composiciones que tiene el Biogás, ya que la Turbina tiene parámetros específicos de operación y algunos ácidos como el H<sub>2</sub>S que generar corrosión en la Turbina o equipos posteriores, dichas características fueron las siguientes:

- %Vol. CH<sub>4</sub>: 60.7
- %Vol. CO<sub>2</sub>: 38.8
- %Vol. CO: 0.9
- ppm O<sub>2</sub>: 2
- ppm H<sub>2</sub>S: 53
- Temperatura: 98 °F (36.7 °C)
- Presión: 22.24 psi (1.56 atm)
- Gas incoloro.
- Aroma ácido (similar al característico del vinagre).

*Tabla 4.2.4. Características del Biogás extraído a la entrada de la Turbina.*

Estado	Gas
Temperatura °C	36.7
Presión Kg/cm <sup>2</sup>	1.56
Sustancia	Biogás (CH <sub>4</sub> )
Forma de entrega	Tubería

Tabla 4.2.4.1. Características del Oxígeno a la entrada de la Turbina.

Estado	Gas
Temperatura °C	Ambiente
Presión $Kg/cm^2$	Atmosférica
Sustancia	Oxígeno
Forma de entrega	Tubería

#### 4.2.5. Condiciones de alimentación al Reactor DC-01.

Para la alimentación y diseño del Reactor se consideraron las condiciones de extracción actuales del Sitio, las cuales se describen a detalle en la sección A, éstas se retomarían y adaptarían al diseño de la planta, dichas características son las siguientes:

Tabla 4.2.5.1. Condiciones de alimentación al Reactor.

Estado	Gas
Temperatura °C	299
Presión $Kg/cm^2$	1.24
Sustancia	CO <sub>2</sub>
Forma de entrega	Tubería

Estado	Gas
Temperatura °C	Ambiente
Presión $Kg/cm^2$	Atmosférica
Sustancia	H <sub>2</sub>
Forma de entrega	Tubería

#### 4.2.6. Condiciones de productos.

Posterior al proceso de Metanación del Reactor, se busca tener las siguientes características en productos:

Tabla 4.2.6. Características de productos a la salida del reactor.

Estado	Gas
Temperatura °C	342.64
Presión $Kg/cm^2$	1.23
Componente principal	CH <sub>4</sub>
Forma de entrega	Tubería

#### 4.2.7. Eliminación de desechos.

Los desechos del proceso en general son los siguientes:

- Aguas amargas
- NOX
- SOX

La planta contará con drenaje pluvial, químico y sanitario, estarán separados.

#### 4.2.8. Condiciones climatológicas.

A continuación, se mencionan las condiciones climatológicas promedio registradas por el Servicio Meteorológico Nacional, para el poniente de la Ciudad de México:

*Tabla 4.2.9. Condiciones climatológicas.*

Rango	Máximo	Normal	Mínimo
Temperatura °C	29	21.9	-1.0
Precipitación mm	151	55	18
Humedad Relativa %	89	60	41
Vientos Km/h	19	12	5
Nivel Freático m	---	0.6	---
Elevación MNM	---	2136	---

#### 4.3. Criterios de diseño.

Estos criterios forman la base de diseño de componentes y sistemas químicos del proyecto muchos de ellos son productos de la experiencia y otros de las mejores prácticas, pueden ser generales o específicas para cada equipo.

Se planea desarrollar el diseño de una planta generadora de energía eléctrica empleando como alimentación al límite de batería Biogás generado en el SDFC de Prados de la Montaña, los gases de Combustión generados serán utilizados para llevar a cabo la reacción de Metanación produciendo CH<sub>4</sub> para generar nuevamente energía.

Este proyecto se planea realizar de tal manera que sea sustentable y amigable con el medio ambiente, esto con el fin de aprovechar el combustible producto de la descomposición anaerobia de los residuos sólidos que fueron depositados en este Sitio como alternativa a la

quema actual que se efectúa, y para disminuir riesgos de migración a las zonas periféricas, ya que el Sitio puede llegar a representar un riesgo tanto a la salud, al medio y a la infraestructura urbana.

#### **4.3.1. Criterios básicos de diseño de procesos.**

- Flexibilidad

Fácil funcionamiento para cada uno de los equipos dentro de la planta, en cuanto a operación del proceso y su control adecuado.

- Operación de la planta

Está en función en que los equipos operen normalmente y acorde a la capacidad de producción demandada.

- Futuras expansiones

Con el desarrollo de este proyecto se plantea poder realizar plantas similares en otros SDFC o SDF, donde en base al estudio del Modelo Mexicano del Biogás se determinará la respectiva vida útil de estos proyectos, siendo en primera instancia los SDFC de Tlalpan y Santa Catarina dentro de la Ciudad de México los principales prospectos para ampliaciones futuras debido a las características del Biogás similares en cuanto a concentración de CH<sub>4</sub>.

Se toma en consideración el Modelo Mexicano de Biogás (MMB) para hacer la proyección y estimar la vida útil del SDFC, se tendrá contemplada el área para la expansión y se pondrá una brida ciega para conexiones modulares futuras.

- Cambio en las condiciones de operación

La planta estará diseñada para el funcionamiento a condiciones máximas o mínimas para controlar los cambios de operación. Los equipos que fallen tendrán algún respaldo dependiendo si son muy necesarios dentro del proceso, como bombas o compresores los cuales tendrán su relevo para evitar que el proceso pueda llegar a detenerse.

- Accionamiento

El sistema de accionamiento estará integrado en la automatización que permita crear solución del control mecánico, neumático o eléctrico en la operación del proceso.

- Calentamiento y enfriamiento

Para el arranque de la planta se contará con energía eléctrica para la producción de  $H_2$  y  $O_2$ , un calentador a fuego directo para poder llevar el Reactor a las condiciones adecuadas de temperatura y presión, esto en los equipos importantes.

- Operación anormal y específica

Para las condiciones anormales de operación en presión el Reactor y los tanques de almacenamiento contarán cada equipo con válvula de alivio para evitar sobrepresión que puedan dañar el equipo. Como también se debe controlar la temperatura del flujo a la entrada del filtro. Los equipos tendrán válvulas de paro por emergencia.

#### **4.3.2. Criterios de diseño de equipo.**

- Tipos de equipo

Son acorde al funcionamiento para cada uno y las propiedades del fluido, para determinar el material de cada uno de ellos. Los intercambiadores de calor serán principalmente de tubos y corazas lo que determine el código *TEMA* (Walas, 1999).

Los tanques de almacenamiento y el Reactor serán acorde al código *ASME* Sección VIII (Código *ASME* Sección VIII, "The American Society of Mechanical Engineers", 2020).<sup>26</sup>

Las bombas, los compresores y Turbina se eligen acorde a la presión requerida para el proceso.

- Materiales de construcción

En la mayoría de los equipos se utilizará acero. Considerando el funcionamiento de ellos, la corrosión permisible y los códigos adecuados.

### 4.3.3. Criterios generales de diseño.

- Dimensionamiento de tuberías

Conociendo el Plan de Localización General (PLG), el Diagrama Isométrico y el flujo volumétrico, se pueden dimensionar la tubería, la selección del diámetro en cada sección del proceso, considerando la velocidad estándar de 10 *ft/s* para líquidos o 100 *ft/s* para gases, y que el costo no sea muy elevado.

- Espaciamiento de equipo

Acorde al tamaño de los equipos y normatividad requerida.

- Lineamiento de instrumentación, sistemas de control y seguridad.

Cada equipo debe tener la instrumentación necesaria, conectada al cuarto de control, como también el paro por emergencia para controlar la seguridad del equipo y de los operadores.

### 4.4. Modelo mexicano del Biogás.

La degradación de los residuos sólidos ocurre de manera gradual a partir del paso del tiempo generando una cierta cantidad anual de Biogás, existe una ecuación de degradación de primer orden que ayuda al estudio estimado de este fenómeno. (Burklin., 2005)<sup>27</sup>

Esta ecuación considera diversos factores como lo son región geográfica, clima, índice de incendios reportados en el Sitio y su tiempo de vida útil.

Para estimar la generación del Biogás, algunos de los modelos requieren que se realicen pruebas de extracción de Biogás y en otros de conocer la composición de los residuos y parámetros de funcionamiento de RESA o SDFC. El Modelo Mexicano del Biogás Versión 2.0 brinda la posibilidad de estimar y conocer algunos de los parámetros de funcionamiento del relleno, sin conocimiento de las pruebas de extracción de los residuos. Sin embargo, es necesario aclarar que la predicción de la generación con información *in situ* disminuye la incertidumbre a la toma de decisiones. (S., 2011)<sup>28</sup>

La ecuación del Modelo Mexicano del Biogás es la siguiente:

$$Q_{LFC} = \sum_{t=1}^n \sum_{j=0.1}^1 2kL_0 \left[ \frac{Mi}{10} \right] (e^{-kt_{ij}})(MCF)(F) \quad (31)$$

Modelo matemático alternativo de cálculo:

$$Q_{LFC} = (L_0)(R)(e^{-kC} - e^{-kt})$$

Dónde:

$$Q_{LFC} = \text{Flujo máximo esperado de Biogás} \left( \frac{m^3}{\text{año}} \right)$$

$i$  = Incremento de tiempo (1 año)

$n$  = Diferencia de el año de cálculo – año inicial de disposición de residuos

$j$  = Incremento de tiempo en 0.1 años

$$k = \text{Índice de generación de metano} \left( \frac{1}{\text{año}} \right)$$

$$L_0 = \text{Generación potencial de metano} \left( \frac{m^3}{\text{ton}} \right)$$

$M_i$  = Masa de residuos dispuestos en el año  $i$  (ton)

$t_{ij}$  = Edad de la sección  $j$  de masa de RSU  $M_i$  dispuestos en el año  $i$  (años)

$MCF$  = factor de corrección de Metano

$F$  = Factor de ajuste por incendios

$$R = \text{Tasa anual de depósito de RSU durante la vida activa del SDFC} \left( \frac{\text{ton}}{\text{año}} \right)$$

$C$  = Tiempo transcurrido desde el cierre del SDF; año ( $c = 0$  para sitios activos)

$t$  = Tiempo transcurrido desde el depósito inicial de RSU

La ecuación simplificada tiene un porcentaje de error del 3% respecto al modelo matemático del Modelo Mexicano del Biogás.

Variables para considerar en el cálculo:

- Categorías de RSU mostradas en Tabla 4.4:

Tabla 4.4. Categoría de los residuos sólidos.

Categoría	Características
1	Alimentos, materia orgánica y 20% máx. De pañales; residuos de degradación rápida.
2	Vegetales, papel higiénico y poda doméstica, municipal y de campo; residuos de degradación moderadamente rápida.
3	Papel, cartón, textiles y derivados de estos; residuos de degradación moderadamente lenta
4	Madera y sus derivados como leña quemada o muebles, caucho, piel, huesos y paja; residuos de degradación lenta.

- Índice de valoración de Metano ( $k$ ):

Este índice se deriva de la siguiente expresión:

$$\text{Años de vida de los RSU} = \frac{\ln(2)}{k} \quad (32)$$

Los valores de  $k$  se encuentran tabulados en la siguiente tabla considerando las regiones climáticas de México, dependiendo de la humedad relativa en el ambiente influirá en la velocidad de degradación de la materia depositada, es decir, a mayor humedad, mayor el factor  $k$ :

Tabla 4.4.1. Índice de valoración de  $CH_4$ .

Categoría	Sureste	Oeste	Centro e interior	Noreste	Norte e interior norte
1	0.300	0.220	0.160	0.150	0.100
2	0.130	0.100	0.075	0.070	0.050
3	0.050	0.040	0.032	0.030	0.020
4	0.025	0.020	0.016	0.015	0.010

- Generación potencial de Metano ( $L_0$ ): El tipo de suelo y el clima regional favorecerán a la degradación de la materia depositada en el Sitio:

Tabla 4.4.2. Potencial de CH<sub>4</sub>.

Categoría	Sureste	Oeste	Centro e interior	Noreste	Norte e interior norte
1	69	69	69	69	69
2	115	126	138	138	149
3	214	214	214	214	214
4	202	202	202	202	202

- Factor de corrección de Metano (MCF): donde la cercanía al Oxígeno ambiental ayudara a la degradación aerobia de la materia depositada:

Tabla 4.4.3. Factor de corrección de CH<sub>4</sub>.

Manejo relativo del SDFC	Profundidad <5m	Profundidad ≥5m
Sin manejo	0.4	0.8
Con manejo	0.8	1
Semi - aeróbico	0.4	0.5
Desconocido	0.4	0.8

- Ajuste por impacto de incendios (F), donde la presencia de incendios influirá en el cambio de pH del subsuelo al carbonizar ciertos componentes de éste, o al forzar la Combustión del Biogás acumulado antes de su extracción:

Tabla 4.4.4 Ajuste por incendios.

Impacto relativo por incendios	Valor tabulado de F
Impacto bajo	1/3
Impacto medio	2/3
Impacto severo	1

Para el estudio del SDFC de Prados de la Montaña se consideraron los siguientes datos:

$$L_o = 138 \text{ m}^3/\text{año}$$

$$R = 761486.49 \text{ ton/año}$$

$$k = \frac{0.0751}{\text{año}}$$

$$t = 1987 \text{ (año en que inició la vida útil del sitio)}$$

$$C = 1994 \text{ (año de clausura del SDF)}$$

Para los datos tabulados en las tablas de índice de valoración de Metano ( $k$ ), generación potencial de Metano ( $L_o$ ) y el factor de corrección de Metano ( $MCF$ ) se considera que la ubicación del Sitio de estudio es de categoría 2, y se encuentra ubicada en la región centro del país; además de un impacto prácticamente nulo de incendios en el Sitio, esto debido a la vigilancia y monitoreo continuo del Sitio, lo cual se complementa con el hecho de que se quema el Biogás del Sitio para minimizar riesgos potenciales de que ocurra un incidente.

Realizando un estudio proyectado a 30 años a partir del año de estudio para el presente proyecto (2020), se obtuvieron los siguientes resultados que se muestran en la tabla 4.4.5:

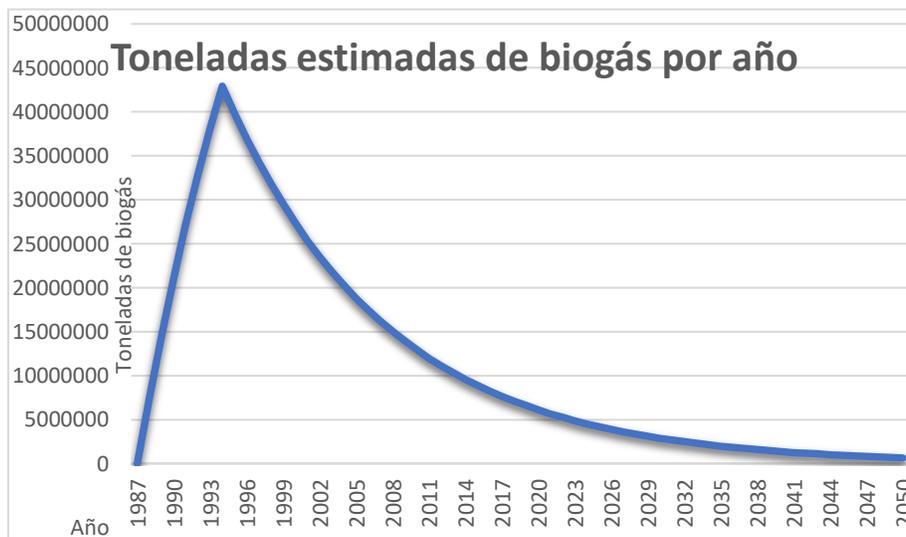
*Tabla 4.4.5. Producción estimada de Biogás en el SDFC.*

Año	$t$	$C$	QLFC ( $\text{m}^3/\text{año}$ )
1987 (Inicio SD)	0	0	0
1988	1	0	7593085.54
1989	2	0	14637521.2
1990	3	0	21172950.5
1991	4	0	27236152.4
1992	5	0	32861248.5
1993	6	0	38079894.8
1994 (Año de clausura)	7	0	42921459.9
1995	8	1	39820104.9
1996	9	2	36942842.9
1997	10	3	34273481.9
1998	11	4	31796999.6
1999	12	5	29499459.2

2000	13	6	27367931.2
2001	14	7	25390419.9
2002	15	8	23555796.6
2003	16	9	21853736.9
2004	17	10	20274662.1
2005	18	11	18809685.7
2006	19	12	17450563.4
2007	20	13	16189646.5
2008	21	14	15019839.1
2009	22	15	13934557.9
2010	23	16	12927695.3
2011	24	17	11993585.1
2012	25	18	11126970.5
2013	26	19	10322974.4
2014	27	20	9577072.23
2015	28	21	8885066.38
2016	29	22	8243062.46
2017	30	23	7647447.5
2018	31	24	7094869.61
2019	32	25	6582219.06
2020 (Año de referencia)	33	26	6106610.86
2021	34	27	5665368.45
2022	35	28	5256008.68
2023	36	29	4876227.82
2024	37	30	4523888.59
2025	38	31	4197008.18
2026	39	32	3893747
2027	40	33	3612398.41
2028	41	34	3351379.1
2029	42	35	3109220.13
2030	43	36	2884558.72
2031	44	37	2676130.57
2032	45	38	2482762.7
2033	46	39	2303366.92
2034	47	40	2136933.66
2035	48	41	1982526.28
2036	49	42	1839275.85
2037	50	43	1706376.19
2038	51	44	1583079.39
2039	52	45	1468691.59
2040	53	46	1362569.06

2041	54	47	1264114.57
2042	55	48	1172774.06
2043	56	49	1088033.49
2044	57	50	1009415.99
2045	58	51	936479.106
2046	59	52	868812.391
2047	60	53	806035.037
2048	61	54	747793.755
2049	62	55	693760.785
2050 (Proyección del cálculo)	63	56	643632.05

Gráfica 4.4.6. Proyección estimada de producción de Biogás hasta el año 2050 desde el inicio de depósito de residuos en el Sitio en el año 1987.



Se realizó la estimación de generación de Biogás en el Sitio a 30 años considerando el 2020 como año de referencia para el estudio como se muestra en la gráfica 4.4.6, así se logra tener un estimado de cuánto combustible se podría generar en este periodo de tiempo, al aplicar el Modelo Mexicano del Biogás nos permite estimar esta proyección, e incluso puede ser una fuente de información para tener un estimado de la vida útil del proyecto en general en la localización seleccionada para el presente estudio.

Del estudio realizado empleando este modelo se sabe que la producción del Biogás inicia desde el primer año de depósito de residuos, teniendo generalmente una producción máxima del combustible en el año de clausura oficial, de ahí que al no ser suministrados los residuos como materia prima para este proceso de degradación a Metano, la producción inicia a decaer lentamente al pasar los años, sin embargo este estudio al ser solo una estimación, se requiere corroborar de manera continua al monitorear constantemente los pozos de extracción y su respectiva composición para tener un estudio detallado del comportamiento de la curva correspondiente a este modelo matemático.

En conclusión para esta estimación se dice que a pesar de que la mayor producción del combustible ya paso hace más de 20 años, en los próximos 30 años se puede aprovechar aún una cantidad importante de Biogás para su aprovechamiento como recurso energético, siendo una producción de 6106610.86  $m^3$  para el 2020 (año de referencia del estudio), y para el año 2050 se espera una producción estimada de 643632.05  $m^3$ , además de que en base a este mismo modelo, se espera que para el año 2074 la producción de Biogás sea de 106391.66  $m^3$ , por lo que a partir de este año ya no sea factible seguir operando esta planta en este Sitio por la baja producción de Biogás.

De manera adicional se estima que la producción de Biogás en éste Sitio sea prácticamente de cero emisiones para el año 2229, esto indicaría la completa degradación de la materia depositada en el Sitio, aunque este último dato no sea de mayor relevancia para el presente estudio, da una cierta concientización de que tan difícilmente pueda ser restaurar un cierto daño provocado al medio ambiente por la actividad humana.

#### **4.5. Balances de masa.**

En las tablas 4.5 y 4.5.1 se muestran el balance de masa de la etapa de Combustión y la de Metanación. En la memoria de cálculo del anexo (Sección A) se muestran más a detalle.

Tabla 4.5 Balance de Masa para Combustión.

Balance de oxi-combustión en la turbuna			$CH_4 + 2O_2 \rightleftharpoons CO_2 + 2H_2O$				
Datos			Entrada		=	Salida	
	Kg/h	%	Kg/h	mol/h		Kg/h	mol/h
Q Biogas	14.892	100					
CH4	9.069228	60.9	9.069228	566.82675			
CO2	5.778096	38.8	5.778096			5.778096	24.94038
H2S							
CO	0.134028	0.9	0.134028			0.134028	
O2				36.27691	1133.6535		
H2O							20.40576
			5.912124	45.34614	1700.4803		
Total			51.258264	1700.4803		51.258264	1700.4803

Tabla 4.5.1 Balance de Masa para Metanación.

Balance de metanación			$CO_2 + 4H_2 \rightarrow CH_4 + 2H_2O$				
Datos			Entrada		=	Salida	
	Kg/h	%	Kg/h	mol/h		Kg/h	mol/h
CO2	30.7184	100	30.7184	698.1455			
CH4						0	11.1703
H2				5.585164	2792.582		
H2O							25.1332
			0	36.30356	3490.727		
Total			36.30356364	3490.727		36.30356364	2094.436

#### **4.6. Descripción del proceso.**

El proceso en general consiste en la extracción del Biogás del Sitio para alimentar a la planta, la cual tendrá 2 etapas de proceso, primera etapa; consistirá en el tratamiento del Biogás y su Combustión para generación de energía, segunda etapa; se basará en el tratamiento de CO<sub>2</sub> producto de la Combustión para su proceso de Metanación y recuperación de Combustible como fuente de energía.

##### **4.6.1. Etapa I Generación de energía.**

El Biogás sale de los pozos por la presión que se genera dentro del RS, el Biogás es impulsado hacia el Filtro hidro-desulfurador FG-01 para eliminar el H<sub>2</sub>S y poder tener una Combustión completa y no producir óxidos de azufre, el gas limpio es recolectado y almacenado en el Tanque pulmón TA-01 a las condiciones de presión y temperatura, ya que el control automático indica cuanto Biogás se requiere en la microturbina TG-01 donde se lleva a cabo la Combustión para generar electricidad, la energía eléctrica será suministrada a la CFE mediante el transformador TE-01, el gas de Combustión CO<sub>2</sub> es enviado al Reactor.

##### **4.6.2. Etapa II Metanación.**

Los gases que resultan de la Combustión pasan al Reactor DC-01, en éste equipo se lleva a cabo la reacción de Sabatier, ya que el equipo contiene los catalizadores seleccionados para la conversión, también se le agrega Hidrógeno que es necesario para la reacción, éste puede ser producto de la electrolisis. Los gases salen del Reactor a altas temperaturas, por ello pasan al Chiller CH-01 para disminuir su temperatura y condensar el vapor de agua a la salida del reactor, el condensado se elimina con trampas de condensado FB-01 y el Metano se envía a la microturbina para la generación de energía nuevamente, aplicando un círculo virtuoso.

#### 4.7. Requerimientos de servicios auxiliares.

A continuación, se mencionarán los requerimientos de servicios auxiliares dentro de la planta.

- Vapor

Los requerimientos de este servicio auxiliar son variables, por lo que en el diseño de cada equipo serán detallados, sin embargo, se muestran las características requeridas según la variación en la capacidad de los equipos:

*Tabla 4.7. Requerimiento de vapor.*

Alta Kg/cm <sup>2</sup>	60 a 274 ° C
Media Kg/cm <sup>2</sup>	20 a 211.4 ° C
Baja Kg/cm <sup>2</sup>	3.5 a 138.2 ° C

- Condensados

Las trampas condensan vapor y mandan el líquido al sistema de recuperación.

- Agua de enfriamiento

*Tabla 4.7.2. Requerimiento de agua de enfriamiento.*

Entrada Temperatura °C	Salida Temperatura °C
10	80
7	40

- Agua de Servicios

Fuente de servicios a Presión y Temperatura disponible por la red disponible de la Ciudad.

- Agua Potable

La requerida para el consumo del personal.

- Agua Contra Incendio

En la zona se encuentran múltiples hidrantes contra incendio, el cual será manejado por el cuerpo de bomberos de la Ciudad en caso de ser requerido.

- Aire de Instrumentos

Para control neumático de actuadores.

- Aire de Planta

Para el caso de aire acondicionado y presurizado deberá referirse a la norma NRF-051-PEMEX (PEMEX, Sistemas de aire acondicionado , 2007)<sup>29</sup>

- Gases Inertes

Serán generados en el proceso y utilizados como energía térmica.

- Energía Eléctrica

Se ejecutará con apego a las normas de las propias Instituciones del país o a la especificación de la NRF-048-PEMEX (Pemex, Diseño de Instalaciones Eléctricas, 2014)<sup>30</sup>

*Tabla 4.7.3. Requerimiento de energía eléctrica.*

Voltaje	Fase
115 volt	1
220 volt	2
380 volt	3

- Teléfono.

Los requeridos para todas las oficinas y lugares donde se ocupen.

- Sistema de Seguridad.

-HAZOP.

-Protección Personal.

-Zonas de seguridad marcadas con las señales correspondientes.

#### 4.8. Equipo de proceso.

Los equipos de proceso forman parte de las dos etapas para las que han sido diseñados y seleccionados en función a las especificaciones y a las condiciones de operación que tienen que ser sometidos cuando la planta funcione normalmente. Aplicando códigos y normas de referencia en función de cada equipo utilizado. En el anexo (Sección B) el diseño de equipos, forma de construcción, material seleccionado acorde a cada tipo de flujo y las dimensiones. Ya que con esto se puede hacer una distribución donde deben de colocarse cada equipo siguiendo el PLG.

En la tabla 4.8 se muestran los equipos utilizados y las claves de los equipos que están en función a la simbología de equipos de proceso. (Pemex, Simbología de equipo de proceso P.2.0401.01, 1999)<sup>31</sup>

*Tabla 4.8. Tabla de equipos de proceso.*

Equipo	Clave
Filtro/ Hidro desulfurador	FG-01
Tanque de almacenamiento	TA-01
Turbina	GT-01
Generador eléctrico	TE-01
Tanque de almacenamiento	FA-01
Reactor	DC-01
Chiller	CH-01
Condensador	FB-01, FB-02
Filtro	FG-01

#### 4.9. Líneas del proceso.

En la tabla 4.9, 4.9.1 y 4.9.2 muestra un resumen de las líneas de proceso principal, perfil hidráulico, carga y presiones respectivamente. En el anexo (sección C) se muestra la memoria de cálculo y el material seleccionado para cada sección de tubería, accesorios y válvulas seleccionadas.

Tabla 4.9 Perfil Hidráulico.

Tramo	POSO_FG-01	FG-01_TA-01	TA-01_GT-01	GT-01_DC-01	DC-01_CHILLER-01	CHILLER-01_TA-01
NPS	3/4"	3/4"	3/4"	1 1/2"	1 1/2"	1 1/2"
Diametro Calculado_in	0.83	0.7942	0.8	1.5056	1.57	1.364
Diametro Real_in	0.84	0.84	0.84	1.66	1.66	1.66
Espesor_in	0.109	0.109	0.109	0.14	0.14	0.14
Diametro Internio_in	0.622	0.622	0.622	1.38	1.38	1.38
Densidad_lb/ft3	0.045	0.05	0.048	0.025	0.024	0.0446
Reynolds	21848.47	20272.12	20457.74	25313.76	25614.35	48982.45
Factor de friccion	0.029	0.03018	0.03011	0.02715	0.0269	0.0249
Velocidad_ft/s	53.76	49.44	51	101.4992	106.4	74.34
DeltaP_100_psi	0.58	0.6	0.6	0.5998	0.6	0.6
Mach	0.0339	0.048	0.0355	0.0533	0.056	0.06

Tabla 4.9.1 Perfil de carga.

Tramo	POSO	FG-01	TA-01	GT-01	DC-01	CH-01
K(accesorios)	3.73	5.48	5.48	5.048	5.048	12.246
Leq total(acc+LTR)	41.8114	22.55	22.5823	35.5627	40.7229	136.93
ht_ft	822.24	369.05	387.8674	1116.548	1392.07	2115.099
Delta_P(acc)_psi	0.06633	0.0722	0.0729	0.1401	0.1478	0.3254
Delta_P(acc+LTR)_psi	0.309	0.2003	0.2022	0.334	0.3799	0.98

Tabla 4.9.2 Perfil de presiones.

Presion	POSO	FG-01	TA-01	GT-01	DC-01	CH-01
psig	22.4	20.13	19.53	18.93	18.2	42.67
Kg/cm <sup>2</sup> m	1.57487622	1.41527939	1.37309521	1.33091102	1.27958693	2.99999859

#### 4.10. Diagrama de flujo del proceso.

Para el DFP se tomó en cuenta la norma de simbología de proceso. (ISA, 1986)<sup>32</sup>.

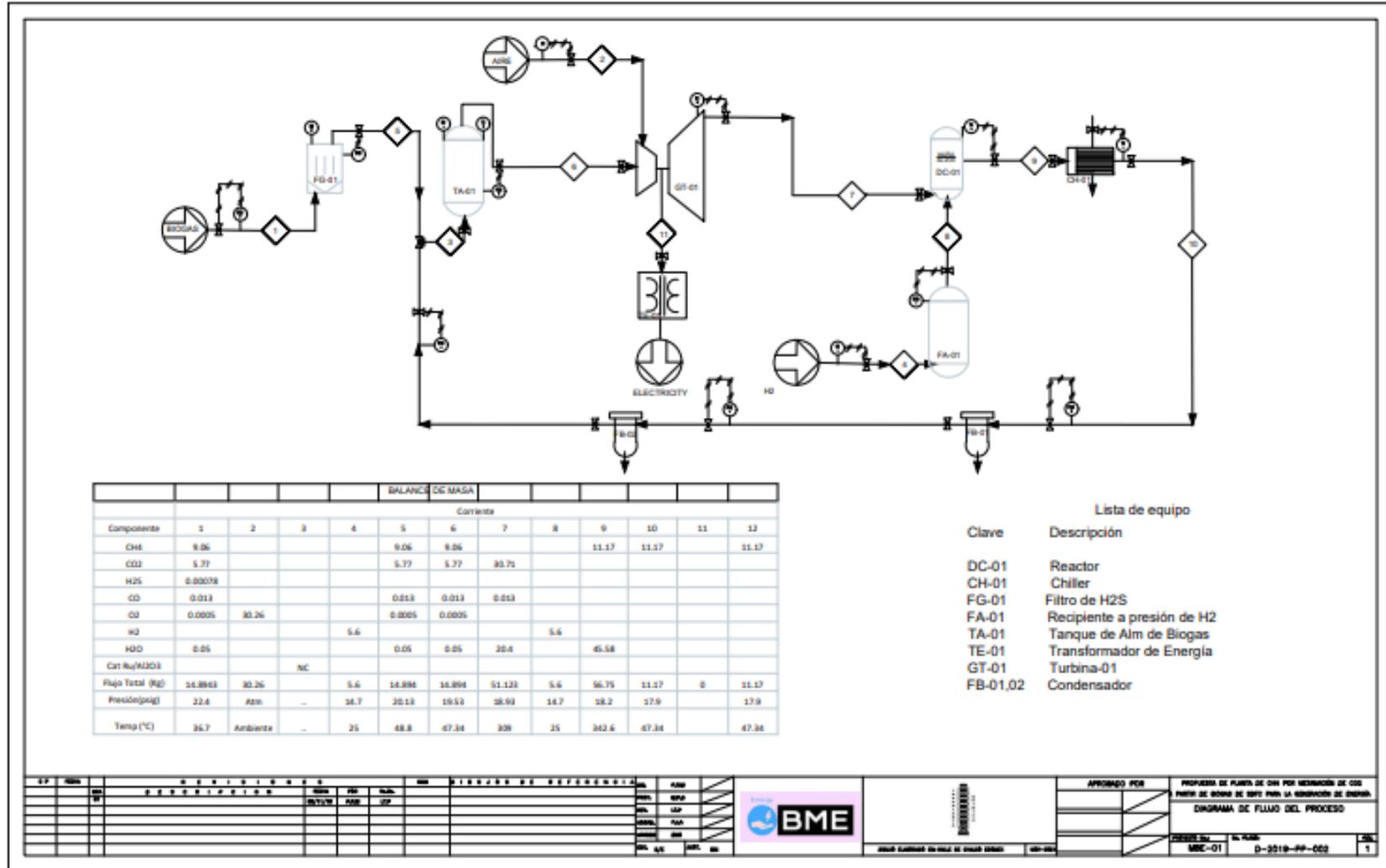
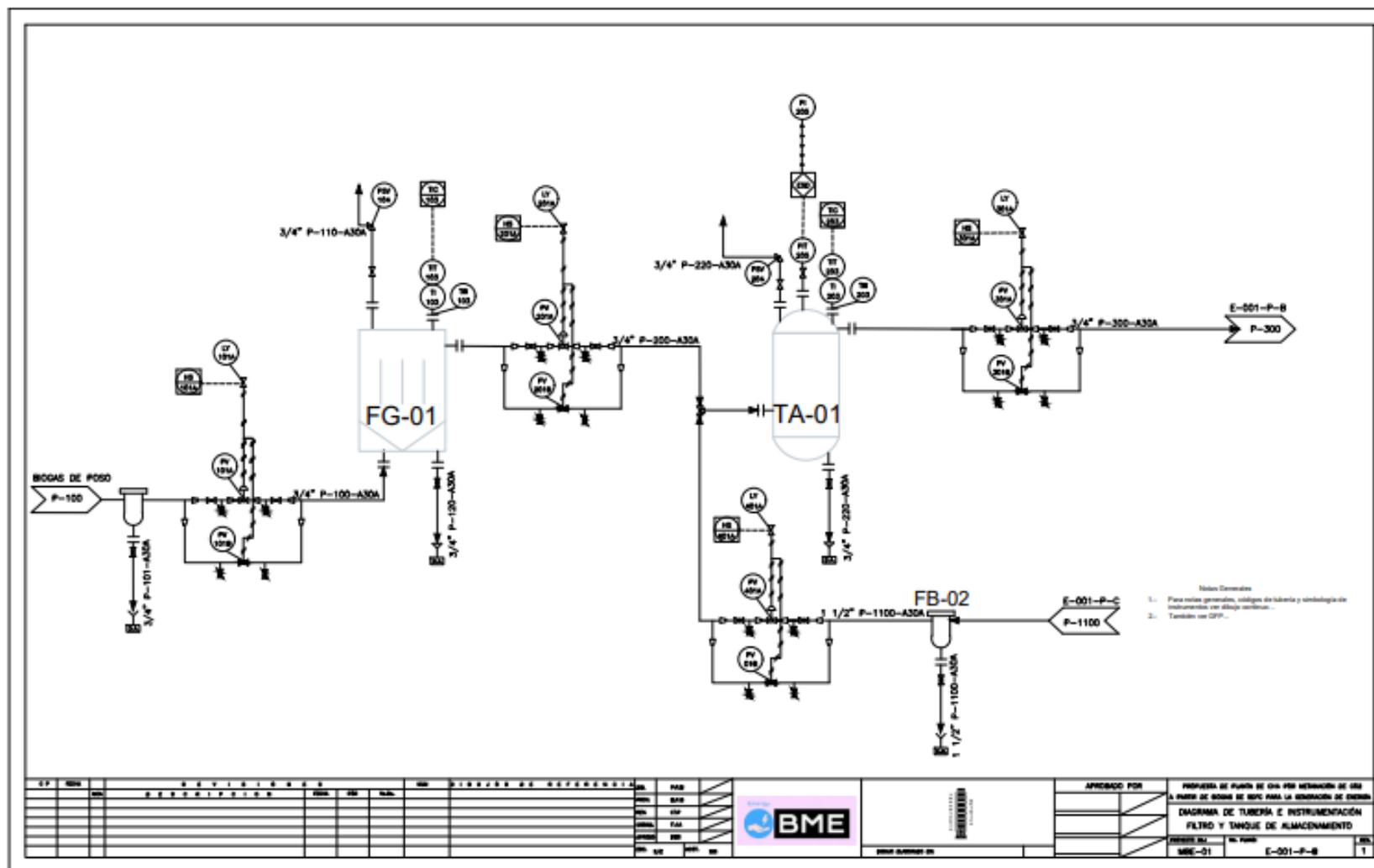


Diagrama de flujo de proceso 4.10.

#### 4.11. Diagrama de tuberías e instrumentación.

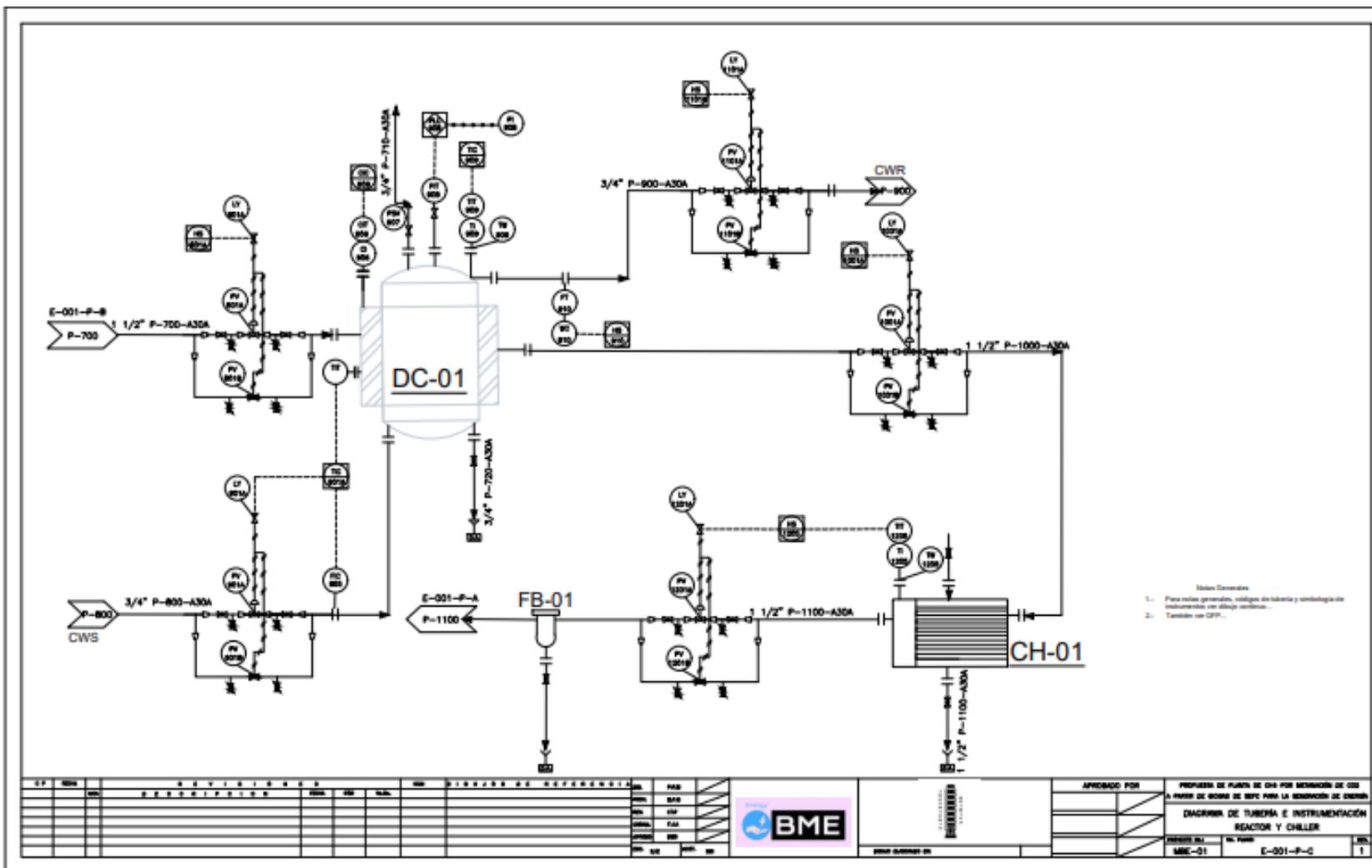
Para el DTI se tomó en cuenta la norma de simbología de Instrumentación ISA-5.5.

DTI 4.11 Filtro y Tanque de almacenamiento E-001-P-A.





DTI 4.11.2. Chiller y Reactor E-001-P-C.



#### **4.12. Filosofías de operación del proceso.**

Este proceso tendrá que operar durante 7 horas continuas al día, todos los días del año, esto considerando el horario de trabajo del actual quemador de Biogás existente en el Sitio, también tendrá que operar en horarios que no abarque de las 11:00 a las 14:00 horas durante los días de monitoreo contempladas por la secretaría de obras y servicios, esto por seguridad del personal que realiza esta labor del estudio de suelo, Biogás y lixiviados del Sitio, dicho monitoreo se realiza durante una semana, con un periodo de descanso de 15 días entre cada visita al Sitio para su respectivo monitoreo; además de que en caso de reportarse migración de Biogás o lixiviados, deberá de suspenderse la operación para generar el aviso correspondiente a protección civil y estar atento a reanudar brevemente las actividades cuando sea prudente hacerlo.

De manera particular por operación, las filosofías de operación deben ser mencionadas para mayor aclaración y entendimiento de cada equipo implicado en el proceso general en las 2 etapas que lo componen.

Esto se ha tomado por el actual quemador en el Sitio, el proyecto se está tomando en cuenta para que opere más días, lo cual se tendrán que modificar dichas actividades actuales en el Sitio.

##### **4.13.1. Filosofías de operación para remoción de H<sub>2</sub>S.**

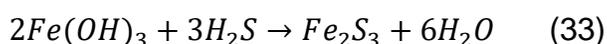
Para este proceso es importante mencionar que, en la presencia del H<sub>2</sub>S en estado gaseoso, puede generar problemas de corrosión en los diferentes equipos, por lo que es fundamental bajar la concentración de esta sustancia presente en el Biogás hasta un máximo de 7 ppm.

El proceso de Hidrodesulfuración se basará en la reacción de H<sub>2</sub>S con F<sub>2</sub>(OH)<sub>3</sub> para la generación de Fe<sub>2</sub>S<sub>3</sub>, para este proceso se puede recuperar el F<sub>2</sub>(OH)<sub>3</sub> haciendo circular una corriente de aire por este compuesto generando azufre en estado puro, lo cual puede generar un menor gasto para la obtención de reactivos, los cuales se comprarán al mercado chino.

Este proceso de purificación inicia al alimentar al tanque hidrodesulfurador con el Biogás obtenido de la red de pozos de extracción existentes en el SDF, los cuales se conectan por un sistema mixto de tuberías de acero inoxidable y PVC, estos gases serán extraídos por una

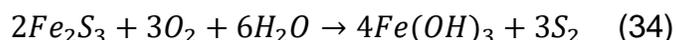
turbina la cuál alimentará al tanque por la parte inferior, donde se encuentran los pellets de  $F_2(OH)_3$ , estos pellets tienen una pureza de 99.8%, por lo que se realizaron los cálculos y consideraciones teniendo en cuenta su alto grado de pureza, el recipiente tendrá un contenido de 51.03 Kg, esto considerando que se tiene una operación de 7 horas continuas cada día, y se encuentra diseñado el equipo para recibir mantenimiento cada tercer día.

El gas resultante tendrá una pureza mayor estimada para ser alimentado a la Turbina posterior al proceso, la cual puede operar con un contenido máximo estimado de 7ppm, por lo que la reacción considerada para los criterios de diseño de este equipo es la siguiente:



En este proceso se obtendrá vapor de agua generado, por lo que se contará con una válvula de alivio en el tanque de tipo *closed Bonet pressure relied valve, style JOS/JBS*, orificio tipo G (325mm o 0.503in), serie 800; esta válvula tendrá la función de retirar el exceso generado de vapores de agua y Biogás que se acumulen dentro del equipo para poder evitar incidentes en el Sitio que puedan afectar a la infraestructura existente o a la vialidad y centros de trabajo/educativos que se encuentran cerca de la periferia del Sitio.

Posteriormente para poder recuperar un poco del reactivo, se removerá del equipo el  $Fe_2S_3$  obtenido para dejarlo expuesto al aire libre y obtener mediante una reacción exotérmica azufre sólido y un poco de  $F_2(OH)_3$  que se podrá reutilizar para un nuevo proceso de limpieza, la reacción considerada para esta recuperación de reactivo es la siguiente:



#### **4.13.2. Filosofías de operación para Combustión de Biogás.**

Esta es la operación principal del proceso en general, se basa en la Combustión del Biogás previamente tratado para el aprovechamiento energético producto de la reacción para su conversión en energía eléctrica, al ser un equipo termo generador requiere de la operación bajo condiciones controladas, además del suministro correspondiente de combustible, también será necesario un suministro de un comburente, el cual será el Oxígeno existente en el ambiente, al ser un equipo que operará bajo condiciones similares del actual quemador del Sitio, deberá de operar bajo las mismas condiciones, las cuales son:

- Operación durante 7 horas diarias, todos los días del año.
- El mantenimiento preventivo en este equipo es fundamental, ya que la Turbina del equipo provee la presión requerida para el flujo de los gases anteriores y posteriores.
- No operar durante trabajos de mantenimiento a la infraestructura ya existente o nueva del Sitio por cuestiones de seguridad.
- No operar al menos 10 horas previas o mientras se realice el trabajo de monitoreo quincenal de pozos de extracción o visitas de personal perteneciente a alguna institución pública o privada en el Sitio, esto con fines de seguridad y de obtener resultados lo más certeros posibles de la composición del Biogás.
- A pesar de lo mencionado en el punto anterior, si puede operar en caso de que los trabajos monitoreo o muestreo sean a lixiviados o condiciones atmosféricas por parte de la secretaria de obras y servicios de la ciudad, esto debido a la lejanía entre los pozos de lixiviados a la zona donde se encuentra el actual quemador y se pretende ubicar el proyecto.
- Su ubicación debe estar al menos 7 metros alejado del pozo más cercano y al menos a 10 metros de distancia de la barda periférica al Sitio, debido al continuo paso de peatones y la constante circulación de vehículos en la zona.

Adicionalmente a los criterios anteriormente mencionados, es importante mencionar que debe existir un plan de emergencia en caso de fallo y propagación de fuego causado por este equipo, los criterios a considerar serán los siguientes:

- No modificar los hidrantes contraincendios ya existentes dentro y fuera del Sitio.
- Tener extintores tipo ABC en las oficinas del Sitio y en casetas de vigilancia, además de una capacitación esencial al personal que labore en el Sitio para poder actuar como primeros respondientes en caso de ocurrir un incendio.
- El control de la planta en general debe ser cuidadosamente monitoreado durante la operación de Combustión para reportar inmediatamente anomalías en caso de ser detectadas.

#### **4.13.3. Filosofías de operación para tanques de almacenamiento en general.**

Para estos equipos es fundamental considerar que todos se encargan de almacenar gases, entre los que podemos destacar son:

- Biogás con o sin tratamiento.
- Oxígeno.
- Hidrógeno.

Estos tanque de almacenamiento se consideran dentro del proceso debido a la necesidad de tener materias primas de respaldo para la operación del proceso en general, en caso de que se deba interrumpir la extracción de Biogás, por lo que constantemente se deban de llenar, esto ocurre por la naturaleza de todos los gases anteriormente mencionados que pueden sufrir fugas de los tanques, para minimizar este fenómeno, se planea diseñar cada tanque con la capacidad de presión y temperatura mínima adecuada para mantenerlos a sus condiciones favorables para su manejo, además de un sistema de purga y de válvulas de seguridad correspondientes a cada gas manejado, estos sistemas deberán de ser de materiales adecuados para su manejo, se recomienda principalmente su diseño con Acero Inoxidable Tipo 316, esto se contempla debido a que este material de construcción es adecuado para trabajar con gas natural y sus efluentes, tiene las características físicas y químicas que pueden tolerar corrosión y altas presiones con las que opera normalmente el proceso.

#### **4.13.4. Filosofías de operación para el Reactor de Metanación.**

Este equipo tiene la tarea de manejar los efluentes propios de la Combustión, por lo que da una mayor caracterización del proyecto con fines ambientales, si bien el usar un gas producto de la actividad urbana es un factor para aminorar el impacto ambiental, al reducir las emisiones a prácticamente 0% de gases de efecto invernadero da un mayor compromiso a las energías renovables.

El equipo al generar un gas combustible como producto, deberá de tener las mismas condiciones de seguridad consideradas para el equipo encargado de la Combustión,

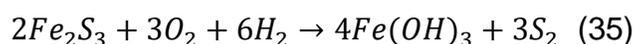
Además de que es un proceso donde la reacción química que se lleva a cabo es exotérmica (165 *kJ/mol* producido), por lo que es necesario el servicio de agua de enfriamiento para su constante refrigeración, sin embargo, en este proceso no existe algún otro equipo que requiera

ser calentado por lo que se descarta el diseño de un intercambiador de calor para aprovechamiento de esta energía producida.

Otro aspecto que también resulta importante es la implementación de una válvula de seguridad tipo Series 900 OMNI-TRIM, orificio tipo E (126 mm), para asegurar la liberación de gases producto de una sobrepresión en la operación normal del equipo.

#### **4.13.5. Recuperación de Fe(OH)<sub>3</sub>.**

Como parte de la optimización del proceso, también se contempla la recuperación de Fe(OH)<sub>3</sub>, esto se puede realizar debido a que al hacer circular una corriente de aire en los pellets usados, se genera la siguiente reacción química exotérmica:



Esta reacción se llevaría a cabo a condiciones atmosféricas al aire libre y no dentro de un equipo en específico, por lo que al igual que en el Reactor de Metanación, no hay posibilidad de aprovechar esta energía para otras etapas del proceso.

Es importante realizar este proceso debido a que la formación de azufre en la superficie de los pellets de Hidróxido de Hierro (III) disminuye la capacidad de remoción de H<sub>2</sub>S del Biogás, y no solo con fines de reutilización de materiales o disminución de costos en materias primas, el principal objetivo de esta operación es el de dar un mantenimiento preventivo al equipo y mejorar su optimización, además de que el azufre recuperado puede ser donado si se solicita a instituciones públicas o educativas que requieran de este material para realizar algunas de sus funciones, de esta manera se genera un apoyo secundario a parte de la generación de energía.

#### **4.14. Especificaciones de energía.**

Generación y consumo de energía eléctrica.

Como se ha mencionado anteriormente, en la Turbina GT-01 se realizará la reacción de Combustión en la cámara de ésta, además se generará energía eléctrica en este equipo producto de la reacción, para estimación se considera el poder calorífico del Biogás, en base al conocido del gas natural:

$$Pc = [18.8 - 23.4] \frac{mJ}{m^3} \quad (36)$$

Donde Pc= Poder calorífico del combustible.

Para este cálculo se utilizó un valor estimado promedio:

$$Pc = 21.1 \frac{mJ}{m^3}$$

Ahora considerando una densidad de:

$$\delta = 1.2 \frac{kg}{m^3}$$

Y un flujo másico de Biogás estimado en base a lo mencionado por personal de monitoreo ambiental, se tiene:  $13.874 \frac{kg}{h}$

Considerando la operación diaria de 7 horas para este proceso, se tiene un flujo diario total de:

$$97.118 \frac{kg}{h}$$

Ahora considerando la densidad antes mencionada, el flujo volumétrico diario estimado es:

$$Q = \frac{m}{\delta} = \frac{97.118 \frac{kg}{día}}{1.2 \frac{kg}{m^3}} = 80.93 \frac{m^3}{día} \quad (37)$$

Para el cálculo de la potencia de la turbina se consideró la siguiente ecuación:

$$=Q = \frac{P}{Pc}; P = Q * Pc \quad (38)$$

Donde:

$Pc = \text{poder calorífico}$

$Q = \text{flujo}$

$P = \text{potencia}$

Entonces se tiene la siguiente potencia estimada para la turbina:

$$P = \left( 80.93 \frac{m^3}{día} \right) \left( 20.85 \frac{mJ}{m^3} \right) = 1687.3905 \frac{mJ}{día}$$

Con base en este cálculo, realizando conversión de unidades se estima la siguiente generación de energía eléctrica en este proceso:

$$P = 468.72 \frac{kW}{h}$$

Adicionalmente, se estimó el consumo eléctrico propio de los instrumentos y accesorios propios del proceso, esta estimación se realizó en base a un consumo promedio de los instrumentos existentes en compra virtual, los cuales se consideraron en la cantidad de instrumentos requeridos para el proceso general como se mostrará en el diagrama de tuberías e instrumentación, los cuales se mostrarán en la siguiente tabla:

*Tabla 4.14. Consumo energético de instrumentos para el proceso.*

Clave de instrumento	Consumo (W/h)	Unidades requeridas	Consumo total. (W/h)
PV	-----	24	-----
HS	-----	12	-----
LY	80	12	960
LIC	100	3	300
LSH	20	3	60
LSL	20	3	60
LT	20	4	80
TIC	130	5	650
TIT	60	6	360
TI	30	5	150
TW	50	5	250
ESD	120	2	240
PI	110	3	330
PIT	110	2	220
PIC	150	1	150
SHH	180	1	180
SC	110	1	110
FIC	20	3	60
FIT	20	2	40
FE	20	2	40
RY	100	1	100
CI	110	1	110
CIT	200	1	200
CIC	80	1	80
PLC	110	1	110
WC	50	1	50
Señal software	4.5	(estimado por uso)	4.5
Señal eléctrica	400	(estimado por uso)	400
Señal neumática	-----	-----	-----

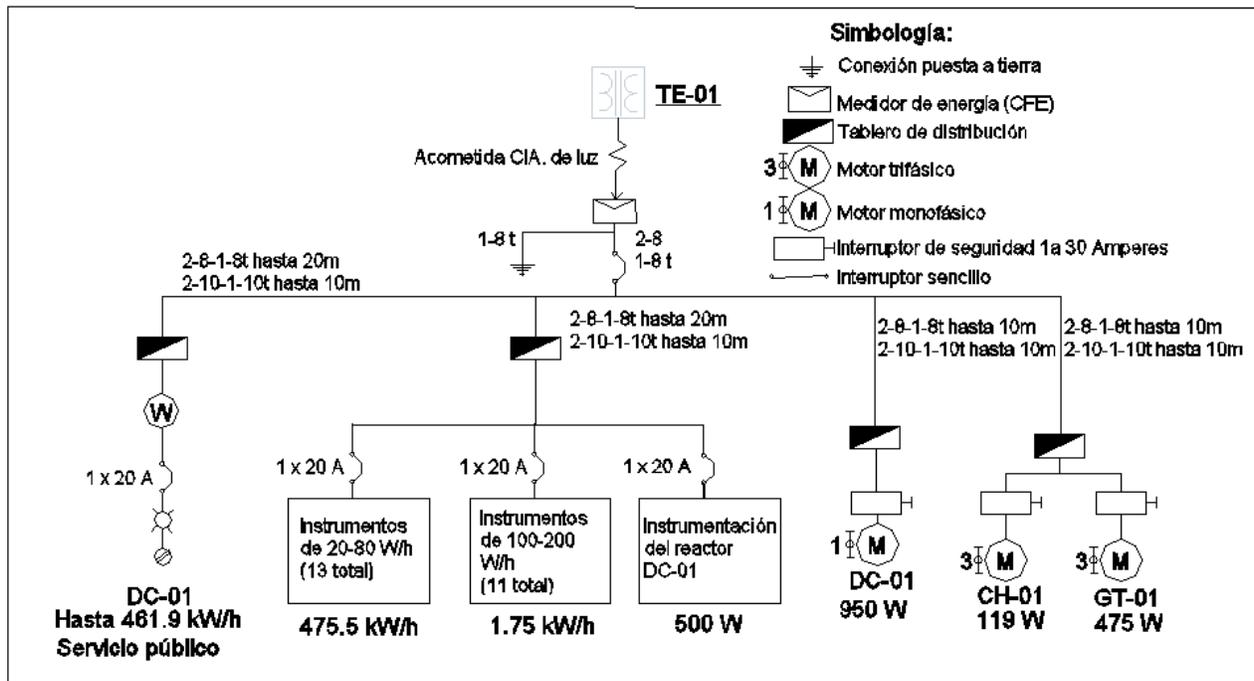
Consumo total estimado en instrumentos: 5294.5 W/h; 5.29 kW/h.

Adicionalmente al consumo energético para los instrumentos y accesorios del proceso, será necesario determinar el consumo de algunos equipos propios del proceso que consumirán de igual manera energía eléctrica, a continuación, se mostrarán estos equipos:

Tabla 4.14.1. Consumo energético en equipos del proceso.

Clave del equipo	Consumo (W/h)	TIPO DE MOTOR
GT-01	11.354	Trifásico
DC-01	232	Trifásico
CH-01	22.42	Trifásico

4.14.2 Diagrama unifilar para consumo de energía eléctrica.



Considerando el consumo de energía eléctrica en equipos del proceso y accesorios en instrumentos, se elaboró un diagrama unifilar.

Donde la distribución e instalación de equipos eléctricos se realizarán desde el transformador TE-01 (esté se detalla en el Apéndice B) con:

- Un medidor de energía instalado y monitoreado por CFE.
- Instalación general de cables de cobre de calibre 2 a 8
- Puente a tierra de calibre 1 a 8.
- El interruptor de 1 a 20 amperes que suministrará el flujo eléctrico a los diferentes equipos del proceso modular y al suministro de servicio público.

El suministro de energía eléctrica que se podrá suministrar será aproximadamente 461.9 *kW/h* mientras el proceso se encuentre bajo operaciones normales, por lo que el consumo propio del proceso no excede a la generación eléctrica.

## **CAPÍTULO V. NORMATIVIDAD Y FILOSOFÍA DE CALIDAD.**

### **5.1. Identificación de riesgos.**

La identificación de riesgos en este proyecto es importante debido a los materiales tratados, los cuales representan riesgos tanto a la salud como al medio ambiente, por lo que empleando el método FODA (Fortalezas, Oportunidades, Debilidades y Amenazas) se tiene lo siguiente:

- **Fortalezas.** Esto representa los aspectos positivos de origen interno del proceso, entre los cuales destacan el uso de un recurso renovable, una supervisión directa de la secretaría de obras y servicios, acreditación constante por parte del gobierno de la Ciudad y un monitoreo constante sin modificar al ya existente para el Sitio.
- **Oportunidades.** Esto representa los aspectos positivos externos al proceso, entre los cuales podemos destacar el aportar un servicio a la población, mejorar la imagen de las energías renovables, generar conciencia ambiental en la población, especialmente entre los jóvenes, y de mano a lo anterior, se podría generar a futuro un programa de visitas al Sitio y al proceso modular para estudiantes, lo cual sería un excelente complemento educativo en su formación.
- **Debilidades.** Esto representa los aspectos negativos de origen interno al proceso, entre los cuales podemos destacar que el Biogás al contener cantidades importantes y variables de H<sub>2</sub>S, requiere inversión de un equipo de seguridad especial para el monitoreo y visita al Sitio, por lo que algunos aspectos podrían estar limitados, además de que al ser un área federal administrada por la Ciudad de México, se requeriría de solicitudes especiales para poder hacer visitas escolares o particulares acompañadas de una estricta supervisión, otro aspecto negativo es el riesgo de incendio al tratar un gas combustible, por lo que será necesario una planificación adecuada junto con Protección Civil para responder de manera adecuada y oportuna en caso de ocurrir un incidente. Además de la constante debilidad que existe al tener una cierta probabilidad de riesgo de migración de Biogás, por lo que el monitoreo en pozos periféricos (pozos de monitoreo) deberá de realizarse con una mayor frecuencia a la actual.

- Amenazas. Esto representa los aspectos negativos externos al proceso, entre los cuales destaca principalmente el bajo interés gubernamental y poblacional por invertir o investigar en maneras adecuadas para aprovechar los recursos generados de la actividad urbana como lo son el Biogás y el lixiviado presentes, por lo que presentar un proyecto convincente puede generar una gran diferencia en el interés en general del Sitio.

Siempre el manejo y administración adecuado del proceso puede generar una diferencia entre un riesgo controlado y uno latente, por lo que una adecuada planificación será crucial para minimizar riesgos.

## **5.2. Responsabilidad ambiental.**

Si bien el presente proyecto es híbrido entre Ingeniería Química e Ingeniería Ambiental, tiene como objetivo el aprovechamiento de un recurso renovable y reducción de gases de efecto invernadero, no puede salvarse de operar y planificarse con una filosofía de responsabilidad ambiental, el cual se basará en el Sistema de Producción Toyota (SPT), el cual basa su responsabilidad con el medio ambiente en las 5´s y en las 5R´s, las 5´s son:

- Seiri (Clasificación).
- Seiton (Orden).
- Seisó (Limpieza).
- Seiketsu (Normalización).
- Shitsuke (Disciplina).

Estas 5´s se pueden manejar en el idioma castellano con los siguientes equivalentes, los cuales respectivamente en el orden mostrado son:

- Separar innecesarios.
- Situar necesarios.
- Suprimir suciedad.
- Señalar anomalías.
- Seguir mejorando.

Como parte de esta filosofía de calidad, se tiene como objetivo el eliminar de manera retórica 7 mudas (desperdicios), los cuales son:

- Sobreproducción.
- Tiempo de espera del operario en su estación de trabajo.
- Traslado y manejo de materiales impropios.
- Procesamiento impropio.
- Detención de inventarios.
- Movimientos impropios de operarios.
- Defectos físicos.

Al eliminar alguno de estos desperdicios se mejora la calidad, y por lo tanto mejora la expectativa sobre el proceso propuesto, esto considerando los riesgos mencionados anteriormente, lo que podría mejorar la expectativa tanto a las autoridades locales como a la población en general sobre el uso de Biogás como recurso renovable, así se fomentaría a una continua inversión sobre energías de este tipo.

Adicional a lo anteriormente mencionado, también es necesario implementar una política de conciencia ambiental al proceso en general, la seleccionada será la implementación de las 5R's, las cuales son:

- Reducir: Se requiere minimizar los desechos producidos, para lo cual se tiene previsto el tratar el Hidróxido de Hierro (III) empleado en el proceso de hidrosulfuración al purificarlo en el proceso mencionado en el capítulo IV, así se reduce la generación de desechos, siendo congruente con los objetivos principales del presente proyecto.
- Reusar: Esta política va de la mano con la anterior, al reusar un material de desperdicio, se reduce la producción de desechos, los cuales pueden generar una nueva fuente de contaminantes.

- **Reformar:** Esta política consiste en usar materiales desechados de una nueva forma a la cual fue destinada originalmente, aplicándolo al presente proyecto se planea usar como equipo de extracción a la infraestructura actual existente en el Sitio, y al proyectar un proceso modular, existe la posibilidad de reubicarse en otro SDFC en caso de requerirse, por lo que al darle un mantenimiento preventivo constante, se puede aprovechar este recurso que es el Biogás de una mejor manera en la Megalópolis Mexicana.
- **Rechazar:** Con esta política se busca evitar adquirir materiales ecológicamente dañinos, sin embargo, el Biogás es ecológicamente dañino, por lo que, en vez de rechazar el uso de este recurso, se procurará emplearlo en un proceso no dañino y que genere un servicio a la población.  
Sin embargo, al seguir con esta misma política, se buscará evitar el uso de materiales contaminantes en los diversos usos que existan en el proceso, como son lubricantes, detergentes para uso personal o de limpieza en general, el uso de desechables compostables para los diversos usos que requiera el personal en el Sitio administrativo o de monitoreo, etc.
- **Reciclar:** Esto consiste en reusar materiales de “desecho” como materia prima o recursos, lo cual, aunque no está explícito en los objetivos del presente trabajo, se entiende que es el objetivo principal, al emplear el Biogás producto de la actividad urbana como materia prima para generar un servicio.

Adicionalmente, se debe estar constantemente monitoreando el proceso en general, el proceso administrativo, al personal de monitoreo y visitantes autorizados, e interesados; esto para verificar una adecuada certificación en la norma ISO 14000, la cual es la responsable de avalar la responsabilidad ambiental de todo proceso actual.

### **5.3. Normatividad aplicable.**

Para poder proponer este proyecto ante autoridades locales de la Ciudad de México, se requiere de tener un catálogo de normatividad vigente aplicable a los diferentes aspectos involucrados en este proceso, las normas a considerar serán las siguientes:

- NORMA Oficial Mexicana NOM-010-ASEA-2016, Gas Natural Comprimido (GNC). Requisitos mínimos de seguridad para Terminales de Carga y Terminales de Descarga de Módulos de Almacenamiento Transportables y Estaciones de Suministro de vehículos automotores. (NOM-010-ASEA-2016, 2016)<sup>33</sup>

Esta Norma Oficial Mexicana fue aprobada por el Comité Consultivo Nacional de Normalización de Seguridad Industrial y Operativa y Protección al Medio Ambiente del Sector Hidrocarburos en su Tercera Sesión Ordinaria celebrada el día 11 de agosto de 2016, para su publicación como Proyecto ya que cumplió con todos y cada uno de los requisitos necesarios para someterse al período de consulta pública.

El objetivo de esta Norma Oficial Mexicana es establecer los requisitos y especificaciones para el diseño, construcción y pre-arranque, operación, mantenimiento, cierre y desmantelamiento de las Terminales de Carga y las Terminales de Descarga de Gas Natural Comprimido de Módulos de Almacenamiento Transportables, así como de las Estaciones de Suministro de Gas Natural Comprimido para vehículos automotores que lo utilicen como combustible.

El campo de aplicación de esta Norma Oficial Mexicana aplica en todo el territorio nacional y es de cumplimiento obligatorio para los Regulados que lleven a cabo las etapas de diseño, construcción y pre-arranque, operación, mantenimiento, cierre y desmantelamiento para:

- a) Las Terminales de Carga de Módulos de almacenamiento transportables por Semirremolque, desde la válvula de entrada de Gas Natural al Sistema de Compresión hasta el Punto de Transferencia del GNC a los Módulos de almacenamiento transportables del Semirremolque.
- b) Las Estaciones de Suministro a vehículos automotores, desde la válvula de entrada de Gas Natural al Sistema de Compresión hasta el Punto de Transferencia del GNC a los sistemas vehiculares.
- c) Las Terminales de Descarga de Módulos de almacenamiento transportables por Semirremolque, desde el área de recepción del Módulo de GNC hasta la válvula de entrega de GNC al usuario, a la instalación de descompresión o a la estación satélite.
- d) Las Estaciones Satélite desde el punto de recepción de GNC hasta el Punto de Transferencia del GNC a los sistemas vehiculares.

Aunque bien el combustible empleado es Biogás y no gas natural, posee características bastante similares, además de que el proceso empleado para su tratamiento, almacenamiento y uso será el mismo con fines técnicos, para lo cual se deberá realizar un mantenimiento constante y supervisión en base a esta norma.

- NORMA OFICIAL MEXICANA NOM-009-SESH-2011, RECIPIENTES PARA CONTENER GAS L.P., TIPO NO TRANSPORTABLE. ESPECIFICACIONES Y METODOS DE PRUEBA. (NOM-009-SESH-2011, 2011)<sup>34</sup>

Esta Norma Oficial Mexicana establece las especificaciones mínimas de diseño y fabricación de los recipientes sujetos a presión para contener Gas L.P., tipo no transportable, no expuestos a calentamiento por medios artificiales, destinados a plantas de almacenamiento, plantas de distribución, estaciones de Gas L.P. para carburación, instalaciones de aprovechamiento, depósitos de combustible para motores de Combustión interna y depósitos para el transporte o distribución de Gas L.P. en autotanques, remolques y semirremolques. Asimismo, se incluyen los métodos de prueba que como mínimo deben cumplir los recipientes no transportables materia de esta norma, así como el procedimiento de evaluación de la conformidad correspondiente.

Es importante aclarar que, si bien el material a tratar y almacenar no es estrictamente gas natural, si presenta características bastante similares, por lo que las consideraciones a tomar en cuenta serán las mismas.

- NORMA Oficial Mexicana NOM-083-SEMARNAT-2003, Especificaciones de protección ambiental para la selección del Sitio, diseño, construcción, operación, monitoreo, clausura y obras complementarias de un Sitio de disposición final de residuos sólidos urbanos y de manejo especial. (NOM-083-SEMARNAT-2003, 2003)<sup>35</sup>

En cumplimiento a lo establecido en la fracción I del artículo 47 de la Ley Federal sobre Metrología y Normalización, con fecha 10 de octubre de 2003 se publicó en el Diario Oficial de la Federación, con carácter de proyecto la Norma Oficial Mexicana PROY-NOM-083-SEMARNAT-2003, Especificaciones de protección ambiental para la selección del Sitio, diseño, construcción, operación, monitoreo, clausura y obras complementarias de un Sitio de disposición final de residuos sólidos urbanos y de manejo especial, con el fin de que dentro de

los 60 días naturales siguientes a su publicación, los interesados presentaran sus comentarios ante el Comité Consultivo Nacional de Normalización de Medio Ambiente y Recursos Naturales.

El crecimiento demográfico, la modificación de las actividades productivas y el incremento en la demanda de los servicios, han rebasado la capacidad del ambiente para asimilar la cantidad de residuos que genera la sociedad; por lo que es necesario contar con sistemas de manejo integral de residuos adecuados con la realidad de cada localidad. Por tal motivo y como parte de la política ambiental que promueve el Gobierno Federal, se pretende a través de la presente Norma Oficial Mexicana (NOM), la cual regula la disposición final de los residuos sólidos urbanos y de manejo especial, que los Sitios destinados a la ubicación de tal infraestructura, así como su diseño, construcción, operación, clausura, monitoreo y obras complementarias; se lleven a cabo de acuerdo a los lineamientos técnicos que garanticen la protección del ambiente, la preservación del equilibrio ecológico y de los recursos naturales, la minimización de los efectos contaminantes provocados por la inadecuada disposición de los residuos sólidos urbanos y de manejo especial y la protección de la salud pública en general.

El objetivo de esta Norma Oficial Mexicana establece las especificaciones de selección del Sitio, el diseño, construcción, operación, monitoreo, clausura y obras complementarias de un SDF de residuos sólidos urbanos y de manejo especial.

El campo de aplicación de esta Norma Oficial Mexicana es de observancia obligatoria para las entidades públicas y privadas responsables de la disposición final de los residuos sólidos urbanos y de manejo especial.

La aplicación de esta norma es quizá la que mayor aplicación activa presente en el presente proyecto, esto debido al constante monitoreo que se realiza considerando esta norma y las actividades administrativas actuales en el Sitio por parte de la Secretaría de Obras y Servicios de la Ciudad de México, además de que las actividades de muestreo y monitoreo mencionados en este trabajo se realizaron en base a lo especificado en esta norma, un complemento a esto es la estimación de Biogás producido en el Sitio en base a requerimientos y comportamientos actuales del SDFC mencionados en esta Norma Oficial.

- ISO 14001: 2015, Sistemas de gestión ambiental. (2015, 2015)<sup>36</sup>

Es una norma aceptada internacionalmente que establece cómo implantar un Sistema de Gestión Ambiental (SGA) y define un proceso para controlar y mejorar el rendimiento medio ambiental de una organización.

Hoy día las exigencias ambientales internacionales y la normativa nacional, cada vez más exigente, fuerzan el control de la contaminación y el aporte empresarial al desarrollo sustentable. La experiencia internacional ha demostrado que la gestión medio ambiental puede, incluso, transformarse en una oportunidad de significativos ahorros en costos, si el problema es abordado en sus inicios desde el punto de vista de la prevención. En muchos casos esta perspectiva puede llegar a ahorrar el uso de dispositivos finales con la consecuente disminución de costos.

Tener un Sistema de Gestión Ambiental certificado permite obtener una serie de beneficios de mercado, económicos, de mejora de la imagen de la empresa y también de su situación reglamentaria, por ejemplo:

- ✓ Que la organización disponga de un Sistema de Gestión de Ambiental desarrollado, documentado e implementado.
- ✓ Los empleados de la organización desarrollan un alto nivel de conciencia y compromiso en el cuidado del medio ambiente.
- ✓ La oportunidad de ordenar, estructurar y simplificar su forma de administrar y cumplir sus obligaciones medioambientales.
- ✓ La organización asegura el cumplimiento de requisitos ambientales legales, lo cual genera un clima de armonía y confianza entre entidades reguladoras de todos los niveles de gobierno y la empresa.
- ✓ Se implementan planes de contingencia o emergencia para prevenir o reaccionar ante situaciones no deseadas que afecten el medioambiente.

## **RESULTADOS.**

En este trabajo se logró dar propuesta de un proyecto que tiene como principal función generar Energía Eléctrica en el SDFC de Prados de la Montaña, empleando como materia prima el Biogás existente, así como el uso de los Gases de Combustión para un Proceso de Metanación. Los resultados concretos obtenidos en este proyecto son:

- Se diseñó una planta capaz de generar 468.72 kW/h.
- Es a partir de lo reportado en la literatura de “Nuevos catalizadores con Ni y Ru para la metanación de CO<sub>2</sub>” de Adriana Gallardo Echaide; se llega a la conclusión de que los catalizadores más adecuados fueron 12%Ni-1%Ru/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-IGR ya que el método teórico garantiza la mayor dispersión en catalizadores monometálicos y es el que posee la mejor conversión dentro del proceso de Metanación para la producción de Metano, con una Eficiencia Teórica de 75%.
- Se diseñó un proceso que trae un beneficio real a la población local al mismo tiempo que reduce la emisión de Contaminantes producto de la actividad urbana.
- Se diseñó el proceso de manera modular e intermitente en ambas etapas del proceso, esto debido a que de esta manera puede facilitar el ser adaptable a las características de otro SDFC dentro o fuera de la Ciudad de México.

## **CONCLUSIONES.**

Con lo expuesto a lo largo del proyecto podemos concluir lo siguiente;

Con el presente proyecto se pone atención y cuidado a la Zona del Poniente de la Ciudad de México donde se encuentre el SDFC, generando cambios en la manera que la sociedad viene interactuando con el medio ambiente, parando el daño que se ha causado con la quema del Biogás en la zona y generando un bien con el mismo recurso, se aprovecha de manera eficiente el Biogás al utilizar una microturbina para generar energía eléctrica.

Incluyendo la etapa de Metanación y la selección de los catalizadores se consigue producir Metano, por lo que no existirán emisiones del proceso ya que es la materia prima en el Reactor.

Finalmente, el proyecto da en manifiesto los efectos y beneficios que tienen las actividades humanas sobre el Ambiente.

## **GLOSARIO.**

**Acuífero.** Un acuífero es aquella masa de rocas permeables que permite la circulación y la acumulación del agua subterránea en sus poros o grietas. El nivel superior del agua subterránea se denomina tabla de agua, que en el caso de un acuífero libre corresponde al nivel freático.

**Biogás.** Es un gas combustible que se genera en medios naturales o en dispositivos específicos, por las reacciones de biodegradación de la materia orgánica, mediante la acción de microorganismos y otros factores, en ausencia de Oxígeno, esto ocurre en un ambiente anaeróbico.

**Contaminante.** Elementos físicos, biológicos o químicos introducidos en un medio o sistema, que provocan una perturbación a este o que provocan que este sea inseguro, o no apto para su uso o asentamiento poblacional.

**Control.** Acción de inspección, vigilancia y aplicación conjunta de las medidas necesarias para el cumplimiento de las disposiciones y reglamentos establecidas por autoridades y la normatividad aplicable.

**Disposición Final de Residuos.** Acción de depositar o confinar permanentemente residuos en Sitios e instalaciones cuyas características permitan prevenir su liberación al ambiente y las consecuentes afectaciones a la salud de la población, los ecosistemas y sus elementos.

**Gas Natural.** Mezcla de gases que se obtiene de la extracción o del procesamiento industrial, y que es constituida principalmente por Metano. Usualmente esta mezcla contiene Etano, Propano, Butanos y Pentanos. Asimismo, puede contener Dióxido de Carbono, Nitrógeno y Ácido Sulfhídrico, entre otros.

**Gestión de residuos.** Conjunto articulado e interrelacionado de acciones normativas, operativas, financieras, de planeación, administrativas, sociales, educativas, de monitoreo, supervisión y evaluación, para el manejo de residuos, desde su generación hasta la disposición final, a fin de lograr beneficios ambientales, la optimización económica de su manejo y su aceptación social, respondiendo a las necesidades y circunstancias de cada localidad o región.

**In situ (Medición).** Medición realizada en campo con el equipo portátil a una muestra tomada, esta medición se realiza al momento de que fue tomada con fines de estandarizar algunas propiedades físicas o químicas con los resultados obtenidos en laboratorio.

**Lixiviado.** En general se denomina lixiviado al líquido resultante de un proceso de percolación de un fluido a través de un sólido. El lixiviado generalmente arrastra gran cantidad de los compuestos presentes en el sólido que atraviesa.

**Manejo de residuos.** Las actividades de reducción en la fuente, separación, reutilización, reciclaje, co-procesamiento, tratamiento biológico, químico, físico o térmico, acopio, almacenamiento, transporte y disposición final de residuos, individualmente realizadas o combinadas de manera apropiada.

**Monitoreo ambiental.** Conjunto de acciones para la verificación periódica del grado de cumplimiento de los requerimientos establecidos para evitar la contaminación del ambiente y de las zonas pobladas cercanas al lugar de monitoreo.

**Presión de diseño.** Es el valor de la presión establecido en la fabricación del equipo, sobre las condiciones más severas de presión y temperatura esperadas durante su funcionamiento, y conforme a las cuales se determinan las especificaciones más estrictas de espesor de pared y de sus componentes. Su valor corresponde usualmente como mínimo al 1.10% el valor de la Presión de Operación Máxima.

**Residuo.** Cualquier material orgánico o inorgánico generado en los procesos de extracción, beneficio, transformación, producción, consumo, utilización o tratamiento, cuya calidad no permite incluirlo nuevamente en el proceso que lo generó.

**Residuos Sólidos Urbanos.** Los generados en las casas habitación, que resultan de la eliminación de los materiales que utilizan en sus actividades domésticas, de los productos que consumen y de sus envases, embalajes o empaques; los residuos que provienen de cualquier otra actividad dentro de establecimientos o en la vía pública que genere residuos con características domiciliarias, y los resultantes de la limpieza de las vías y lugares públicos.

**Sitio de Disposición Final o Relleno sanitario.** Instalación de ingeniería ambiental destinado para la disposición de los residuos sólidos generados por la actividad urbana, su objetivo, diseño y operada tienen como objetivo minimizar los impactos a la salud pública y al medio ambiente.

**Vida útil.** Es el periodo de tiempo en que el SDF será apto para recibir los residuos sólidos urbanos y de manejo especial. El volumen de los residuos y material térreo depositados en este periodo es igual al volumen de diseño.

# Bibliografía.

- 1.- Change, T. I. (10 de 01 de 2020). *The Intergovernmental Panel on Climate Change*. Obtenido de <https://www.ipcc.ch/>
- 2.- Silpa Kaza, L. Y.-T. (2018). *What a Waste*. Obtenido de <https://datatopics.worldbank.org/what-a-waste/>
- 3.- S. Solomon, D. Q. (2007). *Cambio climático 2007: la base de la ciencia física*. Cambridge, Reino Unido: Prensa de la Universidad de Cambridge.
- 4.- Urakawa, A. B. (2013). Towards full one-pass conversion of carbon dioxide to methanol and methanol-derivad products. *Elsevier*, 70.
- 5.- Servicio, M. A. (2019). *Manual Administrativo Secretaría de Obras y Servicio*. Ciudad de México.
- 6.- Federal, L. d. (2017). *Ley de Residuos Sólidos del Distrito Federal*. CDMX.
- 7.- Martínez Román, I. (2017). Influencia de la adición de modificadores sobre el catalizador modelo  $10\text{Ni}10\text{Na}_2\text{CO}_3/\text{Al}_2\text{O}_3$  para el almacenamiento de  $\text{CO}_2$  y metanación en ciclos.
- 8.- Ghaib, K. B.-F. (2018). Transformación de energía en metano: una revisión de vanguardia. *Elsevier*.
- 9.- Echaide, A. G. (22 de 05 de 2017). *Nuevos catalizadores con Ni y Ru para la*. País Vasco. Obtenido de [https://addi.ehu.es/bitstream/handle/10810/30535/TFG\\_Gallardo\\_Echaide\\_Adriana.pdf?sequence=1&isAllowed=y](https://addi.ehu.es/bitstream/handle/10810/30535/TFG_Gallardo_Echaide_Adriana.pdf?sequence=1&isAllowed=y)
- 10.- Scott Fogler, H. (2008). *Elementos de la ingeniería de las reacciones químicas*. México: Pearson Educación.
- 11.- Navarro, O. (1997). *Catálisis y Petroquímica*. México: El colegio Nacional.
- 12.- Sepehri, S. R. (2016). Síntesis fácil de una alúmina mesoporosa y su aplicación como soporte de catalizadores de reformado autotérmico a base de Ni. *Revista Internacional de Energía de Hidrógeno*.
- 13.- Li, S. T. (2017). Loading Ni/La<sub>2</sub>O<sub>3</sub> on SiO<sub>2</sub> for CO methanation from syngas. *Catalysis Today*.
- 14.- Shadravan, V. K. (2019). Una investigación experimental sobre los efectos de agregar un metal de transición a Ni / Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> para la hidrogenación catalítica de CO y CO<sub>2</sub> en presencia de alcanos y alquenos ligeros. *Catálisis hoy*.

- 15.- Yuan, C. Y. (2015). The SiO<sub>2</sub> supported bimetallic Ni–Ru particles: A good sulfur-tolerant catalyst for methanation reaction. *Chemical Engineering Journal*, 1-10.
- 16.- Lamont-Doherty Earth observatory. (2009). *Emisiones de dióxido de carbono*.
- 17.- Bleicher, G. R. (2018). *Programa de Pruebas de campo para la utilización del relleno sanitario de prados de la montaña* .
- 18.- González, J. A. (2009). *Energías Renovables*.
- 19.- Sebastián, N. F. (2010). *Energía de la biomasa*. Universidad de Zaragoza .
- 20.- Herrera-Múnera, K. P.-M. (2013). *Revision of Combustion with oxygen-enriched air as a strategy*. Medellín, Colombia.
- 21.- Froment, J. X. (1989b). Methane Steam Reforming, Methanation and Water-Gas Shift: 1. Intrinsic Kinetics. *AICbE Journal*.
- 22.- Hidalgo, I. A. (2019). *Estrategias de operación para la gestión del calor en la reacción de metanación de CO<sub>2</sub>*. Leioa.
- 23.- MONTSERRAT IBORRA, J. T. (2013). *REACTORES*. Barcelona .
- 24.- *Google Maps*. (s.f.). Obtenido de <https://www.google.com.mx/maps/place/Instituto+Rosner/@19.34022,-99.2819657,17z/data=!3m1!4b1!4m5!3m4!1s0x85d2075294d9cf8f:0x8978346441f4a613!8m2!3d19.34022!4d-99.279777>
- 25.- Walas, S. M. (1999). *Chemical Process Equipment Selection and Desing*. Massachusetts: Howard Brenner.
- 26.- Código ASME Sección VIII, “The American Society of Mechanical Engineers”. (2020).
- 27.- Burklin., A. A. (2005). *El modelo del Biogás*.
- 28.- 2015, N. I. (2015). *Sistemas de gestión ambiental*.
- 29.- PEMEX. (2007). *Sistemas de aire acondicionado* .
- 30.- Pemex. (2014). *Diseño de Intalaciones Eléctricas*.
- 31.- Pemex. (1999). *Simbología de equipo de proceso P.2.0401.01*.
- 32.- ISA. (1986). *The instrumentation Systems and Automation Society 5.5*.

- 33.- NOM-010-ASEA-2016, N. O. (2016). *GAS NATURAL COMPRIMIDO (GNC). REQUISITOS MÍNIMOS DE SEGURIDAD PARA TERMINALES DE CARGA Y TERMINALES DE DESCARGA DE MÓDULOS DE ALMACENAMIENTO TRANSPORTABLES Y ESTACIONES DE SUMINISTRO DE VEHÍCULOS AUTOMOTORES. .*
- 34.- NOM-009-SESH-2011, N. O. (2011). *21RECIPIENTES PARA CONTENER GAS L.P., TIPO NO TRANSPORTABLE. ESPECIFICACIONES Y METODOS DE PRUEBA.*
- 35.- NOM-083-SEMARNAT-2003, N. O. (2003). *ESPECIFICACIONES DE PROTECCIÓN AMBIENTAL PARA LA SELECCIÓN DEL SITIO, DISEÑO, CONSTRUCCIÓN, OPERACIÓN, MONITOREO, CLAUSURA Y OBRAS COMPLEMENTARIAS DE UN SITIO DE DISPOSICIÓN FINAL DE RESIDUOS SÓLIDOS URBAN.*

## ANEXOS.

### Sección A Balance de masa.

Con los datos que se obtuvieron en campo se realizó el balance de masa para la Combustión de la Turbina y del Reactor posteriormente.

Los porcentajes para cada componente son los siguientes en la tabla A.1:

*Tabla A.1 Porcentaje de componentes del Biogás.*

Componente	%	g/mol
CH <sub>4</sub>	60.9	16
CO <sub>2</sub>	38.8	44
H <sub>2</sub> S	53 ppm	
CO	0.9	32
O <sub>2</sub>	2 ppm	

En la tabla A.2 se muestra el balance en la Turbina.

*Tabla A.2 Balance de masa en la Turbina.*

Balance de oxi-combustión en la turbuna			$CH_4 + 2O_2 \rightleftharpoons CO_2 + 2H_2O$					
Datos			Entrada		=	Salida		
	Kg/h	%	Kg/h	mol/h		Kg/h	mol/h	
Q Biogas	14.892	100						
CH <sub>4</sub>	9.069228	60.9	9.069228	566.82675				
CO <sub>2</sub>	5.778096	38.8	5.778096		5.778096	24.94038	566.82675	
H <sub>2</sub> S								
CO	0.134028	0.9	0.134028		0.134028			
O <sub>2</sub>			36.27691	1133.6535				
H <sub>2</sub> O						20.40576	1133.6535	
Total			5.912124	45.34614	1700.4803	5.912124	45.34614	1700.4803
			51.258264	1700.4803		51.258264	1700.4803	

En la tabla A.3 se muestra el balance en el Reactor en relación con la reacción de Metanación.

Tabla A.3 Balance de masa en el Reactor.

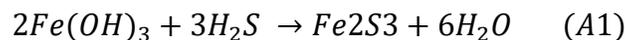
Balance de metanación		$CO_2 + 4H_2 \rightarrow CH_4 + 2H_2O$				
Datos		Entrada			Salida	
	Kg/h	%	Kg/h	mol/h		
CO2	30.7184	100	30.7184	698.1455		
CH4						0 11.1703 698.1455
H2			5.585164	2792.582	=	
H2O						25.1332 1396.291
Total			0 36.30356	3490.727		0 36.3036 2094.436
			36.30356364	3490.727		36.30356364 2094.436

### Reacción de Hidrodesulfuración, FG-01.

La Hidrodesulfuración es un proceso químico catalítico destinado para eliminar el azufre combustible del jet, queroseno, combustible diésel, y fuel oils, y que se instala antes de los procesos que pueden ver afectados.

Para nuestro proceso en específico se empleará esta técnica de remoción de H<sub>2</sub>S del Biogás existente en el SDFC, esto para procurar bajar el contenido promedio de 53 ppm a 7 ppm, esto con el objetivo de suministrar a la Turbina del proceso un combustible apto para su operación, por lo que se planea realizar el diseño de un tanque que realice esta operación de filtrado o remoción de la mayor cantidad posible de H<sub>2</sub>S.

Para realizar estos cálculos de remoción del haluro existente en la mezcla gaseosa, se toma en cuenta la siguiente reacción:



Para realizar esta operación se empleará hidróxido de hierro (III) para generar la reacción química mostrada y generar como productos agua y sulfuro de hierro (III), esta reacción se llevará dentro de un tanque especial para esta operación unitaria de remoción, aunque debido a sus características también podría ser considerado en bibliografía como una operación de filtrado para las partículas del haluro H<sub>2</sub>S, es importante mencionar que en el Biogás no se encuentra disociado, por lo que no se le considera hasta antes de este punto como un ácido,

sin embargo debido a sus características puede generar problemas al equipo; en general provocando corrosión.

Teniendo como objetivo disminuir el contenido del haluro de 53 ppm a 7 ppm, se realizó el cálculo de eficiencia se requiere obtener el 86.79% mínimo de operación, para fines prácticos, al realizar el diseño del equipo se propone una eficiencia del 90% como base de cálculo para la remoción de H<sub>2</sub>S.

También se considera adquirir el Fe(OH)<sub>3</sub> al mercado chino, al cotizarlo se encontró este reactivo en una presentación de pellets con una pureza del 99.8%.

-Requerimiento de Fe(OH)<sub>3</sub>.

Para realizar el cálculo de requerimiento de hidróxido de hierro (III), de consideraron los siguientes datos:

- Peso molecular H<sub>2</sub>S: 34.08 g/mol
- Peso moléculas Fe(OH)<sub>3</sub>: 107 g/mol
- Contenido de H<sub>2</sub>S en el biogás: 53ppm
- Flujo de extracción aproximado de Biogás: 20.4 m<sup>3</sup>/h (dato suministrado por personal de monitoreo ambiental).
- La densidad aproximada del Biogás: 0.73 kg/m<sup>3</sup> (dato suministrado por personal de monitoreo ambiental).
- Densidad aproximada de los pellets de hidróxido de hierro (III): 3.4 g/cm<sup>3</sup>.

Considerando la siguiente ecuación:

$$ppm = \frac{g}{m^3} ; g = ppm * m^3 \quad (A.2)$$

Se tiene que el flujo másico del H<sub>2</sub>S es aproximadamente 1081.2 g/h, o un flujo molar de 34.08 mol/h, por lo que el objetivo de este equipo es bajar este flujo a 4.5 mol/h.

Para el requerimiento del hidróxido se encontró un requerimiento calculado de 22.72 mol/h, por lo que al realizar la conversión a requerimiento másico se tiene que este es de 2431.04 g/h.

Ahora se tienen las siguientes consideraciones generales al proceso para determinar los requerimientos totales del hidróxido:

- La operación diaria de la pequeña planta será de 7 horas diarias, todos los días exceptuando los días que acuda la brigada de monitoreo ambiental para realizar mediciones, esta consideración se toma en cuenta debido a que el actual quemador opera bajo este mismo criterio.
- Se le dará mantenimiento preventivo a este equipo cada 3 días, por lo que se renovará el reactivo cada 3 días.
- La adquisición del hidróxido será anual.

Una vez considerando los anteriores puntos se tienen los siguientes requerimientos del reactivo  $\text{Fe}(\text{OH})_3$  para la operación:

- 17.01 *kg/día*.
- 51.03 *kg* por cada 3 días de operación.
- 6.21 toneladas anuales.

Considerando la densidad antes mencionada de  $3.4 \text{ g/cm}^3$  para el hidróxido de hierro (III) y su respectiva pureza de 99.8%, se tiene un requerimiento de  $15.003 \text{ m}^3$  de reactivo para la operación antes mencionada, ahora considerando un 10% de sobre diseño para el equipo tenemos un requerimiento volumétrico de  $16.5 \text{ m}^3$ .

La siguiente tabla muestra el balance de masa en general de todo el proceso.

*Tabla A.4 Balance de masa para todo el proceso.*

Componente	Corriente											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
CH4	9.06				9.06	9.06			11.17	11.17		11.17
CO2	5.77				5.77	5.77	30.71					
H2S	0.00078											
CO	0.013				0.013	0.013	0.013					
O2	0.0005	30.26			0.0005	0.0005						
H2				5.6				5.6				
H2O	0.05				0.05	0.05	20.4		45.58			
Cat Ru/Al2O3			NC									
Flujo Total (Kg)	14.8943	30.26		5.6	14.894	14.894	51.123	5.6	56.75	11.17	0	11.17
Presión(psig)	22.4	Atm	..	14.7	20.13	19.53	18.93	14.7	18.2	17.9		17.9
Temp (°C)	36.7	ambient	..	25	48.8	47.34	309	25	342.6	47.34		47.34

## Sección B Diseño de equipos.

### Transformador.

Transformador de tipo "Ge 9t83b3387 3ª" de 225kva 480-220y 150c N2 K1 60hz Tp1 imagen B.1

#### Descripción:

Los transformadores GE Tipo QL cumplen con los estándares de eficiencia NEMA TP-1. Están disponibles con devanados de aluminio o cobre y utilizan un sistema de aislamiento de 220 ° C reconocido por UL, algunas de sus ventajas son:

- Rendimiento silencioso.
- Los conjuntos de núcleo y bobina están montados sobre almohadillas de aislamiento de goma para reducir el ruido.
- Terminaciones de bobina atornilladas.
- La parte delantera/trasera de una sola pieza se puede quitar fácilmente para el servicio.
- El recinto a prueba de goteo NEMA 2 es estándar; Los kits de protección contra la intemperie están disponibles para su conversión a la configuración exterior NEMA 3R.
- Cualificado para los requisitos sísmicos de IEEE-693-2005 e IBC-2006.
- Devanados de cobre o aluminio.
- Correa de tierra de cobre.
- Embalaje robusto con protección superior y lateral que protege contra daños durante el envío.
- Las bridas de montaje accesibles con orificios de montaje ranurados delanteros / traseros facilitan la instalación.
- 100% probado en fábrica para detectar cortocircuitos e integridad de la bobina, corriente y pérdida, voltaje, impedancia y ruido.
- Documentación y etiquetado claros y completos.



*Imagen B.1 Transformador de tipo Ge 9t83b3387 3ª.*

Para el uso de este transformador en el presente proyecto será necesario el uso de 2 transformadores de este tipo para poder asimilar la energía generada por la Turbina GT-01, estos transformadores serán instalados en un Sitio administrado en conjunto por la CFE y la Secretaria de Obras y Servicios de la Ciudad de México para el uso de la energía eléctrica generada por la planta ubicada en el Sitio.

#### Diseño Hidro-desulfurador.

El área interna del tanque será en base a un cilindro instalado de manera vertical, por lo que considerando la ecuación de volumen para este diseño se tiene:

Teniendo un volumen interno calculado anteriormente requerido de  $16.5 m^3$ , se propone una altura de  $h=3m$ , resultando así un radio interno de  $1.33 m$ , o un diámetro interno de  $d=2.66m$ .

$$V = \pi * r^2 h ; r = \sqrt{\frac{V}{\pi * h}} = \sqrt{\frac{16.5m^3}{\pi * 3m}} = 1.33m \quad (B1)$$

Donde:

$V = Volumen$

$r = Radio \text{ en metros}$

$h = Altura$

El material de construcción seleccionado para recipiente es *acero inox. Tipo 316*, ideal para trabajar con gas natural y ácidos derivados del azufre; el espesor recomendado es de  $\frac{1}{2} in$  ( $1.27 cm$ ) para este tipo de sustancias en procesos de endulzamiento para gas natural.

Para calcular los extremos del tanque, se consideran estos extremos de tipo hemi-esféricos, por lo que se tiene la siguiente ecuación de cálculo para la altura de ambos extremos juntos:

$$h = \sqrt{r^2 - \frac{\pi}{Ap}} = \sqrt{1.33m^2 - \frac{\pi}{5.56m^2}} = 1.12 \text{ m} \quad (B2)$$

Donde:

$$Ap = \frac{\pi d^2}{4} = 5.56m^2$$

Realizando el cálculo se tiene que la altura total de esfera es de 1.12m, considerando esto, la altura de hemisferio para cada extremo del tanque sería de 0.56m c/u.

Finalmente se tiene que la altura total calculada del tanque es de 4.12m.

Finalmente, para el diseño se considera el uso de una válvula de alivio *STYLE JOS/JBS, closed Bonet pressure relied. Valve*; orificio tipo G (0.503”), serie 800 esto considerando un área de descarga requerida de 0.39” para una temperatura normal de operación de 120°F (579.7 R), esta es la temperatura reportada por monitoreo ambiental a la cual se extrae normalmente el Biogás en los pozos ubicados dentro del Sitio al realizar el monitoreo quincenal.

#### Diseño del Tanque TA-01.

Para el dimensionamiento del tanque de almacenamiento se tomaron los criterios de recipientes a presión.

La fórmula del espesor  $t$  es para el casco cilíndrico

$$t: \frac{PR}{SE-0.6P} \quad (B3)$$

Donde:

$t$ : Espesor in

$$P : \text{Presion de diseño } \frac{lb}{in^2} = P_D = P_{Trabajo} + 30 \frac{lb}{in^2}$$

$R$ : Radio in

$D$ : Diametro m

$S$ : Esfuerzo de material  $\frac{lb}{in^2}$

$E$ : Eficiencia de juntas

Presion prueba :  $1.3(MPPO) = Presion Hidrostatica$

$MPPO$ : Maxima presion permisible de operacion:  $P_D$

$t_D$ : Espesor de Diseño:  $t_c + C.A$

$t_c$ : Espesor calculado      $C.A$ : Tolerancia a la corrosion

Presión es igual a  $2.4 \frac{lb}{in^2}$  , Diámetro es  $47.24in$ , Radio es  $23.622$  Esfuerzo de material es  $13800 \frac{lb}{in^2}$  (Tablas normas ASME Sección 8), Eficiencia de juntas 1(Tablas de ASME Sección 8),  $C.A$   $0.06 in$ .

$$t: \frac{32.4 \frac{lb}{in^2} (23.622in)}{\left(13800 \frac{lb}{in^2}\right) (1) - 0.6 \left(32.4 \frac{lb}{in^2}\right)} = 0.055in$$

$$t_D: 0.055in + 0.06in = 0.1153in$$

$$t_{comercial}: \frac{3}{16} in$$

La siguiente formula de  $t$  es para el cálculo de las tapas (elípticas)

$$t: \frac{PD}{2SE - 0.2P} \quad (B4)$$

$$t: \frac{(32.4 \frac{lb}{in^2})(47.244in)}{2 \left(13800 \frac{lb}{in^2}\right) (1) - 0.2 \left(32.4 \frac{lb}{in^2}\right)} = 0.0554in$$

$$t_D: 0.0554in + 0.06in = 0.1154in$$

$$t_{comercial}: \frac{3}{16} in$$

$$Presion prueba : 1.3 \left(32.4 \frac{lb}{in^2}\right) = Presion Hidrostatica = 42.12 \frac{lb}{in^2} \quad (B5)$$

Para el tamaño óptimo del recipiente se toma en cuenta la gráfica que considera el diámetro del recipiente y Factor de Abakians

$$D_{exterior} = d + 2t = 47.24in + 2\left(\frac{3}{16}\right) = 47.604in = 3.967ft \quad (B6)$$

$$\text{Tamaño óptimo del recipiente (F); } F = \frac{P}{C.A * S * E} = \frac{32.4 \frac{lb}{in^2}}{(0.06in)(13800 \frac{lb}{in^2})(1)} = 0.039in \quad (B7)$$

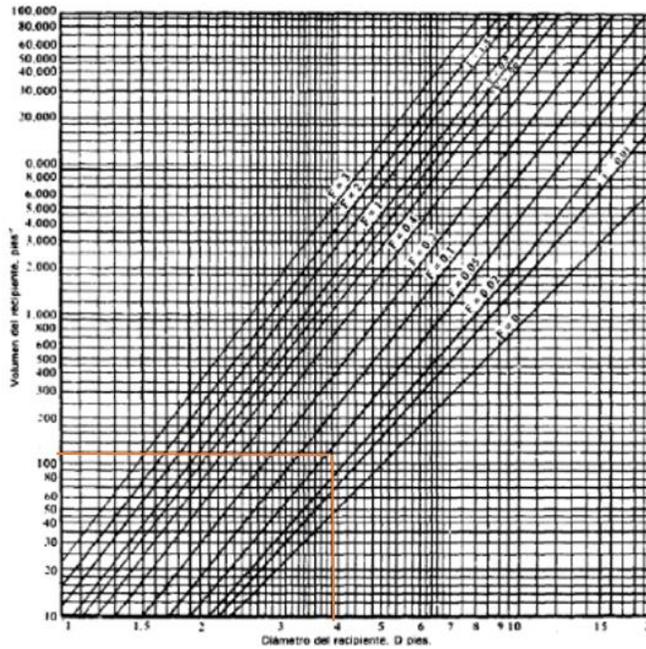


Imagen B.2. Dimensiones calculadas del tanque de Hidro-desulfuración.

Volumen por factor de Abakians  $V \approx 125ft^3$

$$V = \frac{\pi D^2}{4} L; \quad L_{Max} = \frac{4V}{\pi D^2} = \frac{4 * 125ft}{\pi * (3.96ft)^2} = 10.11ft = 3.082m \quad (B8)$$

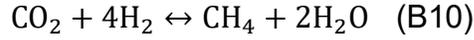
$$V_{Real} = \frac{\pi D^2}{4} L = \frac{\pi 4^2}{4} * 10.11ft = 127.04ft^3 \quad (B9)$$

Diseño de Reactor.

Para el diseño del Reactor de Lecho Fluidizado es necesario dar seguimiento a una serie de pasos:

1. Desarrollar una ley de velocidad congruente con las observaciones experimentales.

Los pasos de reacción son: adsorción; reacción superficial; desorción. Para el caso del presente trabajo se ha tomado que la reacción superficial es la que domina el paso controlante (B10).



$$r_{Ad} = k_A P_{\text{CO}_2} C_v - k_{-A} C_{\text{CO}_2 \cdot S} \quad r_{Ad} = k_A \left( P_{\text{CO}_2} C_v - \frac{C_{\text{CO}_2 \cdot S}}{K_{\text{CO}_2}} \right) \quad (\text{B11})$$

$$r_s = k_s C_{\text{CO}_2 \cdot S} - k_{-s} P_{\text{H}_2\text{O}} C_{\text{CH}_4} \quad r_s = k_s \left( C_{\text{CO}_2 \cdot S} - \frac{P_{\text{H}_2\text{O}} C_{\text{CH}_4}}{K_s} \right) \quad (\text{B12})$$

$$r_D = k_D C_{\text{CH}_4 \cdot S} - k_{-D} P_{\text{CH}_4} C_v \quad r_D = k_D \left( C_{\text{CH}_4 \cdot S} - \frac{P_{\text{CH}_4} C_v}{K_D} \right) \quad (\text{B13})$$

$$\text{De .... (B11)} \quad \frac{r_A}{k_A} \approx 0 \quad \therefore \quad C_{\text{CO}_2} = P_{\text{CO}_2} K_{\text{CO}_2} C_v \quad (\text{B14})$$

$$\text{De .... (B13)} \quad \frac{r_D}{k_D} \approx 0 \quad \therefore \quad C_{\text{CH}_4} = K_{\text{CH}_4} P_{\text{CH}_4} C_v \quad (\text{B15})$$

$$\text{De B14 y B15 en R12} \quad \Rightarrow \quad r_s = k_s \left( P_{\text{H}_2} P_{\text{CO}_2} K_{\text{CO}_2} - \frac{P_{\text{H}_2\text{O}} P_{\text{CH}_4} K_{\text{CH}_4}}{K_s} \right) C_v \quad (\text{B16})$$

$$C_t = C_v + C_{\text{CO}_2} + C_{\text{CH}_4} \quad (\text{B17})$$

$$\text{De B14 y B15 en R8} \quad \Rightarrow \quad C_t = (1 + P_{\text{CO}_2} K_{\text{CO}_2} + K_{\text{CH}_4} P_{\text{CH}_4}) C_v \quad (\text{B18})$$

$$C_v = \frac{C_t}{(1 + P_{\text{CO}_2} K_{\text{CO}_2} + K_{\text{CH}_4} P_{\text{CH}_4})} \quad (\text{B19})$$

$$\text{De (B19) en (B16)} \Rightarrow -r_{CO_2} = r_s = \frac{k_s K_{CO_2} C_t \left( P_{CO_2} P_{H_2} - \frac{P_{H_2O} P_{CH_4} K_{CH_4}}{K_s} \right)}{(1 + P_{CO_2} K_{CO_2} + K_{CH_4} P_{CH_4})} \quad (B20)$$

2. Analizar la ley de velocidad de manera que los parámetros constante de velocidad de reacción específica y constante de equilibrio ( $k, K$ ) puedan extraerse fácilmente de datos experimentales.

El  $CO_2$  y  $H_2$  reaccionan formando  $CH_4$ , sobre catalizador  $Ni/Ru-Al_2O_3$ . A razón de  $698.14 \text{ mol/h}$ , las composiciones de alimentación son:  $CO_2$ : 60.9%,  $H_2$ : 38.8%,  $T$ : 615 K,  $P$ : 1.24 atm.

La constante de equilibrio se puede relacionar con el número de moles de cada componente las cuales están vinculadas.

Para  $K_{eq}$  se tomó la ec.(B21) y se despejó  $X_{eq}$  para el cálculo en ec. (B22)

$$K_{eq} = \frac{n_{CH_4}(1-X) * (n_{H_2O}(1-X))^2 * n_T^2}{n_{CO_2}(1-X) * (n_{H_2}(1-X))^4 * P^2} \quad (B21)$$

$$X_{CO_2} = 1 - \frac{n_{CH_4}(1-X) * (n_{H_2O}(1-X))^2 * n_T^2}{K_{eq} * n_{CO_2} * (n_{H_2}(1-X))^4 * P^2} \quad (B22)$$

Para el calor de la  $K_{eq}$  se utilizó ec (B23)

$$K_{eq} = 137 * T^{-3.998} e^{\left(\frac{158.7}{RT}\right)} = 28400.62 \quad (B23)$$

Donde:

T: A la cual se desea calcular el equilibrio (615 K)

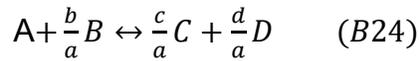
R: Constante del gas (0.00831 kJ/mol\*K)

El número de moles fue calculado con la tabla de estequiometría Ilustración (RA) y las presiones para cada componente en función de la conversión.

<i>Especies</i>	<i>Inicial</i> (mol)	<i>Cambio</i> (mol)	<i>Remanente</i> (mol)
A	$N_{A0}$	$-(N_{A0}X)$	$N_A = N_{A0} - N_{A0}X$
B	$N_{B0}$	$-\frac{b}{a}(N_{A0}X)$	$N_B = N_{B0} - \frac{b}{a}N_{A0}X$
C	$N_{C0}$	$\frac{c}{a}(N_{A0}X)$	$N_C = N_{C0} + \frac{c}{a}N_{A0}X$
D	$N_{D0}$	$\frac{d}{a}(N_{A0}X)$	$N_D = N_{D0} + \frac{d}{a}N_{A0}X$
(inertes)	$N_{I0}$	—	$N_I = N_{I0}$
Totales	$N_{T0}$		$N_T = N_{T0} + \left(\frac{d}{a} + \frac{c}{a} - \frac{b}{a} - 1\right)N_{A0}X$

*Imagen B.3 (Scott Fogler, 2008).*

$$n_{CH_4} = 593.41; n_{H_2O} = 1186.83; n_{CO_2} = 104.72; n_{H_2} = 418.90; n_T = 3490.72$$



$$\rightarrow \delta = \frac{c}{a} + \frac{d}{a} - \frac{a}{a} - \frac{b}{a} \quad \rightarrow \delta = \frac{2}{1} + \frac{1}{1} - \frac{4}{1} - 1 = -2 \quad (B25)$$

$$\epsilon = \delta y_a \rightarrow \epsilon = -2 * 0.61 = -1.22 \quad (B26)$$

$$y_a = \frac{P_{PI}}{P_{TI}} \quad \rightarrow \quad P_{Tot} = P_o y_a \rightarrow \quad P_{Tot} = 1.24 \text{ atm} * 0.61 = 0.75 \text{ atm} \quad (B27)$$

$$P_{CO_2} = C_T RT = P_{Tot} \left( \frac{1-X}{1+\epsilon X} \right) \left( \frac{P}{P_o} \right) \quad \rightarrow \quad P_{CO_2} = 0.75 \text{ atm} \left( \frac{1-X}{1-1.22X} \right) \left( \frac{1}{1.24 \text{ atm}} \right) \quad (B28)$$

$$P_{H_2} = C_T RT = P_{Tot} \left( \frac{\theta_{H_2} - \frac{b}{a} X}{1 + \epsilon X} \right) \left( \frac{P}{P_0} \right) \rightarrow P_{H_2} = 0.75 \text{ atm} \left( \frac{0.62 - 4X}{1 - 1.22X} \right) \left( \frac{1}{1.24 \text{ atm}} \right) \quad (B29)$$

$$P_{CH_4} = C_T RT = P_{Tot} \left( \frac{\theta_{CH_4} - \frac{c}{a} X}{1 + \epsilon X} \right) \left( \frac{P}{P_0} \right) \rightarrow P_{CH_4} = 0.75 \text{ atm} \left( \frac{X}{1 - 1.22X} \right) \left( \frac{1}{1.24 \text{ atm}} \right) \quad (B30)$$

La  $K_{eq}$  constante de equilibrio en función de la Presión:

$$P_{CO_2} = C_T RT = P_{Tot} \left( \frac{1-X}{1+\epsilon X} \right) \left( \frac{P}{P_0} \right) \quad (B31)$$

$$K_{eq} = \frac{P_C^c P_D^d}{P_A P_B^a} = 10719.0404 \quad (B32)$$

3. Encontrar el mecanismo y un paso limitante de la velocidad congruente con los datos experimentales.

Se ha tomado la reacción superficial como la que limita la reacción.



4. Diseñar un reactor catalítico para lograr una conversión específica.

Tomando los valores antes mencionados se ha calculado  $-r_{CO_2}$ .

$$-r_{CO_2} = r_s = \frac{k(P_{CO_2} P_{H_2})}{1 + P_{CO_2} K_{CO_2} + K_{CH_4} P_{CH_4}} \quad (B34)$$

$$-r_{CO_2} = r_s = \frac{1.99 \times 10^{-6} \left[ 0.61 \left( \frac{1-X}{1+1.22X} \right) * 0.61 \left( \frac{0.62-4X}{1+1.22X} \right) \right]}{1 + 8.3 \times 10^{-11} \left[ 0.61 \left( \frac{1-X}{1+1.22X} \right) \right] + 3.74 \times 10^{-7} \left[ 0.61 \left( \frac{X}{1+1.22X} \right) \right]} = 0.00006113 \frac{\text{kmol}}{\text{gcat} \cdot \text{h}}$$

La temperatura tiene influencia en la conversión de  $\text{CO}_2$  en catalizadores preparados por impregnación a humedad incipiente, se ha tomado el valor considerando un valor de  $X= 0.75$  a una  $T=600\text{K}$  la cual es una referencia de Echaide, 2017.

Aplicando la densidad del catalizador:  $4638.73 \text{ Kg/m}^3$  se calculó la masa del catalizador y el volumen del Reactor.

$$W = \frac{F_{A0}X}{r_{\text{CO}_2}} = \frac{(0.69814 \frac{\text{kmolCO}_2}{\text{h}})(0.75)}{0.00006113 \frac{\text{kmolCO}_2}{\text{Kgcatal}\cdot\text{h}}} = 8565.43 \text{Kgcatal} \quad (\text{B35})$$

$$V = \frac{W}{\rho} = \frac{8565.43 \text{Kgcatal}}{4638.73 \frac{\text{Kg}}{\text{m}^3}} = 1.85 \text{m}^3 \quad (\text{B36})$$

Teniendo estas condiciones, se consideró el diseño de un Reactor de lecho fluidizado, donde el catalizador será mixto, se espera obtener un 75% en la eficiencia de conversión de  $\text{CH}_4$  en la reacción de Sabatier que se llevará a cabo en este equipo.

#### Selección de Turbina.

La Turbina seleccionada es del modelo **C65** de la marca CAPSTONE®. Esta Turbina se seleccionó de acuerdo con sus características, con ellos, el proceso de Combustión de Biogás y generación de energía en el más eficiente.

#### NOTAS.

Rendimiento nominal a plena potencia en condiciones ISO:  $59^\circ \text{F}$ ,  $14.696 \text{ psia}$ ,  $60\% \text{ RH}$

Las dimensiones de altura son hasta la línea del techo. La salida de escape puede extenderse hasta 7 pulgadas por encima de la línea del techo.

Especificaciones basadas en sistemas de gas natural de alta presión. Los valores pueden variar con otros tipos de combustible.

En la imagen se muestran los componentes internos.

### C65 Engine Components

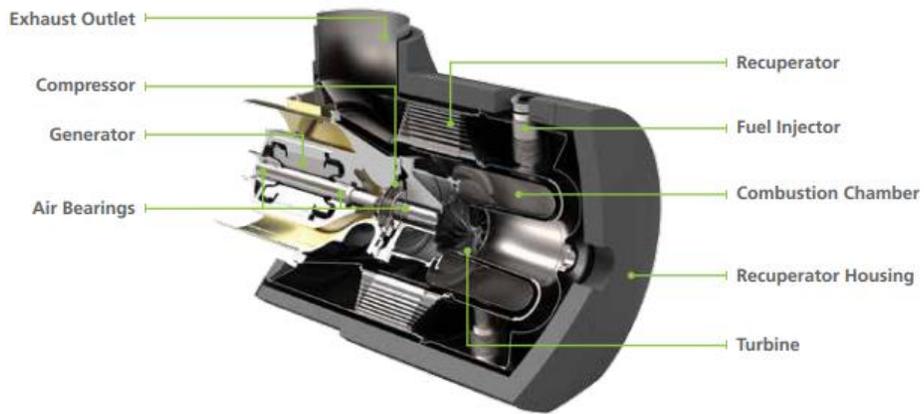


Imagen B.4. Componentes internos del modelo C65.

### Selección de CHILLER.

El Chiller seleccionado es la unidad Modelo **AW60** de la marca AMRT®. Este equipo Chiller cuenta con características que son requeridas en el proceso.

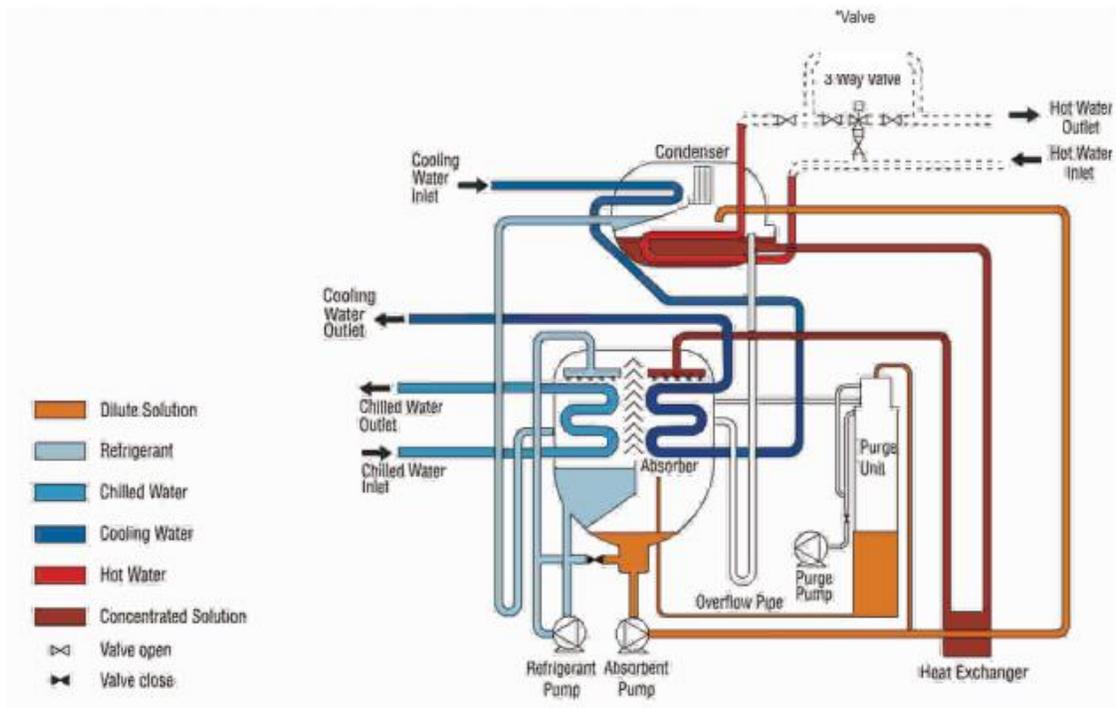


Imagen B.5. Diagrama de ciclo (Thermax).

## Selección de Trampas de condensados.

Las trampas de vapor seleccionadas son de las **Series 800** Balde invertido de la Marca **ARMSTRONG®** la cual es seleccionada en:

1. Carga de condensado en *Kg/h*.
2. Factor de seguridad que se desea (2-3).
3. Diferencial de presión.
4. Presión máxima permitida.

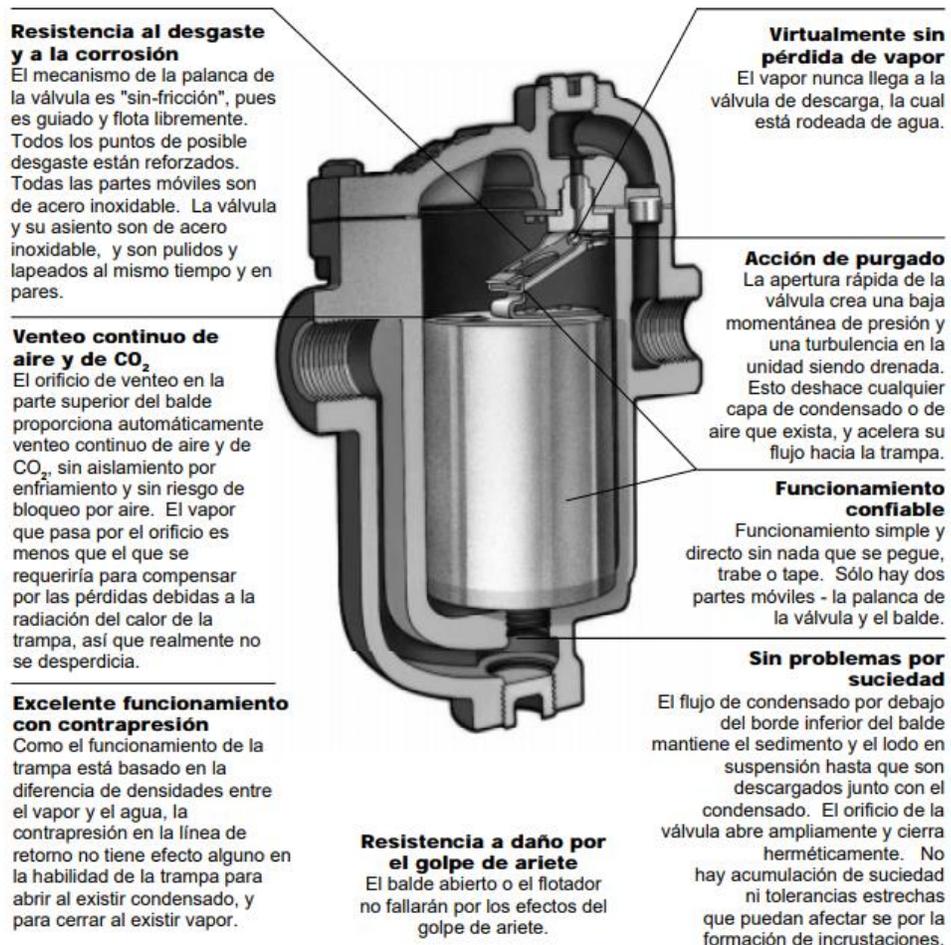


Imagen B.6. Diseño del balde invertido (Armstronginternational).

## Sección C Perfil Hidráulico.

### Perfil hidráulico.

A continuación, se mostrará el algoritmo de cálculo entre equipos del proceso, detallando ecuaciones y características propias tanto de productos, materia prima y material del equipo considerado.

### De Pozo a FG-01.

Con los datos que se obtuvieron en campo se realizaron los cálculos de perfiles hidráulicos

Datos iniciales

$$P_1 = 22.4 \text{ Psig} = 1.56 \text{ atm}$$

$$T_1 = 98^\circ F = 36.7^\circ C$$

$$\text{Flujo volumétrico} = 14.892 \frac{\text{kg}}{\text{Hr}} = \frac{32.8 \text{ lb}}{\text{Hr}} \quad (C1)$$

$$\rho_1 = 0.73 \text{ kg/m}^3 = 0.045 \text{ Lb/ft}^3$$

Material seleccionado: Acero comercial (ASME B36.10M-2004) Rugosidad

$$\varepsilon = 0.0015 \text{ ft} = 0.15 \text{ m}$$

La Viscosidad ( $\mu$ ) se calculó de acuerdo con la Teoría Cinética de Champan-Enskog para gases puros a baja presión, utilizando la siguiente ecuación:

$$\mu = 2.6693 \times 10^{-6} \frac{(MT)^{0.5}}{\sigma^2 \Omega_\mu} \quad (C2)$$

Donde:

$$\text{Masa del biogas} = 16.04 \text{ g/mol}$$

$$\text{Temperatura} = \text{Kelvin} = 309.85$$

Donde diámetro de colisión y energía característica son parámetros específicos del gas. Tabla C.1.

$$\sigma = \text{Diámetro de colisión} = 3.758$$

$$\frac{\varepsilon}{\kappa} = \text{Energía característica entre la constante de Boltzmann} = 148.6$$

Tabla C.1. Parámetros Lennard-Jones (tecno.cruzfierro).

Sustancia	$\sigma$ (Å)	$\varepsilon / \kappa$ (K)	Sustancia	$\sigma$ (Å)	$\varepsilon / \kappa$ (K)
H <sub>2</sub>	2.827	59.7	UF <sub>6</sub>	5.967	236.8
He	2.551	10.22	Hg	2.969	750.0
Ne	2.820	32.8	CH <sub>4</sub>	3.758	148.6
Ar	3.542	93.3	C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>	4.443	215.7
Kr	3.655	178.9	C <sub>2</sub> H <sub>4</sub>	4.163	224.7
Xe	4.047	231.0	C <sub>2</sub> H <sub>2</sub>	4.033	231.8
aire	3.711	78.6	C <sub>3</sub> H <sub>8</sub>	5.118	237.1
N <sub>2</sub>	3.798	71.4	CH <sub>2</sub> =CH-CH <sub>3</sub>	4.678	298.9
O <sub>2</sub>	3.467	106.7	CH <sub>3</sub> C-CH <sub>3</sub>	4.761	251.8
H <sub>2</sub> O	2.649	356	n-C <sub>6</sub> H <sub>10</sub>	4.687	531.4
CO	3.690	91.7	iso-C <sub>6</sub> H <sub>10</sub>	5.278	330.1
CO <sub>2</sub>	3.941	195.2	n-C <sub>5</sub> H <sub>12</sub>	5.784	341.1
COS	4.130	336.0	C(CH <sub>3</sub> ) <sub>4</sub>	6.464	193.4
CS <sub>2</sub>	4.483	467.0	n-C <sub>6</sub> H <sub>14</sub>	5.949	399.3
C <sub>2</sub> N <sub>2</sub>	4.361	348.6	ciclopropano	4.807	248.9
NH <sub>3</sub>	2.900	558.3	ciclohexano	6.182	297.1
NO	3.492	116.7	benceno	5.349	412.3
N <sub>2</sub> O	3.828	232.4	CH <sub>3</sub> -OH	3.626	481.8
SO <sub>2</sub>	4.112	335.4	C <sub>2</sub> H <sub>5</sub> -OH	4.530	362.6
F <sub>2</sub>	3.357	112.6	CH <sub>3</sub> -CO-CH <sub>3</sub>	4.600	560.2
Cl <sub>2</sub>	4.217	316.0	CH <sub>3</sub> -O-CH <sub>3</sub>	4.307	395.0
Br <sub>2</sub>	4.296	507.9	C <sub>2</sub> H <sub>5</sub> -O-C <sub>2</sub> H <sub>5</sub>	5.678	313.8
I <sub>2</sub>	5.160	474.2	CH <sub>2</sub> Cl	4.182	350.0
HF	3.148	330.0	CH <sub>2</sub> Cl <sub>2</sub>	4.898	356.3

La integral de colisión se consulta tabulando la Temperatura adimensional. Tabla C.2.

$$\Omega_{\mu} = \text{Integral de colisión} = 1.1594$$

$$T^* = \frac{T}{\frac{\varepsilon}{\kappa}} = 2.0851 \quad (C3)$$

Tabla C.2 Integral de colisión Lennard-Jones (tecno.cruzfierro).

$T^*$	$\Omega_\mu$	$T^*$	$\Omega_\mu$	$T^*$	$\Omega_\mu$	$T^*$	$\Omega_\mu$
0.25	3.0353	1.30	1.4000	2.7	1.0700	4.8	0.9326
0.30	2.8458	1.35	1.3760	2.8	1.0591	4.9	0.9288
0.35	2.6791	1.40	1.3538	2.9	1.0489	5.0	0.9252
0.40	2.5316	1.45	1.3331	3.0	1.0394	6.0	0.8948
0.45	2.4003	1.50	1.3139	3.1	1.0304	7.0	0.8719
0.50	2.2831	1.55	1.2959	3.2	1.0220	8.0	0.8535
0.55	2.1781	1.60	1.2791	3.3	1.0141	9.0	0.8382
0.60	2.0839	1.65	1.2633	3.4	1.0066	10	0.8249
0.65	1.9991	1.70	1.2486	3.5	0.9995	12	0.8026
0.70	1.9226	1.75	1.2347	3.6	0.9927	14	0.7844
0.75	1.8535	1.80	1.2216	3.7	0.9864	16	0.7690
0.80	1.7909	1.85	1.2092	3.8	0.9803	18	0.7556
0.85	1.7341	1.90	1.1975	3.9	0.9745	20	0.7439
0.90	1.6825	1.95	1.1865	4.0	0.9690	25	0.7196
0.95	1.6354	2.00	1.1760	4.1	0.9637	30	0.7003
1.00	1.5925	2.1	1.1565	4.2	0.9587	35	0.6844
1.05	1.5533	2.2	1.1388	4.3	0.9539	40	0.6710
1.10	1.5173	2.3	1.1227	4.4	0.9493	50	0.6491
1.15	1.4843	2.4	1.1079	4.5	0.9448	75	0.6111
1.20	1.4539	2.5	1.0943	4.6	0.9406	100	0.5855
1.25	1.4259	2.6	1.0817	4.7	0.9365	150	0.5512

$$\mu = 0.000014 Pa \cdot s = 0.014 cP$$

Parámetros calculados con la correlación de Goudar-Sonnad (2008) en algoritmo de Excel.

$$Diametro = 0.83 \text{ in}$$

$$Re = 17677.12$$

$$Factor \text{ de fricción}(f) = 0.0306$$

$$V = 53.07 \text{ ft/s}$$

Velocidad del sonido

$$Vs = 68.1 \sqrt{K \frac{P}{\rho}} = 1581 \frac{ft}{s} \quad (C4)$$

$$Cp = \frac{108.03J}{mol * K}$$

$$Cp = Cv + R$$

$$R = \frac{8.3144J}{mol * K}$$

$$Cv = \frac{99.7156J}{mol * K}$$

$$K = \frac{C_p}{C_v} = 1.0833 \quad (C5)$$

Parámetro dominante en análisis de flujo compresible:  $Mach = \frac{V}{V_s} = 0.0335$  (C6)

Variación de presión en 100 ft de longitud.

$$\Delta p_{100} = \frac{fL}{D} \frac{\rho V^2}{2(144)gc} = 0.58 \text{ Psig} \quad (C7)$$

Datos calculados para saber condiciones finales al llegar a equipo FG-01

$$P_{final} = \Delta p_{100} - P_{Inicial} = 21.82 \text{ Psig} \quad (C8)$$

$$\frac{P_1}{\rho_1} = \frac{P_2}{\rho_2} \Rightarrow \rho_2 = P_2 \frac{\rho_1}{P_1} = \frac{0.0431 \text{ Lb}}{\text{ft}^3} \quad (C9)$$

$$\frac{P_1 V_1}{T_1} = \frac{P_2 V_2}{T_2} \Rightarrow T_2 = T_1 \frac{P_2 V_2}{P_1 V_1} = 35.74^\circ \text{C} = 96.33^\circ \text{F} \quad (C10)$$

*Perfil de pérdida de carga.*

Para calcular la pérdida de carga se utilizan algunos datos calculados en el perfil hidráulico, y tomando en cuenta el coeficiente de resistencia  $K$  de las válvulas y accesorios utilizando los valores del apéndice A de CRANE. Esto se utiliza para cada sección.

$$\text{Para } K = \frac{fL}{D} \quad (C11)$$

*Donde; K: Coeficiente de resistencia*

*f: Factor de fricción*

*L: Longitud de tramo recto en ft*

*D: Diámetro en ft*

*Para pérdida de carga*

$$hf = \frac{fL}{D} \frac{V^2}{2g} \quad (C12)$$

*hf: Pérdida de carga*

$V$ : Velocidad en  $\frac{ft}{s}$

$g$ : 32.2

Para Diferencial de presión por fricción

$$\Delta p = \frac{fLV^2}{2g144} \quad (C13)$$

Tabla C.3 Perfil de carga.

POSO	D_ft	0.07						
Accesorios	N°	D_in	$\beta$	Angulo	K	K Unitaria	K Subtotal	L equivalente
Entrada	1			0	0.78	0.78	0.78	1.882758621
Curva/Cudo(90°)	1			0	30fT	0.75	0.75	1.810344828
T(90°)	2			0	20fT	0.5	1	2.413793103
Val Comp	1		1	0	8fT	0.2	0.2	0.482758621
Salida	1			0	1	1	1	2.413793103
<b>Total</b>							4.73	9.003448276
<b>L_m</b>	10							
<b>L TR_ft</b>	32.808		<b>L Total_ft</b>	41.811448				
<b>hF_ft</b>	777.3700808		<b>hF Acc_ft</b>	212.27253		<b>hF LTR_ft</b>	609.9754652	<b>Total hF:LTR+hF Acc</b>
								822.2479939
<b><math>\Delta P</math> Acc_psi</b>	0.066335165		<b><math>\Delta P</math> LTR_psi</b>	0.2429282		<b><math>\Delta P</math> Tota:LTR+Acc_psi</b>	0.309263315	

De FG-01 a TA-01.

Con los datos que se obtuvieron en campo se realizaron los cálculos de perfiles hidráulicos

Datos iniciales

$$P_1 = 20.13 \text{ Psig} = 1.37 \text{ atm}$$

$$T_1 = 120^\circ F = 48.8^\circ C$$

$$\text{Flujo volumétrico} = 13.874 \frac{kg}{Hr} = \frac{30.62 lb}{Hr}$$

$$\rho_1 = 0.83 \text{ kg/m}^3 = 0.05 \text{ Lb/ft}^3$$

Material seleccionado: Acero comercial (ASME B36.10M) Rugosidad

$$\varepsilon = 0.0015 \text{ ft} = 0.15 \text{ m}$$

La Viscosidad ( $\mu$ ) se calculó de acuerdo con la Teoría Cinética de Champan-Enskog para gases puros a baja presión, utilizando la siguiente ecuación:

$$\mu = 2.6693 \times 10^{-6} \frac{(MT)^{0.5}}{\sigma^2 \Omega_\mu}$$

Donde:

$$\text{Masa del biogas} = 16.04 \text{ g/mol}$$

$$\text{Temperatura} = \text{Kelvin} = 321.95$$

Donde diámetro de colisión y energía característica son parámetros específicos del gas. Tabla C.1

$$\sigma = \text{Diámetro de colisión} = 3.75$$

$$\frac{\varepsilon}{\kappa} = \text{Energía característica entre la constante de Boltzmann} = 148.6$$

La integral de colisión se consulta tabulando la Temperatura adimensional. Tabla C.2.

$$\Omega_\mu = \text{Integral de colisión} = 1.1442$$

$$T^* = \frac{T}{\frac{\varepsilon}{\kappa}} = 2.1665$$

$$\mu = 0.0000118 \text{ Pa} \cdot \text{s} = 0.012 \text{ cP}$$

Parámetros calculados con la correlación de Goudar-Sonnad (2008) en algoritmo de Excel.

$$\text{Diámetro} = 0.794 \text{ in}$$

$$Re = 20272.12$$

$$\text{Factor de fricción}(f) = 0.03018$$

$$V = 49.441 \text{ ft/s}$$

Velocidad del sonido

$$V_s = 68.1 \sqrt{K \frac{P}{\rho}} = 1419 \text{ ft/s}$$

$$C_p = \frac{113.46 \text{ J}}{\text{mol} * K}$$

$$C_p = C_v + R$$

$$R = \frac{8.3144 \text{ J}}{\text{mol} * K}$$

$$C_v = \frac{105.1456 \text{ J}}{\text{mol} * K}$$

$$K = \frac{C_p}{C_v} = 1.079$$

Parámetro dominante en análisis de flujo compresible:  $Mach = \frac{V}{V_s} = 0.0348$

Variación de presión en 100 ft de longitud.

$$\Delta p_{100} = \frac{fL}{D} \frac{\rho V^2}{2(144)gc} = 0.6 \text{ Psig}$$

Datos calculados para saber condiciones finales al llegar a equipo TA-01

$$P_{final} = \Delta p_{100} - P_{inicial} = 19.53 \text{ Psig}$$

$$\frac{P_1}{\rho_1} = \frac{P_2}{\rho_2} \Rightarrow \rho_2 = P_2 \frac{\rho_1}{P_1} = 0.0485 \text{ Lb/ft}^3$$

$$\frac{P_1 V_1}{T_1} = \frac{P_2 V_2}{T_2} \Rightarrow T_2 = T_1 \frac{P_2 V_2}{P_1 V_1} = 47.34^\circ \text{C} = 117.21^\circ \text{F}$$

Tabla C.4 Perfil de carga.

FG-01	D_ft	0.07						
Accesorios	N°	D_in	$\beta$	Angulo	K	K Unitaria	K Subtotal	Lequivalente
Entrada	1			0	0.78	0.78	0.78	1.809145129
Curva/Cudo(90°)	2			0	30ft	0.75	1.5	3.479125249
T(90°)	2			0	20ft	0.5	1	2.319416832
Val Comp	1		1	0	8ft	0.2	0.2	0.463883366
Salida	1			0	1	1	1	2.319416832
<b>Total</b>							5.48	12.71040424
<b>L_m</b>	3							
<b>L TR_ft</b>	9.8424		<b>L Total_ft</b>	22.552804				
<b>hF_ft</b>	369.0564522		<b>hF Acc_ft</b>	207.99439		<b>hF LTR_ft</b>	161.0620651	<b>Total hF:LTR+hF Acc</b>
								369.0564522
<b><math>\Delta P</math> Acc_psi</b>	0.072220273		<b><math>\Delta P</math> LTR_psi</b>	0.1281446		<b><math>\Delta P</math> Tota:LTR+Acc_psi</b>	0.200364875	

De TA-01 a GT-01.

Con los datos que se obtuvieron en campo se realizaron los cálculos de perfiles hidráulicos

Datos iniciales

$$P_1 = 19.53 \text{ Psig} = 1.32 \text{ atm}$$

$$T_1 = 117.21^\circ F = 47.34^\circ C$$

$$\text{Flujo volumétrico} = 13.874 \frac{\text{kg}}{\text{Hr}} = \frac{30.62 \text{ lb}}{\text{Hr}}$$

$$\rho_1 = 0.75 \text{ kg/m}^3 = 0.0485 \text{ Lb/ft}^3$$

Material seleccionado: Acero comercial (ASME B36.10M) Rugosidad

$$\varepsilon = 0.0015 \text{ ft} = 0.15 \text{ m}$$

La Viscosidad ( $\mu$ ) se calculó de acuerdo con la Teoría Cinética de Champan-Enskog para gases puros a baja presión, utilizando la siguiente ecuación:

$$\mu = 2.6693 \times 10^{-6} \frac{(MT)^{0.5}}{\sigma^2 \Omega_\mu}$$

Donde:

$$\text{Masa del biogas} = 16.04 \text{ g/mol}$$

$$\text{Temperatura} = \text{Kelvin} = 320.49$$

Donde diámetro de colisión y energía característica son parámetros específicos del gas. Tabla 4.11.

$$\sigma = \text{Diámetro de colisión} = 3.75$$

$$\frac{\varepsilon}{\kappa} = \text{Energía característica entre la constante de Boltzmann} = 148.6$$

La integral de colisión se consulta tabulando la Temperatura adimensional. Tabla 4.13.

$$\Omega_{\mu} = \text{Integral de colisión} = 1.1465$$

$$T^* = \frac{T}{\frac{\varepsilon}{\kappa}} = 2.156$$

$$\mu = 0.0000118 \text{ Pa} \cdot \text{s} = 0.012 \text{ cP}$$

Parámetros calculados con la correlación de Goudar-Sonnad (2008) en algoritmo de Excel.

$$\text{Diametro} = 0.8 \text{ in}$$

$$Re = 20457.74$$

$$\text{Factor de fricción}(f) = 0.030117$$

$$V = 50.71 \text{ ft/s}$$

Velocidad del sonido

$$V_s = 68.1 \sqrt{K \frac{P}{\rho}} = 1426.88 \text{ ft/s}$$

$$C_p = \frac{112.79 \text{ J}}{\text{mol} \cdot \text{K}}$$

$$C_p = C_v + R$$

$$R = \frac{8.3144 \text{ J}}{\text{mol} \cdot \text{K}}$$

$$C_v = \frac{104.47 \text{ J}}{\text{mol} \cdot \text{K}}$$

$$K = \frac{C_p}{C_v} = 1.079$$

Parámetro dominante en análisis de flujo compresible:  $Mach = \frac{V}{V_s} = 0.0355$

Variación de presión en 100 ft de longitud.

$$\Delta p_{100} = \frac{fL}{D} \frac{\rho V^2}{2(144)gc} = 0.6 \text{ Psig}$$

Datos calculados para saber condiciones finales al llegar a equipo GT-01

$$P_{final} = \Delta p_{100} - P_{Inicial} = 18.93 \text{ Psig}$$

$$\frac{P_1}{\rho_1} = \frac{P_2}{\rho_2} \Rightarrow \rho_2 = P_2 \frac{\rho_1}{P_1} = 0.0465 \text{ Lb/ft}^3$$

$$\frac{P_1 V_1}{T_1} = \frac{P_2 V_2}{T_2} \Rightarrow T_2 = T_1 \frac{P_2 V_2}{P_1 V_1} = 45.88^\circ \text{C} = 114.585^\circ \text{F}$$

Tabla C.5 Perfil de carga.

TA-01	D_ft	0.07						
Accesorios	N°	D_in	$\beta$	Angulo	K	K Unitaria	K Subtotal	Lequivalente
Entrada	1			0	0.78	0.78	0.78	1.813351046
Curva/Cudo(90°)	2			0	30fT	0.75	1.5	3.48721355
T(90°)	2			0	20fT	0.5	1	2.324809034
Val Comp	1		1	0	8fT	0.2	0.2	0.464961807
Salida	1			0	1	1	1	2.324809034
<b>Total</b>							5.48	12.7399535
<b>L_m</b>	3							
<b>LTR_ft</b>	9.8424			<b>L Total_ft</b>	22.582354			
<b>hF_ft</b>	387.8673927			<b>hF Acc_ft</b>	218.81743		<b>hF LTR_ft</b>	169.0499631
								<b>Total hF:LTR+hF Acc</b>
								387.8673927
<b><math>\Delta P</math> Acc_psi</b>	0.072939143			<b><math>\Delta P</math> LTR_psi</b>	0.1292891		<b><math>\Delta P</math> Tota:LTR+Acc_psi</b>	0.202228274

De GT-01 a DC-01.

Con los datos que se obtuvieron en campo se realizaron los cálculos de perfiles hidráulicos

Datos iniciales

$$P_1 = 18.93 \text{ Psig} = 1.2 \text{ atm}$$

$$T_1 = 588^\circ F = 309^\circ C$$

$$\text{Flujo volumétrico} = 13.874 \frac{\text{kg}}{\text{Hr}} = \frac{30.62 \text{ lb}}{\text{Hr}}$$

$$\rho_1 = 0.402 \text{ kg/m}^3 = 0.025 \text{ Lb/ft}^3$$

Material seleccionado: Acero comercial (ASME B36.10M) Rugosidad

$$\varepsilon = 0.0015 \text{ ft} = 0.15 \text{ m}$$

La Viscosidad ( $\mu$ ) se calculó de acuerdo con la Teoría Cinética de Champan-Enskog para gases puros a baja presión, utilizando la siguiente ecuación:

$$\mu = 2.6693 \times 10^{-6} \frac{(MT)^{0.5}}{\sigma^2 \Omega_\mu}$$

Donde:

$$\text{Masa del biogas} = 16.04 \text{ g/mol}$$

$$\text{Temperatura} = \text{Kelvin} = 582.15$$

Donde diámetro de colisión y energía característica son parámetros específicos del gas. Tabla C.1.

$$\sigma = \text{Diámetro de colisión} = 3.75$$

$$\frac{\varepsilon}{\kappa} = \text{Energía característica entre la constante de Boltzmann} = 148.6$$

La integral de colisión se consulta tabulando la Temperatura adimensional. Tabla C.2.

$$\Omega_\mu = \text{Integral de colisión} = 0.9735$$

$$T^* = \frac{T}{\frac{\varepsilon}{\kappa}} = 3.9175$$

$$\mu = 0.0000187 Pa \cdot s = 0.018 cP$$

Parámetros calculados con la correlación de Goudar-Sonnad (2008) en algoritmo de Excel.

$$Diametro = 0.92 in$$

$$Re = 11125.9$$

$$Factor\ de\ fricción(f) = 0.0329$$

$$V = 72.33 ft/s$$

Velocidad del sonido

$$V_s = 68.1 \sqrt{K \frac{P}{\rho}} = 1900.9 ft/s$$

$$C_p = \frac{290.97 J}{mol \cdot K}$$

$$C_p = C_v + R$$

$$R = \frac{8.3144 J}{mol \cdot K}$$

$$C_v = \frac{282.655 J}{mol \cdot K}$$

$$K = \frac{C_p}{C_v} = 1.079$$

Parámetro dominante en análisis de flujo compresible:  $Mach = \frac{V}{V_s} = 0.038$

Variación de presión en 100 ft de longitud.

$$\Delta p_{100} = \frac{fL}{D} \frac{\rho V^2}{2(144)gc} = 0.605 Psig$$

Datos calculados para conocer las condiciones finales al que alimentar al equipo GT-01:

$$P_{final} = \Delta p_{100} - P_{Inicial} = 18.33 \text{ Psig}$$

$$\frac{P_1}{\rho_1} = \frac{P_2}{\rho_2} \Rightarrow \rho_2 = P_2 \frac{\rho_1}{P_1} = 0.024 \text{ Lb/ft}^3$$

$$\frac{P_1 V_1}{T_1} = \frac{P_2 V_2}{T_2} \Rightarrow T_2 = T_1 \frac{P_2 V_2}{P_1 V_1} = 299.35^\circ \text{C} = 570.83^\circ \text{F}$$

Tabla C.6 Perfil de carga.

GT-01	D_ft	0.13833333						
Accesorios	N°	D_in	$\beta$	Angulo	K	K Unitaria	K Subtotal	L equivalente
Entrada	1			0	0.78	0.78	0.78	3.974217311
Curva/Cudo(90°)	2			0	30ft	0.63	1.26	6.419889503
T(90°)	2			0	20ft	0.42	0.84	4.279926335
Val Comp	1		1	0	8ft	0.168	0.168	0.855985267
Salida	1			0	1	1	1	5.095150399
<b>Total</b>							5.048	25.72031921
<b>L_m</b>	3							
<b>L TR_ft</b>	9.8424		<b>L Total_ft</b>	35.562719				
<b>hF_ft</b>	1116.547809		<b>hF Acc_ft</b>	807.5301		<b>hF LTR_ft</b>	309.017713	<b>Total hF:LTR+hF Acc</b>
								1116.547809
<b><math>\Delta P</math> Acc_psi</b>	0.140196197		<b><math>\Delta P</math> LTR_psi</b>	0.1938451		<b><math>\Delta P</math> Tota:LTR+Acc_psi</b>	0.334041303	

De DC-01 a CHILLER-01.

Con los datos que se obtuvieron en campo se realizaron los cálculos de perfiles hidráulicos

Datos iniciales

$$P_1 = 18.2 \text{ Psig} = 1.23 \text{ atm}$$

$$T_1 = 648.75^\circ \text{F} = 342.64^\circ \text{C}$$

$$\text{Flujo volumétrico} = 56.7 \frac{\text{kg}}{\text{Hr}} = \frac{124.96 \text{ lb}}{\text{Hr}}$$

$$\rho_1 = 0.3996 \text{ kg/m}^3 = 0.024 \text{ Lb/ft}^3$$

Material seleccionado: Acero comercial (ASME B36.10M) Rugosidad

$$\varepsilon = 0.0015 \text{ ft} = 0.15 \text{ m}$$

La Viscosidad ( $\mu$ ) se calculó de acuerdo con la Teoría Cinética de Champan-Enskog para gases puros a baja presión, utilizando la siguiente ecuación:

$$\mu = 2.6693 \times 10^{-6} \frac{(MT)^{0.5}}{\sigma^2 \Omega_\mu}$$

Donde:

$$\text{Masa del biogas} = 16.04 \text{ g/mol}$$

$$\text{Temperatura} = \text{Kelvin} = 615.79$$

Donde diámetro de colisión y energía característica son parámetros específicos del gas. Tabla C.1.

$$\sigma = \text{Diámetro de colisión} = 3.75$$

$$\frac{\varepsilon}{\kappa} = \text{Energía característica entre la constante de Boltzmann} = 148.6$$

La integral de colisión se consulta tabulando la Temperatura adimensional. Tabla C.2.

$$\Omega_\mu = \text{Integral de colisión} = 0.9615$$

$$T^* = \frac{T}{\frac{\varepsilon}{\kappa}} = 4.1439$$

$$\mu = 0.0000195 \text{ Pa} \cdot \text{s} = 0.0195 \text{ cP}$$

Parámetros calculados con la correlación de Goudar-Sonnad (2008) en algoritmo de Excel.

$$\text{Diámetro} = 1.57 \text{ in}$$

$$Re = 25614.35$$

$$\text{Factor de fricción}(f) = 0.0269$$

$$V = 106.4057 \text{ ft/s}$$

Velocidad del sonido

$$V_s = 68.1 \sqrt{K \frac{P}{\rho}} = 1899.55 \text{ ft/s}$$

$$C_p = \frac{321.79 \text{ J}}{\text{mol} * K}$$

$$C_p = C_v + R$$

$$R = \frac{8.3144 \text{ J}}{\text{mol} * K}$$

$$C_v = \frac{313.47 \text{ J}}{\text{mol} * K}$$

$$K = \frac{C_p}{C_v} = 1.02$$

Parámetro dominante en análisis de flujo compresible:  $Mach = \frac{V}{V_s} = 0.056$

Variación de presión en 100 ft de longitud.

$$\Delta p_{100} = \frac{fL}{D} \frac{\rho V^2}{2(144)gc} = 0.598 \text{ Psig}$$

Datos calculados para saber condiciones finales al llegar a equipo GT-01

$$P_{final} = \Delta p_{100} - P_{inicial} = 17.60 \text{ Psig}$$

$$\frac{P_1}{\rho_1} = \frac{P_2}{\rho_2} \Rightarrow \rho_2 = P_2 \frac{\rho_1}{P_1} = 0.0232 \text{ Lb/ft}^3$$

$$\frac{P_1 V_1}{T_1} = \frac{P_2 V_2}{T_2} \Rightarrow T_2 = T_1 \frac{P_2 V_2}{P_1 V_1} = 331.344^\circ \text{C} = 628.41^\circ \text{F}$$

Tabla C.7 Perfil de carga.

DC-01	D_ft	0.13833333						
Accesorios	N°	D_in	$\beta$	Angulo	K	K Unitaria	K Subtotal	L equivalente
Entrada	1			0	0.78	0.78	0.78	4.011152416
Curva/Cudo(90°)	2			0	30fT	0.63	1.26	6.479553903
T(90°)	2			0	20fT	0.42	0.84	4.319702602
Val Comp	1		1	0	8fT	0.168	0.168	0.86394052
Salida	1			0	1	1	1	5.142503098
<b>Total</b>							5.048	25.95935564
<b>L_m</b>	4.5							
<b>LTR_ft</b>	14.7636		<b>L Total_ft</b>	40.722956				
<b>hF_ft</b>	1392.073345		<b>hF Acc_ft</b>	887.3945		<b>hF LTR_ft</b>	504.6788405	<b>Total hF:LTR+hF Acc</b>
								1392.073345
<b><math>\Delta P</math> Acc_psi</b>	0.147899084		<b><math>\Delta P</math> LTR_psi</b>	0.2320122		<b><math>\Delta P</math> Tota:LTR+Acc_psi</b>	0.379911308	

De CHILLER-01 a TA-01.

Con los datos que se obtuvieron en campo se realizaron los cálculos de perfiles hidráulicos

Datos iniciales

$$P_1 = 17.9 \text{ Psig} = 1.19 \text{ atm}$$

$$T_1 = 117.21^\circ F = 47.34^\circ C$$

$$\text{Flujo volumétrico} = 56.7 \frac{\text{kg}}{\text{Hr}} = \frac{124.96 \text{ lb}}{\text{Hr}}$$

$$\rho_1 = 0.0209 \text{ kg/m}^3 = 0.0462 \text{ Lb/ft}^3$$

Material seleccionado: Acero comercial (ASME B36.10M) Rugosidad

$$\varepsilon = 0.0015 \text{ ft} = 0.15 \text{ m}$$

La Viscosidad ( $\mu$ ) se calculó de acuerdo con la Teoría Cinética de Champan-Enskog para gases puros a baja presión, utilizando la siguiente ecuación:

$$\mu = 2.6693 \times 10^{-6} \frac{(MT)^{0.5}}{\sigma^2 \Omega_\mu}$$

Donde:

$$\text{Masa del biogas} = 16.04 \text{ g/mol}$$

$$Temperatura = Kelvin = 320.49$$

Donde diámetro de colisión y energía característica son parámetros específicos del gas. Tabla C.1

$$\sigma = \text{Diámetro de colisión} = 3.75$$

$$\frac{\varepsilon}{\kappa} = \text{Energía característica entre la constante de Boltzmann} = 148.6$$

La integral de colisión se consulta tabulando la Temperatura adimensional. Tabla C.2.

$$\Omega_{\mu} = \text{Integral de colisión} = 1.1465$$

$$T^* = \frac{T}{\frac{\varepsilon}{\kappa}} = 2.156$$

$$\mu = 0.0000118 Pa * s = 0.0118 cP$$

Parámetros calculados con la correlación de Goudar-Sonnad (2008) en algoritmo de Excel.

$$Diametro = 1.364 in$$

$$Re = 48982.45$$

$$\text{Factor de fricción}(f) = 0.0249$$

$$V = 74.3408 ft/s$$

Velocidad del sonido

$$Vs = 68.1 \sqrt{K \frac{P}{\rho}} = 1224.37 ft/s$$

$$Cp = \frac{301.49 J}{mol * K}$$

$$Cp = Cv + R$$

$$R = \frac{8.3144 J}{mol * K}$$

$$Cv = \frac{293.1756J}{mol * K}$$

$$K = \frac{Cp}{Cv} = 1.02$$

Parámetro dominante en análisis de flujo compresible:  $Mach = \frac{V}{Vs} = 0.06$

Variación de presión en 100 ft de longitud.

$$\Delta p_{100} = \frac{fL}{D} \frac{\rho V^2}{2(144)gc} = 0.6Psig$$

Datos calculados para saber condiciones finales al llegar a equipo GT-01

$$P_{final} = \Delta p_{100} - P_{inicial} = 17.30 Psig$$

$$\frac{P_1}{\rho_1} = \frac{P_2}{\rho_2} \Rightarrow \rho_2 = P_2 \frac{\rho_1}{P_1} = 0.0446 Lb/ft^3$$

$$\frac{P_1 V_1}{T_1} = \frac{P_2 V_2}{T_2} \Rightarrow T_2 = T_1 \frac{P_2 V_2}{P_1 V_1} = 45.753^\circ C = 114.355^\circ F$$

Tabla C.8 Perfil de carga.

CH-01	D_ft	0.138333333						
Accesorios	N°	D_in	β	Angulo	K	K Unitaria	K Subtotal	L equivalente
Entrada	3			0	0.78	0.78	2.34	13
Curva/Cudo(90°)	3			0	30fT	0.63	1.89	10.5
T(90°)	4			0	20fT	0.42	1.68	9.333333333
Val Comp	2		1	0	8fT	0.168	0.336	1.866666667
Salida	3			0	1	1	3	16.66666667
<b>Total</b>							12.246	68.03333333
<b>L_m</b>	21							
<b>L TR_ft</b>	68.8968		<b>L Total_ft</b>	136.93013				
<b>hF_ft</b>	2115.099401		<b>hF Acc_ft</b>	1050.8809		<b>hF LTR_ft</b>	1064.218495	<b>Total hF:LTR+hF Acc</b>
								2115.099401
<b>ΔP Acc_psi</b>	0.32548117		<b>ΔP LTR_psi</b>	0.6550933		<b>ΔP Tota:LTR+Acc_psi</b>	0.980574456	