

UNIVERSIDAD NACIONAL DEL LITORAL
Facultad de Ingeniería y Ciencias Hídricas



PROYECTO FINAL DE CARRERA
INGENIERÍA AMBIENTAL

TÍTULO

“Acondicionamiento del biogás producido en la planta de
tratamiento de efluentes líquidos de una cervecería para
cogeneración de energía”

ALUMNO

Imvinkelried, Caren Fani

Junio 2022

INDICE

LISTA DE TABLAS	4
LISTA DE ILUSTRACIONES.....	5
1. RESUMEN	6
2. MEMORIA DESCRIPTIVA	7
3. INTRODUCCION.....	10
DIAGNOSTICO	10
ANTECEDENTES	11
BIOGAS	12
LA COGENERACIÓN	13
4. ESTUDIOS PRELIMINARES Y ANALISIS DE PROCESOS	14
ALMACENAMIENTO	15
ACONDICIONAMIENTO:	16
ELIMINACION DE VAPOR DE AGUA	16
ELIMINACIÓN DE PARTÍCULAS SÓLIDAS:.....	18
ELIMINACIÓN DE SULFURO DE HIDROGENO:.....	18
GENERACION DE ELECTRICIDAD Y CALOR:.....	20
FUNCIONAMIENTO DEL MOTOR.....	20
ELEMENTOS DE SEGURIDAD:	21
ANTORCHA DE SEGURIDAD:	21
5. ANALISIS DE ALTERNATIVAS Y ELECCIÓN DE LA MÁS CONVENIENTE	22
INTRODUCCIÓN.....	22
DEFINICIÓN DEL PROBLEMA	22
DESCRIPCIÓN DE ALTERNATIVAS	23
ALTERNATIVA NÚMERO 1: Desulfuración del biogás mediante un sistema de adsorción con óxidos de hierro	23
ALTERNATIVA NUMERO 2: Desulfuración mediante absorción física con agua en una columna rellena:	25
DESCRIPCIÓN DE LOS CRITERIOS DE SELECCIÓN.....	29
COMPARACIÓN DE ALTERNATIVAS	30
MATRIZ DE ALTERNATIVAS	30
Matriz de criterios.....	32
SELECCIÓN DE ALTERNATIVA.....	33
6. DATOS BÁSICOS DE DISEÑO:.....	34
BIOGAS	34
CAUDAL	34

PRINCIPALES PARAMETROS	34
COMPOSICIÓN.....	34
ENERGÍA PRIMARIA Y POTENCIA GENERADA.....	35
COGENERACIÓN DE ENERGÍA	36
DEMANDA DE ENERGÍA TÉRMICA	36
PARAMETROS DE ENTRADA	37
7. PROYECTO DE LA ALTERNATIVA SELECCIONADA.....	38
MEMORIA TECNICA.....	38
GASOMETRO	38
ANTORCHA.....	39
ELIMINACIÓN DE HUMEDAD.....	40
SEPARADOR CICLONICO.....	42
DESULFURACION DEL BIOGAS	48
ENERGÍA TÉRMICA REQUERIDA.....	59
DISEÑO HIDRÁULICO.....	70
Sistema de impulsión:.....	78
UNIDAD DE COGENERACIÓN DE ENERGÍA.....	81
ANÁLISIS DE IMPACTO AMBIENTAL Y DE CUESTIONES DE SEGURIDAD.....	84
OBJETIVO	84
UBICACIÓN	84
DIAGNOSTICO AMBIENTAL:	85
ANÁLISIS DE IMPACTO AMBIENTAL	86
PLAN DE MANEJO AMBIENTAL.....	93
MEDIDAS DE SEGURIDAD Y CONTINGENCIAS:	94
PROGRAMA DE MONITOREO:.....	96
Conclusiones:	96
COSTOS.....	97
ESTIMACIÓN DE COSTOS: OPTICA FINANCIERA	97
ESTIMACIÓN DE COSTOS: ENFOQUE ECONÓMICO	99
FINANCIAMIENTO Y POSIBLES BENEFICIOS	102
PLANOS.....	104
ANEXOS.	105
ANEXO I: CÁLCULO DE LA DENSIDAD DEL BIOGAS.....	105
ANEXO II: PRESUPUESTOS Y FICHAS TÉCNICAS DE EQUIPOS	106
ANEXO IV: CÁLCULO DE COSTOS AUXILIARES.....	112
COSTOS SISTEMA DE CONDUCCIÓN.....	112
COSTOS DE IMPORTACIÓN.....	113
COSTOS DE OPERACIÓN.....	113

AMORTIZACIONES.....	114
Bibliografía.....	116

LISTA DE TABLAS

Tabla 4.1 Composición del biogás según origen	14
Tabla 4.2 Grado de acondicionamiento del biogás según uso	15
Tabla 4.3 Ciclones de alta eficiencia	17
Tabla 4.4 Ciclones convencionales.....	17
Tabla 4.5 Ciclones de alta capacidad.....	17
Tabla 5.1 Escala de preferencia	22
Tabla 5.2 Datos de entrada y parámetros de funcionamiento del sistema	23
Tabla 5.3 Datos para el cálculo de los cocientes molares	27
Tabla 5.4 Cocientes molares de entrada.....	28
Tabla 5.5 Comparación de la eficiencia.....	30
Tabla 5.6 Comparación de la disponibilidad de tecnologías.....	30
Tabla 5.7 Comparación de la complejidad.....	30
Tabla 5.8 Comparación del consumo energético	31
Tabla 5.9 Comparación criterio económico.....	31
Tabla 5.10 Comparación criterio ambiental.....	31
Tabla 5.11 Matriz de prefencia	32
Tabla 5.12. Obtención del vector peso para cada criterio	32
Tabla 5.13. Obtención del vector peso global para cada alternativa.....	33
Tabla 6.1 Principales parámetros de entrada del biogás	34
Tabla 6.2 Composición de entrada del biogás	34
Tabla 6.3 Distribución de tamaños de las partículas sólidas.....	34
Tabla 6.4 Datos utilizados para el cálcula de la energía primaria obtenida	35
Tabla 6.5 Potencia de generación	35
Tabla 6.6 Características del biodigestor	36
Tabla 6.7 Temperatura promedio de los meses de invierno.....	36
Tabla 6.8 Requisitos del biogás a la entrada de los sistemas de generación de energía	37
Tabla 7.1 Principales características del chiller seleccionado.....	41
Tabla 7.2 Características del biogás a la entrada del separador ciclónico	43
Tabla 7.3 Parámetros de funcionamiento del separador ciclónico.....	44
Tabla 7.4. Distribución de partículas	44
Tabla 7.5. Cálculo de la eficiencia del ciclón	47
Tabla 7.6 Dispositivos interiores de la columna	49
Tabla 7.7 Dispositivos de control	49
Tabla 7.8. Características estructurales.....	50
Tabla 7.9. Parámetros de entrada a la columna.....	51
Tabla 7.10. Características de pellets de óxido de hierro.....	52
Tabla 7.11. Condiciones de operación	53
Tabla 7.12. Dimensiones de las columnas de adsorción	54
Tabla 7.13 Tiempo de funcionamiento de la columna	56
Tabla 7.14. Esfericidad de partículas	57
Tabla 7.15. Parámetros del biogás utilizados para el cálculo de la caída de presión	58
Tabla 7.16. Diámetro de los tubos de un intercambiador de calor.....	60
Tabla 7.17. Coeficiente de transferencias térmicos entre diferentes medios	61
Tabla 7.18. Coeficiente de conducción de calor para distintos materiales.....	61
Tabla 7.19. Material de construcción del biodigestor	62
Tabla 7.20. Propiedades del agua a diferentes temperaturas.....	64
Tabla 7.21. Dimensiones estándar de los tubos seleccionados	66
Tabla 7.22. Parámetros de los fluidos a la entrada y salida del intercambiador	67
Tabla 7.23. Parámetros calculados para la estimación del coeficiente de transferencia de calor U.....	68
Tabla 7.24. Referencias vista en planta.....	72

Tabla 7.25. Accesorios instalados, línea biogás.....	74
Tabla 7.26. Parámetros utilizados para el cálculo de la presión.	74
Tabla 7.27. Accesorios en la línea de aire de regeneración	75
Tabla 7.28. Parámetros utilizados para calcular la pérdida de carga en la línea de regeneración.....	76
Tabla 7.29 Datos de partida para el cálculo de la energía primaria	81
Tabla 7.30. Modelos de motores de cogeneración de energía	82
Tabla 7.31. Características del motor de cogeneración seleccionado	82
Tabla 7.32. Principales características del motor de generación eléctrica	83
Tabla 7.33. Producción de energía total.....	83
Tabla 7.34. Descripción de los calificadores	87
Tabla 7.35. Importancia y clasificación de impactos	89
Tabla 7.36. Descripción de los factores ambientales	89
Tabla 7.37. Descripción de actividades	90
Tabla 7.38. Matriz de identificación de posibles impactos	91
Tabla 7.39. Matriz de valoración de impactos	92
Tabla 7.40. Medidas preventivas y de mitigación de impactos	93
Tabla 7.41. Plan de monitoreo y control.....	96
Tabla 7.42. Inversión Inicial	97
Tabla 7.43. Costos de operación	99
Tabla 7.44. Incidencia en el costo según capital	100
Tabla 7.45. Capital circulante	101
Tabla 7.46. Cálculo del costo unitario	102
Tabla 7.47. Condiciones del préstamo otorgado por el BICE.....	102
Tabla 0.1. Precio del kwh y clasificación horaria	114

LISTA DE ILUSTRACIONES.

Ilustración 3.1 Matriz Energía Primaria Argentina.....	11
Ilustración 4.1 Etapas típicas de una planta de biogás	15
Ilustración 4.2 Ciclo de OTTO	20
Ilustración 4.3 Esquema de un sistema de cogeneración de energía.....	21
Ilustración 4.4 Comparación de los diferentes tipos de antorchas	21
Ilustración 5.1 Balance de materia, columna de absorción.....	26
Ilustración 5.2. Esquema de tratamiento de la alternativa seleccionada	33
Ilustración 6.1 Gráfico Psicométrico	35
Ilustración 7.1 Gasómetro (Fuente: www.carapasargentinas.com.ar).....	38
Ilustración 7.2. Esquema de la antorcha	40
Ilustración 7.3 Gráfico psicométrico.....	42
Ilustración 7.4 Características dimensionales de un separador ciclónico tipo Tengbergen C.....	43
Ilustración 7.5. Pellets de óxido de hierro. Fuente: Enviado por proveedor	52
Ilustración 7.6 Intercambiador de calor doble tubo	60
Ilustración 7.7. Intercambiador comercial doble tubo	70
Ilustración 7.8. Vista y disposición de equipos y corrientes en la planta.....	72
Ilustración 7.9 Bomba utilizada para el transporte de agua caliente	81
Ilustración 7.10- Ubicación del proyecto. Fuente: Google Earth.....	84
Ilustración 7.11. Distribución inversión inicial.....	99
Ilustración 7.12. Clasificación del capital.....	100

1. RESUMEN

El presente proyecto, tiene como objetivo principal diseñar un sistema de acondicionamiento de biogás generado en un reactor UASB presente en una planta de tratamiento de efluentes de una industria cervecera, para ser utilizado en la cogeneración de energía. La energía eléctrica será inyectada a la red, mientras que el calor se utilizará para calefaccionar el biodigestor de los barros.

Se generan aproximadamente 4469 m³ de biogás diario, y los principales compuestos a reducir son el sulfuro de hidrogeno, la humedad y la concentración de partículas sólidas, debido a que estos compuestos, además de disminuir el poder calorífico del gas, producen corrosión en los motores, disminuyendo la vida útil.

Para ello se plantean dos alternativas de tratamiento, donde la diferencia entre ambas, es el sistema de desulfuración del biogás. La alternativa número uno plantea reducir el contenido de H₂S mediante adsorción química con óxidos de hierro. Por otro lado, la alternativa número dos, consiste en la reducción de este compuesto a través de absorción física utilizando como solvente agua.

Para determinar la alternativa más conveniente, se realiza un análisis multicriterio donde los criterios analizados para la toma de decisión son técnicos, económicos y ambientales. Dentro de los criterios técnicos se evaluó como subcriterios la eficiencia de cada sistema, la disponibilidad, la complejidad de las alternativas analizadas y el consumo energético. De este análisis, surge que la alternativa más conveniente es la alternativa número uno, debido principalmente al gran caudal de agua necesario para poder realizar la absorción física del sulfuro de hidrogeno en la alternativa número dos.

La alternativa número 1 cuenta con un gasómetro y como principal sistema de seguridad una antorcha de llama abierta. El sistema de deshumidificación del biogás consiste en un Chiller donde la humedad pasa del 100% al 20%. Para la eliminación de partículas sólidas se dimensiona un separador ciclónico de la familia de ciclones Tenbergen de alta eficiencia. El sistema de desulfuración por su parte, consiste en dos columnas rellenas de pellets de óxidos de hierro las cuales tienen una altura de lecho de 7,58 m, una altura total de 8,58 m y un diámetro de 1,05 m. Finalmente, el biogás tratado ingresa al sistema de cogeneración de energía, compuesto por un motor de cogeneración de energía y un motor generador eléctrico común donde se generan 143 kW de potencia térmica y un total de 333 kW de potencia eléctrica. Adicionalmente, se diseña un intercambiador de calor externo de tubos concéntricos donde se logra aumentar la temperatura de los lodos que ingresan al biodigestor de 7°C a 30°C, temperatura de máxima eficiencia.

En cuanto a los impactos ambientales, se encuentra que los potenciales impactos negativos del proyecto se dan en el caso si ocurriesen accidentes, tales como fugas de gas, incendios y explosión donde se afectaría principalmente la calidad del aire, el paisaje y el medio socioeconómico. En cuanto a los impactos positivos, los mismos estarían relacionados a los aspectos socioeconómicos mediante la generación de trabajo en la economía tanto local como nacional y al uso de un residuo como fuente de energía.

Finalmente, del análisis de costos surge que se necesita una inversión inicial de \$ 50.195.246 para la puesta en marcha del proyecto, con un costo operacional de \$ 12.579.812 anuales. Mediante un análisis de costos desde la óptica económica, se determina que el costo de tratamiento de un metro cúbico de biogás es aproximadamente de \$24,15.

2. MEMORIA DESCRIPTIVA

El principal objetivo del proyecto es acondicionar el biogás, de forma que pueda ser utilizado como combustible en un motor de cogeneración de energía. El biogás utilizado en este proyecto se genera en una planta de tratamiento de efluentes de una cervecería, donde estos gases se generan por medio de la digestión anaerobia que se lleva a cabo en un reactor UASB. Una vez que se acondiciona el biogás se propone utilizarlo para inyectar la energía eléctrica a la red y el calor generado en forma de agua caliente, mediante un intercambiador de calor, utilizarlo para otorgar una temperatura óptima al biodigestor anaerobio que se encarga de tratar los barros producto del tratamiento de los líquidos residuales.

Como punto de partida, se realiza un breve estudio de los antecedentes de esta tecnología, donde se pudo conocer que una de las principales trabas en estos proyectos es la falta de desarrollo en el país de las tecnologías necesarias tanto para el acondicionamiento como para la transformación del biogás en energía. Por un lado, al ser equipos importados en su mayoría, se encarece demasiado la obra, lo que lo hace que el biogás resulte menos competitivo frente a otros tipos de fuente de energía, y por el otro, al no existir un desarrollo interno de este mercado, existen muy pocos servicios de ingeniería, mantenimiento e instalación asociados a estos proyectos lo que disminuye la confianza de los inversores en este tipo de energía.

Posteriormente, se realiza un estudio preliminar y análisis de los procesos asociados al uso del biogás en motores de cogeneración de energía. Se estudian las diferentes tecnologías de tratamiento que existen, los equipos necesarios en una planta y el funcionamiento de los motores de cogeneración de energía.

Con dicha información se proponen dos alternativas de tratamiento asociadas principalmente a la disminución del contenido de sulfuro de hidrogeno del biogás. La primera propuesta consiste en la desulfuración del biogás mediante adsorción química con pellets de óxido de hierro y la segunda alternativa, utiliza la absorción física con agua para eliminar el sulfuro de hidrogeno. En ambas alternativas, se cuenta con los siguientes equipos:

- Un gasómetro, encargado de almacenar el biogás y generar un caudal continuo y uniforme del mismo
- Una antorcha, con el fin no solo de quemar los excedentes sino de ser el principal dispositivo de seguridad de la planta.
- Un chiller y un separador ciclónico. El chiller se encarga de condensar la humedad contenida en el biogás, mientras que el separador ciclónico cumple la función de eliminar las partículas sólidas y el resto de gotas que no fueron contenidas en la trampa del chiller. En la alternativa número 1, estos equipos se encuentran antes del sistema de desulfuración, ya que las columnas de adsorción requieren prácticamente un biogás libre de partículas y agua. En la segunda alternativa, en cambio, se ubican posterior al tratamiento.
- Un motor generador de energía eléctrica y un motor cogenerador de energía.
- Un intercambiador de calor de tubos concéntricos.

Luego, la selección de la alternativa más conveniente se realiza mediante un análisis multicriterio AHP, donde se compararon ambas alternativas, utilizando los siguientes criterios:

- Técnicos: donde se analizó la eficiencia de remoción de sulfuro de hidrogeno, la disponibilidad de las tecnologías, la complejidad de los sistemas y el consumo energético.
- Económicos: se analizó los beneficios y los costos de implementación del proyecto
- Ambientales: se estudió el impacto ambiental de la implementación de este proyecto, teniendo en cuenta la generación de efluentes líquidos y residuos de características peligrasas.

Se seleccionó la alternativa número 1, adsorción química mediante pellets de óxido de hierro, ya que, entre las principales desventajas de la segunda alternativa, se encontró, que para eliminar el sulfuro de hidrogeno mediante absorción física, se necesitaba un caudal de agua demasiado elevado, lo que la hacía inviable tanto técnica como económicamente.

Una vez seleccionada la alternativa de tratamiento, se procedió a describir todos los datos básicos necesarios para el diseño de la planta. La planta de biogás, se diseña para tratar 4469 m³ diarios. El mismo tiene un contenido de sulfuro de hidrogeno de 3100 ppm y se debe reducir hasta los 200 ppm. Por otro lado, el biogás está completamente saturado de vapor de agua, y se exige que los mismos tengan como máximo un 60% de contenido de humedad para el ingreso a los motores. En cuanto al contenido de material particulado, se exige una reducción del 92 % de la concentración de los mismos.

En cuanto a la parte energética del proyecto, conociendo la eficiencia de los motores de cogeneración, se encontró que se pueden generar aproximadamente 481 KW como energía térmica, y 421 KW de potencia como energía eléctrica. Luego, mediante un balance de energía térmica, se determinó que para los meses de invierno (peores condiciones), se necesita una potencia de 133 KW, por lo que la energía generada alcanza para cumplir esta demanda. Por este motivo, se decidió elegir por un lado un motor de cogeneración que sea capaz de satisfacer esa demanda térmica y, por otro lado, un motor generador eléctrico más grande que se aproveche para generar más energía eléctrica con el resto del biogás que no ingresa al cogenerador.

Con todos estos datos, se procede al diseño de la planta. La planta de acondicionamiento de biogás cuenta con los siguientes equipos:

- Un gasómetro doble membrana capaz de almacenar 2235 m³ aproximadamente.
- Una antorcha de llama abierta, con una capacidad máxima de quemar de forma segura 195 m³/hora de biogás.
- Un chiller capaz de enfriar hasta 5°C el biogás, condensado el vapor de agua y atrapándolo a la salida. Este chiller también cuenta con un intercambiador de calor, que logra que el biogás salga a 30°C del mismo.
- Un separador ciclónico del tipo Tengbergen C.
- Dos columnas de adsorción rellenas de pellets de óxido de hierro, la cuales poseen una altura total de 8,58 metros y un diámetro de 1,05 m, donde una de las columnas se encuentra en funcionamiento y la otra regenerándose. La regeneración se realiza mediante la inyección de aire y se estimó un funcionamiento total de 458 días de las columnas antes de su recambio.
- Un cogenerador marca TEDOM modelo CENTO T100 el cual brinda una potencia eléctrica de 106 kW y una potencia térmica de 143 kW.
- Un generador eléctrico de la marca CAT, modelo G3516A con una potencia eléctrica 1000 kW.
- Un intercambiador de calor externo de tubos concéntricos o doble tubo, el cual elevará la temperatura de los barros que ingresan al biodigestor de 7,1°C (promedio de las peores condiciones) a 35°C (temperatura óptima de funcionamiento del biodigestor).

Mediante todos estos equipos se logra cumplir los parámetros de entrada del biogás a los sistemas de generación de energía, y elevar la temperatura de los barros antes de su ingreso al biodigestor, mejorando la eficiencia del sistema.

Una vez diseñada la planta, se procedió a realizar un análisis de impacto ambiental mediante una matriz de doble entrada, valorizando los impactos según su importancia siguiendo una adaptación de la metodología propuesta por Vicente Conesa Fernandez-Vitora. El resultado obtenido fue que los posibles impactos negativos más graves se encuentran en el caso de que existan accidentes, tales como fuga, incendio y explosión. Mientras que los potenciales impactos positivos de mayor puntaje están asociados a los aspectos socioeconómicos, ya que la puesta en marcha de la planta, repercute en la economía local y además crea una buena imagen de la empresa, al utilizar residuos como fuente de energía. A partir de dicho análisis, se construye un Plan de Manejo ambiental y además se planteó un conjunto de medidas de seguridad y contingencia en caso de accidentes.

Finalmente, se realiza una estimación de los costos de la planta. En primer lugar, se calculan los costos desde la óptica financiera, donde se pudo conocer el desembolso de dinero necesario para la puesta en marcha de la planta y los gastos asociados a la operación de la misma. Se obtuvo que se necesita aproximadamente \$ 50.195.246 para la instalación de la planta, donde el mayor porcentaje del costo

corresponde a los equipos de generación de energía. Los gastos de operación suman un total de \$ 12.579.812 anuales, donde el mayor porcentaje corresponde a la mano de obra. En segundo lugar, se realiza una estimación de los costos desde la óptica económica, donde se tiene en cuenta, además de los gastos y la depreciación del capital, el costo de oportunidad. Se calcula un costo de tratamiento igual a \$ 24,15 por metro cubico de biogás. Por último, se indica la forma de financiar el proyecto, a través de créditos brindados por el banco BICE, y además los posibles beneficios que se podrían llegar a tener si se implementa este proyecto, tales como ahorro en la factura eléctrica y beneficios fiscales que otorga Argentina por invertir en energías del tipo renovable.

3. INTRODUCCION

DIAGNOSTICO

En las cercanías de la ciudad de Paraná, se encuentra ubicada una industria cervecera que produce, en los meses de mayor consumo, un millón de litros por día de cerveza blanca.

Debido a las características del proceso productivo, se produce un efluente con alto contenido de materia orgánica y sólidos disueltos.

Esta industria, cuenta con una planta de tratamiento de efluentes capaz de tratar 64.400 hl de aguas residuales por día. El efluente, según su origen, se divide en tres corrientes principales: bodega, envasado y cocina.

En dicho establecimiento se logra que las características del efluente cumplan con la ley Provincial 6.260 de Prevención y Control de la Contaminación por parte de las Industrias y el Decreto Reglamentario N° 5.837 M.B.S.C y E., donde el principal parámetro a reducir es la Demanda Química de Oxígeno (DQO).

Para reducir el valor de la DQO y los sólidos disueltos consta de tres tamices, un reactor UASB, dos sedimentadores, un sistema de barros activados y un sistema de cloración. En los sedimentadores, se producen barros con alto grado de contaminación, por lo tanto, la planta cuenta también con un tratamiento de los mismos, donde los principales componentes son un digestor anaerobio y un horno de secado.

El presente proyecto se centra en el aprovechamiento del biogás que se genera en el reactor UASB. Los reactores UASB, son un tipo de biorreactor tubular que operan en régimen continuo y en flujo ascendente. A lo largo del reactor, se encuentra una capa de lodos formada por gránulos de microorganismos encargados de degradar los compuestos orgánicos presentes en el efluente. Debido a la ausencia de oxígeno, como resultado de este proceso, se libera una mezcla de gases comúnmente denominada biogás, que es recolectado en un domo ubicado en la parte superior del reactor.

En dicho reactor se produce un caudal de 4469 m³/día de biogás. Este gas tiene un alto poder calorífico y está compuesto principalmente por metano (CH₄) y dióxido de carbono (CO₂), vapor de agua (H₂O) y otros compuestos trazas, de los que se destaca el sulfuro de hidrogeno (H₂S).

Actualmente, esta mezcla de gases es liberada a la atmosfera sin tratamiento alguno, donde no solo se desperdicia su potencial energético como fuente de energía renovable, sino que además se emiten gases contaminantes. El CO₂ y el CH₄ son gases de efecto invernadero que contribuyen al cambio climático. Mientras que el H₂S liberado, en contacto con el aire, es oxidado a dióxido de azufre (SO₂), uno de los principales causantes de la lluvia ácida.

Como opción de aprovechamiento para este gas, se propone utilizarlo para un sistema de cogeneración de energía. Estos sistemas se basan en aprovechar simultáneamente el calor y la electricidad generada en el proceso, donde el calor podrá utilizarse para obtener la temperatura adecuada en el digestor anaerobio de la planta, mientras que la electricidad generada puede ser inyectada a la red de energía eléctrica.

Los motores de cogeneración, pueden alcanzar un rendimiento energético alrededor del 85% (Gilbert Armengod, 2019). Esto es debido a que este tipo de motores presentan normalmente un rendimiento eléctrico del orden del 35 al 42%. Siendo el restante rendimiento térmico, es decir, entre un 30 y 40%. Siendo el restante rendimiento térmico, es decir, entre un 30 y 40%. Además, el procedimiento es más ecológico, ya que durante la combustión se libera menos CO₂, NO_x y SO_x, que, usando fuentes de energías tradicionales, tales como carbón o petróleo. (Universidad del Atlantico, Universidad Autonoma de Occidente)

Sin embargo, el biogás debe cumplir ciertos requisitos para ser utilizado en la cogeneración de energía, ya que, de no cumplirlos, produce daños en el sistema y reduce la vida útil del mismo. Por lo tanto,

además de la unidad de cogeneración, se debe contar con un sistema de acondicionamiento para el mismo. Los principales parámetros a reducir son el contenido de H₂S y el vapor de agua. La combinación de estos dos gases, puede formar ácido sulfúrico (H₂SO₄), el cual es muy corrosivo para el motor y sus componentes.

ANTECEDENTES

El consumo energético a nivel mundial es uno de los asuntos de mayor importancia. Se espera que la demanda eléctrica de energía siga creciendo rápidamente en el mediano plazo, con un crecimiento anual del 5% en los próximos años. El principal reto en este contexto, es como y a partir de que fuentes suministrar suficiente energía para poder cubrir esta demanda creciente, la cual es principalmente generada en la actualidad por tecnologías térmicas contaminantes. (World Bank Group, 2017)

Las energías de origen fósil, actualmente representan un 86% de la matriz energética primaria. En cuanto a la energía hidráulica (4%) y la nuclear (2%), han desarrollado un crecimiento para la generación de electricidad. En el terreno de las energías renovables, estas aún son incipientes, y no tienen un impacto considerable sobre la oferta total de energía del país. Sin embargo, de a poco adquieren mayor relevancia para la generación de energía eléctrica y con la sanción de la ley 27.191 que fomenta el uso de estas energías, se espera que en los próximos años aumenten su participación en la matriz energética total.

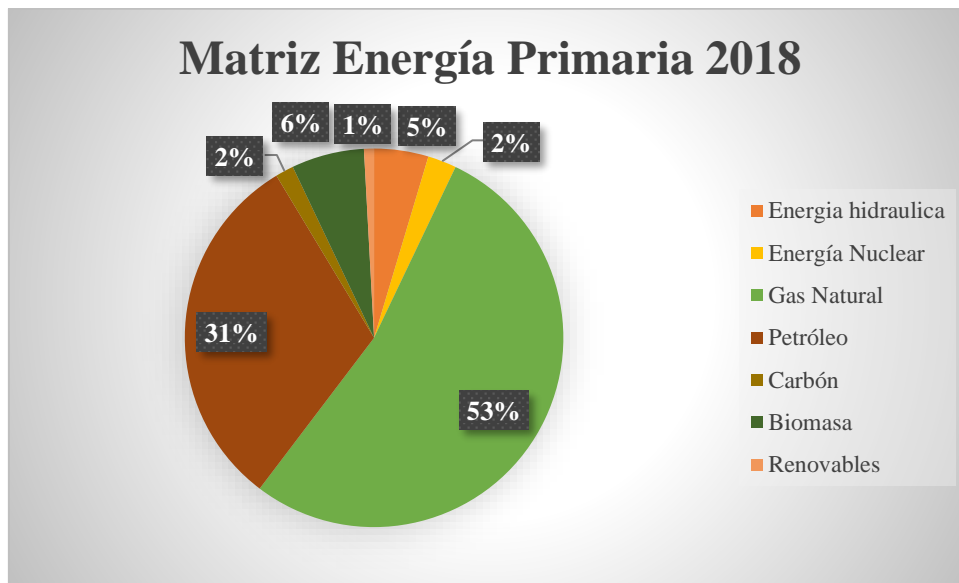


Ilustración 3.1 Matriz Energía Primaria Argentina

(Fuente: <https://www.argentina.gob.ar/produccion/energia/hidrocarburos/balances-energeticos>)

Por su parte, la matriz eléctrica, hace referencia a las energías primarias que se utilizan en la generación de electricidad de un país. En la Argentina, más del 60% de la electricidad se produce en centrales térmicas que funcionan principalmente a gas¹.

Según un informe mensual de junio de 2019 de CAMESA (Compañía Administradora del Mercado Mayorista Eléctrico), un 5,4% de la energía eléctrica generada proviene de fuentes renovables. Las plantas de energía renovable, con base en biomasa, biogás o gas de relleno sanitario en operación comercial al año 2019, incluyendo proyectos GENREN, RENOVAR ronda entre el 1 y 2%.

¹ Fuente:

https://www.argentina.gob.ar/sites/default/files/capacitacion_a_docentes_sobre_uso_responsable_de_la_energia_0.pdf

BIOGAS

La ley 27.191 establece como objetivo, lograr una contribución de las fuentes de energías renovables hasta alcanzar el 8% del consumo de energía eléctrica nacional, al 31 de diciembre de 2025.

En 2015, se lanzó el plan de energías RenoVar. Este programa apunta a la generación de energías renovables para sumarlas a la oferta eléctrica del país, con el objetivo de instalar hasta 10.000 mW hacia el 2025.²

Ese mismo año, el proyecto para la promoción de la energía derivada de la biomasa, a través de una carta de acuerdo con el Instituto Nacional de Tecnología Industrial (INTI), apoyó la finalización de un diagnóstico nacional sobre la situación de la biodigestión anaeróbica en el país, en el que se identificó la existencia de 105 plantas de producción de biogás (FAO, 2019).

En 2019, de dicho total, se realizó un relevamiento de 62 plantas, donde la mayoría se encuentran ubicadas en las provincias de Santa Fe, Buenos Aires y Córdoba. Se encontró, que el 52% de las plantas correspondían al ámbito rural, el 41% al urbano, y solo el 6% a actividades industriales. Sin embargo, un bajo porcentaje de esas instalaciones tenían fines netamente energéticos, la mayoría de las plantas se implementaron para el tratamiento de desechos y efluentes. (FAO, 2019)

A continuación, se destacan algunos ejemplos de plantas de generación de biogás en operación en Argentina (FAO, 2020)

Proyecto Las Camelias:

Las Camelias SA es un frigorífico avícola de Entre Ríos, con capacidad diaria para tratar 3000 m³ de efluente líquido de frigorífico avícola, donde se desarrolló el aprovechamiento del biogás en una caldera y un motogenerador. Este proyecto demandó una inversión de u\$s 300.000. Actualmente genera en el orden de los 3000 m³ de biogás por día, el cual se utiliza 16 horas para alimentar una caldera que produce 4 toneladas de vapor por hora para proceso. El resto se utiliza en un motogenerador de 300 kW instalados.

En cuanto al uso de la energía reportan que no han tenido dificultades con la disponibilidad de la red, ya que en este caso cuentan con una red propia para el autoconsumo de la energía en la planta frigorífica. Pero si han mencionado que registraron varios problemas con el motogenerador CETEC por falta de adecuación específicamente para combustionar biogás.

Proyecto Central Bioelectrica II:

Este proyecto se encuentra localizado en Río Cuarto, Cordoba. Utiliza como recursos para la producción de biogas vinaza, estiércol y silaje de maíz. Actualmente disponen de dos motogeneradores Caterpillar Alemanes de 1,2 MW. Parte del calor de combustión generado se envía a los dos digestores y otra parte es enviado a través de ductos para su aprovechamiento en la destilaría. Se invirtieron aproximadamente, 7 millones de dólares.

En cuanto a su experiencia, las principales barreras que encontraron fueron tecnológicas, siendo lo más complejo elegir el método de desulfuración o desulfuración del biogás. Los desarrolladores indicaron la necesidad de financiamiento, baja de aranceles a la importación de equipos, fomentos impositivos, tarifas más atractivas por la generación con biogás, entre otros.

Proyecto Solamb SRL:

Solamb SRL es una empresa que presta servicios de disposición final de efluentes industriales en la zona de Timbues, Santa Fe. Es un proyecto de cogeneración de energía de 1,5 MW, que utiliza biogás a partir de efluentes industriales diversos.

Durante el desarrollo del proyecto hubo algunos puntos críticos. Estos se dieron en la etapa de diseño, porque fue compleja la caracterización del efluente y la estimación de las cantidades. Luego, en la etapa

² Fuente: <https://www.argentina.gob.ar/economia/energia/energia-electrica/renovables/renovar>

de operación fue crítico conseguir mano de obra especializada y reducir la corrosión por sulfhídrico y humedad.

Esta planta se encuentra en operación, genera biogás y es capaz de autoabastecer el predio donde Solamb realiza sus actividades. Según los desarrolladores de este proyecto, consideran que es necesario mayor control por parte de los organismos de regulación ambiental para que se fomenten este tipo de proyectos.

LA COGENERACIÓN

La cogeneración es una tecnología conocida desde hace décadas con grados de desarrollos muy avanzados y con altas eficiencias de funcionamiento, sin embargo, en América Latina y más precisamente en Argentina no ha tenido un gran desarrollo. En general, el sector industrial de nuestro país tiene una demanda térmica diez veces superior a la eléctrica, por lo cual la cogeneración es una buena alternativa para ayudar a resolver la crisis energética. (Kirschbaum, 2018)

Se han realizado algunos estudios sobre el potencial que ofrece la cogeneración en Argentina. Un estudio hecho por un proyecto llamado “Propuesta de marco legislativo y evaluación técnico-económica para proyectos de cogeneración de carácter demostrativo en la Provincia de Buenos Aires”, estimó un potencial técnico de 580 MW y un potencial técnico-económico (esto es, proyectos con retornos de la inversión inferiores a tres años) de 220 MW, para la provincia de Buenos Aires. Otros proyectos han arrojado como resultados a nivel país que el potencial teórico podría alcanzar unos 3750 MW, lo que significaría unos 2730 GWh/mes de aporte adicional de la cogeneración al sistema centralizado. (Tech4CDM, 2009)

A pesar del importante potencial de cogeneración que tiene Argentina, su desarrollo es muy bajo, y esto se debe a barreras de distintas índoles, como ser:

- Barrera tecnológica: no se conocen datos actualizados del potencial que puede ofrecer las tecnologías de cogeneración en nuestro país. Si bien hay algunos estudios sobre el tema, estos no son actualizados y para realizar inversiones en el mercado es necesario conocer cuál es el potencial, las ventajas técnicas, cual es el ahorro económico y energético, etc.
- Barreras de capacitación: con un mercado poco desarrollado en nuestro país, no es de esperarse que los servicios asociados a las plantas de cogeneración, como ser servicios de ingeniería, de mantenimiento, de instalación, etc., sea de gran calidad. Esto repercute directamente en la confianza del inversor a la hora de decidir el ingreso o no al mercado.
- Barrera regulatoria: el marco regulatorio no es el adecuado para el desarrollo de la cogeneración, ya que, a pesar de estar presente en la actual legislación eléctrica, no ha logrado el desarrollo que se pretende.
- Barrera económica: en este aspecto se considera que los costos de las tarifas eléctricas son bajos con respecto a los altos costos de inversión de una planta de cogeneración, y por ende, los periodos de retorno de la inversión se vuelven largos.

4. ESTUDIOS PRELIMINARES Y ANALISIS DE PROCESOS

Como se mencionó anteriormente, el biogás debido a su composición necesita un acondicionamiento antes de ser utilizado como fuente de energía, debido a que puede causar daño de los equipos utilizados en la planta.

Dependiendo de su origen, el biogás tiene distintas composiciones:

Tabla 4.1 Composición del biogás según origen

Gases	Desechos agrícolas	Lodos cloacales	Desechos industriales	Relleno sanitario	Propiedades
Metano	50 – 80%	50 -80 %	50 – 70%	45 – 65 %	Combustible
Dioxido de carbono	30-50%	20 – 50%	30 – 50 %	34 – 55 %	Ácido, asfixiante
Vapor de agua	saturación	saturación	saturación	saturación	Corrosivo, reduce valor calorífico
Hidrógeno	0 – 2 %	0 – 5 %	0 – 2 %	0 – 1 %	Combustible
Sulfuro de hidrógeno	100 – 700 ppm	0 – 1 %	0 – 8 %	0,5 – 100 ppm	Corrosivo, tóxico, oloroso
Amoniaco	trazas	trazas	trazas	trazas	Corrosivo
Monóxido de carbono	0 – 1 %	0 – 1 %	0 – 1 %	trazas	Tóxico
Nitrógeno	0 – 1 %	0 – 3 %	0 – 1 %	0 – 20 %	Inerte
Oxígeno	0 – 1 %	0 – 1 %	0 – 1 %	0 – 5 %	Corrosivo
Orgánicos	trazas	trazas	trazas	5 ppm (terpenos, ésteres, hidrocarburos)	Corrosivo, oloroso

Fuente: <https://jmirez.wordpress.com/2012/05/15/j473-caracteristicas-del-biogas/>

La concentración de metano, es la que le otorga al biogás un alto poder calorífico. Esta característica es la que lo hace interesante a la hora de producir distintos tipos de energía.

Existen diversas opciones para la utilización del biogás (Moreno, 2011). Las más destacadas son las siguientes:

- Producción de calor o vapor
La obtención de energía térmica corresponde al uso más simple del biogás. Los quemadores de gas convencionales se pueden adaptar fácilmente para operar con biogás, simplemente cambiando la relación aire-gas.
- Generación de electricidad o combinación de calor y electricidad (cogeneración):
Los sistemas combinados de calor y electricidad utilizan la electricidad generada por el combustible y el calor residual que se genera.
Cuando se cogenera energía, se aumenta la eficiencia del proceso en contraste si se utilizara el biogás solo para producir electricidad o calor. El uso de biogás en estos sistemas requiere la remoción de H₂S y el vapor de agua.
- Combustible para vehículos:
Para utilizar el biogás como combustible de vehículos, este debe tener una calidad similar a la del gas natural. El biogás puede ser utilizado en motores de combustión interna tanto a gasolina como diésel. El gas obtenido por fermentación tiene un octanaje que oscila entre 100 y 110 lo cual lo hace muy adecuado para su uso en motores de alta relación volumétrica de compresión, por otro lado, una desventaja es su baja velocidad de encendido.

Dependiendo del uso que tendrá, este debe tener distintos grados de acondicionamiento:

Tabla 4.2 Grado de acondicionamiento del biogás según uso

USO DEL BIOGAS	ELIMINACION DE AGUA	ELIMINACION DE CO ₂	ELIMINACION DE H ₂ S
Caldera de vapor	✓	✗	✗
Motores de generación/cogeneración	✓✓	✗	✓✓
Combustible para vehículos	✓✓	✓✓	✓✓
Inyección a la red de gas natural	✓✓	✓✓	✓✓
* Eliminación no necesaria	✓ Eliminación Recomendable	✓✓ Eliminación necesaria	✓✓ Eliminación necesaria

Fuente: <https://blog.condorchem.com/tratamiento-del-biogas/>

Por lo tanto, en una planta de cogeneración con biogás es necesario reducir el contenido de humedad y la concentración del sulfuro de hidrogeno.

Una planta típica de biogás en la que se generará energía cuenta mínimamente con las siguientes etapas o procesos:

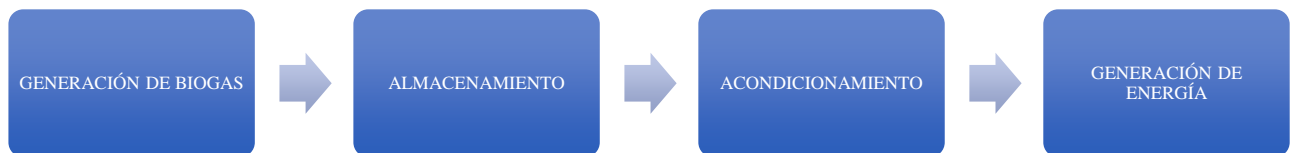


Ilustración 4.1 Etapas típicas de una planta de biogás

Además de estas cuatro etapas, las plantas de biogás deben contar con distintos elementos de seguridad.

ALMACENAMIENTO

El almacenamiento del biogás se realiza en gasómetros. Los gasómetros son dispositivos acumuladores de gases, capaces de equilibrar las fluctuaciones de producción, consumo y los cambios de volumen asociados principalmente a cambios en la temperatura y producción (Quiroz Marchant & De la Cerda, 2016).

Los tanques de almacenamiento de gas deben ser a prueba de fugas, a prueba de presión y resistentes al medio, a la luz ultravioleta, a la temperatura y a la acción del clima.

Se pueden distinguir entre tanques de presión baja, media y alta (Fernandez Perez, 2017):

- Tanques de presión baja: son los más comunes, operan a una presión calibrada de 0,5 a 30 mbar. Los tanques de presión baja están hechos de láminas plásticas que deben cumplir con los requisitos de seguridad. Estos tanques pueden estar instalados como cubiertas de gas en la parte superior de los digestores (tanques de almacenamiento integrado) o como instalaciones externas de almacenamiento.
- Tanques de almacenamiento de presión media y presión alta: almacenan el biogás a presiones operativas entre 5 y 250 bar en contenedores y balones presurizados de acero. Son caros y los costos operativos altos, por lo que prácticamente nunca se usan en plantas pequeñas de biogás.

En el mercado se encuentran disponibles principalmente 3 tipos de gasómetros y son los de cúpula rígida (hormigón o PRFV), de membrana simple y membrana doble, donde las membranas son de EPDM, HDPE y PVC. (De la Cerda & Quiroz Marchant).

ACONDICIONAMIENTO:

Debido a que el biogás se utilizará para cogeneración de energía, se analizarán las distintas tecnologías para eliminar el vapor de agua y el contenido de sulfuro de hidrogeno.

ELIMINACION DE VAPOR DE AGUA

Al salir del reactor UASB, el biogás se encuentra saturado con vapor y la cantidad de agua absoluta depende de la temperatura. Así cuanto menor sea la temperatura, menor será el contenido de agua.

El biogás debe tener una humedad relativa inferior al 60% para prevenir la formación de condensado en las tuberías de transporte, por lo tanto, debe ser secado antes de ser purificado. Este puede secarse por métodos físicos o químicos. La no extracción de estos condensados conlleva a problemas en la red, daños en los equipos e inclusive problemas de seguridad, pudiendo producir tapones hidráulicos aumentando la presión del sistema. (Moreno, 2011)

METODOS DE SECADO FISICO.

Uno de los métodos más sencillos para eliminar el exceso de humedad es mediante condensación. Con este método solo se puede bajar la temperatura hasta 0,5°C por problemas de congelación en las superficies del intercambiador de calor.

Los equipos para separar el agua condensada son:

Trampas de condensados:

En estos dispositivos, la condensación del agua tiene lugar por la expansión del gas, lo cual ocasiona una disminución de la temperatura del mismo, y por consiguiente, la condensación del agua que es recogida y retirada por la parte inferior del dispositivo.

El dimensionamiento de la trampa de humedad se realiza determinando la cantidad de agua condensada en las redes, por lo que se determina por el largo del segmento de red en el cual se capturará su condensado y sedimento. Muchas veces, se instalan varios de estos y se dimensionan de acuerdo a la estimación de su tiempo de llenado. (Quiroz Marchant & De la Cerda, 2016)

Separador ciclónico:

Un separador ciclónico consiste en un cilindro vertical con un fondo cónico, una entrada tangencial cerca de la parte superior y una salida para las gotas y los sedimentos en el fondo del cono.

El gas entra cargado de humedad y recorre un camino en espiral alrededor y hacia abajo del cuerpo cilíndrico del ciclón. La fuerza centrífuga desarrollada en el vértice tiende a desplazar radialmente las partículas hacia la pared, de forma que aquellas que alcanzan la pared deslizan hacia abajo dentro del cono y se recogen. (Chacón Romero, 2015)

Como los ciclones son dispositivos de control bastante estudiados, el diseño de un ciclón se basa normalmente en elegir familia de ciclones que ya tienen proporciones definidas.

Las principales familias de ciclones de entrada tangencial son:

- Ciclones de alta eficiencia
- Ciclones de alta capacidad
- Ciclones convencionales

Los ciclones de alta eficiencia están diseñados para alcanzar mayor remoción de las partículas pequeñas que los ciclones convencionales, llegando a remover hasta un 90% de partículas de 5 μm . Mientras que los ciclones de alta capacidad, están garantizados solamente para remover partículas mayores de 20 μm .

En las siguientes tablas se presenta un resumen de las características de las principales familias de ciclones de entrada tangencial (Petit, Pico, & Barbosa, 2012). El diámetro del ciclón identifica la

dimensión básica de diseño, todas las demás dimensiones simplemente son una proporción del diámetro del ciclón.

Tabla 4.3 Ciclones de alta eficiencia

Dimensión	Relación dimensional	Stairmand HE	Storch 4	Tengbergen C
Diámetro del ciclón	D_c/D_c	1.0	1.0	1.0
Altura de entrada	a/D_c	0.5	1.0	0.3
Ancho de entrada	b/D_c	0.2	0.15	0.3
Altura de salida	S/D_c	0.5	0.68	0.43
Diámetro de salida	D_s/D_c	0.5	0.45	0.33
Altura de la parte cilíndrica	h/D_c	1.5	3.5	0.55
Altura de la parte cónica	z/D_c	2.5	2.7	2.2
Altura total del ciclón	H/D_c	4.0	6.2	2.75
Diámetro de salida de polvo	B/D_c	0.375	0.35	0.33
Factor de configuración	G	551.22	229.64	533.12
Número de cabezas de velocidad	NH	6.4	11.8	13.2
Número de vórtices	N	5.5	4.85	5.5

Tabla 4.4 Ciclones convencionales

Dimensión	Relación dimensional	Lapple	Vibco	Muschelknautz D
Diámetro del ciclón	D_c/D_c	1.0	1.0	1.0
Altura de entrada	a/D_c	0.5	0.4	0.5
Ancho de entrada	b/D_c	0.25	0.31	0.15
Altura de salida	S/D_c	0.625	0.433	0.9
Diámetro de salida	D_s/D_c	0.5	0.4	0.33
Altura de la parte cilíndrica	h/D_c	2.0	0.8	0.73
Altura de la parte cónica	z/D_c	2.0	1.72	1.68
Altura total del ciclón	H/D_c	4.0	2.5	2.4
Diámetro de salida de polvo	B/D_c	0.25	0.23	0.55
Factor de configuración	G	402.88	237.99	1060.03
Número de cabezas de velocidad	NH	8.0	12.4	11.0
Número de vórtices	N	6.0	4.1	3.12

Tabla 4.5 Ciclones de alta capacidad

Dimensión	Relación dimensional	Stairmand HF	Tengbergen B
Diámetro del ciclón	D_c/D_c	1.0	1.0
Altura de entrada	a/D_c	0.75	0.85
Ancho de entrada	b/D_c	0.375	0.27
Altura de salida	S/D_c	0.875	1.06
Diámetro de salida	D_s/D_c	0.75	0.53
Altura de la parte cilíndrica	h/D_c	1.5	1.54
Altura de la parte cónica	z/D_c	2.5	1.35
Altura total del ciclón	H/D_c	4.0	2.9
Diámetro de salida de polvo	B/D_c	0.375	0.53
Factor de configuración	G	29.79	101.23
Número de cabezas de velocidad	NH	8.0	13.1
Número de vórtices	N	3.7	2.62

MÉTODOS DE SECADO QUÍMICO:

Adsorción en sílice gel o alúmina:

El biogás es presurizado antes de ser introducido en las columnas de relleno. Normalmente se emplean dos columnas en paralelo, uno adsorbe mientras la otra se regenera. En la regeneración se evapora el agua mediante descompresión y calentamiento. Un porcentaje del biogás seco se envía a la columna y se recicla a un compresor. A presión atmosférica se puede conseguir un punto de rocío de -10°C a -20°C . (Fernandez Prad, 2014)

Absorción en sales higroscópicas:

La sal se disuelve a medida que absorbe agua del biogás. La solución de sal saturada se retira de la columna y se renueva por nuevos gránulos de sal.

ELIMINACIÓN DE PARTÍCULAS SÓLIDAS:

Es necesario disminuir el contenido de partículas sólidas del biogás antes del sistema de tratamiento y de cogeneración de energía, ya que estas pueden disminuir la eficiencia de los equipos de purificación y dañar los motores de generación de energía.

Las partículas se pueden eliminar de diferentes maneras:

- Haciéndolas pasar por una malla de acero inoxidable. Este es un método que requiere gran mantenimiento debido a la obstrucción de la malla.
- Ciclones, capaces de eliminar partículas de hasta 5 micras.
- Filtros de grava o cerámica

ELIMINACIÓN DE SULFURO DE HIDROGENO:

El sulfuro de hidrogeno (H_2S) es un gas extremadamente toxico e irritante y es el compuesto que le da el olor característico a huevo podrido al biogás.

Cuando el biogás es utilizado en compuestos tales como generadores eléctricos, turbinas y otros, el H_2S puede causar daños internos. En el caso de los generadores eléctricos, la presencia del h_2s disminuye la vida útil de todos los equipos que intervienen en la producción, transferencia y suministro de energía, produciendo la corrosión de los mismos. (Ortega Viera, Rodriguez Muñoz, Fernandez Santana, & Barcenaz Perez, 2015)

Procesos de Absorción

Absorción con agua:

El absorbente utilizado en este caso es el agua. Esta se pone en contacto con el biogás a purificar en torres o columnas de relleno o de platos, donde se efectúa la transferencia de masa del SH_2 al agua que fluye en contracorriente.

En estos sistemas se regenera el agua cargada de H_2S . Esto se realiza utilizando una columna, donde de forma instantánea, el H_2S pasa al aire circundante, reincorporando el agua al proceso de absorción.

Es un proceso sencillo donde se pueden alcanzar eficiencias de remoción superiores al 99,5% del H_2S . (Morero, Purificación de biogas con tecnologías de producción limpias, 2014). Sin embargo se necesita mucha cantidad de agua, por lo que se consume mucha potencia para la recirculación de la misma.

Este sistema de remoción es no selectivo, ya que se elimina junto con el h_2s , el dióxido de carbono que contiene el biogás.

Absorción química:

La absorción química implica la formación de enlaces químicos reversibles entre el soluto y el solvente. La regeneración del solvente, comprende la ruptura de esos enlaces y la correspondiente entrada, relativamente alta, de energía. (Morero, Purificación de biogas con tecnologías de producción limpias, 2014)

Uno de los químicos utilizados es el hidróxido de sodio ($NaOH$), el cual eleva mucho más la absorción que si se utiliza solo agua, pero tiene la desventaja de que se forman sulfuro de sodio o hidrosulfuro de sodio, que no se regeneran y producen problemas de disposición final. Este método es rentable solo cuando se tratan pequeñas cantidades de H_2S .

Otro tipo de absorción química es la que utiliza aminas, siendo la MDEA (metildietanolamina) la que es capaz de absorber selectivamente el H_2S bajo condiciones de operación apropiadas con bajos tiempos de contacto. Las aminas tienen al menos un grupo hidroxilo y un grupo amino. El grupo hidroxilo es el que sirve para reducir la presión de vapor y aumentar la solubilidad en agua, mientras que el grupo

amino proporciona la alcalinidad necesaria en las soluciones acuosas para producir la absorción de los gases ácidos. La desventaja de utilizar aminas como solvente, es que consumen gran cantidad de energía en la regeneración del solvente y que generan grandes problemas de corrosión en los equipos.

Adsorción en óxidos de hierro.

La adsorción química se puede llevar a cabo utilizando pellets de óxido de hierro como adsorbente. El H₂S contenido en el biogás fluye a través de una columna que contiene el óxido de hierro reaccionando con este y formando sulfuro de hierro. Cuando los pellets se cubren completamente con sulfuro son regenerados. Este es un método simple, aunque en la regeneración se libera mucho calor.

La reactivación de los lechos se lleva a cabo con aire que convierte el sulfuro de hierro formado a óxido de hierro y sulfuro elemental. Por lo tanto, el sistema debe contar con dos columnas, una en funcionamiento y la otra en regeneración.

En estas columnas el contenido de humedad debe ser estrictamente controlado, ya que reducen la eficacia de los pellets. (Morero, Purificación de biogás con tecnologías de producción limpias, 2014)

Separación por membranas:

El principio de esta técnica es que algunos componentes del biogás pueden ser transportados a través de una membrana delgada (menor a 1 mm) mientras que otros son retenidos. El transporte de cada componente se debe a la diferencia de presión parcial sobre la membrana y depende ampliamente de la permeabilidad del componente en la membrana. (Morero, Gropelli, & Campanella, Revisión de las principales tecnologías de purificación de biogás, 2010)

Procesos biológicos:

Un tratamiento biológico del biogás consiste en términos generales en un proceso en el cual los gases contaminados son tratados al hacerlos entrar en contacto con un medio biológicamente activo.

El ácido sulfhídrico es oxidado por bacterias sulfoxidantes, produciendo compuestos de fácil oxidación.

Los diseños de biorreactores más utilizados son, los biofiltros de lecho escurrido, los biolavadores y los biofiltros de lecho fijo (Marin, 2011). El funcionamiento entre ellos es muy similar. El gas a tratar es inyectado al biorreactor donde los contaminantes gaseosos son transferidos a una fase líquida o sobre un soporte. Dentro del biorreactor, los microorganismos convierten contaminantes en compuestos menos tóxicos, los que se sitúan en el material de soporte, donde se forma la biopelícula. Estos microorganismos pueden encontrarse inmovilizados o dispersos y el estado de la fase acuosa puede ser móvil o estacionaria.

Biofiltros de lecho fijo:

Los biofiltros de lecho fijo tienen como principal característica la ausencia de una fase líquida o móvil, por lo tanto, es una tecnología en donde los microorganismos se encuentran fijados a un medio poroso (lecho) con el fin de degradar contaminantes presentes en las corrientes de aire. Estos microorganismos crecen, formando una biopelícula adherida a la superficie del medio. Cuando la corriente de aire contaminado pasa a través del lecho, la biomasa activa utiliza los contaminantes presentes en el gas como fuente de nutrientes y/o energía, degradándolos.

BIOLAVADORES:

Es una tecnología diseñada en dos etapas. En la primera el contaminante a extraer es absorbido con agua en una torre de aspersión o columna. En la segunda, la corriente líquida es tratada en un reactor biológico, de regeneración.

BIOFILTRO DE LECHO ESCURRIDO:

Esta tecnología consiste en un biofiltro empaquetado con un soporte sintético, y en este es donde se forma la película microbiana. La corriente de gas contaminado es inyectada en la parte inferior del biorreactor y atraviesa el lecho, al mismo tiempo por la parte superior se añade una solución recirculada encargada de aportar nutrientes, humedad, pH y eliminar productos de degradación.

GENERACION DE ELECTRICIDAD Y CALOR:

La generación de electricidad no es un proceso eficiente en las plantas tradicionales; en general solo se convierte una tercera parte de la energía potencial del combustible, y gran parte del subproducto de la generación de electricidad en las plantas eléctricas convencionales es el calor, que es liberado a la atmosfera circundante³. Este calor, no solo es energía perdida, sino que contribuye con la contaminación y el calentamiento global.

El uso de sistemas combinados de calefacción y suministro eléctrico (CHP), que permiten generar electricidad y energía térmica usando un único sistema integrado, constituyen una importante alternativa de futuro para el suministro eléctrico doméstico. Al utilizar el calor residual, los sistemas integrados CHP presentan una eficiencia cercana al 85%. (Castillo Figueroa, 2011)

FUNCIONAMIENTO DEL MOTOR

El funcionamiento del motor se puede explicar a través del ciclo de otto. El ciclo de otto se basa en el movimiento alternativo (de subida y bajada) del pistón en el interior del cilindro. El ciclo es abierto, pues la mezcla de combustible gas-aire se renueva en cada tiempo o fase de admisión. El ciclo completo consta de 4 tiempos, dos de subida de pistón y do de bajada. (Fraile, 2008)

Tiempo 1, admisión: el pistón se encuentra en el PMS (punto muerto superior). La válvula de admisión se abre y entra una mezcla de gas y aire en el cilindro. Cuando el pistón llega al PMI (punto muerto inferior) la válvula de admisión se cierra.

Tiempo 2, compresión: el pistón, en su subida desde el punto muerto inferior hasta el punto muerto superior comprime la mezcla. Las válvulas de admisión y escape están cerradas. Un poco antes de llegar a la parte más alta se produce el encendido de bujía y la mezcla deflagra. Estas dos etapas son consumidoras de energía, ya que hasta ahora no se ha generado ningún trabajo.

Tiempo 3, expansión: los gases producidos en la explosión se expansionan, lanzando el pistón hacia abajo. Las válvulas de admisión y escape siguen cerradas. De los cuatro tiempos, este es el único en el que se desarrolla trabajo, los otros tres son consumidores de energía mecánica. El pistón llega finalmente al PMI

Tiempo 4: al alcanzar el PMI, la válvula de escape se abre y libera los gases quemados y producidos en la combustión. Al llegar al PMS, esta válvula se cierra y se abre nuevamente la de admisión, comenzando un nuevo ciclo.

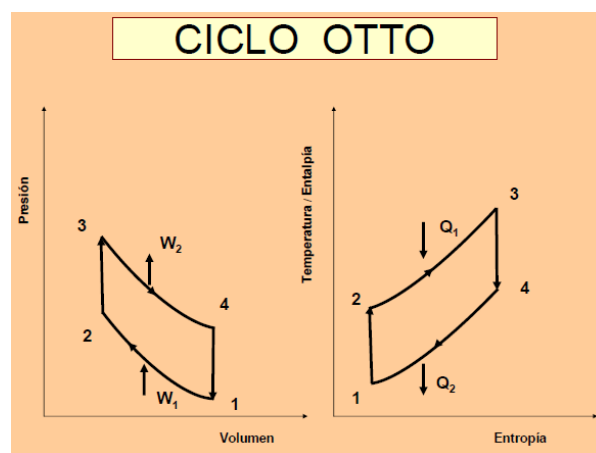


Ilustración 4.2 Ciclo de OTTO

Fuente: <https://www.eoi.es/es/savia/publicaciones/20203/cogeneracion-aspectos-tecnologicos>

Desde el punto de vista termodinámico, el ciclo se compone de la presión isotrópica (1-2), en la que se consume trabajo, la explosión isocora (2-3) en la que se verifica la aportación de calor, la expansión

³ Fuente: <http://bibing.us.es/proyectos/abreproy/70549/fichero/Capitulo+3.pdf>

isentrópica (3-4), durante la cual se produce trabajo útil, y por último, la isocora de escape (4-1), durante la cual se produce la cesión de calor.

Si además conectamos el motor a un alternador, este trabajo mecánico puede convertirse en energía eléctrica. A su vez, durante el proceso se desprende gran parte de la energía primaria en forma de calor, la cual puede ser recuperada a través de un sistema de refrigeración y del recuperador de calor de los gases de escape.

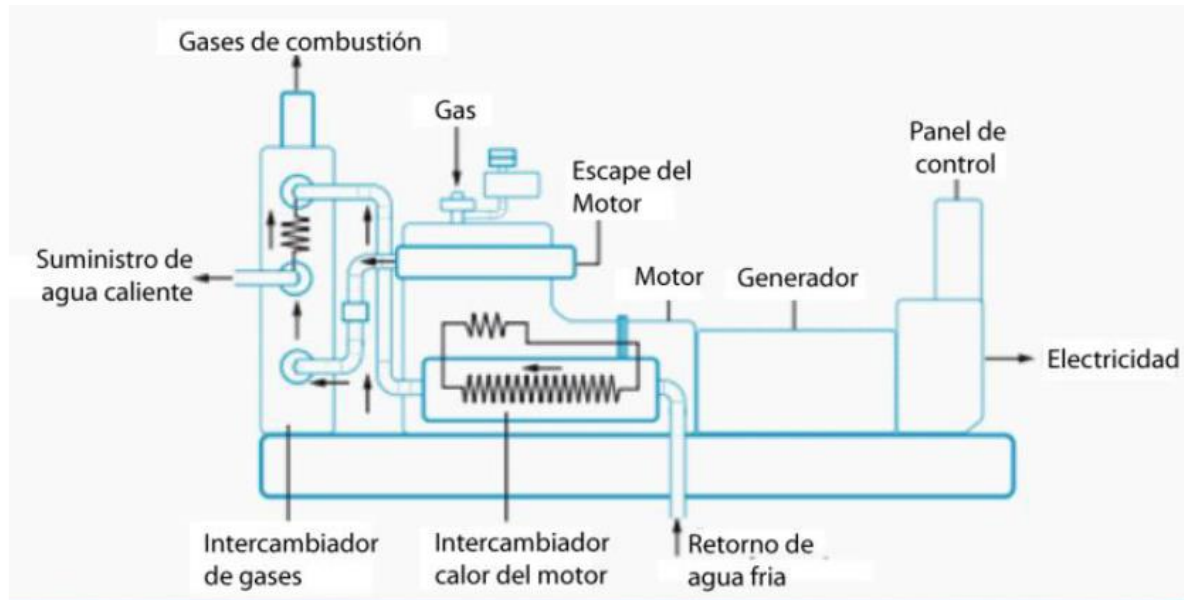


Ilustración 4.3 Esquema de un sistema de cogeneración de energía

Fuente: <http://bibing.us.es/proyectos/abreproy/70549/fichero/Capitulo+3.pdf>

ELEMENTOS DE SEGURIDAD:

Ante la posibilidad de que algunos de los sistemas fallen, se debe aprovisionar la planta con algunos sistemas de seguridad.

ANTORCHA DE SEGURIDAD:

La antorcha corresponde al principal elemento de seguridad y protección del medio ambiente. Las antorchas cumplen la función de combustionar el gas de forma segura y controlable en situaciones de emergencia, evitando su emisión directa a la atmósfera. Adicionalmente, se utilizan para eliminar los excedentes de gas y las puntas producidas en caso de parada de quemadores o motores. Para seleccionarla se debe conocer el caudal máximo de biogás que se puede producir. (Quiroz Marchant & De la Cerda, 2016)

Existen dos tipos, abiertas y cerradas. Su diferencia principal es que, en las abiertas, el biogás combustiona con una llama visible, mientras que en las cerradas con llama ocultas.

Ventajas	Desventajas
Abiertas	
<ul style="list-style-type: none"> - Son más económicas. - La flama es visible, lo que permite un control visual a distancia 	<ul style="list-style-type: none"> - La flama al ser visible, genera impacto en la población
Cerradas	
<ul style="list-style-type: none"> - Son más seguras - Mantenición más fácil (el quemador puede estar al nivel del piso) 	<ul style="list-style-type: none"> - Tienen un costo más elevado - La llama no es visible para el operador

Ilustración 4.4 Comparación de los diferentes tipos de antorchas

5. ANALISIS DE ALTERNATIVAS Y ELECCIÓN DE LA MÁS CONVENIENTE

INTRODUCCIÓN

Para la selección de la alternativa de solución más conveniente se utilizará el método Analytic Hierarchy Process (AHP), propuesto por Thomas Saaty. Este es un método cuantitativo para la toma de decisiones multicriterio que permite generar escalas de prioridad basándose en juicios expertos manifestados a través de comparaciones por pares mediante una escala de preferencia. Esta escala permite incorporar en un modelo de decisión juicios sobre intangibles, representando la dominancia o preferencia de una alternativa frente a otra en relación con un atributo.

Según Saaty, el proceso de decisión con AHP se puede descomponer en los siguientes 4 pasos:

A continuación, se definen los elementos que componen un problema de decisión:

- Criterios de decisión ($C = C_1, C_2, \dots, C_n$): condiciones o parámetros que permiten discriminar alternativas y establecer preferencias del decisor.
- Pesos ($w = w_1, w_2, \dots, w_n$): los pesos o ponderaciones son las medidas de la importancia relativa que los criterios tienen para el decisor.
- Alternativas: las alternativas son los diferentes enfoques para la resolución del problema.

Para realizar las comparaciones es preciso una escala de números que indique en cuantas magnitudes es preferible un elemento (criterio o alternativa) sobre otro con relación a la propiedad respecto a la cual se lo analiza (Saaty, 2008). A continuación se detalla la escala:

Tabla 5.1 Escala de preferencia

Escala	Explicación
1	Igualmente preferible
2	Entre igualmente y moderadamente preferible
3	Moderadamente preferible
4	Entre moderadamente preferible y fuertemente preferible
5	Fuertemente preferible
6	Entre fuertemente preferible y muy fuertemente preferible
7	Muy fuertemente preferible
8	Entre muy fuertemente preferible y extremadamente preferible
9	Extremadamente preferible

Fuente: Saaty, y Vargas, 2012

DEFINICIÓN DEL PROBLEMA

De acuerdo a lo descripto en capítulos anteriores, para el aprovechamiento del biogás como combustible para generar energía eléctrica y térmica, es necesario contar con un sistema de acondicionamiento que conste de las siguientes etapas:

- 1) Gasómetro
- 2) Antorcha
- 3) Acondicionamiento del biogás
- 4) Generación de energía

Debido a que el principal problema es el contenido de sulfuro de hidrogeno, se proponen dos alternativas para reducirlo hasta los valores recomendados por los proveedores de motores de cogeneración. Para cada alternativa se hará un análisis de la viabilidad técnica, económica, ambiental y financiera y se adoptará la más conveniente.

Se proponen dos alternativas de solución:

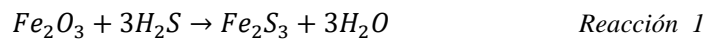
- 1) Adsorción química del sulfuro de hidrogeno mediante una columna rellena de pellets de óxido de hierro
- 2) Absorción física con agua del sulfuro de hidrogeno mediante una columna rellena.

Ambas alternativas deben ser capaces de reducir en un 93,55% el h2s previo a su entrada a los motores.

DESCRIPCIÓN DE ALTERNATIVAS

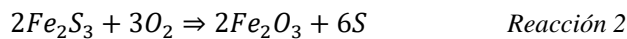
ALTERNATIVA NÚMERO 1: Desulfuración del biogás mediante un sistema de adsorción con óxidos de hierro

La desulfuración del biogás se efectúa haciendo pasar el biogás, por una columna previamente cargada con reactivos a base de compuestos férricos, en forma de materiales solidos granulados de gran superficie específica. El gas ingresa a la columna por la parte superior, generando una zona de reacción que va desplazándose hacia abajo a medida que el reactivo se va agotando, y sale por la parte inferior. El sulfuro de hidrogeno presente en el biogás es removido por reacción con el óxido de hierro:



La reacción química resulta en la formación de sulfuro férrico y agua. Una vez que los pellets se cubren completamente con sulfuro, el material puede ser regenerado, lo que obliga a trabajar con dos columnas en paralelo, una en funcionamiento y la otra en regeneración.

El lecho de óxidos de hierro se regenera a través de una reacción con oxígeno atmosférico con el sulfuro férrico generando óxido de hierro nuevamente y además sulfuro elemental:



El proceso de regeneración es altamente exotérmico, por lo que el aire debe introducirse lentamente para que se pueda disipar el calor de reacción controlando continuamente la temperatura. Si se introduce rápidamente, se corre el riesgo de que el lecho pueda sufrir auto ignición. Debido a que parte del azufre elemental producido se acumulará en el lecho, después de 2 o 3 regeneraciones será necesario reemplazar el medio ya que se genera una disminución de la reactividad del lecho.

Condiciones de operación:

La columna de adsorción funciona en condiciones de presión y temperatura atmosféricas. La mayor complicación se da en la regeneración de los pellets, ya que la reacción de regeneración es altamente exotérmica. Se debe monitorear constantemente la temperatura, disminuyendo el caudal de aire que ingresa a la columna en caso de que la temperatura se eleve por encima de los 60°C (datos aportados por proveedores).

Cantidad de Óxidos de Hierro:

La cantidad de óxido de hierro es uno de los parámetros más importante ya que constituye uno de los principales costos en la operación: no solo por su renovación una vez agotados, sino también por su disposición final, ya que son considerados residuos peligrosos (Anexo II, ley Nacional 24.051).

A partir de datos enviados por una empresa china que se dedica a la producción de este material, se realiza una estimación de la cantidad necesaria:

Tabla 5.2 Datos de entrada y parámetros de funcionamiento del sistema

Caudal de biogás	4468,84 m ³ /día
Contenido de H₂S a la entrada	3100 ppm _v
Contenido de H₂S a la salida	200 ppm _v
Peso molecular del H₂S	34,10 g/mol
Tiempo de funcionamiento de la columna antes de la primera regeneración	90 días
Contenido de Fe₂O₃ de las pellets	45 % P/P
Temperatura de operación	Ambiente

Presión de operación	Atmosférica
Contenido de humedad del gas al ingreso	<20%

La cantidad de óxido de hierro necesario, se estima a través de la siguiente ecuación:

$$Masa_{pellets} = Q_{Fe_2O_3} * 90 \text{ días} * \frac{1}{0,45}$$

Donde el caudal de óxido de hierro se conoce por estequiometria, teniendo en cuenta la reacción 1:

$$Q_{Fe_2O_3} = Q_{H_2S} * \frac{PM_{Fe_2O_3}}{PM_{H_2S}} * \frac{1 \text{ mol } Fe_2O_3}{3 \text{ mol } H_2S}$$

Donde:

$Q_{Fe_2O_3}$ es el caudal de óxido de hierro en g/hora

$PM_{Fe_2O_3}$ es el peso molecular del óxido de hierro en g/mol = 159,69 g/mol

PM_{H_2S} es el peso molecular del sulfuro de hidrógeno en g/mol = 34,1 g/mol

Q_{H_2S} es el caudal de H_2S a eliminar en la torre en m³/hora

El caudal de H_2S a eliminar se obtiene multiplicando el caudal de biogás por la diferencia entre la concentración de H_2S entre la entrada a la torre y la salida, dando como resultado un valor de 741,10 g H_2S /hora

Reemplazando:

$$\begin{aligned} Q_{Fe_2O_3} &= (741,10 \text{ g } H_2S/hora) * \frac{159,69 \text{ g } Fe_2O_3/mol \text{ } Fe_2O_3}{\frac{34,1 \text{ g } H_2S}{molH_2S}} * \frac{1 \text{ mol } Fe_2O_3}{3 \text{ mol } H_2S} \\ &= 1156,86 \text{ g } Fe_2O_3/hora \\ Masa_{pellets} &= \frac{1156,86 \text{ } Fe_2O_3}{hora} * 90 \text{ días} * \frac{24 \text{ horas}}{1 \text{ día}} * \frac{1 \text{ kg}}{1000 \text{ g}} * \frac{1 \text{ g pellets}}{0,45 \text{ g } Fe_2O_3} \\ &= 5552,94 \text{ kg } Fe_2O_3 \end{aligned}$$

Teniendo en cuenta que se utilizan dos torres, se necesitaran en total 11.105,88 kg de Óxidos de Hierro.

Para un buen funcionamiento de este material, antes de la misma se colocará un chiller y un separador ciclónico, que se encargarán de eliminar el contenido de humedad y las partículas sólidas presente en la corriente gaseosa.

Eficiencia de remoción:

Este tratamiento tiene una eficiencia de remoción superior al 99.98% y es altamente selectivo, por lo que no se eliminaran cantidades apreciables de dióxido de carbono y metano (Morero, Purificación de biogás con tecnologías de producción limpias, 2014)

Costos:

Los principales costos de inversión en este sistema incluyen los pellets de óxido de hierro y las columnas. En cuanto a la operación, los costos se dan en el recambio de los pellets, el tratamiento de estos una vez agotados y el sistema de impulsión del biogás.

Según la bibliografía (Okoro & Sun, 2019), se estima que con este sistema en promedio se tiene un costo de inversión de u\$s 1,20 por metro cubico de biogás a tratar, y un costo de operación de u\$s 0,012 por metro cúbico de biogás.

Impactos en el ambiente:

Las esponjas de hierro son el principal elemento de este sistema. Si se observa todo su ciclo de vida (desde su producción hasta que se convierte en residuo) se encuentra que, para su obtención, las plantas productoras producen grandes emisiones, que contienen SO₂, NO_x, CO₂, HF, HCl, As, Pb, Cd, Cu, Hg, Ti y Zn. Además, este tipo de industria se encuentra entre las industrias cuyos alrededores se dan las mayores tasas de inmisión de metales pesados en el aire.⁴

Durante la fase operativa, el posible impacto a tener en cuenta es con respecto la generación de residuos. Las esponjas una vez agotadas son consideradas un residuo peligroso ya que son inflamables.

ALTERNATIVA NUMERO 2: Desulfuración mediante absorción física con agua en una columna rellena:

La absorción es la operación unitaria en la que se eliminan uno o más componentes de una corriente de gas al ser tomados por un líquido no volátil (solvente).

En este caso, se eliminará el sulfuro de hidrogeno contenido en el biogás mediante absorción física en una columna rellena utilizando agua como solvente. Para el ingreso a la columna, el biogás crudo debe ser comprimido y alimentado a la columna en forma ascendente mientras que el agua presurizada es rociada desde la parte superior, permitiendo el contacto agua-biogás en contracorriente. Dentro de la columna, se instala un material de relleno que permita que exista una gran superficie de contacto entre el agua y el biogás.

Debido a que en estos procesos generalmente se utilizan grandes cantidades de agua, el proceso completo consiste en un sistema de absorción-desorción, necesitando la instalación de dos columnas. Una vez que se absorbe el sulfuro de hidrogeno en el agua, el agua contaminada pasa a la columna de desorción, donde se da la operación inversa: el sulfuro de hidrogeno se transfiere a la fase gaseosa mediante el contacto del agua con aire. Finalmente, el agua tratada se recircula a la columna de absorción donde se inicia nuevamente le proceso.

En esta alternativa, el separador ciclónico y el chiller se encontrará a la salida de la columna, con el fin de eliminar condensados y partículas sólidas que puedan escapar de la torre.

Operación del sistema de tratamiento:

Este sistema requiere de grandes presiones para lograr una correcta absorción del sulfuro de hidrogeno. Dependiendo del grado de remoción que se necesita, se puede optar por un lavado suave o un lavado fuerte. El lavado suave opera a 6 bares mientras que el lavado fuerte a 9 bares. (Villa Briongos, 2015).

En cuanto a la temperatura, se puede trabajar a temperatura ambiente, pero se logra una mayor absorción cuanto más baja es la temperatura del gas.

Eficiencia de remoción:

En este sistema, el H₂S y parte del CO₂ se disuelven en agua y salen por el fondo de la torre, mientras que el biogás rico en metano sale por la parte superior. Este sistema posee una eficiencia de remoción de 99,50%. (Morero, Purificación de biogás con tecnologías de producción limpias, 2014)

Material de relleno:

El relleno de la columna es el encargado de proporcionar la superficie de contacto entre el biogás y el agua. Existen tres tipos de rellenos en el mercado: el empaque estructurado, el empaque colocado y el empaque aleatorio. El más común y el más utilizado en este tipo de proyectos es el empaque aleatorio, debido a su bajo precio y a su fácil mantenimiento.

⁴ Fuente: <http://www.nzdl.org/cgi-bin/library?e=d-00000-00---off-0envl--00-0---0-10-0---0---0direct-10---4-----0-11--11-en-50---20-about---00-0-1-00-0--4---0-0-11-10-OutfZz-8-10&cl=CL1.8&d=HASH9bb031552b0155082aaffa.4.6.3>=1>

Cantidad de solvente:

Debido a que se realiza una absorción física, el solvente en este caso es agua. El caudal de agua a utilizar en este sistema es uno de los parámetros más importantes, ya que influye en los costos del sistema.

A través de un balance de materia, se puede conocer la cantidad de agua a utilizar:

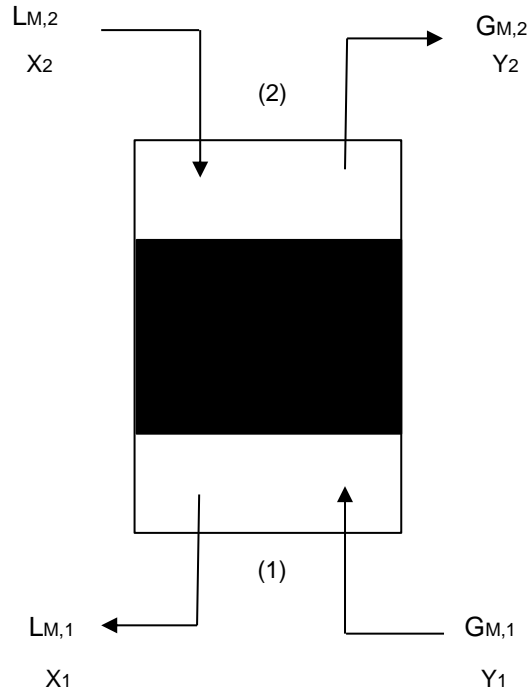


Ilustración 5.1 Balance de materia, columna de absorción

Donde:

$G_{M,1}, G_{M,2}$ son los caudales molares del gas

$L_{M,1}, L_{M,2}$ son los caudales molares del líquido

y_1 es la concentración del H_2S en la corriente líquida de salida

y_2 es la concentración de H_2S en la corriente líquida de entrada

x_1 es la concentración de H_2S en la corriente gaseosa de entrada

x_2 es la concentración de H_2S en la corriente gaseosa de salida

Realizando el balance para la entrada y la salida de la torre se tiene:

$$0 = G_{M,1}y_1 + L_{M,2}x_2 - G_{M,2}y_2 - L_{M,1}x_1 \quad (1)$$

$$G_{M,1}y_1 + L_{M,2}x_2 = G_{M,2}y_2 + L_{M,1}x_1 \quad (2)$$

Teniendo en cuenta que los caudales de gas y líquido se mantienen a lo largo del equipo se pueden definir los siguientes caudales:

$$G_{M,S} = G_{M,1}(1 - y_1) = G_{M,2}(1 - y_2) \quad (3)$$

$$L_{M,S} = L_{M,1}(1 - x_1) = L_{M,2}(1 - x_2) \quad (4)$$

Entonces:

$$G_{M,1} = \frac{G_{M,S}}{(1 - y_1)} \quad (5)$$

$$G_{M,2} = \frac{G_{M,S}}{(1 - y_2)} \quad (6)$$

$$L_{M,1} = \frac{L_{M,S}}{(1 - x_1)} \quad (7)$$

$$L_{M,2} = \frac{L_{M,S}}{(1 - x_2)} \quad (8)$$

Reemplazando las 4 últimas ecuaciones en la ecuación (2):

$$\frac{G_{M,S}}{(1 - y_1)} y_1 + \frac{L_{M,S}}{(1 - x_2)} x_2 = \frac{G_{M,S}}{(1 - y_2)} y_2 + \frac{L_{M,S}}{(1 - x_1)} x_1 \quad (9)$$

$$\frac{y_1}{(1 - y_1)} G_{M,S} + \frac{x_2}{(1 - x_2)} L_{M,S} = \frac{y_2}{(1 - y_2)} G_{M,S} + \frac{x_1}{(1 - x_1)} L_{M,S} \quad (10)$$

$$Y_1 G_{M,S} + X_2 L_{M,S} = Y_2 G_{M,S} + X_1 L_{M,S} \quad (11)$$

$$Y_i = \frac{y_i}{1 - y_i} \Rightarrow \text{Cociente molar gaseoso}$$

$$X_i = \frac{x_i}{1 - x_i} \Rightarrow \text{Cociente molar líquido}$$

Para el cálculo de los cocientes molares se utilizan los siguientes datos:

Tabla 5.3 Datos para el cálculo de los cocientes molares

Parámetro	Valor	Unidades
H ₂ S contenido en el biogás	0,31	[% V/V]
CH ₄ contenido en el biogás	65	[% V/V]
CO ₂ contenido en el biogás	34	[% V/V]
Temperatura de operación	30	[°C]
Densidad del H ₂ S*	34,1	[kg/m ³]
Densidad del CO ₂ *	1,842	[kg/m ³]
Densidad del CH ₄ *	0,668	[kg/m ³]
Constante de Henry*	515	[atm]

*Datos obtenidos de textos brindados por la cátedra de Procesos Físico químicos en Ingeniería Ambiental, FICH-UNL.

$$n_x = \frac{C_x * \rho_x}{PM_x}$$

Siendo

C_x la concentración del compuesto

ρ_x la densidad del compuesto

PM_x el peso molecular del compuesto

n_x el número de moles por metro cubico de biogás

Aplicando la ecuación para cada gas, se obtiene:

Tabla 5.4 Cocientes molares de entrada

Compuesto	Valor	Unidades
H ₂ S	0,130	[moles/m ³]
CO ₂	12,56	[moles/m ³]
CH ₄	27,07	[moles/m ³]
Moles totales	41,43	[moles/m³]

Con estos valores, se procede al cálculo de cada fracción molar:

- Cálculo de Y_1 :

$$Y_1 = \frac{0,130 \frac{\text{moles } H_2S}{m^3 \text{ biogás}}}{41,43 \frac{\text{moles totales}}{m^3 \text{ biogás}}} = 0,00315$$

$$1 - \frac{0,130 \frac{\text{moles } H_2S}{m^3 \text{ biogás}}}{41,43 \frac{\text{moles totales}}{m^3 \text{ biogás}}}$$

- Cálculo de Y_2 :

La concentración a la salida de la torre de absorción debe ser de 200 ppm, por lo tanto, se necesita una eficiencia de eliminación de H₂S de 94,55%

$$Y_2 = 0,00315 * (1 - 0,9455) = 0,0002036$$

- Cálculo de X_2 :

Se parte del supuesto de que no hay presencia de H₂S en la corriente líquida de entrada, por lo tanto:

$$X_2 = 0$$

- Cálculo de X_1 :

Como se supone que la solución es diluida, se aplica la ley de Henry.

$$Y_1 = \frac{H}{P_T} * X_1 \tag{12}$$

Donde

H es la constante de Henry

P_T es la presión de trabajo de la torre

$$0,00315 = \frac{515 \text{ atm}}{8,88 \text{ atm}} * x_1$$

Despejando:

$$X_1 = 5,44 * 10^{-5}$$

Con estos valores, y despejando de la ecuación número (11), se obtiene la relación mínima que existe entre el caudal líquido y gaseoso:

$$\frac{L_{M,S}}{G_{M,S,min}} = \frac{(Y_2 - Y_1)}{(X_2 - X_1)} \tag{13}$$

Reemplazando:

$$\frac{L_{M,S}}{G_{M,S_{min}}} = \frac{(0,0002036 - 0,00315)}{(0 - 5,44 * 10^{-5})} = 54,25$$

Debido a que la relación mínima no es un valor realista, este debe multiplicarse por un factor, comúnmente entre 1,2 y 1,5. En este caso se opta por 1,25:

$$\frac{L_{M,S}}{G_{M,S}} = \frac{L_{M,S}}{G_{M,S_{min}}} * 1,25 \quad (14)$$

Finalmente, la relación entre caudales debe ser la siguiente:

$$\frac{L_{M,S}}{G_{M,S}} = 54,25 * 1,25 = 67,82$$

Utilizando este valor, se calcula el caudal líquido necesario para la remoción del sulfuro de hidrogeno:

$$\frac{L_{M,S}}{G_{M,S}} = 67,82$$

$$G_{M,S} = \frac{\left(4468,84 \frac{m^3}{día}\right) * \frac{1 día}{86400 s} * 10,65 \frac{kg}{m^3}}{0,02549 kg \text{ biogas/mol}} = 21,61 \text{ mol biogas/s}$$

$$L_{M,S} = 21,61 \frac{\text{mol biogas}}{s} * 67,87 = 1466,10 \text{ mol } H_2O/s$$

$$L = \frac{1466,10 \text{ mol } H_2O}{s} * \frac{18 g}{1 \text{ mol}} * \frac{1 kg}{1000 g} * \frac{1 m^3}{1000 kg} * \frac{86400 s}{1 día} = \mathbf{2281 m^3/día}$$

Costos:

Los principales costos de inversión en este sistema son la construcción de las columnas, y el sistema de bombeo para el gran caudal de agua necesario.

En cuanto a la operación, el mayor consumo se da por el consumo energético para conducir el caudal de agua.

Según la bibliografía, se encontró un costo aproximado de u\$s 2,334 por metro cubico de biogás de inversión y un costo de operación de u\$s 0,130 por metro cubico de biogás tratado. (Okoro & Sun, 2019).

Impactos ambientales:

La posibilidad de generar impactos negativos sobre el medio ambiente se debe principalmente por la generación de grandes cantidades de efluentes líquidos. El agua utilizada para remover el sulfuro de hidrogeno del biogás en el proceso de absorción pasa a una columna de desorción donde el sulfuro de hidrogeno es eliminado del agua a través de aire. Este proceso no es 100% eficiente y siempre quedan restos de sulfuro de hidrogeno en el agua. Una vez que el agua no se puede regenerar más, se genera un efluente ácido con altos contenidos de ácido sulfhídrico y dióxido de carbono que debe ser tratada para no contaminar los recursos hídricos.

Otro posible impacto a tener en cuenta es la contaminación atmosférica. Cuando el sulfuro de hidrogeno es absorbido por el aire en el proceso de absorción, se emite a la atmosfera un aire con alto contenido de este ácido. El H₂S en la atmosfera se oxida y forma óxido de azufre, que se disuelve en el agua, dando como resultado el fenómeno de lluvia ácida. (Universidad Complutense de Madrid)

DESCRIPCIÓN DE LOS CRITERIOS DE SELECCIÓN

A continuación, se establecen los criterios sobre los cuales se tomará la decisión:

Criterio Técnico:

Este criterio define la relevancia técnica del sistema de acondicionamiento a implementar, según el alcance establecido en los siguientes subcriterios:

- Eficiencia: eficiencia de remoción del sulfuro de hidrogeno de la corriente de biogás.
- Disponibilidad de tecnologías: con este criterio se hace referencia a la facilidad que se tiene para acceder a los distintos elementos que componen el sistema de tratamiento.
- Complejidad: Grado de dificultad en la operación del sistema.
- Consumo energético: Energía requerida por sopladores y bombas para el funcionamiento de la planta.

Criterio económico:

Permite incorporar los beneficios y costos incurridos en la implementación del proyecto.

Criterio ambiental:

El criterio ambiental incorpora el impacto de la implementación del proyecto en el medio ambiente, teniendo en cuenta las emisiones de gases, la generación de efluentes líquidos y residuos de características peligrosas.

COMPARACIÓN DE ALTERNATIVAS

MATRIZ DE ALTERNATIVAS

Se elaborará una matriz de comparación por pares de las alternativas respecto a los diferentes criterios considerados. Así, se obtienen 6 matrices:

Tabla 5.5 Comparación de la eficiencia

EFICIENCIA	Alternativas	Adsorción	Absorción
	Adsorción	1	2
	Absorción	1/2	1

La alternativa Adsorción se considera entre igualmente preferible a medianamente preferible ya que posee una eficiencia pequeñamente mayor que la absorción (99,98 y 99,50 respectivamente).

Tabla 5.6 Comparación de la disponibilidad de tecnologías

DISPONIBILIDAD DE TECNOLOGÍAS	Alternativas	Adsorción	Absorción
	Adsorción	1	1/5
	Absorción	5	1

En cuanto a la disponibilidad de tecnologías la alternativa de tratamiento absorción se considera mejor, ya que todos los insumos están disponibles en el país, mientras que para la Adsorción, los pellets de óxidos de hierro son importados desde China.

Tabla 5.7 Comparación de la complejidad

COMPLEJIDAD	Alternativas	Adsorción	Absorción
	Adsorción	1	7
	Absorción	1/7	1

La alternativa adsorción se considera mucho mejor que la Absorción por varios motivos. En primer lugar, la adsorción se realiza en condiciones normales de temperatura y presión, mientras que la absorción necesita de grandes presiones para lograr una buena eficiencia. En segundo lugar, el otro problema de la absorción es el gran caudal de agua que utiliza. Se estimó que se necesitan 2281 m³/día para remover el sulfuro de hidrogeno presente en el biogás; haciendo que se necesiten grandes bombas para poder realizar el proceso completo.

Tabla 5.8 Comparación del consumo energético

CONSUMO ENERGÉTICO	Alternativas	Adsorción	Absorción
	Adsorción	1	9
	Absorción	1/9	1

La alternativa adsorción se considera extremadamente preferible con respecto a la absorción, ya que en ambas alternativas se consume electricidad para bombear el gas, pero en la absorción hay que sumarle la potencia necesaria para movilizar los 2281 m³/día lo que hace prácticamente inviable el proyecto en este sentido.

Tabla 5.9 Comparación criterio económico

CRITERIO ECONÓMICO	Alternativas	Adsorción	Absorción
	Adsorción	1	7
	Absorción	1/7	1

La necesidad de compresores para alcanzar las presiones de trabajo y el gran sistema de bombeo para movilizar el caudal, hace que la alternativa absorción sea operacionalmente más cara que la adsorción.

Tabla 5.10 Comparación criterio ambiental

CRITERIO AMBIENTAL	Alternativas	Adsorción	Absorción
	Adsorción	1	4
	Absorción	1/4	1

Ambientalmente, ambas alternativas generarían impactos en el medio ambiente. El caudal de agua utilizado en la absorción llega a un punto en que no puede reutilizarse más y por lo tanto genera un efluente que contiene ácido sulfhídrico como principal contaminante. Por su parte los pellets de hierro en el proceso de adsorción, una vez agotado también constituyen un residuo que hay que disponer correctamente. Se consideró preferible la alternativa adsorción en este criterio, teniendo en cuenta el impacto ambiental que produce la gran cantidad de energía que hay que utilizar para el sistema de bombeo en la absorción, y además la utilización de grandes cantidades de agua.

A continuación, criterio a criterio, se normalizó cada matriz, y se obtuvo el **vector de pesos para cada alternativa con respecto a cada criterio:**

	ALTERNATIVAS	PESO
EFICIENCIA	Adsorción	0,67
	Absorción	0,33

	ALTERNATIVAS	PESO
DISPONIBILIDAD DE TECNOLOGIAS	Adsorción	0,17
	Absorción	0,83

	ALTERNATIVAS	PESO
COMPLEJIDAD	Adsorción	0,87
	Absorción	0,13

	ALTERNATIVAS	PESO
CONSUMO ENERGETICO	Adsorción	0,90
	Absorción	0,10

	ALTERNATIVAS	PESO
CRITERIOS ECONOMICOS	Adsorción	0,87
	Absorción	0,13

	ALTERNATIVAS	PESO
CRITERIOS AMBIENTALES	Adsorción	0,82
	Absorción	0,18

Matriz de criterios

A continuación, se expone los valores subjetivos para conformar la matriz de preferencias sobre los criterios adoptados:

Tabla 5.11 Matriz de preferencia

Criterios		Técnicos				Económicos	Ambientales
		Eficiencia	Disponibilidad de tecnologías	Complejidad	Consumo energético		
Técnicos	Eficiencia	1	5	1/4	1/3	4	3
	Disponibilidad de tecnologías	1/5	1	1/7	1/6	1/3	1/4
	Complejidad	4	7	1	3	6	5
	Consumo energético	3	6	1/3	1	5	4
Económicos		1/4	3	1/6	1/5	1	1/3
Ambientales		1/3	4	1/5	1/4	3	1
$\sum r_i$		8,78	26	2,09	4,95	19,33	13,58

La matriz anterior permite identificar los pesos normalizados de cada criterio. Se divide cada valor de la matriz por la suma de su correspondiente columna. Luego, en la última columna se suma cada fila y se divide por la cantidad de criterios comparados, obteniendo el vector pesos de cada criterio:

Tabla 5.12. Obtención del vector peso para cada criterio

Criterios		Técnicos				Económicos	Ambientales	Pesos
		Eficiencia	Disponibilidad de tecnologías	Complejidad	Consumo energético			
Técnicos	Eficiencia	0,11	0,19	0,12	0,07	0,21	0,22	0,1534
	Disponibilidad de tecnologías	0,02	0,04	0,07	0,03	0,02	0,02	0,0331
	Complejidad	0,46	0,27	0,48	0,61	0,31	0,37	0,4145
	Consumo energético	0,34	0,23	0,16	0,20	0,26	0,29	0,2477
Económicos		0,03	0,12	0,08	0,04	0,05	0,02	0,0567
Ambientales		0,04	0,15	0,10	0,05	0,16	0,07	0,0944

SELECCIÓN DE ALTERNATIVA

Para la selección de la alternativa más conveniente es necesario obtener el peso global para cada alternativa.

La determinación de los pesos globales para cada alternativa se obtiene sumando el múltiplo de los pesos obtenidos de cada criterio por los vectores de pesos que en cada alternativa con respecto a cada criterio:

Tabla 5.13. Obtención del vector peso global para cada alternativa

	Eficiencia	Disponibilidad de tecnologías	Complejidad	Consumo Energético	Económicos	Ambientales	Total
Alternativa 1: Adsorción	$0,67 \cdot 0,1534 = \mathbf{0,1023}$	$0,17 \cdot 0,0331 = \mathbf{0,0055}$	$0,87 \cdot 0,4145 = \mathbf{0,3730}$	$0,90 \cdot 0,2477 = \mathbf{0,2230}$	$0,87 \cdot 0,0567 = \mathbf{0,0496}$	$0,82 \cdot 0,0944 = \mathbf{0,0771}$	0,8306
Alternativa 2: Absorción	$0,33 \cdot 0,1534 = \mathbf{0,0511}$	$0,83 \cdot 0,0331 = \mathbf{0,0276}$	$0,13 \cdot 0,4145 = \mathbf{0,0518}$	$0,10 \cdot 0,2477 = \mathbf{0,0248}$	$0,13 \cdot 0,0567 = \mathbf{0,0071}$	$0,18 \cdot 0,0944 = \mathbf{0,0173}$	0,1694

De la tabla anterior queda seleccionada la alternativa numero 1: **desulfuración mediante adsorción**. A continuación, se detalla la secuencia y los elementos que componen la alternativa seleccionada:

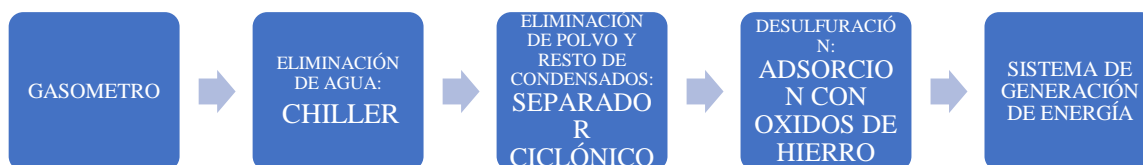


Ilustración 5.2. Esquema de tratamiento de la alternativa seleccionada

En los próximos capítulos se darán los detalles de la alternativa elegida.

6. DATOS BÁSICOS DE DISEÑO:

BIOGAS

CAUDAL

La planta se dimensionará para un caudal operativo promedio de 4468,84 m³/día de biogás, pudiendo llegar a tener picos de 4700 m³/día en los meses de verano.

PRINCIPALES PARAMETROS

Tabla 6.1 Principales parámetros de entrada del biogás

Temperatura	30	[°C]
Presión	1	[atm]
Densidad a 20°C y 1 atm	1,20	[kg/m ³]
Viscosidad	1,984	[Kg/m.s]

Fuente: (Varnero Moreno, 2011) <http://www.fao.org/3/as400s/as400s.pdf>

Teniendo en cuenta estos datos, se supondrá que el biogás se comportará como un gas ideal.

COMPOSICIÓN

El biogás producto del tratamiento de los efluentes de la cervecería posee la siguiente composición a la salida del reactor:

Tabla 6.2 Composición de entrada del biogás

Contenido de CH₄	65	[% V/V]
Contenido de CO₂	25	[% V/V]
Vapor de agua	Saturado	
Sulfuro de Hidrogeno	3100	[ppm]
Partículas solidas	1,412	[g/m ³]

Fuente: <https://riunet.upv.es/handle/10251/90712> (Gil Martinez, 2017)

Partículas sólidas:

Las partículas sólidas poseen la siguiente distribución:

Tabla 6.3 Distribución de tamaños de las partículas sólidas

Intervalo de partícula (µm)	Diametro medio (µm)	Concentración m_i (%)
5-10	7.5	45
10-30	20	25
30-50	40	15
50-70	60	10
70-100	85	5

Fuente: <https://library.co/document/qvvjo50q-tratamiento-proveniente-complejo-ambiental-ensenada-generacion-energia-electrica.html> (Fernandez & Zarza, 2019)

Vapor de agua:

El biogás se encuentra saturado a la salida del reactor.

A través de un gráfico psicométrico se procede a caracterizar el contenido de agua del biogás.

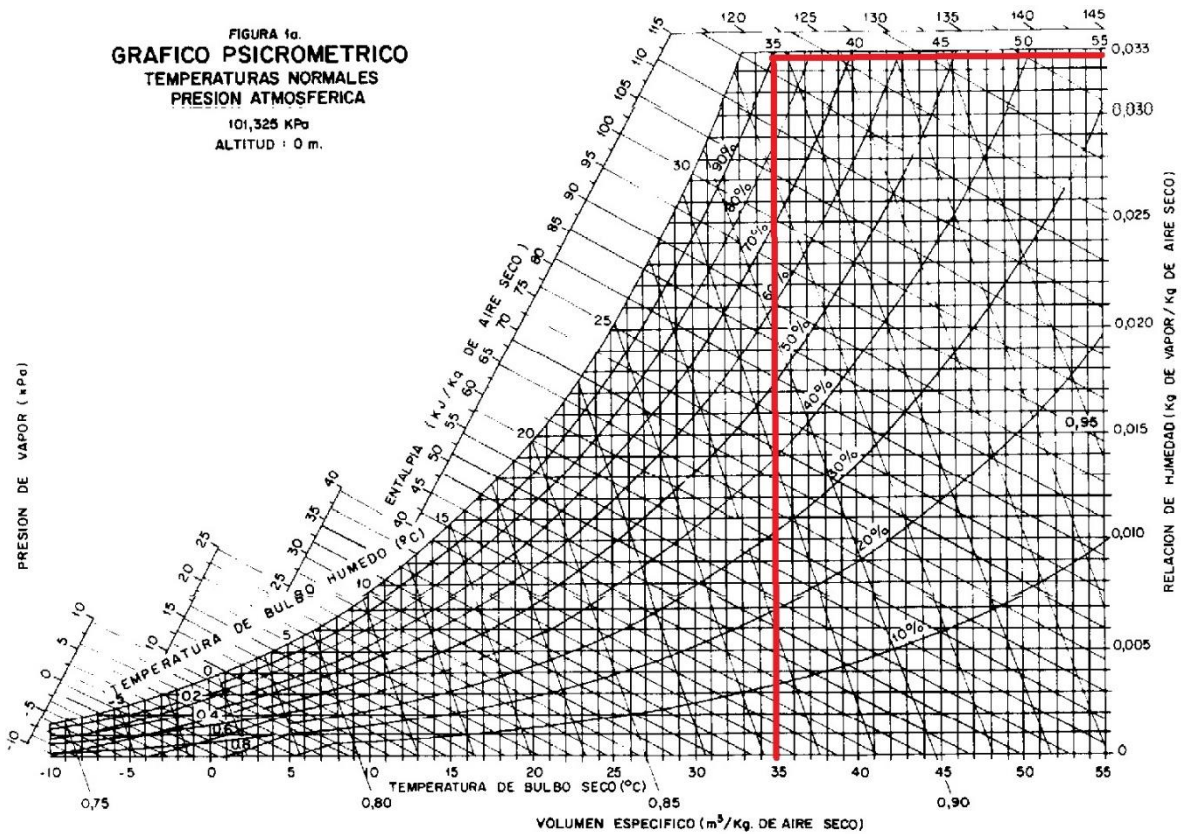


Ilustración 6.1 Gráfico Psicrométrico

Fuente: <http://www.fao.org/3/X5057S/x5057S1A.GIF>

Según el gráfico psicrométrico, para el biogás a 35°C, a presión atmosférica y completamente saturado, el contenido de agua es igual a 0,032 kg agua/kg biogás.

ENERGÍA PRIMARIA Y POTENCIA GENERADA

Para obtener la energía primaria contenida en el biogás se utilizarán los siguientes datos:

Tabla 6.4 Datos utilizados para el cálculo de la energía primaria obtenida

Parámetro	Valor	Unidades
Caudal de biogás (Qb)	4468,84	[m3/día]
Contenido de metano (Cm)	65	[% V/V]
Poder calorífico del metano (PCI)	9,94	[kWh/m3 CH4]

$$E_{primaria} = Q_{biogas} * C_M * PCI_{Metano}$$

Reemplazando por los valores de la tabla:

$$E_{primaria} = \frac{4468,84 \text{ m}^3 \text{ biogas}}{\text{día}} * \frac{0,65 \text{ m}^3 \text{ CH}_4}{\text{m}^3 \text{ biogas}} * \frac{9,94 \text{ kWh}}{1 \text{ m}^3 \text{ CH}_4} * \frac{1 \text{ día}}{24 \text{ horas}} = 1203,05 \text{ kW}$$

Teniendo en cuenta que los motores tienen rendimientos alrededor del 35% para generar energía eléctrica y 40% para generar calor, se tiene la siguiente disponibilidad de energía:

Tabla 6.5 Potencia de generación

Energía Térmica	481,22	kW
Energía Eléctrica	421,07	kW
Energía Total	902,29	kW

COGENERACIÓN DE ENERGÍA

DEMANDA DE ENERGÍA TÉRMICA

La energía térmica generada será utilizada para calefaccionar el biodigestor de la planta, el cual se encarga de acondicionar los barros generados en la planta de tratamiento de efluentes. Este biodigestor tiene las siguientes características:

Tabla 6.6 Características del biodigestor

Diámetro	7 metros
Altura	10 metros
Material de construcción	Hormigón Armado
Espesor de las paredes	0,30 metros
Temperatura óptima de funcionamiento	35°C

La cantidad de energía térmica para un funcionamiento óptimo viene dada por la cantidad de calor necesario para:

- Aumentar la temperatura del sustrato hasta la temperatura de proceso (35°C) previa alimentación al digestor.
- Compensar las pérdidas de calor que se producen a través de las paredes, fondo y cubierta del biodigestor.

En cuanto a la necesidad de calor para elevar la temperatura, se considerarán las temperaturas promedio de los meses de invierno, ya que son las condiciones más desfavorables para el funcionamiento del biodigestor:

Tabla 6.7 Temperatura promedio de los meses de invierno

- Mes	Temperatura promedio mínima
Junio	7,1 °C
Julio	6,8 °C
Agosto	7,3 °C

Fuente: <https://www.weather-arg.com/es/argentina/parana-clima>

$$T_{\text{exterior}} = \frac{7,1^{\circ}\text{C} + 6,8^{\circ}\text{C} + 7,3^{\circ}\text{C}}{3} = 7,1^{\circ}\text{C}$$

Para el cálculo del calor se realizará un balance de energía a un volumen de control que encierra la totalidad del intercambiador, para un flujo estacionario, teniendo en cuenta las siguientes condiciones:

- No se realiza trabajo externo
- No se transfiere calor al sistema si el intercambiador está bien aislado
- Los cambios de energía cinética y potencial suelen ser insignificante

El balance queda de la siguiente manera:

$$0 = Q_{\text{req}} - \sum Q_{\text{perdidas}} - Q_{\text{sustrato}} \quad (15)$$

Donde:

Q_{perdidas} , son las pérdidas de calor en las paredes, cubierta y fondo del biodigestor

Q_{sustrato} , es el calor necesario para aumentar la temperatura del sustrato

Q_{req} , es el calor necesario que se requiere.

El calor total requerido por la planta es de aproximadamente 88,45 kW. Este cálculo se encuentra detallado en la sección “ENERGÍA TÉRMICA” de la Memoria Técnica del proyecto.

Este valor se multiplicará por un factor de seguridad igual a 1,50, el cual abarcará todas las pérdidas que se pueden producir en las tuberías de transporte de agua caliente. Por lo tanto, la potencia necesaria será la siguiente:

$$E_{t\acute{e}rmica} = 88,45 \text{ KW} * 1,50 = 133 \text{ kW}$$

Se puede observar que la energía térmica requerida se puede cubrir con la energía generada por el biogás.

PARAMETROS DE ENTRADA

Tanto el motor de generación de energía eléctrica como el de cogeneración, exigen que el biogás tenga los siguientes parámetros de entrada:

Tabla 6.8 Requisitos del biogás a la entrada de los sistemas de generación de energía

Contenido de CH₄	>55	[% V/V]
Vapor de agua	<60	[% V/V]
Sulfuro de Hidrogeno	200	[ppm]
Partículas solidas	<0,1	[g/m ³]
Presión	20000	Pa

La planta de tratamiento de biogás se diseñará con el fin de que se cumplan dichos parámetros.

7. PROYECTO DE LA ALTERNATIVA SELECCIONADA

MEMORIA TECNICA

En el presente capítulo se dimensionarán los equipos a utilizar a partir de las condiciones iniciales de biogás, el caudal a tratar y las condiciones finales requeridas y se determinará la disposición de los mismos.

GASOMETRO

Se adoptará un gasómetro con forma de $\frac{3}{4}$ esfera de doble membrana de lona, una interior y otra exterior. Ambas membranas están compuestas por un hilado de poliéster de alta tenacidad, y ambas caras recubiertas con PVC. Poseen un tratamiento UV, fungicida y retardante a la propagación de llama. En la membrana interior, se colocará además una película extra estanco resistente a la permeabilidad del gas, siendo esta capa de lona, la que será impermeable al biogás, impidiendo la fuga del mismo.

A continuación, se detallan todos los elementos que conforman el gasómetro:

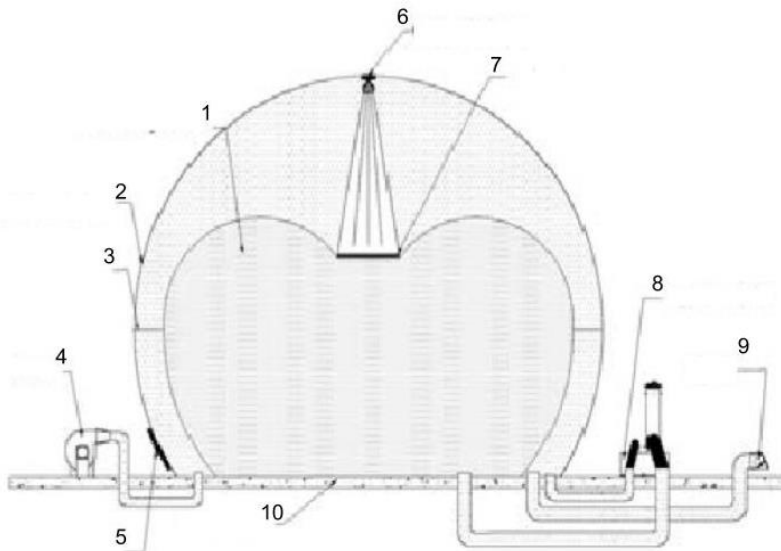


Ilustración 7.1 Gasómetro (Fuente: www.carapasargentinas.com.ar)

1. Membrana Interna adaptable al volumen del gas
2. Membrana Externa tensada por presión
3. Enlace flexible
4. Soplador que genera aire entre las dos membranas
5. Boca de inspección
6. Sensor ultrasónico
7. Balastro
8. Válvula de seguridad
9. Salida de aire

DIMENSIONAMIENTO

El dimensionamiento de un gasómetro viene dado por los requerimientos de almacenamiento y las variaciones en la producción de biogás. (ASyD consultores)

Hay tres situaciones que establecen el criterio para el diseño del volumen del gasómetro (ASyD Consultores):

- 1) Si se produce biogás durante todo el día, pero se consume solo una cantidad de horas por día:

$$V_{gasometro} > Q_{biogas} * (1 - t_c) \quad (16)$$

Siendo $V_{gasometro}$ es el volumen del gasómetro en m^3 , Q_{biogas} es el caudal de biogás producido en $m^3/hora$, t_c es el tiempo de consumo de biogás.

- 2) Si se produce biogás una cantidad de horas al día, y además el consumo también es por solo unas horas:

$$V_{gasometro} > Q_{biogas} t_{produccion} - Q_{consumo} t_{consumo} \quad (17)$$

Siendo $t_{produccion}$ el tiempo en el que se genera biogás en horas y $Q_{consumo}$ el caudal de consumo de biogás en $m^3/hora$.

- 3) Si se genera biogás durante todo el día, y también se consume las 24 horas del día.

$$V_{gasometro} > Q_{biogas} * \tau \quad (18)$$

Siendo τ el tiempo de residencia en horas.

En este caso, se utiliza la ecuación número 3, ya que se produce y consume todo el biogás que se genera, y por lo tanto el gasómetro solo sirve para lograr un caudal uniforme de biogás para los procesos posteriores. El tiempo de residencia seleccionado, tiene que contemplar las fluctuaciones que se pueden producir y el caso en que existan fallas en algunos de los siguientes procesos, para que el biogás pueda ser acumulado. Para este proyecto, se elige un tiempo de residencia mínimo de 12 horas.

El volumen del gasómetro es el siguiente:

$$V_{gasometro} = \left(4468,84 \frac{m^3}{día}\right) * \left(\frac{1 día}{24 horas}\right) (12 horas) * 1,15 = 2234,42 m^3$$

ANTORCHA

Es el principal elemento de seguridad y protección al medio ambiente. Cumple la función de combustionar el gas de forma segura y controlable en situaciones de emergencia, evitando su emisión directa a la atmosfera. Adicionalmente, se utilizan para eliminar los excedentes de gas y las puntas producidas en caso de parada de los motores o de alguno de los procesos de acondicionamiento.

Existen dos tipos, abiertas y cerradas. Las abiertas combustionan el biogás con una llama visible, mientras que las cerradas con una llama oculta. La instalación de las primeras se realiza a alturas considerables, mientras que la segunda a nivel del piso.

Teniendo en cuenta la seguridad de la planta, la antorcha se colocará a una distancia prudencial de 12 metros con respecto al gasómetro.

DIMENSIONAMIENTO:

La selección de la antorcha es de acuerdo a la cantidad máxima de biogás generado en el periodo de operación.

En el diseño del reactor UASB, se calculó que como máximo se pueden producir 4700 $m^3/día$.

$$Q_{max} = \frac{4700 m^3}{d} = 195 m^3/hora$$

Se seleccionó una antorcha de llama abierta, debido a que son más económicas y a que la llama visible de la misma permite un control del funcionamiento a distancia.

Se seleccionó una antorcha de la empresa PROGECO, de la serie EMR, la cual puede operar hasta un caudal de 250 m^3/h , lo que da el suficiente margen de seguridad. La misma tiene una altura de llama de 6 metros sobre el nivel del suelo.



Ilustración 7.2. Esquema de la antorcha

La antorcha viene con los siguientes equipos:

- Una rampa de entrada de gases, con apagallamas y electroválvulas de corte.
- Un quemador cerámico, para el caudal indicado
- Un sistema de separación de condensados
- Un medidor continuo de gas de entrada
- Electrodo para el encendido del gas
- Un cuadro de control y maniobra

El conjunto es suministrado en una estructura metálica para ser fijada al suelo, en una bancada de hormigón.

ELIMINACIÓN DE HUMEDAD

El biogás debe ser deshumidificado antes de ingresar a los lechos de adsorción de H_2S .

Una humedad relativa superior al 20% puede disminuir considerablemente la capacidad de adsorción de los pellets de óxido de hierro (dato suministrado por el proveedor de los pellets, Zhengzhou Kelin Water Purification Material Co., Ltd.).

El sistema elegido para eliminar la humedad es el de condensación de agua. El sistema está formado por dos intercambiadores de calor de placas y un chiller. Un chiller es un refrigerador, que enfría mediante el intercambio térmico.

El gas que se requiere enfriar circula a través de un intercambiador, este flujo transmitirá su calor al flujo refrigerante. El refrigerante, al recibir el calor, se evapora debido a sus características y la baja presión de evaporación. El refrigerante es extraído por el compresor, el cual lo envía comprimido hacia el condensador. En dicho proceso, el refrigerante se calienta por efecto de la compresión y del calor del motor del compresor. El gas caliente del compresor entra al condensador, en donde su calor es transmitido al medio refrigerante. El calor extraído provoca que el refrigerante condense a alta presión. El refrigerante en estado líquido a alta presión es almacenado y luego enviado a la válvula de expansión para su inyección en el evaporador y así reiniciar el ciclo.

Debido a la gran cantidad de componentes internos que conforman un chiller y a su venta como conjunto, se seleccionó del mercado un sistema que contiene el chiller y los intercambiadores de calor ya integrados. A continuación, se detalla el modelo elegido, sus componentes y su funcionamiento.

CARACTERÍSTICAS Y FUNCIONAMIENTO DEL CHILLER SELECCIONADO

Se eligió el sistema LNLS-200-Ex de la compañía Hangzhou Linuo Machinery Co., Ltd, con las siguientes características:

Tabla 7.1 Principales características del chiller seleccionado

Capacidad	200 m ³ /hora
Temperatura máxima del gas en la entrada	35°C
Presión de trabajo	1-30kpa
Caida de presión	2 kpa
Temperatura de enfriamiento	5°C
Tipo de enfriamiento	Enfriamiento por agua
Consumo de energía	3,3 kW
Volumen de agua de refrigeración	4T/h
Temperatura del gas de salida	30°C
Conexión entrada y salida	DN80
Dimensiones	1860x1214x1760 mm
Peso	480 kg

Fuente: Datos brindados por el proveedor. Se adjunta ficha técnica

El biogás húmedo entra por la tubería superior e ingresa al economizador, el cual consiste en un intercambiador de calor biogás – biogás. Allí, el biogás caliente y húmedo se pone en contacto con el biogás frío y seco de salida con el propósito de generar un primer descenso de temperatura del gas de entrada y, en segundo lugar, darle una temperatura 30°C al biogás a la salida del sistema.

Luego del economizador, el biogás ingresa al siguiente intercambiador de calor biogás-refrigerante. El biogás en este intercambiador, alcanza una temperatura de aproximadamente 5°C, donde a medida que se enfría, el vapor de agua comienza a condensar. A la salida del intercambiador ingresa al separador de agua, acoplado con una válvula neumática para la extracción de los condensados. Cuando el nivel de condensados alcanza una altura preestablecida en el tanque, simultáneamente, se abre la válvula y se inicia la extracción del condensado.

CONTENIDO FINAL DE HUMEDAD

Para calcular el contenido de humedad a la salida del sistema, se utiliza un gráfico psicométrico.

En el gráfico se observan los puntos 1,2 y 3.

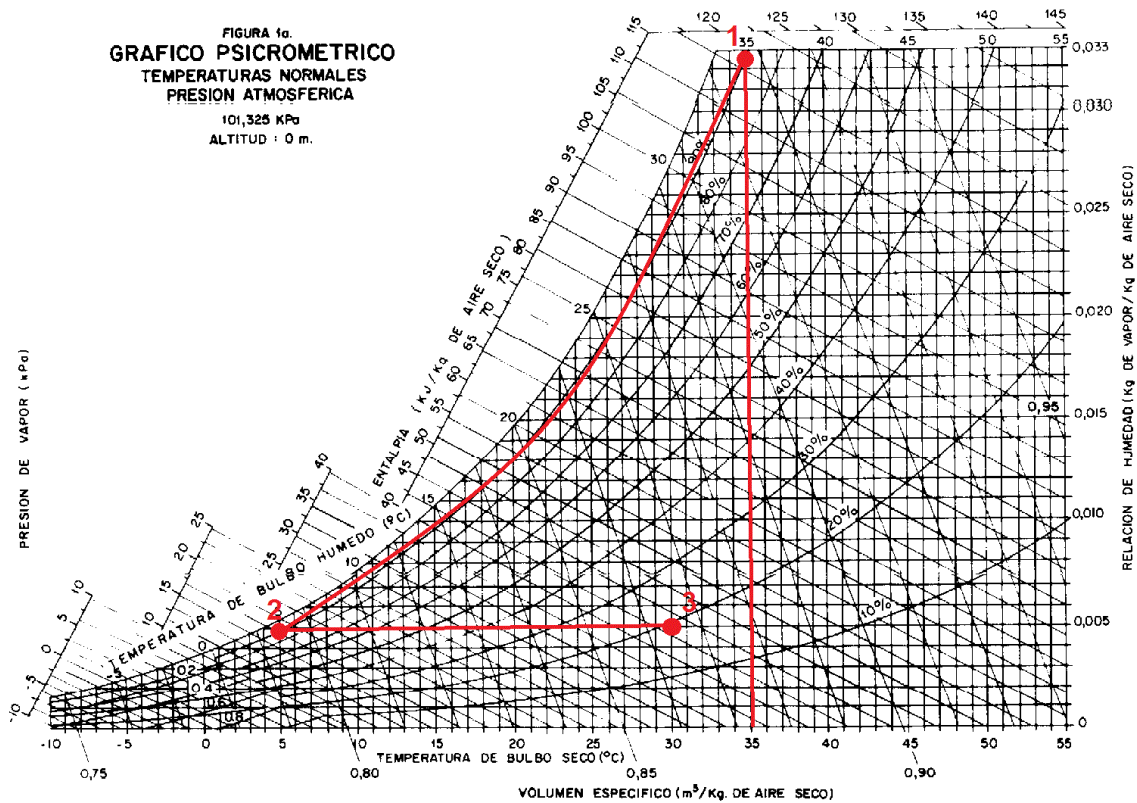


Ilustración 7.3 Gráfico psicrométrico

Fuente: <https://www.fao.org/3/X5057S/x5057S08.htm>

Punto 1: el punto 1 corresponde al biogás a la entrada del sistema, con una temperatura de 35°C y completamente saturado (curva de humedad relativa 90%).

Punto 2: corresponde al punto de rocío que se alcanza en el sistema (5°C)

Punto 3: temperatura de salida del biogás, debido al economizador (30°C).

Del gráfico se pueden obtener los siguientes datos:

Humedad absoluta inicial (Hai): 0,032 kg vapor/m³ aire.

Humedad absoluta final (Haf): 0,005 kg vapor/m³ aire.

Humedad relativa final: aproximadamente 20%.

CALCULO CANTIDAD DE CONDENSADOS:

Para el cálculo de condensados se utiliza la siguiente ecuación:

$$Q_{condensados} = Q_{biogas} * (Hai - Haf)$$

Donde :

Qcondensados es el caudal de condensados en m³/día

Reemplazando:

$$Q_{condensados} = \frac{4468,84 \text{ m}^3}{\text{día}} * \left(\frac{0,032 \text{ kg vapor}}{\text{m}^3 \text{ aire}} - \frac{0,005 \text{ kg vapor}}{\text{m}^3 \text{ aire}} \right) * \frac{1 \text{ m}^3}{1000 \text{ kg}} = 0,12 \frac{\text{m}^3}{\text{día}}$$

SEPARADOR CICLONICO

El separador ciclónico es un equipo utilizado para separar partículas sólidas suspendidas en una corriente gaseosa, basándose en el principio del impacto inercial, generado por la fuerza centrífuga.

En el ciclón, el gas entra en la cámara superior tangencialmente y desciende en espirales hasta el ápice de la sección cónica; luego, asciende en una segunda espiral, con diámetro más pequeño y sale por la parte superior a través de un ducto vertical centrado. Las partículas sólidas y líquidas se mueven radialmente hacia las paredes, y son recogidas en la parte inferior.

DISEÑO

El diseño de un ciclón se basa normalmente en familias de ciclones que tienen proporciones definidas. Las principales familias de ciclones de entrada tangencial son: ciclones de alta eficiencia, ciclones convencionales y ciclones de alta capacidad.

Debido a que la presencia de condensados y partículas sólidas en el biogás pueden arruinar el lecho de pellets de óxidos de hierro y el motor de cogeneración, se colocará el ciclón antes de la entrada al mismo. El ciclón deberá ser capaz de remover un 95% del contenido de partículas sólidas.

En este caso se seleccionó un ciclón tipo Tengbergen de alta eficiencia, el cual tiene las siguientes características dimensionales:

DIMENSION	RELACION DIMENSIONAL	TENGBERGEN C
Diámetro del ciclón	D_c/D_c	1
Altura de entrada	a/D_c	0.3
Ancho de entrada	b/D_c	0.3
Altura de salida	S/D_c	0.43
Diámetro de salida	D_s/D_c	0.33
Altura de la parte cilíndrica	h/D_c	0.55
Altura de la parte cónica	z/D_c	2.2
Altura total del ciclón	H/D_c	2.75
Diámetro de salida de polvo	B/D_c	0.33
Factor de configuración	G	533.12
Número de cabezas de velocidad	Nh	13.2
Numero de vórtices	N	5.5

Ilustración 7.4 Características dimensionales de un separador ciclónico tipo Tengbergen C

Fuente: (Petid, Pico, & Barbosa, 2011)

DATOS INICIALES

El ciclón se utilizará principalmente para la remoción de partículas sólidas presentes en el biogás y la reducción de condensado.

Se tienen las siguientes características en el biogás antes de la entrada al ciclón:

Tabla 7.2 Características del biogás a la entrada del separador ciclónico

Dimensión	Valor	Unidad
Densidad de partículas sólidas	1500	[Kg/m ³]
Temperatura del biogás	30	[°C]
Concentración de Partículas	1,412	[g/m ³]
Densidad del biogás	0,8	[Kg/m ³]
Viscosidad del biogás	1,984	[Kg/m.s]
Densidad del agua	995,71	[Kg/m ³]

Para garantizar un buen funcionamiento del ciclón se deben cumplir los siguientes parámetros (Echeverri Londoño, 2006):

Tabla 7.3 Parámetros de funcionamiento del separador ciclónico

Parámetro	Valor
Diámetro del ciclón (D_c)	< 1,0 m
Caída de presión	<2488,16 Pa
Relación de velocidades (V_i/V_s)	<1,35
Velocidad de entrada	15,2 – 27,4 m/s
Longitud Natural del ciclón	$L < H-S$
Eficiencia requerida (Partículas sólidas)	95%

Fuente: (Fernandez & Zarsa, 2019)

La concentración de partículas sólidas viene dada de la siguiente manera:

Tabla 7.4. Distribución de partículas

Intervalo de partícula (μm)	de Diametro medio (μm)	Concentración m_i (%)
5-10	7.5	45
10-30	20	25
30-50	40	15
50-70	60	10
70-100	85	5

Fuente: (Fernandez & Zarsa, 2019)

- Diámetro del ciclón (D_c):

Para el cálculo del diámetro del separador ciclónico se seleccionará una velocidad de entrada dentro del rango de 15,2 a 27,4 m/s. En este caso se selecciona 17 m/s.

El área del separador se puede calcular a través de la siguiente ecuación:

$$Area = \frac{Q}{v_i} \tag{19}$$

Reemplazando los valores del caudal de gas y la velocidad elegida se obtiene:

$$Area = \frac{\frac{4468,84 \text{ m}^3}{\text{dia}} * \frac{1 \text{ dia}}{86400 \text{ s}}}{\frac{17 \text{ m}}{\text{s}}} = 0,003 \text{ m}^2 = 30 \text{ cm}^2$$

Además, el área de entrada tangencial es igual a:

$$Area = a * b = 0,3 D_c * 0,3 D_c \tag{20}$$

Reemplazando el valor del área calculado y despejando D_c , se obtiene:

$$D_c = \sqrt{\frac{0,003 \text{ m}^2}{0,3 * 0,3}} = 0,18 \text{ m}$$

Una vez obtenido el valor de D_c , se pueden calcular las demás dimensiones:

- Altura de entrada (a):

$$a = 0,3 * D_c = 0,3 * 0,18 \text{ m} = 0,055 \text{ m} = 5,5 \text{ cm}$$

- Ancho de entrada (b):

$$b = 0,3 * D_c = 0,3 * 0,18 \text{ m} = 0,055 \text{ m} = 5,5 \text{ cm}$$

- Altura de salida (S):

$$S = 0,43 * D_c = 0,43 * 0,18 \text{ m} = 0,079 \text{ m} = 7,9 \text{ cm}$$

- Diámetro de salida (Ds):

$$D_s = 0,33 * D_c = 0,33 * 0,18 \text{ m} = 0,061 \text{ m} = 6,1 \text{ cm}$$

- Altura del cilindro (h):

$$h = 0,55 * D_c = 0,55 * 0,18 \text{ m} = 0,101 \text{ m} = 10 \text{ cm}$$

- Altura del cono (z):

$$z = 2,2 * D_c = 2,2 * 0,18 \text{ m} = 0,404 \text{ m} = 40,4 \text{ cm}$$

- Altura total del ciclón (H):

$$H = 2,75 * D_c = 2,75 * 0,18 \text{ m} = 0,505 \text{ m} = 50 \text{ cm}$$

- Diámetro de salida de polvo/partículas (B):

$$B = 0,33 * D_c = 0,33 * 0,18 \text{ m} = 0,061 \text{ m} = 6,1 \text{ cm}$$

- Velocidad de saltación:

El incremento de la velocidad de entrada conduce a un aumento en la eficiencia del ciclón. Sin embargo, cuando la velocidad de entrada del ciclón es suficientemente grande puede ocurrir el fenómeno de re suspensión de las partículas, que da origen a la llamada velocidad de saltación, parámetro fundamental en el diseño de un ciclón.

Se ha definido una ecuación empírica para estimar la velocidad de saltación (Kalen & Zenz, 1974; Echeverri, 2006):

$$v_s = \frac{4,913 * W * K_b^{0,4} * D_c^{0,067} * \sqrt[3]{v_i^2}}{\sqrt[3]{1 - K_b}} \quad (21)$$

Donde $K_b = b/D_c = 0,3$ y W es la velocidad equivalente:

$$W = \left(\frac{4g\mu(\rho_p - \rho)}{3\rho^2} \right)^{1/3} \quad (22)$$

Reemplazando los valores de viscosidad del gas, densidad de partícula y densidad del gas, se obtiene:

$$W = \left(\frac{4 * \left(\frac{9,8 \text{ m}}{\text{s}^2} \right) * \left(\frac{1,98 * 10^{-5} \text{ kg}}{\text{m} \cdot \text{s}} \right) * \left(\frac{1500 \text{ kg}}{\text{m}^3} - \frac{0,8 \text{ kg}}{\text{m}^3} \right)}{3 * \left(\frac{0,8 \text{ kg}}{\text{m}^3} \right)^2} \right)^{1/3} = 0,85 \text{ m/s}$$

Reemplazando en la ecuación numero 3:

$$v_s = \frac{4,913 * \left(\frac{0,85 \text{ m}}{\text{s}} \right) * (0,3)^{0,4} * (0,18 \text{ m})^{0,067} * \sqrt[3]{\left(\frac{17 \text{ m}}{\text{s}} \right)^2}}{\sqrt[3]{1 - 0,3}} = 17,09 \text{ m/s}$$

- Relación de velocidades v_i/v_s :

Para que no se produzca re suspensión del material, y la eficiencia calculada posteriormente no sea una sobreestimacion, se debe respetar la siguiente condición:

$$\frac{v_i}{v_s} < 1,35$$

Reemplazando ambas velocidades:

$$\frac{17 \text{ m/s}}{17,09 \text{ m/s}} = 0,99$$

Como se cumple la condición, se asegura que no exista re suspensión de las partículas.

- Longitud Natural del ciclón:

La longitud natural del ciclón es la longitud necesaria para iniciar el vórtice ascendente tomada desde la altura superior del ciclón. Se puede estimar a través de la siguiente ecuación: (Echeverri Londoño, 2006):

$$L = 2,3 * D_c * \sqrt[3]{\frac{D_c^2}{a * b}} \quad (23)$$

Reemplazando:

$$L = 2,3 * 0,18 \text{ m} * \sqrt[3]{\frac{(0,18\text{m})^2}{0,055\text{m} * 0,055\text{m}}} = 0,31$$

Se debe verificar que la longitud del ciclón cumpla la siguiente condición:

$$L < H - S$$

Reemplazando:

$$H - S = 0,505 - 0,079 = 0,43$$

Debido a que se verifica, se puede proceder al cálculo de la eficiencia del ciclón.

EFICIENCIA DEL CICLON:

No existe un método teórico sencillo que permita el cálculo de la eficiencia de forma exacta. Esto es, en parte, debido a que, en la práctica, partículas pequeñas que teóricamente deberían salir con el gas, debido a la aglomeración y al barrido y choque con partículas mayores, serán capturadas, mientras que las partículas grandes que deberían se retenidas rebotaran contra las paredes o serán capturadas por turbulencias, pudiendo escapar del ciclón.

- Eficiencia para partículas sólidas

La eficiencia total del ciclón se calcula de la siguiente manera:

$$n_T = \sum n_i * m_i \quad (24)$$

Donde m_i es la concentración de partículas y n_i es la eficiencia de partículas para un determinado intervalo de tamaño de partículas.

La eficiencia para cada intervalo se obtiene a través de la siguiente ecuación:

$$n_i = 1 - e^{-2\left(\frac{G * T_i * Q * (n+1)}{D_c^3}\right)^{0,5}} \quad (25)$$

Donde:

n_i , es la eficiencia del ciclón para un intervalo de partículas

G , es el factor de configuración igual a 533,12

T_i , es el tiempo de relajación

Q , es el caudal de biogás

n , es el exponente de vórtice

D_c , es el diámetro del ciclón

Se debe calcular entonces el tiempo de relajación y el exponente de vórtice para obtener la eficiencia.

El tiempo de relajación es el tiempo necesario para que una partícula alcance la velocidad terminal de caída, se calcula de la siguiente manera:

$$T_i = \frac{\rho_i * d_{pi}^2}{18\mu} \quad (26)$$

Donde

T_i , es el tiempo de relajación en segundos

d_{pi} , es el diámetro medio de partículas para un determinado intervalo

El exponente de vórtice resulta de relacionar la velocidad tangencial y el radio de giro de un movimiento en forma de vórtice. Las mediciones en ciclones, señalan que este valor puede variar de 0.5 a 0.7 de acuerdo con el tamaño del ciclón y la temperatura.

$$n = 1 - (1 - 0,67 * D_c^{0,14}) * \left(\frac{T}{283}\right)^3 \quad (27)$$

Donde

n , es el exponente de vórtice

T , es la temperatura del biogás igual a 303 K

Reemplazando los valores en la ecuación n° :

$$n = 1 - (1 - 0,67 * 0,18^{0,14}) * \left(\frac{303 K}{283}\right)^3 = 0,54$$

Se procede a calcular el tiempo de relajación y la eficiencia por intervalos en la siguiente tabla:

Tabla 7.5. Cálculo de la eficiencia del ciclón

Intervalo de partícula (µm)	Diametro medio (µm)	Concentración m_i (%)	Tiempo de relajación (s)	Eficiencia (n_i)	$n_i * m_i$
5-10	7.5	45	$2,36 \times 10^{-4}$	0,9033	40,64
10-30	20	25	$1,67 \times 10^{-3}$	0,9879	24,69
30-50	40	15	$6,72 \times 10^{-3}$	0,9990	14,98
50-70	60	10	$1,51 \times 10^{-2}$	0,9999	9,99
70-100	85	5	$3,03 \times 10^{-2}$	0,9999	4,99
Eficiencia total del ciclón					95,33

CAIDA DE PRESION

La caída de presión es un parámetro importante debido a que relaciona directamente los costos de operación. La caída de presión de un ciclón se debe a las pérdidas de entrada y salida, y pérdidas de energía cinética y fricción.

Se utilizará la ecuación desarrollada por Shepherd y Lapple para calcular este parámetro:

$$\Delta P = \frac{1}{2} * \rho * v_i^2 * N_H$$

Donde

ΔP , es la caída de presión

ρ , es la densidad del biogás igual a 0.8 kg/m³

v_i , es la velocidad de entrada 17 m/s

N_H , es el número de cabezas de velocidad

$$\Delta P = \frac{1}{2} * \frac{0,8 \text{ kg}}{\text{m}^3} * \left(\frac{17 \text{ m}}{\text{s}}\right)^2 * 13,2 = 1525,92 \text{ Pa}$$

Este valor es menor al fijado en la tabla n° 7.3, por lo tanto se considera aceptable.

DESULFURACION DEL BIOGAS

DESCRIPCION DE LA COLUMNA DE LA COLUMNA DE ADSORCIÓN

La desulfuración del biogás se realiza a través de una columna cilíndrica rellena con pellets de óxido de hierro. Se cuentan con dos columnas iguales separadas a una distancia de 1 metro entre sí. Una de las columnas se encuentra en funcionamiento, mientras que en la otra se regenera el relleno a través de la inyección de aire a la misma.

El biogás ingresa a la columna por la parte superior de la misma, a través de una tubería de PVC de 90 mm. La misma cuenta con una placa deflectora que distribuye y guía al biogás hacia la zona de reacción.

La zona de reacción consiste en un lecho cargado de pellets de óxidos de hierro de gran superficie específica. El biogás avanza por la zona de reacción de arriba hacia abajo. A medida que va atravesando el lecho, el sulfuro de hidrogeno contenido en el biogás reacciona con el óxido de hierro, formando sulfuro de hierro y agua. Una vez que los pellets se cubren completamente de sulfuro, la columna deja de utilizarse y se comienza el proceso de regeneración.

La regeneración de los pellets se realiza mediante la inyección de aire a la columna desde la zona inferior a la zona superior. El oxígeno contenido en el aire, reacciona con el sulfuro de hierro, formando nuevamente óxido de hierro y azufre. Este proceso es altamente exotérmico, por lo tanto, debe ser fundamental controlar la temperatura durante la reacción.

La columna contará con una escotilla en la parte superior, donde se realizará la carga de los pellets de óxido de hierro. También contará con una escotilla, situada en la zona inferior del lecho, donde se podrá descargar los pellets una vez que estos sean inutilizables y proceder a la limpieza de la columna.

Para una mayor claridad, en la sección de planos, se encuentra el plano descriptivo de la columna y sus detalles.

A continuación, se detallan todos los dispositivos de la columna y las características estructurales de la misma.

Tabla 7.6 Dispositivos interiores de la columna

Dispositivo	Descripción
Rociadores automáticos	Debido a que el proceso de regeneración es altamente exotérmico y se corren riesgos de incendio, se colocaran un total de 4 rociadores conectados a una reserva de agua. Uno en la parte superior de la columna y los demás en los laterales. Estos rociadores poseen un sensor de temperatura y se encienden automáticamente cuando la temperatura supere los 80°C con el propósito de enfriar el lecho hasta el rango de temperatura recomendada.
Deflectores	La distribución del gas hacia la zona de reacción se realiza mediante una placa deflectora. Al mismo tiempo, se tiene una placa deflectora debajo del lecho, la cual se encarga de dirigir el biogás hacia la salida ubicada en el fondo del recipiente.
Plato soporte del lecho	Se utilizará una reja de soporte ondulada de plástico, la cual garantiza una superficie libre para que el flujo de gas pueda atravesarlo. El mismo se apoya sobre un anillo interior soldado a la pared de la columna.
Reja de sujeción	La reja de sujeción es una malla de 40 cables por pulgada de acero inoxidable sujeta a la columna mediante tornillos. Se colocará directamente sobre el lecho para evitar la dispersión, el desplazamiento o el escape de relleno hacia otras partes.
Purgador de condensados	El agua generada durante el proceso ingresa al purgador situado en la zona inferior de la columna. Está formado por un filtro donde quedan retenidos los sedimentos. El condensado ya filtrado pasa por el sistema automático de drenaje que consiste en una placa de acero inoxidable móvil, la cual debido a la presión generada se abre automáticamente generando la descarga de los condensados. Los mismos son conducidos mediante una tubería de plástico hacia un desagüe fuera de la columna.

Tabla 7.7 Dispositivos de control

Dispositivos de control	Descripción
Termopares	Son los sensores de temperatura utilizados en el proceso de regeneración. Se colocarán en la zona lateral de la columna

	a una distancia de dos metros entre ellos. Serán los encargados de brindar una señal de alarma, que darán aviso cuando la temperatura alcance los 60°C.
Válvula de seguridad	Consiste en una válvula de alivio de presión mecánica, la cual se compone por un tapón y un resorte calibrado que mantiene este tapón en posición evitando que el gas se escape de la columna. Cuando la presión interna del fluido supera la presión del resorte, el tapón cede y gas sale por el escape. Una vez que la presión interna disminuye el tapón regresa a su posición original.
Manómetro	Se instalarán dos manómetros, uno a la entrada del biogás y el otro a la salida. Estos se colocan no solo para controlar la presión de trabajo, sino como un indicador del estado del lecho, ya que cuando se superan los valores de presión normal, es posible que el lecho deba ser cambiado debido a un apelmazamiento del azufre elemental en la superficie de los pellets.

Tabla 7.8. Características estructurales

Estructura	Detalle
Material de la columna	Estas columnas se realizan generalmente de acero o PRFV (plásticos reforzados con fibra de vidrio) ya que ambos materiales son resistentes a la corrosión. En este caso, se optó por realizar las dos columnas con acero al carbono recubierto con un anticorrosivo, con un espesor de 9 mm.
Fondo	Los cabezales de las columnas suelen ser planos, toriesfericos, semielipticos, semiesfericos, entre otros. En este caso se seleccionó los toriesfericos, ya que tienen un costo relativamente bajo y es recomendado para la presión de trabajo de la columna
Soporte	La columna será diseñada como unidad auto soportada utilizando faldones del mismo material, los cuales irán soldados a tope al fondo inferior, de forma que los diámetros medios del faldón y la envolvente coincidan. Estará anclada a la cimentación de concreto, por medio de pernos de anclaje y de anillo de la base. Se instalarán 8 pernos de anclaje. Debido a la altura de la columna, el faldón tendrá una altura de 1 m y un espesor de 8 mm. El mismo tendrá un acceso al interior y ventilación.

Escotillas	Se instalan dos escotillas, una en la zona superior de la torre para cargar el material de relleno, y otra ubicada donde comienza el lecho relleno, para retirar el material una vez gastado. La escotilla superior tiene un diámetro de 0,72 m, mientras que la inferior tiene un diámetro de 0,85 m.
Escaleras y Plataformas	Ambas columnas dispondrán de una escalera tipo gato con jaula de protección, ya que se tiene una altura mayor a 20 pies. Se dispondrá de una plataforma de descanso a los 8,36 m. Esta plataforma tendrá un ancho de 1 m con una barrera de seguridad de la misma dimensión. La escalera tendrá las siguientes características: <ul style="list-style-type: none"> • Comienza a 1,5 metros del suelo y finaliza en la última plataforma • Los peldaños estarán separados cada 30 cm • Está situada paralelamente a la columna a 0,15 m de la columna Con respecto al túnel de protección, el mismo tiene un ancho 0,60 metros.

A continuación, se detallan los principales parámetros de operación del biogás a la entrada de la torre. La misma se diseñará para disminuir el contenido de sulfuro de hidrogeno a un valor de 200 ppm⁵.

Tabla 7.9. Parámetros de entrada a la columna

Parámetro	Valor	Unidades
Caudal	4468,84	[m ³ /día]
Contenido de H ₂ S	3100	[ppmv]
Peso molecular H ₂ S	34,10	[gr/mol]
Temperatura	30	[°C]
Presión	1	[atm]

En dichas condiciones de operación, se puede suponer que el gas, se comporta como un gas ideal.

DIMENSIONAMIENTO:

- CANTIDAD DE H₂S A ELIMINAR

$$Q_{H_2S} = Q_{biogás} * (C_{ent H_2S} - C_{sal H_2S}) * \frac{1 \text{ día}}{24 \text{ horas}} \tag{28}$$

Donde:

Q_{H_2S} es el caudal de H₂S a eliminar en la torre en m³/hora

$Q_{biogás}$ es el caudal de biogás en m³/día

$C_{ent H_2S}$ es la concentración de H₂S en g/m³ a la entrada de la torre

$C_{sal H_2S}$ es la concentración de H₂S en g/m³ a la salida de la torre

⁵ Dato brindado por el proveedor, INGEN S.A.

$$C_{ent\ H_2S}(gr/m^3) = \frac{3100 * 10^{-6} \text{ lt } H_2S}{\text{lt biogás}} * \frac{1000 \text{ lt biogás}}{1 \text{ m}^3 \text{ biogás}} * \frac{1 \text{ mol } H_2S}{24,85 \text{ lt } H_2S} * \frac{34,1 \text{ gr } H_2S}{1 \text{ mol } H_2S}$$

$$= 4,254 \text{ g/m}^3$$

$$C_{sal\ H_2S}(gr/m^3) = \frac{200 * 10^{-6} \text{ lt } H_2S}{\text{lt biogás}} * \frac{1000 \text{ lt biogás}}{1 \text{ m}^3 \text{ biogás}} * \frac{1 \text{ mol } H_2S}{24,85 \text{ lt } H_2S} * \frac{34,1 \text{ gr } H_2S}{1 \text{ mol } H_2S}$$

$$= 0,274 \text{ g/m}^3$$

$$Q_{H_2S} = \frac{4468,84 \text{ m}^3}{\text{día}} * \left(4,254 \frac{\text{g}}{\text{m}^3} - 0,274 \frac{\text{g}}{\text{m}^3} \right) * \frac{1 \text{ día}}{24 \text{ horas}} = 741,10 \text{ g } H_2S/\text{hora}$$

- **CANTIDAD DE OXIDO DE OXIDO DE HIERRO NECESARIO**

Para la desulfuración del biogás se utilizarán un material granular sólido con óxido de hierro como principal ingrediente activo. Las principales características de este material, se detallan en la siguiente tabla:

Tabla 7.10. Características de pellets de óxido de hierro.

Característica	Valor
Densidad aparente	0,75-0,85 kg/L
Densidad de partícula	1370 kg/m ³
Diámetro	4,5 mm
Longitud	6 mm
Contenido de óxido de hierro	45 %

Fuente: Datos enviados por el proveedor



Ilustración 7.5. Pellets de óxido de hierro. Fuente: Enviado por proveedor

El primer paso para estimar la cantidad de óxido de hierro requerida, es definir la vida útil del filtro hasta ser regenerado. Generalmente, se diseñan para una vida útil de 3 meses a 1 año. Hay que tener en cuenta, que cuanto más tiempo de vida útil se asigne, las dimensiones de la torre serán mayores. En este caso, se define una vida útil de 90 días antes de la primera regeneración.

La cantidad de óxido de hierro necesario, se calcula por estequiometría, en base a la siguiente reacción:



$$Q_{Fe_2O_3} = Q_{H_2S} * \frac{PM_{Fe_2O_3}}{PM_{H_2S}} * \frac{1 \text{ mol } Fe_2O_3}{3 \text{ mol } H_2S} \quad (29)$$

Donde:

$Q_{Fe_2O_3}$ es el caudal de óxido de hierro en g/hora

$PM_{Fe_2O_3}$ es el peso molecular del óxido de hierro en g/mol = 159,69 g/mol

PM_{H_2S} es el peso molecular del sulfuro de hidrógeno en g/mol = 34,1 g/mol

$$Q_{Fe_2O_3} = (741,10 \text{ g } H_2S/hora) * \frac{159,69 \text{ g } Fe_2O_3/mol \text{ } Fe_2O_3}{34,1 \text{ g } H_2S/molH_2S} * \frac{1 \text{ mol } Fe_2O_3}{3 \text{ mol } H_2S}$$

$$= 1156,86 \text{ g } Fe_2O_3/hora$$

Como el material contiene un 45% de óxido de hierro, la masa necesaria de pellets será la siguiente:

$$Masa_{pellets} = Q_{Fe_2O_3} * 90 \text{ días} * \frac{24 \text{ horas}}{1 \text{ día}} * \frac{1 \text{ kg}}{1000 \text{ g}} * \frac{1}{0,45} \quad (30)$$

Donde

$Masa_{pellets}$ es la masa necesaria de pellets de Fe_2O_3 en kilogramos

Reemplazando:

$$Masa_{pellets} = \frac{1156,86 \text{ } Fe_2O_3}{hora} * 90 \text{ días} * \frac{24 \text{ horas}}{1 \text{ día}} * \frac{1 \text{ kg}}{1000 \text{ g}} * \frac{1 \text{ g pellets}}{0,45 \text{ g } Fe_2O_3}$$

$$= 5552,94 \text{ kg } Fe_2O_3$$

- CAUDAL DE AGUA GENERADO:

Utilizando la ecuación número 29, se estima el caudal de agua generada durante la reacción:

$$Q_{Fe_2O_3} = \left(741,10 \text{ g } \frac{H_2S}{hora}\right) * \frac{24 \text{ horas}}{1 \text{ día}} * \frac{1 \text{ mol } H_2S}{102,3 \text{ g } H_2S} * \frac{3 \text{ moles } H_2O}{3 \text{ moles } H_2S} * \frac{18 \text{ g } H_2O}{1 \text{ mol } H_2O} * \frac{1 \text{ L}}{1000 \text{ g}}$$

$$= 3,13 \text{ Lt } H_2O/día$$

Este caudal de agua se dirige por gravedad hacia el fondo de la columna, donde se encuentra un purgador, conectado a una tubería de PVC, la cual dirige el agua hacia el desagüe.

- DIMENSIONES

Para el cálculo de las dimensiones geométricas de la columna, se debe tener en cuenta las siguientes condiciones para asegurar una correcta operación:

Tabla 7.11. Condiciones de operación

Parámetro	Rango	Unidades
Tiempo de contacto (t) ¹	>60	[segundos]
Velocidad Superficial (v_s) ²	0,05 - 5	[m/s]
Relación Longitud/Diámetro ¹	≥ 3	
Caída de presión ³	0,1-5	PSI

¹Fuente: RedBioLac, Segunda Edición, 2018 (<http://redbiolac.org/publicaciones/>)

²Datos Brindados por el proveedor.

³<http://mvseer.com/technologies/h2s-removal-media/>

Volumen:

El volumen de la columna se obtiene multiplicando la masa de pellets de óxido de hierro por la densidad aparente del material. Esta densidad es el cociente entre la masa de producto y el volumen aparente del mismo, es decir, incluye los huecos entre las partículas sólidas.

$$V_{Lecho} = Masa_{Fe_2O_3} * \rho_{Fe_2O_3} = 5552,94 \text{ kg } Fe_2O_3 * \frac{1 \text{ L } Fe_2O_3}{0,85 \text{ kg } Fe_2O_3} * \frac{1 \text{ m}^3}{1000 \text{ L}} = 6,5 \text{ m}^3$$

Área:

El área del cilindro se calculará suponiendo que la velocidad del biogás no varía a lo largo de la columna, a través de la siguiente ecuación:

$$A_{Lecho} = \frac{Q_{biogás}}{v_s}$$

Definiendo una velocidad superficial de 0,06 m/s:

$$A_{Lecho} = \frac{\frac{4468,84 \text{ m}^3}{\text{día}} * \frac{1 \text{ día}}{86400 \text{ s}}}{0,06 \text{ m/s}} = 0,86 \text{ m}^2$$

Diámetro:

Teniendo en cuenta que el área transversal de la columna es un círculo

$$D = \sqrt{\frac{A_{Lecho} * 4}{\pi}} = \sqrt{\frac{1,03 \text{ m}^2 * 4}{\pi}} = 1,05 \text{ m}$$

Longitud:

$$H_{Lecho} = \frac{V_{Lecho}}{A_{Lecho}} = \frac{7,3 \text{ m}^3}{1,15 \text{ m}^2} = 7,58 \text{ m}$$

Se procede a verificar que se cumplan con los parámetros establecidos para un correcto funcionamiento:

$$t = \frac{H_{Lecho}}{v_s} = \frac{6,76 \text{ m}}{0,06 \text{ m/s}} = 126 \text{ segundos}$$

Como es mayor a 60 segundos, se garantiza que tiene el suficiente tiempo de contacto.

$$\frac{Longitud}{Diámetro} = \frac{7,58 \text{ m}}{1,05 \text{ m}} = 7,2$$

Como es mayor a 3, se cumple la condición entre la relación del diámetro y la longitud, logrando un correcto flujo del biogás por la torre.

Longitud total de la columna:

La longitud total de la torre, debe incluir un espacio adicional por debajo y por encima del lecho de óxidos de hierro, para contener el soporte del lecho, para los sistemas de distribución y desconexión de la corriente de gas, y para el acceso físico al lecho. En este caso, se dejó 0,50 metros de cada lado.

$$L_{total} = H_{Lecho} + 1 \text{ m} = 7,58 \text{ m} + 1 \text{ m} = 8,58 \text{ m}$$

En la siguiente tabla, se resumen todas las dimensiones de la torre:

Tabla 7.12. Dimensiones de las columnas de adsorción

Dimensión	Valor
Altura del lecho	7,58 m
Altura total de la torre	8,58 m
Diámetro	1,05 m

Regeneración de la torre

El material adsorbente, se regenera mediante la inyección de aire, a través de la siguiente reacción:



Este proceso es altamente exotérmico por lo que la temperatura debe ser monitoreada. La regeneración del lecho no es 100% eficiente. Con cada regeneración se disminuye hasta un 30% de la vida útil del lecho⁶. Además, el apelmazamiento del azufre elemental en el lecho limita la cantidad de veces que el lecho puede ser regenerado. Se recomienda cambiar el relleno del lecho luego de la segunda o tercera regeneración.⁷

La operación para la regeneración debe cumplir las siguientes condiciones:

- Velocidad espacial del aire dentro del rango de 0,50 a 140 h⁻¹
- Presión atmosférica
- Temperatura: 30-60°C. Nunca superar los 80°C

El aire atmosférico ingresará a la columna por la parte superior con la ayuda de un soplador. Debido a que se recomienda que la regeneración sea lenta y controlada, se tomará como velocidad para el diseño del caudal de aire, una velocidad espacial baja dentro del rango recomendado y se pondrá especial atención en los sensores de temperatura. Si los sensores, marcan una temperatura superior a 60°C, se reducirá inmediatamente el caudal de ingreso de aire hasta que la temperatura se estabilice nuevamente. Se recomienda evitar el uso del agua para el control de temperatura ya que arruina el lecho.

Para calcular la cantidad de aire necesario para regenerar la torre, primero se debe conocer la cantidad de Fe₂S₃ que se genera mediante *Reacción 2*:

$$M_{Fe_2S_3} = Q_{Fe_2O_3} * \frac{1}{PM_{Fe_2O_3}} * \frac{mol\ Fe_2S_3}{mol\ Fe_2O_3} * PM_{Fe_2S_3} * 90\ días$$

Siendo

$M_{Fe_2O_3}$ la masa de óxido de hierro generada en kg

$PM_{Fe_2S_3}$, peso molecular del sulfuro férrico igual a 0,20787 kg/mol

$PM_{Fe_2O_3}$ el peso molecular del óxido de hierro igual a 0,15969 kg/mol

$M_{Fe_2S_3}$ la masa de sulfuro férrico generada en kg

Reemplazando:

$$M_{Fe_2S_3} = \frac{1156,86\ g\ Fe_2O_3}{hora} * \frac{24\ horas}{1\ día} * \frac{1\ mol\ Fe_2O_3}{159,69\ g\ Fe_2O_3} * \frac{1\ mol\ Fe_2S_3}{1\ mol\ Fe_2O_3} * \frac{207,87\ g\ Fe_2S_3}{1\ mol\ Fe_2S_3} * 90\ días = 3.252.740\ g\ Fe_2S_3 = 3252,74\ kg\ Fe_2S_3$$

Con este valor, se puede calcular la cantidad de aire necesario en la torre para ser regenerado a través de la *Reacción 3*:

$$M_{aire} = M_{Fe_2S_3} * \frac{1}{PM_{Fe_2S_3}} * \frac{3\ mol\ O_2}{2\ mol\ Fe_2S_3} * \frac{1\ mol\ aire}{0.21\ mol\ O_2} * \frac{V_{mol}}{1\ mol\ aire} * 1,1 \quad (31)$$

Donde

M_{aire} , es la masa de aire en kg

V_{mol} , es el volumen de un mol de aire, a 30°C y 1 atm, utilizando la ecuación de los gases ideales igual a 0,0248 m³

1,1, es un factor de seguridad, teniendo en cuenta que la reacción no es 100% eficiente.

Reemplazando:

⁶ <https://www.varec-biogas.com/>

⁷ <https://cdn.sare.org/wp-content/uploads/20190103164430/3a-Iron-Sponge-basics.pdf>

$$V_{aire} = 3.252.740 \text{ g } Fe_2S_3 * \frac{1 \text{ mol } Fe_2S_3}{207,87 \text{ g } Fe_2S_3} * \frac{3 \text{ mol } O_2}{2 \text{ mol } Fe_2S_3} * \frac{1 \text{ mol aire}}{0,21 \text{ mol } O_2} * \frac{0,0248 \text{ m}^3}{1 \text{ mol aire}} * 1,1$$

$$= 3054,77 \text{ m}^3$$

Teniendo en cuenta el rango de velocidad espacial recomendado (0,50 a 140 h-1), se elegirá una velocidad baja con el fin de evitar el incendio del lecho:

$$t_{reg} = \frac{V_{aire} (m^3)}{V_{lecho}(m^3) * v_e \left(\frac{1}{h}\right)}$$

Donde:

t_{reg} , es el tiempo de regeneración

V_{lecho} , es el volumen del lecho

v_e , es la velocidad espacial

Reemplazando:

$$t_{reg} = \frac{3054,77 \text{ m}^3}{6,5 \text{ m}^3 * 1,5 \text{ h}} = 443 \text{ horas} = 19 \text{ días}$$

El lecho se regenerará durante 25 días, por lo tanto, el soplador deberá ser capaz de proveer el siguiente caudal de aire:

$$Q_{aire} = \frac{V_{aire}}{t_{reg}} = \frac{3054,77 \text{ m}^3}{443 \text{ h}} = \frac{9,8 \text{ m}^3 \text{ aire}}{\text{hora}}$$

Tener en cuenta que este tiempo es estimativo, ya que en caso de que se eleve la temperatura, se disminuirá el caudal de aire y la columna se regenera de forma más lenta.

DIAS DE FUNCIONAMIENTO

Teniendo en cuenta que por cada regeneración el tiempo de vida del lecho disminuye un 30% y que se regenerará el lecho solo 3 veces:

Tabla 7.13 Tiempo de funcionamiento de la columna

ETAPAS	Días de funcionamiento Columna 1	Días de funcionamiento Columna 2
1era etapa	90	90
2da etapa (después de la 1º regeneración)	63	63
3 etapa (después de la 2º regeneración)	44	44
4 etapa (después de la 3º regeneración)	31,5	31,5
TOTAL, DE DÍAS DE FUNCIONAMIENT	456 DÍAS	

Las columnas por lo tanto funcionarán un total de 456 días, luego se deberá cambiar el relleno de ambas columnas.

Para realizar el recambio, se recomienda rociar con agua todo el material de relleno para evitar que se eleve la temperatura del lecho en contacto con el aire. Luego se abrirá la boca de entrada ubicada en la parte inferior, y se procederá a quitar el material gastado.

En cuanto a la disposición final de los pellets agotados, estos se consideran sólidos inflamables por lo que deberán ser tratados como un residuo peligroso según la legislación nacional.

PERDIDA DE CARGA

La pérdida de carga en el lecho, se calcula mediante la ecuación de Ergun:

$$\Delta P_{lecho} = (P_1 - P_2) = \frac{150 * \mu * v * \Delta L * (1 - \varepsilon)^2}{(\varnothing * D_p)^2 * \varepsilon^3} + \frac{1,75 * \rho * v^2 * \Delta L * (1 - \varepsilon)}{\varnothing * D_p * \varepsilon^3} \quad (32)$$

Donde:

P_1 y P_2 son las presiones de entrada y salida del lecho respectivamente en Pa

L, es la longitud del lecho en partículas (m)

μ , es la viscosidad del fluido (kg/m.s)

v , es la velocidad media del fluido (m/s)

ε , es la porosidad del lecho

ρ , es la densidad del fluido a través de lecho (kg/m³)

D_p es el diámetro equivalente de partículas que constituyen el lecho (m)

\varnothing , factor de esfericidad igual a 0,8487. Este dato se obtuvo por interpolación entre $h=d$ y $h=2d$ de la siguiente tabla:

Tabla 7.14. Esfericidad de partículas

Forma de la partícula	Esfericidad
Esfera	1
Cubo	0,81
Cilindros	
$h = d$	0,87
$h = 5d$	0,70
$h = 10d$	0,58
Discos	
$h = d/3$	0,76
$h = d/6$	0,60
$h = d/10$	0,47
Arena de playa	Tan alta como 0,86
Arena de río	Tan baja como 0,53
Distintos tipos de arena	0,75
Sólidos triturados	0,5 - 0,7
Partículas granulares	0,7 - 0,8
Trigo	0,85
Anillos Raschig	0,26 - 0,53
Sillas Berl	0,30 - 0,37

Fuente: <https://es.slideshare.net/angiee1995/lechos-porosos-49605331>

La ecuación de Ergun por sí misma no considera los cambios a lo largo del tiempo en el diámetro de las partículas y la fracción de huecos del lecho, como ocurre en el proceso de captura de H₂S utilizando adsorbentes sólidos. Estos dos parámetros influyen notablemente en el aumento de la caída de presión. Trabajos de investigación realizados, revelan que estos dos aspectos pueden hacer que la caída de presión dentro de la torre aumente hasta un 60% del valor inicial. (Carrasco, Avila, Viloria, & Ricaurte, 2021). Por lo tanto, al valor calculado con la ecuación de Ergun, se lo multiplicara por un factor de 1,60.

Datos necesarios de la corriente de gas

Tabla 7.15. Parámetros del biogás utilizados para el cálculo de la caída de presión

Densidad ¹	0,8 kg/m ³
Viscosidad ²	0,00001984 kg/m.s

¹Calculado en anexo I

² https://e-archivo.uc3m.es/bitstream/handle/10016/23542/TFG_Jorge_Cuesta_Lopez.pdf?sequence=1&isAllowed=y

Cálculo de ε:

$$\varepsilon = \frac{\text{Volumen de huecos en el lecho}}{\text{Volumen total del lecho}} = \frac{V \text{ total del lecho} - V \text{ que ocupan las partículas}}{\text{Volumen total del lecho}}$$

Por lo tanto:

$$\varepsilon = 1 - \frac{\text{Volumen que ocupan las partículas}}{\text{Volumen total del lecho}}$$

$$\varepsilon = 1 - \frac{4248 \text{ kg}}{1370 \text{ kg/m}^3 \cdot 5 \text{ m}^3} = 0,38$$

Cálculo del diámetro equivalente:

El diámetro de las partículas se calcula a través de la siguiente ecuación:

$$D_p = \frac{6}{a_s} \tag{33}$$

Donde a_s es la superficie específica, igual a:

$$\begin{aligned} a_s &= \frac{\text{area de particula}}{\text{volumen de particula}} = \frac{2 * \pi * r^2 + 2 * \pi * r * l}{\pi * r^2 * l} \\ &= \frac{2 * \pi * (0,002 \text{ m})^2 + 2 * \pi * 0,002 \text{ m} * 0,006 \text{ m}}{\pi * (0,002 \text{ m})^2 * 0,006 \text{ m}} = 1333,33 \text{ m}^{-1} \\ D_p &= \frac{6}{1000 \text{ m}^{-1}} = 0,0045 \text{ m} \end{aligned}$$

Reemplazando todos los valores calculados en la ecuación (32):

$$\begin{aligned} \Delta P_{lecho} &= \frac{150 * \frac{1,984 * 10^{-5} \text{ kg}}{\text{m.s}} * \frac{0,06 \text{ m}}{\text{s}} * 7,58 \text{ m} * (1 - 0,38)^2}{(0,8487 * 0,0045 \text{ m})^2 * 0,38^3} \\ &+ \frac{1,75 * \frac{0,8 \text{ kg}}{\text{m}^3} * \left(\frac{0,06 \text{ m}}{\text{s}}\right)^2 * 7,58 \text{ m} * (1 - 0,38)}{0,8487 * 0,0045 \text{ m} * 0,38^3} = 766,55 \text{ Pa} \end{aligned}$$

Se procede a multiplicar el valor calculado por el factor de 1,60:

$$\Delta P_{lecho} = 766,54 * 1,60 = 1226,48$$

Se debe verificar que la misma esté dentro del rango mencionado en la tabla

$$1226,46 \text{ Pa} * \frac{1 \text{ PSI}}{6894,76 \text{ Pa}} = 0,18 \text{ PSI}$$

Por lo tanto, se verifica que se encuentra dentro del rango recomendado.

ENERGÍA TÉRMICA REQUERIDA

La energía térmica generada será utilizada para la calefacción del biodigestor de la planta y proporcionarle una temperatura óptima de 35° C durante todo el año.

Para el dimensionamiento del sistema de calefacción, se necesitan las dimensiones del biodigestor y las temperaturas menos favorables en las que opera el mismo.

Mes	Temperatura promedio mínima
Junio	7,1 °C
Julio	6,8 °C
Agosto	7,3 °C

Fuente: <https://www.weather-arg.com/es/argentina/parana-clima>

$$T_{\text{exterior}} = \frac{7,1^{\circ}\text{C} + 6,8^{\circ}\text{C} + 7,3^{\circ}\text{C}}{3} = 7,1^{\circ}\text{C}$$

Los sistemas de calefacción empleados en plantas de biogás se clasifican según distintas configuraciones:

- Pre calentamiento en la entrada
- Calentamiento por recirculación
- Calentamiento interno
- Calentamiento por agitación
- Calentamiento por corriente gaseosa

Para esto se utilizan intercambiadores de calor. Los más utilizados son:

- Doble tubo
- De placas
- De carcasa y tubos
- Espirales

DIMENSIONAMIENTO DEL INTERCAMBIADOR DE CALOR

El dimensionado del intercambiador de calor se hará a través del método logarítmico de temperaturas.

Para ello, se deben realizar los siguientes pasos:

- 1) Seleccionar el tipo de intercambiador apropiado para la aplicación.
- 2) Velocidad de transferencia de calor mediante balance de energía
- 3) Calcular el incremento de temperatura medio logarítmico
- 4) Obtener, seleccionar o calcular el coeficiente de transferencia global de calor U.
- 5) Calcular el área superficial
- 6) Seleccionar un intercambiador de área superficial igual o mayor a la calculada.

SELECCIÓN DEL INTERCAMBIADOR

Se tendrán en cuenta para la elección del intercambiador los siguientes factores:

- Temperatura de trabajo y estado de los fluidos (líquido, gaseosos)
- Presiones de las corrientes y pérdidas de presión admisibles
- Caudales de fluidos
- Posibilidad de ensuciamiento del aparato
- Acción corrosiva de los fluidos
- Espacio disponible para la instalación

Para el presente proyecto se seleccionó un intercambiador de calor externo de tubos concéntricos o doble tubo, con flujo en contracorriente, debido a que estos son especialmente recomendados para procesar corrientes de alto ensuciamiento con lodos sedimentables por la facilidad con la que se limpian.

Estos intercambiadores son los más sencillos que existen. Están constituidos por dos tubos concéntricos de diámetros diferentes. Uno de los fluidos fluye por el interior del tubo de menor diámetro y el otro fluye por el espacio anular entre los dos tubos.

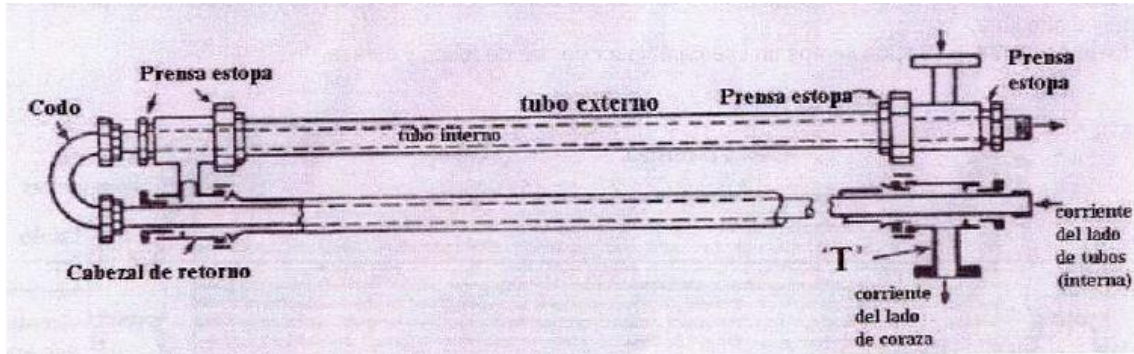


Ilustración 7.6 Intercambiador de calor doble tubo

Fuente:

http://www.webaero.net/ingenieria/equipos/Estaticos/Intercambiadores%20de%20calor/Bibliografia_Documentacion/prevvisualizacion/prev_Apunte%20modernos%20sobre%20intercambiadores%20de%20calor.pdf

El intercambiador está formado por varias unidades como las mostradas en el esquema. Cada una de ellas se llama “horquilla” y se arma con un tubo roscado común y corriente.

El mismo, se colocará a la entrada del biodigestor, donde el fluido caliente, será el agua que proviene de la unidad CHP, mientras que el fluido frío, corresponde a los lodos generados en la planta de tratamiento de efluentes.

Las dimensiones y características de los tubos para estos intercambiadores, están dadas por la codificación IPS, y el espesor está dado por el número de catálogo (cedula):

Las configuraciones más utilizadas incluyen tubos de acero al carbono, de longitud efectiva (es decir, la longitud de tubo empleada en una horquilla es igual al doble de la longitud de cada tubo) de 1,5 a 12 metros, mientras que las más comunes son 12, 15 y 20 pies, con las siguientes combinaciones de diámetros:

Tabla 7.16. Diámetro de los tubos de un intercambiador de calor

Diámetro tubo externo (pulgadas)	Diámetro tubo interno (pulgadas)				
2	3/4	1	1 1/4		
2 1/2	3/4	1	1 1/4		
3	3/4	1	1 1/4	1 1/2	2
4	3/4	1	1 1/4	1 1/2	2

<http://www1.frm.utn.edu.ar/electromecanica/materias%20pagina%20nuevas/INSTALACIONES%20TERMICAS%20MECANICAS%20Y%20FRIGORIFICAS/material/apuntes/INTERCAMBIADOR%20%202018.pdf>

CALCULO DE LA VELOCIDAD DE TRANSFERENCIA DE CALOR

Las necesidades de energía en forma de calor de un biodigestor vienen dadas por la cantidad de calor necesario para:

- Aumentar la temperatura del sustrato hasta la temperatura de proceso (35°C) previa alimentación al digestor.

- Compensar las pérdidas de calor que se producen a través de las paredes, fondo y cubierta del biodigestor.

Para el cálculo del calor se realizará un balance de energía a un volumen de control que encierra la totalidad del intercambiador, para un flujo estacionario, teniendo en cuenta las siguientes condiciones:

- No se realiza trabajo externo
- No se transfiere calor al sistema si el intercambiador está bien aislado
- Los cambios de energía cinética y potencial suelen ser insignificante

El balance queda de la siguiente manera:

$$0 = Q_{req} - \sum Q_{perdidas} - Q_{sustrato} \quad (34)$$

Donde:

$Q_{perdidas}$, son las pérdidas de calor en las paredes, cubierta y fondo del biodigestor

$Q_{sustrato}$, es el calor necesario para aumentar la temperatura del sustrato

Q_{req} , es el calor necesario que se requiere.

Para el cálculo de las distintas pérdidas se utilizará la siguiente ecuación:

$$Q_{perdidas} = U \cdot A \cdot \Delta T \quad (35)$$

Donde:

U , es el coeficiente global de transmisión térmica del material (Kcal/h.m².°C)

A , es el área a través de la cual se produce la pérdida de calor (m²)

ΔT , es la diferencia de temperaturas entre el interior y el exterior del volumen de control. (°C)

El coeficiente global de transmisión de calor viene determinado por la siguiente expresión:

$$\frac{1}{U} = \frac{1}{h_1} + \frac{e_1}{k_1} + \dots + \frac{e_n}{k_n} + \frac{1}{h_2} \quad (36)$$

Donde:

h_1 y h_2 son los coeficientes de transferencias térmicos entre diferentes medios (Kcal/h.m².°C)

k_n son los coeficientes de conducción de calor (Kcal/h.m.°C)

e , es el espesor de las paredes/membranas

Para el diseño en biodigestores, se adoptan los siguientes valores (Hernandez, 1997):

Tabla 7.17. Coeficiente de transferencias térmicos entre diferentes medios

Superficie en contacto	Coeficiente h (kcal/h.m ² °C)
Pared-Fango	300
Pared-Aire	20
Pared-Suelo	50
Membrana-Aire	8,04

Tabla 7.18. Coeficiente de conducción de calor para distintos materiales

Material de construcción	Coeficiente k (kcal/h.m°C)
Hormigón armado	1,4

Hormigón en masa	1,1
Espuma de poliuretano	0,02
Aire	0,02
Ladrillo	0,35
Membrana	0,43

Tabla 7.19. Material de construcción del biodigestor

Material de construcción	Espesor (m)
Hormigón armado	0,3
Membrana	0,003

Además, se deben tener en cuenta las dimensiones del biodigestor:

Diámetro (m)	7
Altura (m)	10

Para el cálculo del calor necesario para aumentar la temperatura del sustrato ($Q_{sustrato}$), se utiliza la siguiente ecuación:

$$Q_{sustrato} = C_{Masa} * C_p * \Delta T \quad (37)$$

Donde:

C_{Masa} , es el caudal másico de lodos (kg/día)

C_p , es el calor específico de los lodos (KJ/kg.K)

ΔT , diferencia de temperatura a la entrada y salida del volumen de control (intercambiador)

Pérdidas de calor en las paredes del digestor

Se calcula primero la superficie de intercambio, teniendo en cuenta que en este caso el área es la de un cilindro:

$$A_{pared} = 2\pi \cdot r \cdot h = 2\pi \cdot (3,5 \text{ m}) \cdot (10 \text{ m}) = 219,80 \text{ m}^2$$

r = radio del biodigestor = 3,5 m

h = altura del biodigestor = 10 m

Luego, con la ecuación nº (36) se calcula el coeficiente global de transmisión térmica del material (U)

$$U_{pared} = \frac{1}{\frac{1}{h_{aire}} + \frac{e_{hormigón}}{k_{hormigón}} + \frac{1}{h_{fangos}}}$$

Reemplazando los valores de la tabla:

$$U_{pared} = \frac{1}{\frac{1}{20 \text{ kcal/h.m}^2.\text{°C}} + \frac{0,3 \text{ m}}{1,4 \text{ kcal/h.m}.\text{°C}} + \frac{1}{300 \text{ kcal/h.m}^2.\text{°C}}} = 3,74 \text{ kcal/h.m}^2.\text{°C}$$

Finalmente, se calcula mediante la ecuación (35), la pérdida de calor:

$$q_{pared} = (3,74 \text{ kcal/h.m}^2.\text{°C}) * (219,80 \text{ m}^2) * (35\text{°C} - 7,1\text{°C}) = \mathbf{22942,11 \text{ kcal/hora}}$$

Pérdidas de calor en el fondo del digestor:

Primero se calcula la superficie de intercambio, teniendo en cuenta que el área se representa con un círculo:

$$A_{pared} = \pi \cdot r^2 = \pi \cdot (3,5 \text{ m})^2 = 38,46 \text{ m}^2$$

Luego, con la ecuación nº (36) se calcula el coeficiente global de transmisión térmica del material (U)

$$U_{fondo} = \frac{1}{\frac{1}{h_{suelo}} + \frac{e_{hormigón}}{k_{hormigón}} + \frac{1}{h_{fangos}}}$$

$$U_{fondo} = \frac{1}{\frac{1}{50 \text{ kcal/h.m}^2.\text{°C}} + \frac{0,3 \text{ m}}{1,4 \text{ kcal/h.m}.\text{°C}} + \frac{1}{300 \text{ kcal/h.m}^2.\text{°C}}} = 4,21 \text{ kcal/h.m}^2.\text{°C}$$

Finalmente, se calcula mediante la ecuación (35), la pérdida de calor:

$$q_{fondo} = (4,21 \text{ kcal/h.m}^2.\text{°C}) * (38,46 \text{ m}^2) * (35\text{°C} - 7,1\text{°C}) = \mathbf{4521,76 \text{ kcal/hora}}$$

Pérdidas de calor por la cubierta:

Primero se calcula la superficie de intercambio, teniendo en cuenta que el área se representa con un medio círculo:

$$A_{pared} = 2 \cdot \pi \cdot r^2 = 2 \cdot \pi \cdot (3,5 \text{ m})^2 = 76,93 \text{ m}^2$$

Luego, con la ecuación nº (36) se calcula el coeficiente global de transmisión térmica del material (U)

$$U_{fondo} = \frac{1}{\frac{1}{h_{aire}} + \frac{e_{membrana}}{k_{membrana}} + \frac{1}{h_{aire}}}$$

$$U_{fondo} = \frac{1}{\frac{1}{8,04 \text{ kcal/h.m}^2.\text{°C}} + \frac{0,003 \text{ m}}{0,43 \text{ kcal/h.m}.\text{°C}} + \frac{1}{8,04 \text{ kcal/h.m}^2.\text{°C}}} = 3,91 \text{ kcal/h.m}^2.\text{°C}$$

Finalmente, se calcula mediante la ecuación (35), la pérdida de calor:

$$q_{fondo} = (3,91 \text{ kcal/h.m}^2.\text{°C}) * (76,93 \text{ m}^2) * (35\text{°C} - 7,1\text{°C}) = \mathbf{8402,93 \text{ kcal/hora}}$$

- Pérdidas totales en el biodigestor:

$$\sum Q_{perdidas} = \frac{22942,11 \text{ kcal}}{\text{hora}} + \frac{4521,76 \text{ kcal}}{\text{hora}} + \frac{8402,93 \text{ kcal}}{\text{hora}} = \mathbf{35866,79 \text{ kcal/hora}}$$

$$\sum Q_{perdidas} = \frac{35866,79 \text{ kcal}}{\text{hora}} * \frac{4,184 \text{ KJ}}{1 \text{ kcal}} * \frac{1 \text{ kW.s}}{1 \text{ KJ}} * \frac{1 \text{ hora}}{3600 \text{ s}} = \mathbf{41,69 \text{ kW}}$$

Demanda de calor del sustrato

Para el cálculo de la demanda de calor del sustrato, se realiza la aproximación de utilizar como propiedades de los lodos, las propiedades del agua a la misma temperatura. Se realiza esta aproximación ya que, no se disponen datos de calor específico y densidad de los lodos para distintas temperaturas, y además el error de aproximación no es apreciable ya que los lodos están formados en su mayor parte por agua.

Tabla 7.20. Propiedades del agua a diferentes temperaturas

Temperatura (°C)	Densidad (kg/m ³)	Capacidad calorífica C _p (KJ/kg.K)
5	1005	4,201
10	1003	4,191
15	1001	4,184
20	999,5	4,180
25	999,9	4,176
30	996,2	4,175
35	994,3	4,174
40	992,4	4,174
45	990,3	4,175
50	988,1	4,177
55	985,7	4,179
60	983,2	4,182
65	980,6	4,184
70	977,9	4,191
80	971,9	4,195
85	968,8	4,199
90	965,5	4,204
95	962,1	4,209
100	958,5	4,214

Fuente: S.A. Klein y F.L. Alvarado, “Engineering Equation Solver Software (EES)”, Academia Versión 6.271 (20-07-2001).

Para obtener la densidad y el calor específico del sustrato frío, se tomará como dato de entrada a la tabla la temperatura media:

$$T_{m,f} = \frac{T_{F,ent} + T_{F,sal}}{2}$$

Donde

$T_{m,f}$, es la temperatura media del fluido

$T_{F,ent}$, es la temperatura del fluido frío a la entrada del intercambiador igual a 7,1°C

$T_{F,sal}$, es la temperatura del fluido frío a la salida del intercambiador igual a 35°C.

$$T_{m,f} = \frac{35^{\circ}C + 7,1^{\circ}C}{2} = 21,03^{\circ}C$$

Para obtener las propiedades del sustrato se hace interpolación con los datos de la tabla, quedando:

$$\rho_{sustrato} = 999,5 \text{ kg/m}^3$$

$$C_p = \frac{4,181 \text{ KJ}}{\text{kg} \cdot \text{K}}$$

Utilizando la ecuación n° 37:

$$Q_{sustrato} = \frac{28,69 \text{ m}^3}{\text{día}} * \frac{1005,84 \text{ kg}}{\text{m}^3} * \frac{4,195 \text{ kJ}}{\text{kg} \cdot \text{K}} * \frac{1 \text{ kW} \cdot \text{s}}{1 \text{ kJ}} * \frac{1 \text{ día}}{86400 \text{ s}} * (308 \text{ K} - 280,10 \text{ K}) = 38,71 \text{ kW}$$

Despejando de la ecuación número 34, se obtiene el calor requerido por los lados para ingresar al biodigestor:

$$Q_{req} = 38,71 \text{ kW} + 41,69 \text{ kW} = 80,41 \text{ kW}$$

Se multiplica este valor por un coeficiente de seguridad de 1,10:

$$Q_{req} = 80,41 \text{ kW} * 1,10 = \mathbf{88,45 \text{ kW}}$$

Cálculo del caudal másico de agua caliente que circulará por el intercambiador

Para el cálculo del caudal másico de fluido caliente se utilizará la ecuación número 4, teniendo en cuenta los siguientes datos:

- La temperatura a la entrada del intercambiador, será la temperatura del agua a la salida del motor igual a 90°C y la temperatura a la salida del intercambiador, será de 75°C (datos brindados por el proveedor, “BGA Energía”)
- El calor intercambiado, será el calor requerido por el fluido frío igual 82290 W

Despejando:

$$C_{Masa} = \frac{88,45 \text{ kW}}{\frac{4,195 \text{ kJ}}{\text{kg.K}} * (90^\circ - 70^\circ\text{C})} = 1,40 \text{ kg/s}$$

CALCULO DEL INCREMENTO DE TEMPERATURA LOGARITMICA:

La diferencia de temperatura media logarítmica (LMTD) representa la fuerza impulsora de la temperatura para la transferencia de calor. Este concepto se introduce debido al hecho de que el cambio de temperatura que tiene lugar a través del intercambiador de calor desde la entrada a la salida no es lineal.⁸

Su expresión es la siguiente:

$$\Delta T_{ml} = \frac{(T_{C,sal} - T_{F,ent}) - (T_{C,ent} - T_{F,sal})}{\ln\left(\frac{T_{C,sal} - T_{F,ent}}{T_{C,ent} - T_{F,sal}}\right)}$$

$T_{C,sal}$ (°C)	75
$T_{C,ent}$ (°C)	90
$T_{F,ent}$ (°C)	7,1
$T_{F,sal}$ (°C)	35

Reemplazando:

$$\Delta T_{ml} = \frac{(75 - 7,1) - (90 - 35)}{\ln\left(\frac{70 - 7,1}{90 - 35}\right)} = 61^\circ\text{C}$$

CALCULO DEL COEFICIENTE GLOBAL DE TRANSFERENCIA DE CALOR U

En el intercambiado de calor se transfiere del fluido caliente (agua de refrigeración de la unidad CHP) hacia la pared del tubo interno, después a través de la pared por conducción y por último, de la pared hacia el fluido frío (sustrato) de nuevo por convección.

La resistencia térmica total contiene dos resistencias a la convección (externa e interna al tubo) y una a la conducción por el tubo interior del intercambiador.

Combinando todas estas resistencias se obtiene:

$$R_{total} = R_i + R_{pared} + R_o = \frac{1}{h_i * A_i} + \frac{\ln\left(\frac{r_o}{r_i}\right)}{2\pi kL} + \frac{1}{h_o A_o} = \frac{1}{UA} = \frac{1}{U_i A_i} = \frac{1}{U_i A_i}$$

Donde:

h_i y h_o son los coeficientes individuales de convección interior y exterior, respectivamente

⁸ <https://operacionesunitarias1.files.wordpress.com/2011/07/unidad-iv-intercambiadores-de-calor.pdf>

r_i es el radio interno del tubo interno (m)

r_o es el radio externo del tubo interno (m)

Se debe tener en cuenta además una resistencia adicional que representa el ensuciamiento debido a la acumulación de depósitos sobre las superficies de transferencia de calor. Este efecto se representa por un factor de incrustación R_f el cual es una medida de la resistencia térmica inducida.

El efecto de este ensuciamiento hace que la ecuación anterior quede finalmente de la siguiente manera:

$$R = \frac{1}{UA} = \frac{1}{U_i A_o} = \frac{1}{h_i * A_i} + \frac{R_{f,o}}{A_o} + \frac{\ln\left(\frac{r_o}{r_i}\right)}{2\pi k L} + \frac{R_{f,i}}{A_i} + \frac{1}{h_o A_o}$$

Este coeficiente global de intercambio de calor se debe especificar en base al área al cual se aplica. En el caso de los intercambiadores de calor, se utiliza la superficie interior del tubo interno como superficie de referencia. Por lo tanto, el coeficiente global de intercambio de calor referido al área interior queda de la siguiente manera:

$$\frac{1}{U_i} = \frac{1}{h_i} + R_{f,o} * \frac{D_i}{D_o} + \frac{\ln\left(\frac{r_o}{r_i}\right) D_i}{2k} + R_{f,i} + \frac{D_i}{h_o D_o}$$

Donde:

U_i , es el coeficiente global de transferencia de calor referido al área interior (W/m².°C)

h_i , es el coeficiente individual de convección en el lado del fluido frío (interior del tubo interno) en (W/m².°C)

h_o , es el coeficiente individual de convección en el lado del fluido caliente (exterior del tubo interno) en (W/m².°C)

D_i , es el diámetro del tubo interior en metros

D_o , es el diámetro del tubo exterior en metros

A continuación, se hallarán cada uno de los términos de la ecuación.

SELECCIÓN DE DIAMETRO Y ESPESOR DE LOS TUBOS

Para la selección de los diámetros se tendrá en cuenta la siguiente disposición de fluidos:

Tubo interior: fluido frío. (0,331 kg/s)

Anulo: fluido caliente (1,31 kg/s)

Se necesitará entonces que el área del anulo (espacio entre el tubo interior y el exterior) sea mayor que en el interior del tubo, ya que se tiene un caudal mayor. Se seleccionó por lo tanto el siguiente arreglo:

- un diámetro de tubo externo de 2 pulgadas.
- un diámetro de tubo interno de 1 ¼ pulgadas.

De la tabla de dimensiones estándar para un número de cedula intermedia de 40S, se obtienen los siguientes valores:

Tabla 7.21. Dimensiones estándar de los tubos seleccionados

	Tubo interior	Tubo exterior
DN	1 ¼"	2"
Diámetro exterior	42,2 mm	60,3 mm
Espesor	3,56 mm	3,92 mm
Diámetro interior	35,08 mm	52,46 mm

Fuente: <https://www.octalacero.com/dimensiones-de-tubos-cedula-40-80>

CALCULO DEL COEFICIENTE DE PELICULA INTERNA, h_i

Para el cálculo de h_i , se estiman algunas propiedades del fluido a la temperatura media entre la entrada y la salida:

Tabla 7.22. Parámetros de los fluidos a la entrada y salida del intercambiador

Parámetro	Fluido frío (lodos)	Fluido caliente (agua)	Unidades
Caudal másico (m)	0,332	1,40	[kg/s]
Temperatura de entrada (T_{ent})	7,1	90	[°C]
Temperatura de salida (T_{sal})	35	75	[°C]
Temperatura media (T_m)	21,05	82,5	[°C]
Capacidad calorífica media (C_p) ¹	4,181	4,198	[KJ/kg.°C]
Densidad media (ρ) ¹	999,5	970	[kg/m ³]
Viscosidad (μ) ¹	0,000979	0,000346	[kg/m.s]
Coefficiente de conducción de calor (k) ¹	0,000597	0,000673	[kW/m.°C]
Prandlt ($P=C_p \mu/k$)	6,85	2,16	
G (caudal másico)	343,56	1842,42	[Kg/m ² .s]

¹ <http://materias.fi.uba.ar/6731/Tablas/Tabla9.pdf>

El coeficiente de película interna se puede calcular a partir del número de Nusselt, el cual es un número adimensional que mide el aumento de la transmisión de calor desde una superficie por la que un fluido discurre (transferencia de calor por convección) comparada con la transferencia de calor si esta ocurriera solamente por conducción.

$$Nu_L = \frac{\text{Transferencia de calor por convección}}{\text{Transferencia de calor por conducción}} = \frac{h_i D_i}{k}$$

$$h_i = \frac{Nu_L * k}{D_i}$$

El número de Nusselt se puede calcular mediante correlaciones que dependen del tipo de régimen en el que se encuentra el fluido. Por lo tanto, primero se debe calcular el número de Reynolds:

$$Re = \frac{G * D_i}{\mu} = \frac{\left(271,94 \frac{kg}{m^2.s}\right) * (0,03508 m)}{0,000979 \frac{kg}{m.s}} = 12310,83$$

Debido a que Reynolds es mayor a 10000, el régimen es turbulento y por lo tanto se utiliza la siguiente correlación:

$$Nu_d = 0,023 * Re^{\frac{4}{5}} * Pr^n$$

Esta ecuación es válida para flujo turbulento completamente desarrollado y además para Pr entre 0,6 y 160. Cuando la temperatura de salida es mayor a la temperatura media, n es igual a 0,4 y para una temperatura de salida menor a la temperatura media n es igual a 0,3.

Reemplazando los valores correspondientes:

$$Nu_d = 0,023 * 12310,83^{4/5} * 6,85^{0,4} = 92,98$$

Despejando de la ecuación del número de Nusselts

$$h_i = \frac{92,98 * 0,000597 \frac{kW}{m \cdot ^\circ C}}{0,035083 m} = 1,582 \frac{kW}{m^2 \cdot ^\circ C} = 1582 \frac{W}{m^2 \cdot ^\circ C}$$

CALCULO DEL COEFICIENTE DE PELICULA EXTERNO, ho

El cálculo es similar al proceso anterior, con la diferencia que el área es la de un anillo, por lo tanto, se utilizará el diámetro equivalente para el cálculo de Nu y Re.

$$D_{eq} = 4 * r_h = 4 * \frac{\frac{\pi}{4} * (D_i^2 - d_o^2)}{\pi(D_i + d_o)} = \frac{0,05246^2 - 0,0422^2}{0,05246 + 0,0422} = 0,01026 m$$

Se procede a calcular el número de Reynolds para el fluido que circula por la corriente anular de los tubos:

$$Re = \frac{G * D_{eq}}{\mu} = \frac{\left(\frac{1842,42 kg}{m^2 s} \right) * (0,01026 m)}{0,000346 \frac{kg}{m \cdot s}} = 54633,61$$

Para el cálculo del número de Nusselt, en conductos anulares se debe multiplicar al mismo por un factor de corrección. Si la pared está aislada térmicamente y la transferencia de calor se realiza únicamente a través de la pared del tubo interior, el factor de corrección del n° de Nu es:

$$F_c = 0,86 * \left(\frac{d_o}{D_i} \right)^{-0,16} = 0,86 * \left(\frac{0,0422}{0,05246} \right)^{-0,16} = 0,89$$

En este caso, como la temperatura a la salida del fluido es menor que la temperatura media, el exponente “n” para el número de Nusselts es igual a 0.3:

$$Nu_d = 0,89 * 0,023 * 54633,61^{4/5} * 2,16^{0,3} = 159,055$$

Despejando ho:

$$h_o = \frac{159,055 * 0,000673 \frac{kW}{m \cdot ^\circ C}}{0,01026 m} = 10433 \frac{kW}{m^2 \cdot ^\circ C}$$

FACTORES DE ENSUCIAMIENTO

Según varios trabajos realizados con estos tipos de fluidos, se recomiendan los siguientes factores de ensuciamiento⁹:

$$R_{fi} = 0,000252 \frac{W}{m^2 \cdot ^\circ C}$$

$$R_{fo} = 0,00017 \frac{W}{m^2 \cdot ^\circ C}$$

CALCULO DEL COEFICIENTE GLOBAL DE TRANSFERENCIA DE CALOR U

A continuación, se resumen todos los valores que se calcularon y se utilizarán para el cálculo del coeficiente global de transferencia:

Tabla 7.23. Parámetros calculados para la estimación del coeficiente de transferencia de calor U

Parámetro	Valor	Unidades
Coeficiente individual de convección en el interior del tubo (hi)	1582	[W/m2.°C]
Coeficiente individual de convección en el lado anular (ho)	10433	[W/m2.°C]
Diámetro interior del tubo interno (di)	0,03508	[m]

⁹ <http://webdelprofesor.ula.ve/ingenieria/jesusf/OP2-001Def.pdf>

Diámetro exterior del tubo interno (do)	0,0422	[m]
Radio interior del tubo interno (ri)	0,01754	[m]
Radio exterior del tubo interno (ro)	0,0211	[m]
Conductividad térmica del acero de carbono (w)¹	45	[W/m.°C]

¹ <https://jnaceros.com.pe/blog/conductividad-termica-acero-inoxidable/#:~:text=Conductividad%20en%20el%20acero%20al,econ%C3%B3mico%2C%20para%20construir%20componentes%20estructurales.>

Reemplazando estos valores en la ecuación de coeficiente global de transferencia de calor:

$$\frac{1}{U_i} = \frac{1}{\frac{1582 \text{ W}}{\text{m}^2\text{°C}}} + \frac{0,00017 \text{ W}}{\text{m}^2\text{°C}} * \frac{0,03508 \text{ m}}{0,0422 \text{ m}} + \frac{\ln\left(\frac{0,0211 \text{ m}}{0,01754 \text{ m}}\right) * 0,01754 \text{ m}}{2 * \frac{45 \text{ W}}{\text{m}^{\circ}\text{C}}} + \frac{0,000252 \text{ W}}{\text{m}^2\text{°C}}$$

$$+ \frac{0,03508 \text{ m}}{\frac{10433 \text{ W}}{\text{m}^2\text{°C}} * 0,0422 \text{ m}}$$

$$U_i = 849 \text{ W/m}^2\text{°C}$$

Se debe comprobar que este coeficiente calculado, esté dentro de los rangos teóricos para este sistema. Según la bibliografía consultada (Towler & Sinnott, 2012), para un intercambiador de calor de tubos concéntricos, con flujo contracorriente y considerando el sistema agua-agua, el valor del coeficiente global de transferencia de calor, estaría comprendido entre 800-1500 W/m²°C.

CALCULO DEL AREA SUPERFICIAL

A partir de la ecuación de diseño del intercambiador se calculará el área necesaria:

$$Q = U_i A_i \Delta T_{m,l}$$

Despejando:

$$A_i = \frac{Q}{U_i \Delta T_{m,l}} = \frac{88450 \text{ W}}{\frac{849 \text{ W}}{\text{m}^2\text{°C}} * 61\text{°C}} = 1,71 \text{ m}^2$$

Esta área se sobredimensiona multiplicándola por un factor de seguridad igual a 1,20

$$A_i = 1,74 \text{ m}^2 * 1,20 = 2 \text{ m}^2$$

El área de intercambio es igual al área de la pared del tubo interno igual a:

$$A_i = \pi d_i L \quad \rightarrow \quad L = \frac{2 \text{ m}^2}{\pi * 0,03508 \text{ m}} = 18,2 \text{ m}$$

Las configuraciones más utilizadas incluyen tubos de acero de carbono de longitud efectiva (longitud de tubo de una horquilla, igual al doble de la longitud de cada tubo que compone la horquilla) de 12 a 20 pies.

En este caso se selecciona una longitud efectiva de 20 pies (aproximadamente 6 metros), por lo tanto, la longitud de cada tubo será de 3 metros.

El número de horquillas necesarias será la siguiente:

$$N_{\text{Horquillas}} = \frac{18,20 \text{ m}}{3 \text{ m}} = 6 \text{ horquillas}$$

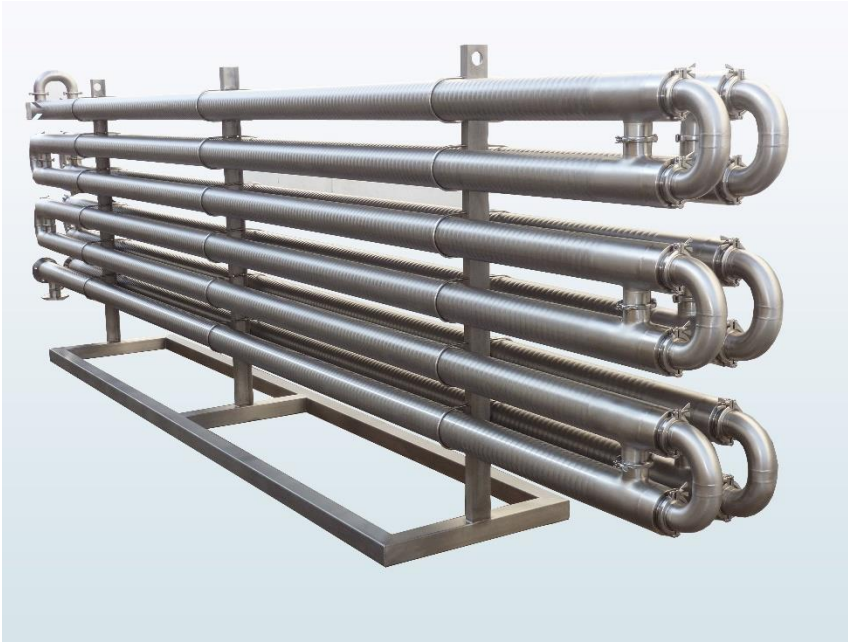


Ilustración 7.7. Intercambiador comercial doble tubo

DISEÑO HIDRÁULICO

A continuación, se describen las líneas de biogás y agua caliente, se definen las conducciones de cada línea, en cuanto a materiales, diámetros y elementos presentes en las mismas.

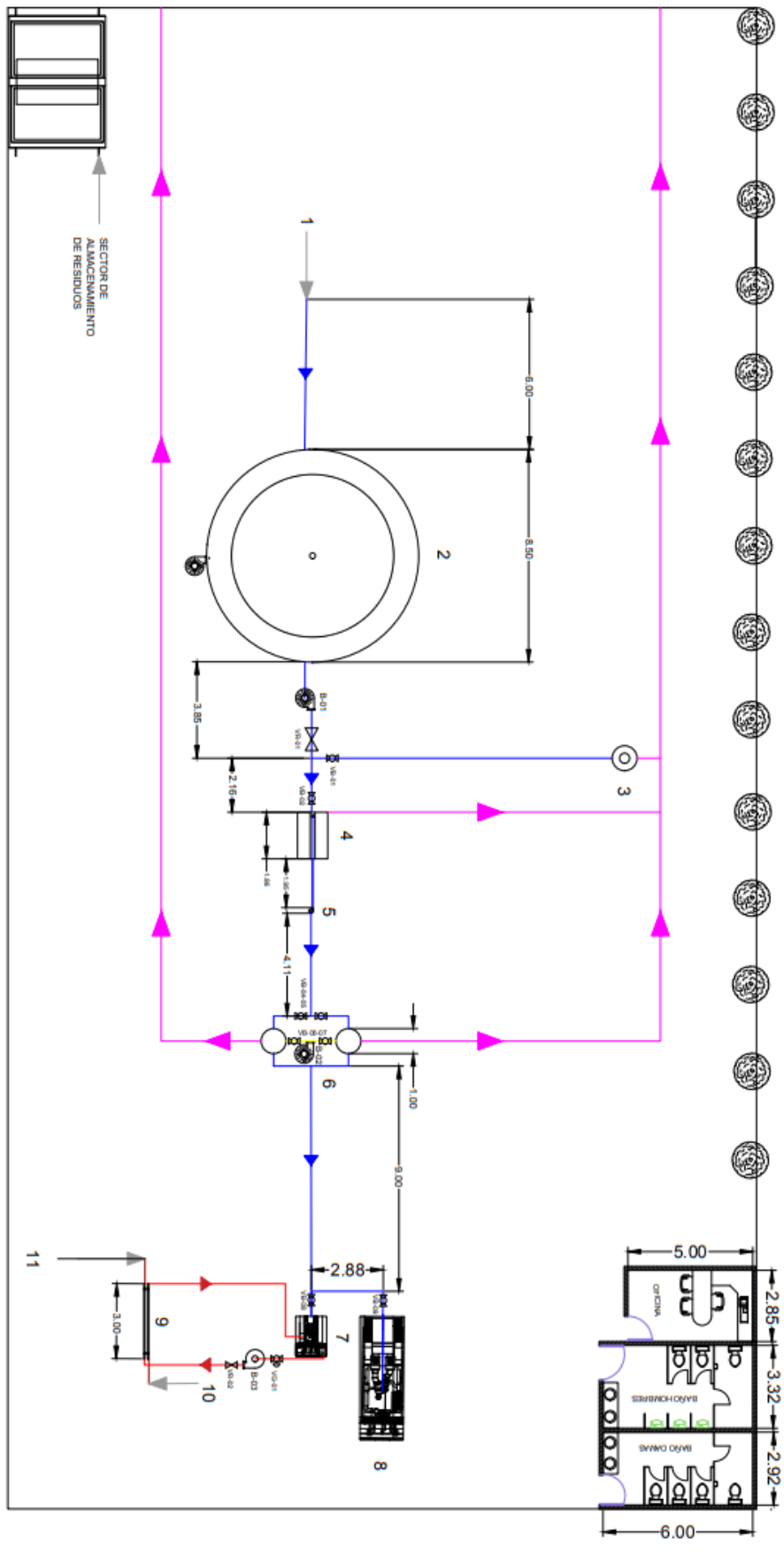










Ilustración 7.8. Vista y disposición de equipos y corrientes en la planta

Tabla 7.24. Referencias vista en planta

Referencias	
	Línea biogás
	Línea agua caliente
	Línea aire de regeneración
	Línea de barros
	
	Válvula de retención
	Válvula de bola
	Válvula de control

Válvulas:

Las válvulas son los dispositivos que regulan o impiden la circulación de fluido por la conducción.

Válvulas de retención: son diseñadas para permitir que el fluido circule en un único sentido. Su apertura se produce debido a la presión del fluido que circula por las conducciones en un determinado sentido. Cuando el flujo se detiene se cierra de forma automática por acción de la gravedad o mediante un resorte en la parte móvil.

En la planta se tienen 3 válvulas de retención: Una en la línea de biogás a la salida del soplador a la salida del gasómetro, la segunda se encuentra a la salida del soplador de la línea de aire de regeneración y la tercera en la línea de agua caliente a la salida de la bomba impulsora.

Válvulas de bola: Una válvula de bola es un mecanismo de llave de paso que sirve para regular el flujo de un fluido y se caracteriza porque el mecanismo regulador situado en el interior tiene forma de esfera perforada. Estas válvulas se abren mediante el giro del eje unido a la esfera, de tal forma que permite el paso del fluido. En la planta se tienen 10 válvulas de bola, 8 en la línea de biogás y 2 en la línea de aire de regeneración.

Válvulas de globo: Se usan para cortar o regular el flujo de líquido, especialmente indicadas para producir estrangulamiento debido a la resistencia que presenta ante el flujo. Se instalará una válvula de globo en la planta en la línea de agua caliente, la cual permitirá regular el flujo de agua caliente en el intercambiador de calor.

LINEA BIOGAS

Selección del material de las tuberías:

Los materiales más utilizados para las redes de conducción del biogás se encuentra el acero inoxidable, HDPE, PVC y cañerías de acero galvanizado. En este caso se utilizarán tuberías de acero inoxidable.

Diseño hidráulico de la conducción de biogás:

Para el diseño se supondrá que la temperatura a lo largo de la línea se mantiene constante, por lo tanto, la densidad del biogás no variará y su velocidad tampoco.

El diámetro de la tubería se determina en base a la velocidad máxima de conducción en la tubería y el caudal a transportar.

En términos de velocidad de flujo de biogás en tuberías, existe la convención entre ingenieros proyectistas que busca mantener dentro del sistema velocidades alrededor de 5 m/s. Sin embargo, cuando se usan sopladores, las velocidades pueden ser mayores, siempre y cuando se cumpla con lo siguiente (Quiroz Marchant & De la Cerda, 2017):

- 1) Que en tramos largos, no supere los 12 m/s
- 2) Que en tramos cortos, no supere los 20 m/s

Se seleccionará una tubería de diámetro nominal de 90 mm y diámetro interno de 76,2 mm, y se verificará que se cumpla con las condiciones mencionadas anteriormente:

$$v = Q/A$$

$$Q = \frac{4468,84 \text{ m}^3}{\text{día}} = \frac{0,052 \text{ m}^3}{\text{s}}$$

$$A = \pi \frac{D^2}{4} = \pi * \frac{(0,0762 \text{ m})^2}{4} = 0,0045 \text{ m}^2$$

$$v = \frac{0,052 \text{ m}^3/\text{s}}{0,0045 \text{ m}^2} = 11,34 \text{ m/s}$$

PERDIDAS DE CARGA

Se tienen en cuenta las pérdidas de carga debido a la conducción del biogás y además las pérdidas de carga debido a los diferentes accesorios presentes en las tuberías, tales como codos a 90°, válvulas, etc.

Perdida de carga por accesorios:

Para evaluar estas pérdidas se hará uso de las longitudes equivalente (Leq) definiendo la misma como la longitud de tramo recto de tubería que producirían las mismas pérdidas de carga que el accesorio.

Se usará como dato la siguiente tabla:

Elemento	Leq/D
Válvula bola	350
Válvula de globo	340
Válvula de retención	150
T	60
Codo 90°	27

https://previa.uclm.es/area/ing_rural/Hidraulica/Temas/Tema9.pdf

Perdidas de carga en la conducción:

Para el cálculo de las pérdidas de cargas en la conducción de biogás hay que tener en cuenta el patrón de flujo que tiene lugar, es decir, si es un flujo adiabático, isotérmico o isotrópico.

En este caso, se considerará que el flujo de gas se da en condiciones isotérmicas, es decir, se considera que la temperatura del biogás a la entrada de la conducción es igual a la temperatura de la salida del proceso y, por lo tanto, no se producirán cambios significativos en la densidad del fluido.

Para este tipo de fluido se utilizará la ecuación de Weymouth:

$$(P_1^2 - P_2^2) = \frac{G^2 RT}{M} \left[2 \ln \left(\frac{\rho_1}{\rho_2} \right) + \frac{4 f L_e}{D} \right]$$

Donde:

M, es el peso molecular del gas (kg/mol)

R, es la constante universal de gases (J/Mol.K)

T, es la temperatura del gas

G, velocidad másica del gas (kg/m²s)

f, es el factor de fricción

Le, longitud equivalente de la conducción (m)

D, diámetro interno de la conducción

P_1, P_2 presión a la entrada y salida de la tubería, respectivamente (Pa)

ρ_1, ρ_2 , es la densidad del fluido a la entrada y la salida de la tubería, respectivamente (kg/m^3)

Teniendo en cuenta que la variación de densidad del biogás a lo largo de la tubería es casi nula, el término logarítmico es igual a cero y la ecuación se simplifica de la siguiente manera:

$$(P_2^2 - P_1^2) = \frac{G^2 RT}{M} \frac{4 f L_e}{D} \quad (38)$$

Accesorios instalados:

Tabla 7.25. Accesorios instalados, línea biogás

Accesorio	Cantidad	Longitud equivalente
Válvulas de bola	4	106,68 m
Válvula de retención	1	11,43 m
T utilizada como codo	4	18,29 m
Codos 90°	11	11,43 m

Longitud de tramo total de tuberías: 33,90 metros

$$L_{eq} = \sum Leq + Longitud\ total = 106,68\ m + 11,43\ m + 18,28\ m + 11,43\ m + 33,90\ m = 192,92\ m$$

Se despeja P_2 de la ecuación número 38:

$$P_2 = \left(P_1^2 - \frac{G^2 RT}{M} \frac{4 f L_e}{D} \right)^{1/2}$$

Tabla 7.26. Parámetros utilizados para el cálculo de la presión.

Parámetro	Valor	Unidades
P_1^*	106325	Pa
R	8,314	J/K.mol
T	303	K
M	0,0244	Kg/mol
D	0,0762	m

*Presión atmosférica más la presión a la salida del gasómetro.

Cálculo del factor de fricción f:

Se calcula mediante el número de Reynold y la gráfica de Moody:

$$Re = \frac{vD\rho}{\mu} = \frac{\frac{11,35\ m}{s} * 0,0762\ m * 0,8\ kg/m^3}{1,98 * \frac{10^{-5}\ kg}{m \cdot s}} = 34862$$

Entrando con este valor y para una tubería de acero inoxidable:

$$f = 0,024$$

$$G = \frac{Q * \rho}{A} = \frac{\frac{0,052\ m^3}{s} * \frac{0,8\ kg}{m^3}}{0,0051\ m^2} = 9,08 \frac{kg}{m^2 s}$$

Reemplazando:

$$P_2 = \left[(101325 Pa)^2 - \frac{\left(9,08 \frac{kg}{m^2 s}\right)^2 * \frac{8,314 J}{mol \cdot K} * 303 K}{0,0244 kg/mol} * \frac{0,024 * 192,92 m}{0,0762 m} \right]^{1/2} = 10204,57 Pa$$

$$\Delta P_{conducción} = 10204,58 Pa$$

La pérdida de carga total en la línea de biogás es la siguiente:

$$\begin{aligned} \Delta P_{total} &= \Delta P_{Conduccion} + \Delta P_{Chiller} + \Delta P_{ciclón} + \Delta P_{Columna ads} \\ &= 10204,58 Pa + 2000 Pa + 1525,92 Pa + 1226,48 Pa = 14957 Pa \end{aligned}$$

LINEA AIRE DE REGENERACIÓN

Selección del material de las tuberías

Para el transporte del aire atmosférico para la regeneración se utilizarán tuberías de acero inoxidable.

Diseño hidráulico de la conducción de aire

Para el diseño hidráulico se tendrán las mismas premisas que para el biogás. El único parámetro que varía es la velocidad, para el cual se recomienda un rango de velocidad entre 5 y 10 m/s.¹⁰

Se seleccionará una tubería de acero inoxidable de diámetro nominal de 20 mm y diámetro interno de 16,2 mm, y se verificará que se cumpla con las condiciones mencionadas anteriormente:

$$v = Q/A$$

$$Q = \frac{9,799 m^3}{hora} = 0,0027 m^3/s$$

$$A = \pi \frac{D^2}{4} = \pi * \frac{(0,01905 m)^2}{4} = 0,00028 m^2$$

$$v = \frac{0,0027 m^3}{s} = 9,55 m/s$$

Perdidas de carga en la conducción:

Para el cálculo de las pérdidas de carga se tendrán en cuenta las mismas consideraciones que para el biogás.

Accesorios:

Tabla 7.27. Accesorios en la línea de aire de regeneración

Accesorio	Cantidad	Longitud equivalente
Válvulas esféricas	1	6,67 m
T utilizada como codo	1	1,14 m
Codos 90°	2	0,99 m

Longitud total:

- Longitud horizontal = 1 m
- Longitud vertical = 9,19 m
- Longitud total = 10,19 m

$$L_{eq} = \sum Leq + Longitud total = 1,190 m + 6,67m + 1,14m + 0,99 m = 18,99 m$$

¹⁰ <https://www.ugr.es/~aulavirtualpfciq/descargas/documentos/BOMBAS%20Y%20TUBERIAS.pdf>

Se despeja P_2 de la ecuación número 34:

$$P_2 = \left(P_1^2 - \frac{G^2 RT}{M D} 4 f L_e \right)^{1/2}$$

Tabla 7.28. Parámetros utilizados para calcular la pérdida de carga en la línea de regeneración

Parámetro	Valor	Unidades
P_1	101325	Pa
R	8,314	J/K.mol
T	303	K
M	0,029	Kg/mol
D	0,01905	M

Cálculo del factor de fricción f :

Se calcula mediante el número de Reynold y la gráfica de Moody:

$$Re = \frac{vD\rho}{\mu} = \frac{\frac{9,55 \text{ m}}{\text{s}} * 0,01905 \text{ m} * 1,16 \text{ kg/m}^3}{\frac{1,86 * 10^{-5} \text{ kg}}{\text{m.s}}} = 11352$$

Entrando con este valor y para una tubería de acero:

$$f = 0,0345$$

$$G = \frac{Q * \rho}{A} = \frac{\frac{0,00027 \text{ m}^3}{\text{s}} * \frac{1,16 \text{ kg}}{\text{m}^3}}{0,00028 \text{ m}^2} = 11,08 \frac{\text{kg}}{\text{m}^2 \text{ s}}$$

Reemplazando:

$$P_2 = \left[(101325 \text{ Pa})^2 - \frac{\left(11,08 \frac{\text{kg}}{\text{m}^2 \text{ s}} \right)^2 * \frac{8,314 \text{ J}}{\text{mol.K}} * 303 \text{ K}}{0,02896 \text{ kg/mol}} * \frac{0,034 * 18,99 \text{ m}}{0,01905 \text{ m}} \right]^{1/2} = 93790 \text{ Pa}$$

$$\Delta P_{\text{conducción}} = 7534,93 \text{ Pa}$$

La pérdida de carga total en la línea de biogás es la siguiente:

$$\Delta P_{\text{total}} = \Delta P_{\text{Conduccion}} + \Delta P_{\text{Columna ads}} = 7534 \text{ Pa} + 1226,48 \text{ Pa} = 8761,41 \text{ Pa}$$

LINEA AGUA CALIENTE:

Selección del material de las tuberías:

Para el transporte del agua caliente generada en el moto generador se utilizarán tuberías de acero inoxidable.

Diseño hidráulico

Para este tipo de conducciones se recomienda una velocidad de flujo de 0,5 a 3 m/s.

Se seleccionará una tubería de acero inoxidable de diámetro nominal de 40 mm y diámetro interno de 34,46 mm, y se verificará que se cumpla con las condiciones mencionadas anteriormente:

$$v = Q/A$$

$$Q = \frac{1,31 \text{ m}^3}{\text{s}}$$

$$A = \pi \frac{D^2}{4} = \pi * \frac{(0,03446 \text{ m})^2}{4} = 0,00093 \text{ m}^2$$

$$v = \frac{\frac{1,31 \text{ m}^3}{\text{s}}}{0,00093 \text{ m}^2} = 1,55 \text{ m/s}$$

Perdidas de carga en la conducción:

Longitud total: 18,17 m

Para el cálculo de la pérdida de carga, se utilizará la ecuación de Fanning:

$$h_f = f * \frac{L}{D} * \frac{v^2}{2g}$$

El factor f, es el factor de rozamiento y se calcula a través de la gráfica de Moody:

$$Re = \frac{D * v * \rho}{\mu} = \frac{0,03446 \text{ m} * 1,55 \frac{\text{m}}{\text{s}} * 969,5 \text{ kg/m}^3}{0,000346 \frac{\text{kg}}{\text{m s}}} = 150075$$

Entrando con este valor y para una tubería de acero inoxidable:

$$\frac{\varepsilon}{d} = \frac{0,002 \text{ mm}}{34,46 \text{ mm}} = 0,00005$$

$$f = 0,018$$

Reemplazando:

$$h_f = 0,018 * \frac{18,17 \text{ m}}{0,03446 \text{ m}} * \frac{\left(1,55 \frac{\text{m}}{\text{s}}\right)^2}{2 * \left(9,8 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}\right)} = 1,17 \text{ m}$$

Perdida de carga intercambiador de calor:

Se hallará la pérdida de carga del agua caliente que circula por la sección anular del intercambiador. Se utilizará la ecuación de Fanning aplicando el diámetro equivalente igual a 0,01026 metros calculado en la sección del intercambiador de calor

La longitud total del intercambiador corresponde a la longitud total del intercambiador más la longitud equivalente de codos a 180°, los cuales son los que unen las horquillas.

Elemento	Leq/D	Leq	Cantidad	Longitud Equivalente total
Codos a 180°	75	0,7695	10	7,70

$$L_{total} = L + L_{equivalente} = 18 \text{ m} + 7,70 \text{ m} = 25,70 \text{ m}$$

El número de Reynolds para la sección anular fue calculado en el diseño del intercambiador de calor, el cual tiene un valor de 50831.

Entrando con este valor y para una tubería de acero:

$$\frac{\varepsilon}{d} = \frac{0,002 \text{ mm}}{10,26 \text{ mm}} = 0,0002$$

$$f = 0,019$$

Velocidad del fluido en la sección anular:

$$v = \frac{Q}{A} = \frac{0,0013 \text{ m}^3/\text{s}}{0,00076 \text{ m}^2} = 1,71 \text{ m/s}$$

$$h_f = 0,019 * \frac{25,70m}{0,01026 m} * \frac{\left(1,71 \frac{m}{s}\right)^2}{2 * \left(9,8 \frac{m}{s^2}\right)} = 7,13 m$$

$$h_{total} = h_{f, tramo\ recto} + h_{f, intercambiador} = 1,28 m + 7,13m = 8,42 m$$

Pérdida de carga por accesorios:

Accesorio	Cantidad	Leq/D	Leq (m)
Codos	2	27	1,86
Valvula de Retención	1	150	5,48
Valvula globo	1	340	11,72
Longitud Total			19,06

Aplicando la ecuación de Fanning:

$$h_{f, accesorios} = 0,018 * \frac{19,06 m}{0,03446 m} * \frac{\left(1,44 \frac{m}{s}\right)^2}{2 * \left(9,8 \frac{m}{s^2}\right)} = 1,22 m$$

$$h_{total} = h_{f, tramo\ recto} + h_{f, intercambiador} + h_{f, accesorios} = 1,17 m + 7,13m + 1,22 = 9,40 m$$

Sistema de impulsión:

LINEA BIOGAS

Para generar el movimiento de los fluidos desde un punto a otro del proceso será necesario un soplador. El soplador impulsará el biogás desde el gasómetro hacia la unidad CHP. Deberá ser capaz de comprimir el biogás a una presión tal que este pueda fluir fácilmente por toda la planta, superando las pérdidas de carga producidas por los distintos procesos de tratamiento y además proporcionarle la presión requerida por el motor.

$$P_2 = P_{CHP} + P_{perdidas} = 20000 Pa + 14957 = 34957 Pa$$

La potencia necesaria del soplador se calcula a través de la siguiente ecuación:

$$Potencia = \frac{h_A g W_m}{\eta}$$

Donde

h_A , carga del soplador

g , es la gravedad igual a $9,8 m/s^2$

W_m , es el caudal másico de biogás en kg/s

η , es el rendimiento del soplador igual a 0,8

La carga del soplador (h_A) se calcula mediante la ecuación para la compresión isotérmica:

$$h_A = \frac{RT}{Mg} \ln\left(\frac{P_2}{P_1}\right) = \frac{\frac{8,314 J}{mol \cdot K} * 303 K}{0,0244 \frac{kg}{mol} * 9,81 m/s^2} \ln\left(\frac{101325 Pa + 34957 Pa}{101325 Pa + 5000 Pa}\right) = 2988,46 m$$

Reemplazando:

$$Potencia = \frac{(2988,46 m) * \left(\frac{9,81 m}{s^2}\right) * \left(\frac{0,052 m^3}{s}\right) * \left(\frac{0,8 kg}{m^3}\right)}{0,80} = 1616 W = 2,03 HP$$

Las características que tendrá el soplador son las siguientes:

- Ser capaz de impulsar un caudal de 186,20 m³/hora desde una presión de 5000 Pa (presión a la salida del gasómetro) a una presión 34957 Pa
- Tener una potencia mínima de 2,03HP

Para esto se eligió un soplador de lóbulos rotativos de la marca Repicky, modelo R200. Los sopladores de lóbulos rotativos poseen dos rotores que giran sincronizados dentro del cuerpo del soplador. El gas es capturado y transportado por la cavidad formada entre el cuerpo y los rotores, para luego ser comprimido y expulsado por la boca de salida.

$\Delta p(\text{mbar})$		100		200		300		400	
Modelo	RPM	Q m ³ /h	P HP	Q m ³ /h	P HP	Q m ³ /h	P HP	Q m ³ /h	P HP
R100	1450	29,6	0,4	23,1	0,5	18	0,7	13,7	0,9
	2250	54	0,6	47,5	0,8	42,2	1,1	38,1	1,4
	2900	74	0,7	67,3	1,1	62,2	1,4	57,9	1,6
	4500	123	1,5	116	1,6	111	2,1	107	2,6
R200	1450	63	0,6	52	0,9	43,3	1,3	35,9	1,6
	2250	112	0,9	101	1,4	92,1	1,9	84,6	2,4
	2900	152	1,2	140	1,8	132	2,4	124	3,1
	4500	249	1,7	238	2,8	229	3,8	222	4,9

Fuente: <https://repicky.com.ar/site/wp-content/uploads/2016/01/Folleto-Sopladores-y-Bombas-RA-Repicky.pdf>

LINEA AIRE DE REGENERACION

Para el transporte de aire de regeneración se utilizará un soplador, el cual será dimensionado con el mismo criterio que para el transporte de biogás.

La potencia necesaria del soplador se calcula a través de la siguiente ecuación:

$$Potencia = \frac{h_A g W_m}{\eta}$$

Donde

h_A , carga del soplador

g , es la gravedad igual a 9,8 m/s²

W_m , es el caudal másico de aire en kg/s

η , es el rendimiento del soplador igual a 0,8

La carga del soplador (h_A) se calcula mediante la ecuación para la compresión isotérmica:

$$h_A = \frac{RT}{Mg} \ln\left(\frac{P_2}{P_1}\right) = \frac{\frac{8,314 \text{ J}}{\text{mol} \cdot \text{K}} * 303 \text{ K}}{0,02896 \frac{\text{kg}}{\text{mol}} * 9,81 \text{ m/s}^2} \ln\left(\frac{101325 \text{ Pa} + 8761 \text{ Pa}}{101325 \text{ Pa}}\right) = 760,58 \text{ m}$$

Reemplazando:

$$Potencia = \frac{(760,58 \text{ m}) * \left(\frac{9,81 \text{ m}}{\text{s}^2}\right) * \left(\frac{0,0027 \text{ m}^3}{\text{s}}\right) * \left(\frac{1,22 \text{ kg}}{\text{m}^3}\right)}{0,80} = 35,4 \text{ W} = 0,05 \text{ HP}$$

Las características que tendrá el soplador son las siguientes:

- Ser capaz de impulsar un caudal de 9,8 m³/hora con una diferencia de presión de 8761,4 Pa
- Tener una potencia mínima de 0,05 HP.

Para ello se eligió un turbo soplador de aire de la marca GF VORTEX, modelo GF180 el cual tiene una capacidad de transportar 11,4 m³/h, una potencia máxima de 0,1 HP y una presión máxima de 10000 Pa.



GF180/180C

Ilustración 7.9. Turbo soplador aire de regeneración

LINEA AGUA CALIENTE

Para la impulsión del agua caliente se seleccionará una bomba. A diferencia de los sopladores, para la selección de la bomba se realizará un balance de energía mecánica.

$$P_B = \frac{w_m * g * h_b}{\eta}$$

Donde:

w_m , es el caudal másico impulsado por la bomba igual a 1,31 kg/s

g , es la aceleración de la gravedad igual a 9,81 m/s²

h_b , es la altura manométrica de la bomba en m

P_B , potencia requerida por la bomba en Watts

η , es la eficiencia de la bomba

Altura manométrica:

Se calcula a través de la ecuación de Bernoulli para un fluido incompresible entre los puntos de succión y descarga de la bomba:

$$\frac{P_1}{\rho g} + \frac{v_1^2}{2g} + Z_1 + h_b = \frac{P_2}{\rho g} + \frac{v_2^2}{2g} + Z_2 + h_f$$

El subíndice 1 hace referencia al punto de succión de la bomba, mientras que el subíndice 2 hace referencia al punto de descarga.

Se tienen en cuenta las siguientes condiciones:

- La presión en la descarga de la bomba es igual a la presión en la succión, por lo tanto, $P_1=P_2$
- Debido a que la tubería es de sección constante, las velocidades en la succión y la descarga son iguales, por lo tanto, $v_1=v_2$
- Las alturas a las que se encuentran los puntos de succión y descarga son iguales, por lo tanto $Z_1=Z_2$.

Por lo tanto:

$$h_b = h_f = 9,40 \text{ m}$$

Potencia de la bomba:

$$P_B = \frac{\frac{1,31 \text{ kg}}{\text{s}} * \frac{9,81 \text{ m}}{\text{s}^2} * 9,40 \text{ m}}{0,80} = 162 \frac{\text{J}}{\text{s}} = 162 \text{ W}$$

Por lo tanto, la bomba a seleccionar deberá ser capaz de transportar un caudal de 0,0013 m³/s (4,70 m³/h) y tener una potencia mínima de 0,16 kW.

Se seleccionó una electrobomba centrífuga Motorarg Linea Vasser Modelo QC 75, con una potencia máxima de 0,55 HP y capaz de transportar hasta 5,4 m³/h.



Ilustración 7.10 Bomba utilizada para el transporte de agua caliente

UNIDAD DE COGENERACIÓN DE ENERGÍA

El aprovechamiento energético del biogás se realizará a través de una unidad de cogeneración de energía. Se seleccionará un motor CHP que sea capaz de generar la energía térmica necesaria para calefaccionar el biogás y con la potencia restante, se utilizará un generador eléctrico.

ENERGÍA PRIMARIA

El cálculo de la energía primaria contenida en el biogás se hará a partir de los siguientes datos de partida:

Tabla 7.29 Datos de partida para el cálculo de la energía primaria

Parametro	Valor	Unidades
Caudal de biogas (Qb)	4468,84	[m ³ /día]
Contenido de metano (Cm)	65	[%V/V]
Poder calorífico del metano (PCI)	9,94	[kWh/m ³ CH ₄]

$$E_{\text{primaria}} = Q_{\text{biogas}} * C_M * PCI_{\text{Metano}}$$

Reemplazando por los valores de la tabla:

$$E_{\text{primaria}} = \frac{4468,84 \text{ m}^3 \text{ biogas}}{\text{día}} * \frac{0,65 \text{ m}^3 \text{ CH}_4}{\text{m}^3 \text{ biogas}} * \frac{9,94 \text{ kWh}}{1 \text{ m}^3 \text{ CH}_4} * \frac{1 \text{ día}}{24 \text{ horas}} = 1203,05 \text{ kW}$$

MOTOR DE COGENERACION

El biogás generado se quema en un motor de combustión interna acoplado a un generador. El módulo CHP consiste en sistemas de intercambio de calor para la recuperación de energía térmica de los gases de escape, circuitos de aceite de lubricación, sistemas hidráulicos para la distribución de calor y energía eléctrica, y un equipo de control para la distribución de la potencia y el control de la unidad.

La selección del motor de cogeneración viene dada por los requerimientos de calor de la planta. En este caso el calor requerido, es el calor necesario para mantener los lodos que ingresan en el biodigestor a 35°C.

En la sección *ENERGÍA TÉRMICA*, se calculó que se necesitan 88,45 kW de potencia en términos de energía térmica. Este valor se multiplicará por un factor de seguridad igual a 1,50, el cual abarcará todas las pérdidas que se pueden producir en las tuberías de transporte de agua caliente. Por lo tanto, la potencia necesaria será la siguiente:

$$E_{térmica} = 88,45 \text{ kW} * 1,50 = 133 \text{ kW}.$$

Se seleccionará un motor de cogeneración de la marca TEDOM los cuales son comercializados en Argentina. Poseen las siguientes potencias:

Tabla 7.30. Modelos de motores de cogeneración de energía

Modelo CHP	Potencia Eléctrica (kW)	Potencia Térmica (kW)	Consumo de combustible (kW)
Micro T30	25	47,5	79,1
Cento T80	83	121	237
Cento T100	106	143	291
Cento T120	124	165	336
Cento T160	166	217	439
Cento T180	182	224	465
Cento T200	200	245	510
Cento L230	235	269	580
Cento L410	410	487	1004
Cento L500	500	566	1193
Quanto D600	600	645	1405
Quanto D800	800	858	1868
Quanto D1200	1200	1344	2852
Quanto D1600	1560	1771	3734
Quanto D2000	2000	2157	4667

El motor seleccionado es la unidad CENTO T100, el cual posee las siguientes características:

Tabla 7.31. Características del motor de cogeneración seleccionado

Energía primaria	291 Kw
Potencia térmica	143 kW
Potencia eléctrica	106 kW
Eficiencia térmica	49%
Eficiencia eléctrica	36%
Eficiencia total	85%
Medidas	1570 mm x 1240 mm

Se adjunta ficha técnica como anexo.

Por lo tanto, solo un 85% de los 291 kW se convertirán en energía útil, el resto se pierde.

SELECCIÓN DE UN GENERADOR COMUN

El generador común de electricidad, tiene los mismos requerimientos que la unidad CHP, con la diferencia que no se recuperan los gases de escapes del motor y, por lo tanto, se obtiene solo energía eléctrica.

La selección del generador común de electricidad, se realizará utilizando el sobrante de potencia del biogás.

$$P_{Generador} = E_{Primaria} - 291 \text{ kW} = 1203,05 \text{ kW} - 291 \text{ kW} = 912,05 \text{ kW}$$

Para esto se seleccionó un motor generador modelo G3516A de la marca CAT, el cual posee las siguientes características:

Tabla 7.32. Principales características del motor de generación eléctrica

Potencia Nominal	1000 kW
Tipo de combustible	Gas Natural, Biogás, Gas de carbón
Eficiencia eléctrica	36,50%
Longitud	4913 mm
Ancho	1736 mm
Altura	1940 mm

Se adjunta ficha técnica del motor como anexo.

Teniendo en cuenta la eficiencia del motor, se tiene la siguiente potencia eléctrica:

$$P_{\text{Generador}} = 912,05 \text{ kW} * 0,3650 = 332,90 \text{ kW}$$

A continuación, se resume la producción de energía de la planta:

Tabla 7.33. Producción de energía total

Energía térmica	143 kW
Energía térmica requerida por la planta	133 kW
Energía eléctrica (Cogenerador)	106 kW
Energía eléctrica (Generador)	332,90 kW
Energía eléctrica total	439 kW

Como se observa en la tabla anterior, la energía térmica alcanza a cubrir la demanda requerida por el biodigestor, el cual era el principal objetivo al instalar un sistema de este tipo. Con respecto a la energía eléctrica generada, la misma será inyectada a la red eléctrica, la cual generará importantes ahorros en las facturas eléctricas.

ANÁLISIS DE IMPACTO AMBIENTAL Y DE CUESTIONES DE SEGURIDAD

En este capítulo se desarrolla el estudio de los impactos ambientales asociados al proyecto en las etapas de construcción y operación de la planta diseñada. En este estudio, se identificarán y evaluarán los efectos o impactos asociados al proyecto, en relación a los componentes físico-químicos, biológicos y socioeconómicos del ambiente.

En primer lugar, se determinará la línea de base del sitio donde se va a desarrollar el proyecto en cuestión, describiendo los elementos del medio que se verán afectados por el proyecto. Luego, se identificarán las actividades asociadas al proyecto potencialmente generadoras de impacto.

Una vez identificadas dichas actividades se realiza un análisis de cada una, donde se las valoriza respecto a diferentes aspectos para finalmente determinar el grado y signo de su impacto. Finalmente, se realiza un plan de prevención y mitigación para aquellas actividades identificadas como de impacto negativo.

OBJETIVO

El proyecto busca acondicionar el biogás producido en la planta de tratamiento de efluentes y utilizarlo como fuente de energía térmica y eléctrica, con el objetivo de reducir la acumulación de gases de efecto invernadero en la atmósfera y contribuir al desarrollo de proyectos de energías renovables

UBICACIÓN

La planta de tratamiento de biogás, se ubicará en la ciudad de Paraná, Entre Ríos. Dicha ciudad, se ubica en la margen izquierda del río Paraná, a los 31°44' de latitud sur y a los 60°32' de longitud Oeste. La altitud de acuerdo a la Nivelación General de la República, realizada por el Instituto Geográfico Militar, es de 71.5 metros sobre el nivel del mar.

El predio donde se ubicará la planta de tratamiento de biogás se encuentra entre la calle Ayacucho y la ruta nacional 168, en frente de un camping de golf y a 300 metros al sur del camping UPCN y de una zona de viviendas y a 300 metros de una industria papelera. La zona de playas por su parte, se encuentra aproximadamente a 1 km del predio.

Este predio ya cuenta con servicios de agua potable, energía eléctrica, telefónica y buena accesibilidad vial.



Ilustración 7.11- Ubicación del proyecto. Fuente: Google Earth.

DIAGNOSTICO AMBIENTAL:

A continuación, se describe el área donde se encontrará ubicado el proyecto y los sitios que se verán afectados por la presencia del mismo. Se define a partir de esta descripción una línea de base, que sirve como referencia para determinar de qué manera el proyecto impacta o modifica el área descripta.

AREA DE INFLUENCIA

El área de influencia se define como el área donde se distribuirán los posibles efectos e impactos que este generará. Se pueden identificar un área de influencia directa y una indirecta.

El área de influencia directa corresponde al área específica donde se desarrollarán las actividades del proyecto, donde se manifiestan los impactos ambientales directos. Mientras que el área de influencia indirecta en cambio determina la zona hasta donde llegan los efectos producidos por los impactos.

En este caso, se definió como área de influencia directa, toda la zona alrededor de la planta con un radio de unos 500 metros, mientras que la zona de influencia indirecta se considera a toda la ciudad de Paraná.

MEDIO BIOFÍSICO

CLIMA

Las condiciones climáticas tienen una importante influencia sobre el funcionamiento del proyecto que se analiza, por lo tanto, en este apartado se detallarán algunas variables relevantes a considerar.

TEMPERATURA

La temperatura media anual de la ciudad de Paraná es de 18°C. En verano, la temperatura promedio es de 23°C en verano, con máximas de 33°C y mínimas de 18°C. En invierno, la temperatura varía con máximas que alcanzan los 18°C y mínimas de 7°C. (Fuente: www.parana.gob.ar)

Las temperaturas más altas se registran en los meses de verano (Diciembre-Enero y Febrero), mientras que las más bajas se dan en los meses de invierno (Junio, Julio y Agosto).

PRECIPITACIÓN

Paraná se caracteriza por tener un clima pampeano (templado y húmedo) donde las precipitaciones presentan una media anual de alrededor de 1100-1200 mm.

En el verano, el nivel medio de precipitaciones es de 400 mm de promedio estacional. Mientras que el invierno es seco, con un promedio estacional de 100 mm.

(Poner gráficos)

VIENTOS

La provincia de Entre Ríos se halla bajo la influencia de vientos regulares que a lo largo del año provienen con mayor frecuencia del NE y del SE, los del N y S son importantes pero se presentan con frecuencias algo inferiores. En invierno aumenta la frecuencia de los S y SE, mientras que en primavera y verano se incrementan las frecuencias de los vientos E. La velocidad del viento es mayor en los meses de agosto, septiembre y octubre, los valores menores se producen en verano.¹¹

Recursos hídricos superficiales

La ciudad de Paraná se encuentra a la vera del Río Paraná, la misma cuenta con 16 cuencas que desembocan al río. La planta de biogás se encontrará ubicada en la cuenca Las Viejas, la cual posee un arroyo con el mismo nombre que desemboca en el río Paraná.

¹¹ Fuente: <https://www.entrierios.gov.ar/ambiente/userfiles/files/archivos/Plan%20Girsu/A%20-%20Area%20de%20Estudio/2-%20Aspectos%20Biof%C3%ADsicos/Capitulo%202%20-%20Aspectos%20Biofisicos.pdf>

FLORA Y FAUNA

En esta región existen, sobre todo en épocas de bajante de río, una serie de bañados en donde se desarrollan especies animales y vegetales en íntima relación con el agua. Son comunes los arbustos rama crespá, cedrón del monte, lantana, palma caranday y cactáceas. Junto a los cursos de agua se pueden encontrar sauces, chilcas y, en algunos lugares, matas de paja para techar.

En cuanto a la fauna, los animales más observables en esta zona son el carpincho, corzuelas paerdas y numerosos tipos de aves. (Fuente: <http://www.entreriostotal.com.ar/parana/caracteristicas.php>)

AMBIENTE SOCIOECONOMICO

POBLACION

La ciudad de Paraná posee una superficie de 137 km² y una población de 247863 habitantes (censo 2010), siendo la ciudad más poblada de la provincia y la decimocuarta a nivel nacional. Es el principal componente del aglomerado llamado Gran Paraná, que se encuentra unido al Gran Santa Fe a partir del túnel subfluvial Raul Uranga-Carlos SylvestreBegniss.¹²

ACTIVIDADES ECONOMICAS

Paraná es sede del gobierno provincial, siendo esta su principal actividad. Sin embargo cuenta con un importante parque industrial y fábrica de lácteos, envases, alimento para animales, maderas, entre otros. También es un centro turístico y de convenciones.

La zona además, cuenta con una actividad agrícola ganadera de importancia, siendo los principales cultivos el trigo, el maíz, el girasol y la soja.

ANALISIS DE IMPACTO AMBIENTAL

Procedimiento

A partir del análisis del medio y de la descripción de las actividades, se identifican los factores ambientales más representativos que podrían recibir algún tipo de impacto positivo y/o negativo.

Para ello se utilizará una matriz de doble entrada, relacionando las acciones que podrían generar impactos (filas) con los factores ambientales y socioeconómicos (columnas) susceptibles de ser impactados por dichas acciones.

Una vez efectuada la identificación de los potenciales impactos ambientales, se procede a su valoración, se realiza una nueva matriz cromática de símbolos gráficos con puntuación.

Posteriormente, se describen los impactos más significativos, de acuerdo con las acciones que lo generan, posibles efectos asociados y por último se detallan medidas de mitigación o potenciación que corresponden a aplicar en cada caso.

Valoración de impactos

Los impactos serán calificados según su importancia (I), siguiendo una adaptación de la metodología propuesta por Vicente ConesaFernandez-Vitora (Conesa, 1993) que se resume a continuación:

$$I = \pm[3i + 2EX + MO + PE + RV + SI + AC + EF + PR + MC]$$

Donde:

I es la importancia del impacto

± es el signo

¹² Fuente: www.argentina.gob.ar/ciencia/conae/educacion-y-formacion-masiva/parana-entre-rios-cbers-4-panmux-13-de-septiembre-de-2016

i es la intensidad o grado probable de destrucción

EX es la extensión o área de influencia del impacto

MO es el momento o tiempo entre la acción y la aparición del impacto

PE es la persistencia o permanencia del efecto provocado por el impacto

RV es la reversibilidad

SI es la sinergia o reforzamiento de dos o más efectos simples

AC es la acumulación o efecto de incremento progresivo

EF es el efecto

PR, periodicidad

MC Recuperabilidad o grado posible de reconstrucción por medios humanos.

A continuación, se presenta una breve descripción de los calificadores y los rangos a emplear para determinar la importancia de cada impacto:

Signo: alude al carácter beneficioso (expresado como +) o perjudicial (expresado como -) de cada una de las acciones que van a actuar sobre los distintos factores considerados.

De esta manera tenemos dos tipos de carácter de potenciales impactos:

- Beneficioso (+): impacto positivo, mejora la calidad del ambiente analizado
- Perjudicial (-): impacto negativo, alteración o pérdida de calidad del ambiente analizado.

La descripción de los demás calificadores se presenta en la siguiente tabla:

Tabla 7.34. Descripción de los calificadores

Calificadores	Descripción	Valor numérico	
Intensidad	Grado de incidencia de la acción sobre el factor, en el ámbito específico que actúa	Baja: afección mínima	1
		Media	2
		Alta	3
		Muy alta	4
		Total: destrucción total del factor en el área que se produce el efecto	8
Extensión	Es la componente geográfica, establece el porcentaje del área del proyecto que será afectada por el impacto	Puntual: efecto muy localizado	1
		Parcial	2
		Extenso	4
		Total: efecto de influencia generalizada en todo el entorno	8
		Crítica	12
Momento	Tiempo transcurrido entre la aparición de la acción y el comienzo del efecto sobre el	Largo Plazo: el efecto se manifiesta luego de 5 años o mas	1
		Medio Plazo: el efecto se manifiesta en un periodo de entre 1 y 5 años	2

	factor del medio considerado	Inmediato: el efecto se manifiesta dentro del primer año	4
		Crítico	8
Persistencia	Tiempo de permanencia del efecto desde su aparición hasta su desaparición por acción de medios naturales o mediante medidas correctivas.	Fugaz: < 1 año	1
		Temporal: entre 1-10 años	2
		Permanente: >10 años	4
Reversibilidad	Posibilidad de reconstrucción del factor afectado por el proyecto, por medios naturales, una vez que la acción deja de actuar sobre el medio	Corto Plazo: < 1 año	1
		Medio Plazo: entre 1-10 años	2
		irreversible: >10 años o imposible de revertir	4
Sinergia	Reforzamiento de dos o más efectos simples. La componente total de la manifestación de los efectos simples, provocados por acciones simultáneas es superior a la que cabría esperar cuando las acciones que las provocan actúan de manera independiente no simultánea	Sin sinergia	1
		Sinérgico	2
		Muy sinérgico	4
Acumulación	Incremento progresivo de la manifestación del efecto, cuando persiste de forma continuada la acción que lo genera	Simple: No produce efectos acumulativos	1
		Acumulativo: Produce efectos acumulativos	4
Recuperabilidad	Posibilidad de reconstrucción, total o parcial, del factor afectado, es decir, la posibilidad de retornar a las condiciones iniciales previas a la actuación, por medio de la intervención humana (aplicación de	Total del factor en forma inmediata: < a 1 año	1
		Total del factor a medio plazo: entre 1 y 10 años	2
		Parcial del factor en forma inmediata: < a 1 año	4
		Parcial del factor a mediano en forma inmediata: < a 1 año	8
			10

	medidas correctoras).	Irrecuperable: Acción imposible de reparar, tanto por acción natural como humana, > a 10 años	
Efecto	Relación causa-efecto, es decir la forma de manifestación del efecto sobre un factor, como consecuencia de una acción.	Indirecto: cuando la repercusión de la acción no es consecuencia directa de esta	1
		Directo: la repercusión de la acción es consecuencia directa de esta	4
Probabilidad	Regularidad de manifestación del efecto, bien sea de manera cíclica o recurrente (efecto periódico), de forma impredecible en el tiempo (efecto irregular) o constante en el tiempo (efecto continuo)	Irregular o discontinuo	1
		Periódico	2
		Continuo	4

En función de este modelo, los valores de importancia (I) pueden variar de 13 a 100. Según esta variación se clasifican los impactos ambientales de acuerdo al siguiente criterio:

Tabla 7.35. Importancia y clasificación de impactos

Impacto beneficioso	Importancia	Impacto perjudicial
13-26	Leve	13-26
27-40	Moderado	27-40
41-60	Moderado significativo	41-60
61-80	Significativo	61-80
81-100	Alto	81-100

Las evaluaciones realizadas consideraron la situación base (“sin proyecto”) del medio analizado y la previsión de los cambios que pueden ocurrir a partir del proyecto.

Una vez cuantificados los potenciales impactos ambientales, se procede a la descripción de los impactos negativos y se propone un Plan de Manejo que corresponde a cada caso.

FACTORES AMBIENTALES IMPACTADOS:

Tabla 7.36. Descripción de los factores ambientales

Físico	Aire	Calidad del aire: se refiere al material particulado y olores naturalmente presentes en el área de proyecto. Ruido y vibraciones: Intensidad de los sonidos producidos
	Agua	Calidad del agua: corresponde a las características fisicoquímicas y biológicas del agua que garantizan los procesos ecológicos y humanos de acuerdo a los diferentes usos del agua.

	Suelos	Calidad: tiene en cuenta la capacidad de un tipo específico de suelo de funcionar para sostener la productividad de las plantas y de los animales. Estructura: se definen por la forma en que se agrupan las partículas individuales de arena, limo, y arcilla.
	Flora y fauna	Flora
		Fauna
	Paisaje: corresponde al valor intrínseco de un paisaje desde el punto de vista visual	
Socioeconómico	Economía: Empleo en el área de proyecto	
	Sociedad: Seguridad e higiene y calidad de vida de la comunidad.	

Principales actividades impactantes del proyecto:

Tabla 7.37. Descripción de actividades

Etapas	Actividad
Construcción	Tránsito de vehículos de carga
	Operación de máquinas y herramientas
	Contratación de mano de obra
	Instalación de equipos, generadores, líneas de conducción, etc
	Obras complementarias
	Generación de residuos
	Retiro de maquinarias
Operación	Conducción del biogás, almacenamiento y purificación del biogás
	Generación de energía
	Contrato de personal
	Quemado en antorcha
	Mantenimiento de la planta
	Generación de efluentes
	Generación de residuos sólidos

Debido a que el biogás, es un gas tóxico, inflamable y de carácter explosivo, dentro de la etapa de operación se identificaron los potenciales impactos que se producirían en caso de accidentes y situaciones indeseadas.

IDENTIFICACION DE IMPACTOS

En la siguiente matriz, además de las fases de construcción y operación de la planta, se consideró los accidentes que pueden llegar a suceder, tales como la fuga de biogás, los incendios y las explosiones. Cada celda con una cruz identifica un posible impacto ambiental que surge como consecuencia del entrecruzamiento de las acciones derivadas de las etapas del proyecto con los factores ambientales. Los componentes potencialmente más afectados corresponden a las emisiones de gases, la calidad de aire, el nivel sonoro, y empleo. Mientras que las actividades que mayor probabilidad de incidencia son las relacionadas a la preparación del terreno, la instalación de los equipos, la conducción y el sistema de acondicionamiento del biogás, y los accidentes relacionados a los incendios y explosiones, por lo que habrá que hacer un importante énfasis en las medidas de seguridad de la planta.

Tabla 7.38. Matriz de identificación de posibles impactos

Etapa	Componente Elemento Acciones	Físico							Socioeconómico			
		AIRE		AGUA	SUELO		Flora y fauna		Paisaje	Economía	Sociedad	
		Calidad	Ruido y vibraciones	calidad del agua	Calidad del suelo	Estructura del suelo	Flora	Fauna				
Construcción	Tránsito de vehículos de cargas	x	x						x	x	x	
	Operación de máquinas y herramientas	x	x		x	x	x	x	x	x	x	
	Contratación de mano de obra									x	x	
	Instalación de equipos, generadores, líneas de	x	x		x	x	x	x	x	x	x	
	Obras complementarias	x	x		x	x	x	x		x	x	
Operación	Generación de residuos	x		x	x			x	x		x	
	Conduccion del biogas, almacenamiento y		x	x					x	x	x	
	Contrato de personal									x	x	
	Generacion de energia	x	x	x	x			x		x	x	
	Quemado en antorcha	x		x					x			
	Mantenimiento de la planta			x						x	x	
	Generacion de residuos solidos	x		x	x		x	x	x		x	
	Accidentes	Fugas de biogas	x						x	x		x
		Incendio	x	x		x	x	x	x	x	x	x
		Explosión	x	x		x	x	x	x	x	x	x

A continuación, se describen brevemente los impactos destacados en la matriz:

Construcción:

- Tránsito de vehículo de carga: esta acción se presenta cuando ingresan y se retiran materiales, equipos de la planta, unidades hacia y desde la obra de construcción. De forma negativa esto puede llegar a impactar en el ambiente a través de emisiones de gases tóxicos y de efecto invernadero y los ruidos y vibraciones por el funcionamiento de los motores. Estos vehículos pueden repercutir en la fauna local, provocando que se vean forzados a desplazarse. En cuanto a lo económico, la contratación de este tipo de vehículos puede tener un impacto positivo en la generación de empleos, tanto directos como indirectos.
- Operación de máquinas y herramientas: esta actividad puede repercutir en el ambiente de forma similar al tránsito de vehículos de carga y además puede llegar a generar impactos en el suelo de la obra.
- Instalación de equipos, generadores y líneas de conducción: la instalación de los equipos puede generar impactos potencialmente negativos en el suelo debido a que se necesita realizar excavaciones y extracciones; esto también puede repercutir en el paisaje y en la flora y la fauna debido a las dimensiones de algunos equipos. Por otro lado, desde los aspectos económicos, esta actividad tiene potencial para generar empleo, no solo local sino de otros distritos.
- Obras complementarias: una planta de biogás debe contar con obras complementarias, como veredas, baños para el personal, oficinas, etc.; esta actividad repercute de forma similar a la actividad anterior, con la salvedad de que debido a que las dimensiones son muchos menores, posiblemente no afectan el paisaje.
- Generación de residuos: la generación de residuos es inevitable. Este impacto puede ser más relevante en el área de influencia indirecta, donde se realice la disposición final.

Operación:

- Conducción del biogás, almacenamiento y purificación del biogás: debido a los ruidos que pueden generar el sistema de bombeo, se pueden generar impactos negativos en el aire por ruido y vibraciones. Por su parte, la generación de efluentes en el sistema de limpieza de biogás podría impactar en la calidad del agua.

- **Contrato de personal:** la contratación de personal para que se encargue de la planta de biogás puede generar impactos potencialmente positivos en la economía de la zona.
- **Generación de energía:** la generación de energía puede reducir la cantidad de gases de efecto invernadero si se compara la calidad del aire antes de la instalación de la planta, pero, por otro lado, generaría impactos posiblemente negativos en cuanto a los ruidos y vibraciones por parte de los equipos generadores de energía. En cuanto a los aspectos socioeconómicos, la generación de energía a partir de una fuente renovable podría impactar positivamente tanto en lo económico como en la sociedad.
- **Quemado en antorcha:** en la planta se instalará una antorcha de llama visible, donde el el impacto potencialmente negativo que se tendría es en el paisaje y la fauna.
- **Mantenimiento de la planta:** el mantenimiento de la planta podría afectar la calidad del agua, debido a tareas tales como el lavado de equipos purificadores y el cambio de aceite en bombas, sopladores y generadores.
- **Generación de residuos sólidos:** la mayor generación de residuos sólidos se da cuando se cambia el relleno de las columnas de adsorción, estos constituyen un residuo inflamable por lo que requieren una correcta disposición final. Los impactos potencialmente negativos de esta actividad pueden darse en el área de influencia indirecta más que en la directa.

Accidentes:

- **Fugas de biogás:** una posible fuga de biogás podría impactar negativamente en la calidad del aire, la flora y la fauna, y en la sociedad, ya que se generarían emisiones de gases de efecto invernadero, y además sulfuro de hidrogeno, el cual posee un característico olor a huevo podrido.
- **Incendio:** un posible incendio en la planta podría generar los mismos impactos que la fuga de biogás, pero, además, podría afectar de forma potencialmente negativa el suelo.
- **Explosión:** al igual que el punto anterior, podría generar los mismos impactos sumándole además los fuertes ruidos y vibraciones que se producen al momento de una implosión.

Una vez identificados todos los impactos, se procede a la valoración de los mismos.

Tabla 7.39. Matriz de valoración de impactos

Etapa	Componente Elemento Acciones	Físico							Socioeconómico			
		AIRE		AGUA	SUELO		Flora y fauna		Paisaje	Economía	Sociedad	
		Calidad	Ruido y vibraciones	calidad del agua	Calidad del suelo	Estructura del suelo	Flora	Fauna				
Construcción	Tránsito de vehículos de cargas	-42	-42						-28	30	-32	
	Operación de máquinas y herramientas	-42	-42		-38	-38	-31	-37	-31	32	-32	
	Contratación de mano de obra									40	37	
	Instalación de equipos, generadores, líneas de conducción	-33	-33		-35	-35	-34	-28	-31	56	34	
	Obras complementarias	-35	-33		-35	-35	-28	-28		32	32	
	Generación de residuos	-34		-26	-36			-34	-31		-33	
Operación	Conducción del biogás, almacenamiento y purificación del biogás		-45	-30				-35	-39	43	38	
	Contrato de personal									50	53	
	Generación de energía	72	-42	-27	-30			-38		36	45	
	Quemado en antorcha	-37		-23					-42			
	Mantenimiento de la planta			-24						40	33	
	Generación de residuos sólidos	-42		-26	-31		-28	-34	-42		-35	
	Accidentes	Fugas de biogás	-65					-27	-27		-40	-44
		Incendio	-36	-29		-30	-24	-38	-35	-44	-52	-44
Explosión		-36	-41		-24	-24	-38	-35	-48	-64	-48	

A partir de la matriz elaborada, se pueden llegar a varias conclusiones. En primer lugar, destacar que los posibles impactos negativos más altos se encontraron en el análisis en casos de que ocurran

accidentes, tales como fuga de biogás, incendio y explosión, donde los factores más afectados podrían llegar a ser la calidad del aire, el paisaje y el medio socioeconómico.

En la etapa de construcción la mayoría de los impactos se clasifican como moderados, pudiendo llegar a ser los más afectados la calidad del aire y los ruidos y vibraciones. Sin embargo, en esta etapa se pueden dar impactos positivos en la economía de la zona y en la sociedad, con beneficios tales como la contratación de mano de obra y la instalación de todos los sistemas necesarios para la planta.

En la etapa operación, se encontraron varios impactos negativos moderados y moderados significativos en cuanto a la calidad del agua, los ruidos y vibraciones, el paisaje y la zona. Sin embargo, se consideró que la generación de energía a partir del biogás, podría lograr un impacto positivo significativo en la calidad del aire, debido a que si se compara la situación antes del proyecto (el biogás se desprendía a la atmosfera sin tratamiento), la emisión de gases de efecto invernadero podría ser mucho menor.

La mayor cantidad de impactos positivos, podrían ser con respecto a los aspectos socioeconómicos, ya que poner en marcha la planta repercute en la economía local. Además, el uso la generación de energía a través de un residuo, podría causar una imagen positiva del proyecto para la sociedad.

A partir del análisis y las observaciones realizadas, es necesario construir un Plan de Manejo Ambiental (PMA), donde se identificarán las medidas de prevención, mitigación, remediación y compensación que resulten necesarias.

PLAN DE MANEJO AMBIENTAL

El principal objetivo del PMA, es el de establecer acciones específicas para garantizar la minimización y compensación de aquellos impactos negativos asociados al proyecto.

MEDIDAS DE PREVENCIÓN Y MITIGACION:

En este apartado, se listan acciones a llevar a cabo para prevenir los impactos ambientales identificados.

Tabla 7.40. Medidas preventivas y de mitigación de impactos

Factores ambientales	Medidas de prevención (potenciación en caso de impacto positivo)	Medidas de Mitigación
Calidad del aire	Mantenimiento programado de unidades de tratamiento del biogás y de generación de energía. Instalación de sensores de calidad de aire en los alrededores de la planta. Capacitación del personal en las operaciones de combustión en antorcha y unidades generadores de energía	
Ruido y vibraciones	Utilización de vehículos de transporte en buen estado y con tecnologías que minimicen las emisiones gaseosas. Mantenimiento preventivo y programado para vehículos propios y terciarizados. Realizar una adecuada instalación de sopladores, bombas y unidades de generación de energía.	Instalar cortina forestal en el perímetro que actúe como barrera contra los ruidos generados en el lugar. Uso de equipamiento de protección contra ruidos por parte de los operarios.

Calidad de agua	Canalizar y transportar controladamente los efluentes líquidos. Control periódico de la cantidad y calidad de agua generada en el proceso de adsorción. Mantenimiento periódico y controles del nivel de aceite de los generadores de energía.	Disponer los caudales de agua generados en la planta de tratamientos de efluentes para su correcta disposición. Colocar el aceite generado en el contenedor que vino y llevarlos a los talleres mecánicos más cercanos para que puedan ser reutilizados.
Calidad del suelo y estructura del suelo.	Instalación de barreras físicas en sitios de acopio de residuos para evitar filtración de lixiviados. Impermeabilización del suelo en sitios de generación y canalización de efluentes.	
Flora y fauna		Plan de re-plantación de individuos removidos del sitio de construcción.
Paisaje	Ubicación de la antorcha y las columnas de adsorción en el lugar menos visible y donde se obstruya lo menos posible el paisaje.	Evaluar la instalación de una antorcha de llama cerrada.
Economía	Promover la incorporación de mano de obra local para la construcción y operación de la planta.	
Sociedad	Realizar charlas de difusión a prensa y vecinos de la ciudad, con el fin de mostrar los beneficios del reemplazo de los combustibles fósiles. Monitorear los gases de combustión en la antorcha y las unidades de generación de energía. Plan de gestión de residuos sólidos y capacitación del personal. Respetar las normas de seguridad e higiene en el montaje y operación de la planta.	Programar visitas guiadas a instituciones educativas y público en general, para mostrar las actividades que se realizan.

MEDIDAS DE SEGURIDAD Y CONTINGENCIAS:

Como se mencionó anteriormente, en la matriz de impactos se evaluó los impactos que se pueden generar por accidentes o situaciones no esperadas. En este capítulo se definen medidas a ser consideradas para prevenir o mitigar cualquier emergencia, accidente o eventos no deseados que puedan ocurrir.

Se busca a través de estas medidas, diseñar una respuesta planificada para proteger al personal afectado de la planta, las instalaciones y equipamientos y el medio ambiente. También contempla la disponibilidad de equipos y materiales necesarios frente a eventos o accidentes.

FUGAS:

Una de las situaciones no deseadas que pueden ocurrir en la planta es la fuga de biogás, el cual es tóxico e inflamable debido a los gases que la componen.

Se definen tres zonas donde es posible la presencia o fuga de gases:

Zona 0: presencia permanente de gases (interior del gasómetro, tuberías de conducción, sistema de acondicionamiento)

Zona 1: lugar donde en funcionamiento normal hay presencia de gases, la cual se determina en un radio de 3 metros alrededor del punto emisor, de un alivio de gas, un drenaje o una válvula.

Zona 2: se observa con una frecuencia menor, o también se extiende a 3 metros más allá de una zona 1.

Una vez definidas las zonas de riesgo, se realizará la ubicación física de las zonas, para delimitar y clasificarlas según sus niveles de peligrosidad, lo cual podrá ser representado en un plano.

En base a las definiciones de las áreas de riesgo, se deberá confeccionar un Plan de Acción en casos de emergencias.

Medidas generales en caso de fugas:

Ante la detección de una fuga, se debe proceder a cerrar la válvula del tanque o conducto de gas donde se produce la misma. Se debe investigar el área, teniendo en cuenta las prioridades y precauciones necesarias cuando se aproximen al lugar donde se sospecha que se tienen mezcla de biogás/aire.

Medidas preventivas:

- Se colocarán detectores de fugas, en las proximidades de posibles salidas de gas.
- Colocar instrucciones de operación para el caso en que se active una alarma de gas.
- Realizar inspecciones frecuentes del estado del gasómetro, las tuberías y las válvulas con el objetivo de evitar fugas por mal funcionamiento de las mismas.

INCENDIOS

Los materiales inflamables dentro de la planta de biogás son los siguientes:

- Biogás
- Sistema de adsorción
- Antorcha
- Sistemas generadores de energía.

Medidas preventivas:

Las medidas preventivas pueden ser de carácter estructural, técnico y organizacional.

Protección estructural:

- Aislamiento térmico para tanques y edificaciones: material de construcción ignífugo.
- Las tuberías y cables, deben ser de materiales incapaces de propagar el fuego.
- Chequeo de instalaciones eléctricas en las proximidades

Protección técnica:

Contar y realizar el mantenimiento periódico correspondiente de los siguientes elementos:

- Extintor portátil para fuegos
- Suficientes extinguidores y suministro de agua.
- Detectores de fuego/humo

Protección organizacional:

- Crear un plan de emergencia contra incendios

- Instruir periódicamente a los operarios de la planta, sobre todo en el manejo de la columna de adsorción.
- Mantener contacto con la brigada de bomberas de la zona, con los fines de que conozcan la planta, permitiéndoles actuar de forma rápida y eficiente en caso de emergencias.

EXPLOSIONES:

Otro de los peligros del biogás es su característica de explosividad al combinarse con el oxígeno contenido en el aire.

El biogás puede ser explosivos si se dan las siguientes condiciones al mismo tiempo:

- Concentración de metano entre 4.4 – 16.5 % V o una concentración de biogás entre 6-22% V.
- Concentración de aire (oxígeno) mayor a 11.6% V-
- Presencia de una fuente de ignición a una temperatura de 700°C.

Medidas preventivas:

Como medidas preventivas se recomiendan proveer a la planta de los siguientes elementos:

- Cartelera de prohibido fumar.
- Colocar válvulas de alivio que permiten evacuar la sobrepresión.
- Establecer un plan de control de la planta de fácil acceso para los operarios donde se detallen las actividades a realizar no solo durante los incidentes, sino también en la operación normal de la planta.
- Verificación periódica de la instalación
- Verificación diaria de fugas en escotillas y boquillas.

PROGRAMA DE MONITOREO:

El programa de monitoreo tiene como objetivo establecer lineamientos para el relevamiento de factores ambientales afectados por el proyecto.

En la siguiente tabla se establecen los controles mínimos recomendados y la frecuencia a realizarlas.

Tabla 7.41. Plan de monitoreo y control

Factor ambiental	Medida de monitoreo	Frecuencia
Calidad del aire, ruido y vibraciones	Revisión de estado de sensores de calidad del aire	Diaria
	Medición de niveles de ruido y vibraciones	Semestral
Calidad del agua	Análisis de pH, temperatura y solidos sedimentables en los efluentes generados	Semanal
Calidad del suelo y estructura	Chequeo de pérdidas y filtraciones	Mensual

Conclusiones:

De acuerdo a lo observado en el Estudio de Impacto Ambiental se puede concluir que el proyecto es ambientalmente viable.

Se recomienda llevar a cabo el Plan de Manejo Ambiental y el monitoreo, con el fin de evitar y mitigar los impactos potencialmente negativos encontrados.

COSTOS

En el presente capítulo se llevará a cabo en primer lugar el cómputo y presupuesto necesario para acondicionar el biogás con el fin de utilizarlo en la cogeneración de energía, para luego poder realizar una estimación del costo por metro cúbico de biogás tratado en el periodo de un año. La estimación de dichos costos se realiza en un primer lugar desde un enfoque financiero, y luego desde un enfoque económico, donde no solo se contemplan los gastos y depreciaciones de los bienes, sino que se suma el concepto de costo de oportunidad.

Cabe aclarar, que la estimación de costos a realizar, abarca solo los relacionados con su acondicionamiento y utilización como energía térmica, pero se excluyen los costos de inyección a la red eléctrica ya que no están dentro del alcance del proyecto debido a que no se diseñó todo el sistema necesario para poder inyectar la energía a la red.

Debido a que para las plantas de cogeneración de energía se establece una vida útil máxima de 25 años (García Cascallana, 2019), se determinó fijar en ese valor el horizonte de evaluación de los costos.

ESTIMACIÓN DE COSTOS: OPTICA FINANCIERA

En el siguiente apartado se realiza el cálculo del costo desde una óptica financiera, es decir, se calculan todos los gastos o desembolsos que son necesarios realizar para la puesta en marcha y el funcionamiento de la planta de tratamiento del biogás. Estos gastos o desembolsos se expresan en unidades físicas y se valoran por su precio.

INVERSIÓN INICIAL

En la siguiente tabla se detallan todos los ítems necesarios para la puesta en marcha de la obra. Se estima un periodo de puesta en marcha de 1 año.

Los valores obtenidos para los ítems “Trabajos preliminares” y “Elementos estructurales y construcciones” (excepto la cortina forestal, el cerco perimetral y el portón de ingreso) fueron extraídos de la revista CIFRAS, los mismos incluyen un precio base al que se le suma la mano de obra. El valor del cercamiento con alambrado y el portón de ingreso, fueron brindados por la empresa “Forestales y Cercos perimetrales”, mientras que el precio de la cortina forestal fue brindado por “Vivero Guillermo Chrestia”.

En cuanto al valor del terreno, se obtuvo teniendo en cuenta el valor de varios terrenos en venta en el barrio del proyecto. (<https://www.properati.com.ar/>). El valor del cercamiento con alambrado y el portón de ingreso, fueron brindados por la empresa “Forestales y Cercos perimetrales”

En cuanto a los equipos utilizados en la planta se obtuvieron los valores de los mismos a través de distintos proveedores. El gasómetro, la antorcha, el motogenerador y el cogenerador en su precio incluyen además del precio del equipo base, el costo de instalación, mano de obra y viáticos de la empresa que se encarga de instalarlos (BGA Energía). Los precios del resto de los equipos fueron brindados por distintos proveedores (detallados en el anexo “Presupuestos”)

El valor de los distintos componentes del sistema de conducción se obtuvo de la empresa SB ARGENTINA. El detalle de las tuberías, válvulas y accesorios para la tubería se encuentran detallado como anexo.

Tabla 7.42. Inversión Inicial

Item	Detalle	Unidad	Cantidad	Precio Unitario ¹	Precio total	Porcentaje
1	Terreno	m ²	1800	\$ 3.482,53	\$ 6.268.563	12,49
2	Trabajos preliminares					
2.1	Nivelación del terreno	m ³	1800	\$ 265,33	\$ 397.995	
2.2	Estudios preliminares			\$ 224.972,96	\$ 224.973	

				Subtotal	\$ 622.968	1,24
3	Elementos estructurales y construcciones					
3.1	Oficina	m2	14,25	\$ 51.276,00	\$ 730.683	
3.2	Baños	m2	18	\$ 51.276,00	\$ 922.968	
3.3	Cortina forestal de cuasarinas	Unidad	43	\$ 686,00	\$ 29.498	
3.4	Portón de ingreso de caño con tejido	Unidad	1	\$ 25.100,00	\$ 25.100	
3.5	Cercamiento de alambrado	M	180	\$ 2.771,00	\$ 498.780	
3.6	Canaletas	M	108	\$ 7.000,00	\$ 756.000	
3.7	Veredas y caminos de circulación	m2	418	1082	\$ 452.276	
3.8	Hormigón para cimientos	m3	28	\$ 34.441,48	\$ 1.052.500	
				Subtotal	\$ 4.467.805	8,90
4	Equipos					
4.1	Gasómetro doble membrana	Unidad	1	\$ 7.384.750,00	\$ 7.384.750	
4.2	Antorcha PROGECO serie EMR	Unidad	1	\$ 1.312.800,00	\$ 1.312.800	
4.3	Chiller Modelo CNLS-200-EX*	Unidad	1	\$ 1.859.049,36	\$ 1.859.049	
4.4	Separador Ciclónico	Unidad	1	\$ 66.492,87	\$ 66.493	
4.5	Columna de Adsorción*	Unidad	2	\$ 2.944.329,36	\$ 5.888.659	
4.6	Soplador de lóbulos rotativos modelo R200 Repicky	Unidad	1	\$ 154.000,00	\$ 154.000	
4.7	Soplador 0,1 HP	Unidad	1	\$ 22.416,81	\$ 22.417	
4.8	Electrobomba centrífuga VASSER QC-75	Unidad	1	\$ 14.699,00	\$ 14.699	
4.9	Motor Cogenerador de Energía CENTO T100	Unidad	1	\$ 11.503.400,00	\$ 11.503.400	
4.10	Motor generador eléctrico CAT G3516A	Unidad	1	\$ 9.872.450,00	\$ 9.872.450	
4.11	Intercambiador de calor tubos concéntricos	Unidad	1	\$ 191.250,00	\$ 191.250	
				Subtotal	\$ 38.269.967	76,24
5	Sistema de conducción					
5.1				Tuberías	\$ 195.769	
5.2				Valvulería	\$ 178.217	
5.3				Accesorio tuberías	\$ 64.342	
				Subtotal	\$ 438.328	0,87
6	Varios					
6.1	Manómetro	Unidad	2	\$ 1.858,00	\$ 3.716	
6.2	Batea contenedora de residuos.	Unidad	1	\$ 123.900,00	\$ 123.900	
				Subtotal	\$ 127.616	0,25
				Total	\$ 50.195.246	100,00

*Estos equipos son importados directamente desde China, el cálculo de su valor se encuentra detallado en el anexo "Costos de importación"

¹Para equipos con precio en dólares, se tomo un valor de cotización del dólar igual a \$ 113,00. Fecha: 02/03/2022.

Fuente: Banco Nación Argentina. (<https://www.bna.com.ar/Personas>)

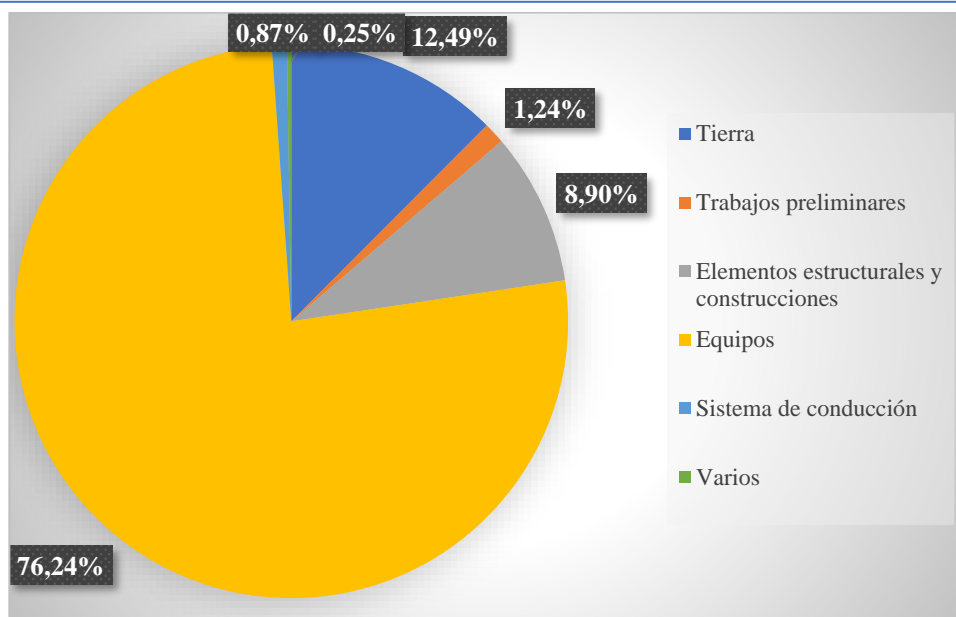


Ilustración 7.12. Distribución inversión inicial

OPERACIÓN.

Dentro de los costos de operación se encuentran los siguientes ítems:

- Recambio del relleno de las columnas de adsorción
- Mano de obra
- Tratamiento de residuos peligrosos
- Servicio de energía eléctrica
- Mantenimiento

En el anexo “Costos de operación” se encuentra detallado el cálculo del valor de la mano de obra y del servicio de energía eléctrica.

Tabla 7.43. Costos de operación

Detalle	Costo Anual	Porcentaje
Mano de obra	\$ 11.293.945	89,78 %
Tratamiento de residuos peligrosos	\$ 38.824	0,31 %
Servicio de energía eléctrica (anual)	\$ 537.246	4,27 %
Mantenimiento	\$ 321.236	2,55 %
Pellets de oxido de hierro + costos de importación	\$ 388.562	3,09 %
TOTAL ANUAL	\$ 12.579.812	100,00 %

ESTIMACIÓN DE COSTOS: ENFOQUE ECONÓMICO

En el siguiente apartado se realiza el cálculo del costo anual por metro cubico de biogás tratado desde un enfoque económico. En este enfoque, se incorpora al costo, además de los gastos y la depreciación del capital, el concepto de “costo de oportunidad” asumido por tener el capital inmovilizado.

Antes de comenzar con el proceso de costeo, es necesario clasificar el capital interviniente en el proceso productivo para comprender como inciden en el costo. El principal criterio para clasificar, es el destino del capital y la disponibilidad del mismo, es decir, si se van a consumir o no en un solo acto productivo.



Ilustración 7.13. Clasificación del capital

Capital Fundiario: El capital fundiario comprende la tierra y las mejoras, es decir, el inmueble. Es inmóvil por su naturaleza y fijo por su destino.

Mejoras Extraordinarias: son aquellas que se realizan una sola vez y quedan incorporadas a la tierra.

Mejoras ordinarias: son aquellas que mantienen su individualidad distinguiéndose de la tierra.

Capital de explotación: compuesto por todos los bienes muebles y servicios empleados en la empresa.

Capital de explotación fijo: compuesto por todos aquellos bienes muebles que se consumen en más de un acto productivo.

Capital de explotación circulante: móvil por su destino y naturaleza, está conformado por el valor de los bienes no durables y los servicios, es decir, que se consumen en un solo acto productivo.

Esta clasificación hace principal hincapié en la duración de los bienes, concepto de suma importancia para saber su incidencia en el costo.

La fórmula de costos queda de la siguiente manera:

$$\text{Costos} = \text{Gastos} + \text{Amortizaciones} + \text{Interes}$$

Donde, los gastos, incluyen el valor de los bienes (no durables) y los servicios necesarios de ser incorporados; las amortizaciones, el valor de la depreciación sufrida por los bienes durables (pero de vida útil limitada, no infinita), y el interés, el costo de oportunidad asumido por el capital productivo inmovilizado o puesto a disposición de un proceso de producción.

En resumen:

Tabla 7.44. Incidencia en el costo según capital

DENOMINACION	TIPO DE BIEN O SERVICIO	INCIDENCIA EN EL COSTO		
		GASTOS	AMORTIZACION	INTERES
Capital fundiario	Tierra			X
	Mejoras Ordinarias		X	X
	Mejoras extraordinarias			X
Capital de explotación fijo	Fijo		X	X
	Circulante	X		X

INTERESES, AMORTIZACIONES Y GASTOS:

- **INTERESES:**

La tasa de interés que representa el costo de oportunidad es la obtenida de la tasa de interés del Banco Nación la cual es la misma para todos los capitales.¹³

$$Tasa\ de\ interés = 39,5\%$$

- **AMORTIZACIONES:**

Para el cálculo de las amortizaciones se optó por el método de amortización lineal, donde se utiliza la siguiente ecuación:

$$A = (VN - VR)/n$$

Siendo,

A: Amortización

VN: Valor a nuevo (precio del bien en estado nuevo, sin uso)

VR: Valor residual (valor que le queda a un bien, que ya no se puede utilizar para la finalidad a la que originalmente se lo había destinado)

n: duración estimada del bien.

Para el cálculo de las mismas, se tuvieron las siguientes consideraciones:

- Para las construcciones el valor residual después de 50 años es del 10% de su valor nominal. Como el proyecto tiene una vida útil de 25 años y no de 50 (vida útil que en general se le asigna a estos bienes) se consideró como valor residual un 20% del valor nominal.
- Para las canaletas y las tuberías de acero inoxidable, se consideró un valor residual del 10%. Para la tubería y accesorios donde circula el biogás (Tubería de acero inoxidable 3''), se consideró un valor residual menor (5%), ya que el biogás es considerado un gas corrosivo.
- Si al final de la vida útil, para algunos equipos se puede considerar la venta por partes o como repuesto, su valor residual será igual a 10%, caso contrario, el valor residual de los equipos es igual a 0 %.
- Para el cálculo de la vida útil se tuvo en cuenta los valores proporcionados por el Tribunal de Tasaciones de la Nación, el mismo se encuentra como anexo

En el anexo "Cálculo de Amortizaciones" se encuentran detallados los cálculos realizados.

- **GASTOS:**

A continuación, se presenta la tabla que resume el valor de los gastos, su periodicidad y finalmente el valor anual del gasto:

Tabla 7.45. Capital circulante

Capital circulante	Valor del gasto	Periodicidad	Valor anual del gasto
Mano de obra	\$ 868.765	Mensual	\$ 11.293.945
Tratamiento de residuos peligrosos	\$ 55.000	17 meses	\$ 38.824
Servicio de energía eléctrica	\$ 89.541	Bimestral	\$ 537.246
Mantenimiento	\$ 321.236	Anual	\$ 321.236
Pellets de óxido de hierro	\$ 550.462	17 meses	\$ 388.562
Total gastos			\$ 12.579.812

¹³ Tasa de interés Banco Nación, fecha 18/02/2022 <https://www.infobae.com/economia/2022/02/17/suba-de-tasas-el-interes-de-los-plazos-fijos-a-30-dias-subira-del-39-al-415-anual/>

ESTIMACIÓN DEL COSTO UNITARIO.

A continuación, se calcula el costo de tratamiento por metro cubico de biogás. Para su determinación se calculará primero el costo total directo y total, como la suma de las amortizaciones, gastos e intereses. Luego, para determinar el costo unitario de tratamiento se realiza el cociente entre dicho valor y el volumen total anual de biogás a tratar:

$$\text{Costo unitario } (\$/\text{m}^3) = \frac{\text{Costo directo } (\$)}{\text{Volumen anual de biogas } (\text{m}^3)}$$

Teniendo en cuenta que se generan 4469 m³/día, se estima que se trataran aproximadamente 1.608.840 m³ de biogás.

Tabla 7.46. Cálculo del costo unitario

Detalle	Valor	Amortizaciones	Intereses	Gastos
Terreno	\$ 6.268.563	\$ -	\$ 2.476.082	\$ -
Trabajos preliminares	\$ 622.968	\$ -	\$ 246.072	\$ -
Elementos estructurales y construcciones	\$ 4.467.805	\$ 884.954	\$ 1.764.783	\$ -
Equipos	\$ 38.269.967	\$ 1.926.716	\$ 15.116.637	\$ -
Sistema de conducción	\$ 438.328	\$ 30.737	\$ 173.139	\$ -
Varios	\$ 127.610	\$ 5.947	\$ 50.406	\$ -
Mano de obra	\$ 11.293.945	\$ -	\$ 4.461.108	\$ 11.293.945
Tratamiento de residuos peligrosos	\$ 38.824	\$ -	\$ 15.335	\$ 38.824
Servicio de energía eléctrica	\$ 537.246	\$ -	\$ 212.212	\$ 537.246
Mantenimiento	\$ 321.236	\$ -	\$ 126.888	\$ 321.236
Pellets de Oxido de hierro	\$ 388.562	\$ -	\$ 153.482	\$ 388.562
Totales		\$ 2.848.355	\$ 23.433.082	\$ 12.579.812
Costo directo				\$ 38.862.656
Costo por m3 de biogas tratado				\$ 24,15/m³

FINANCIAMIENTO Y POSIBLES BENEFICIOS

FINANCIAMIENTO

Debido a que este proyecto utiliza una fuente de energía renovable, puede acceder a ciertos créditos que tratan de impulsar estos proyectos.

Una forma de financiarse es a través del Fondo Verde por el Clima. Este es un fondo global creado para apoyar los esfuerzos de los países en desarrollo para responder al desafío del cambio climático.

En Argentina, actualmente el BICE es el encargado de financiar estos proyectos a través de dicho fondo. A continuación, en la siguiente tabla se exponen las condiciones de dichos prestamos:

Tabla 7.47. Condiciones del préstamo otorgado por el BICE

Destino	Proyectos de eficiencia energética y tecnologías de energía renovable
Beneficiarios	Los demandantes de crédito deben ser personas físicas con domicilio real en la República Argentina o personas jurídicas (PyMEs) que tengan su domicilio o el de su sucursal, asiento o el de cualquier otra especie de representación permanente en la República Argentina.
Monto Máximo	Para una empresa o grupo económico es de US\$ 10.000.000
Porcentaje a financiar	Hasta el 80% del monto total del proyecto, excluido el Impuesto al Valor Agregado (IVA).

Tasa	Pesos: Variable. Badlar bancos privados + 200pb con tope en 32% los primeros 24 meses. Dólares: Fija 6%
Plazo Máximo	15 años
Periodo de gracia	2 años
Sistema de amortización	Frances
Comisión	Sin comisión
Garantía	A satisfacción del BICE

POSIBLES BENEFICIOS

Económicos

Si bien, en este proyecto no se realizó un cálculo de los posibles ahorros económicos que tendría la utilización del biogás como fuente de energía, tanto para la calefacción como para la inyección de la energía eléctrica generada, cabe mencionar que a nivel nacional existe el régimen de fomento a la Generación Distribuida que mediante la ley 27.422, establece el marco regulatorio para que los usuarios de la red de distribución generen energía eléctrica de origen renovable para su autoconsumo, con inyección de los excedentes a la red eléctrica. En estos casos, el distribuidor de energía instala un medidor bidireccional, con el cual se mide tanto la energía consumida como la inyectada a la red. Los valores de energía inyectados se ven reflejados en la factura de suministro eléctrico donde figuran en forma discriminada los kwh inyectados, los kwh demandados y los precios correspondientes a cada uno de ellos. El esquema adoptado en la ley es el de balance neto de facturación, en el cual el valor a pagar por el usuario-generador será el resultante de la diferencia entre el valor monetario de la energía demandada a la red y el de energía inyectada en la red antes de impuestos.

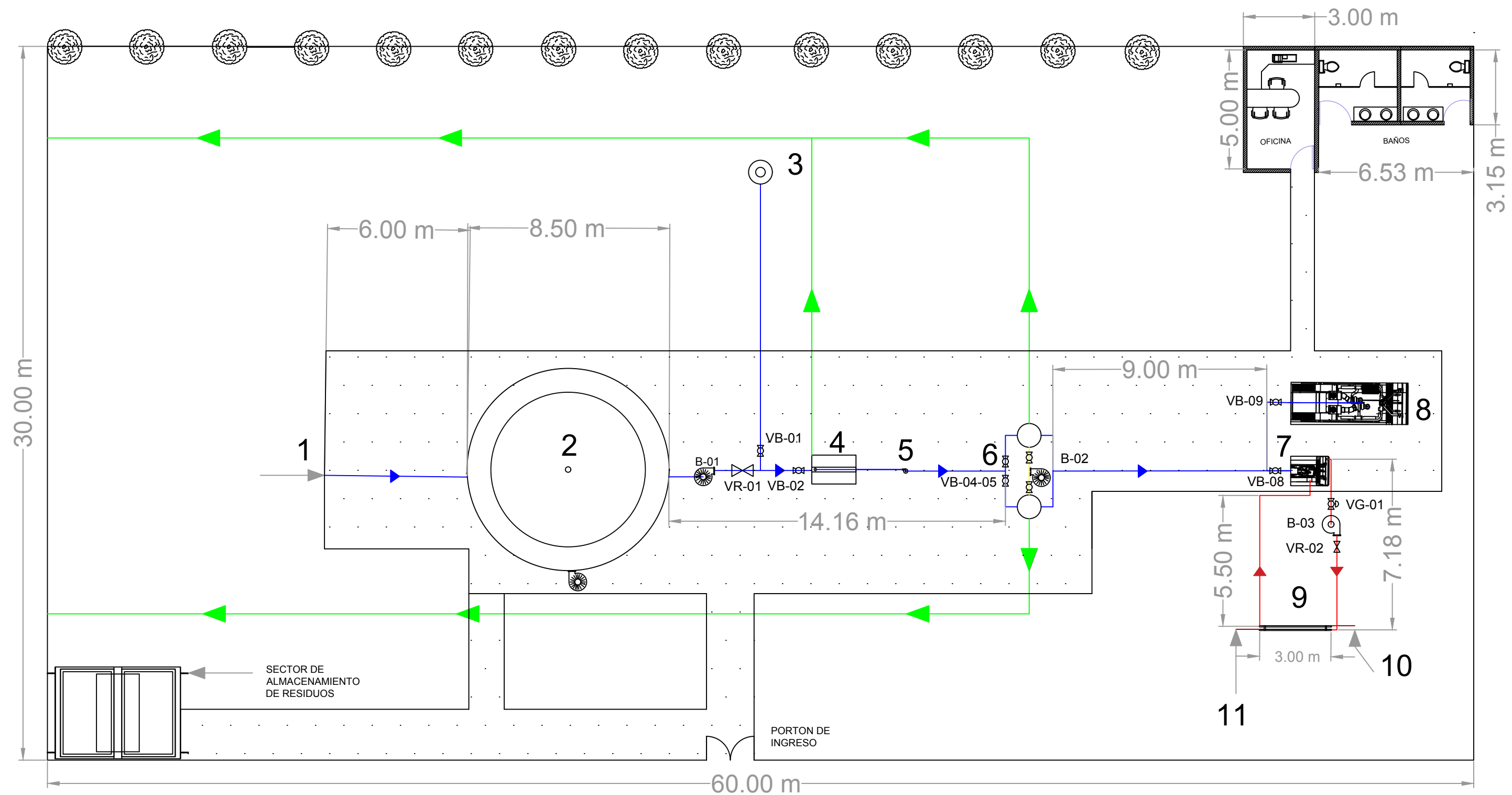
Otro punto a destacar, es que la compensación económica corresponde al precio al cual el distribuidor compra la energía eléctrica en el mercado mayorista (precio mayorista), que siempre es menor al precio al cual el usuario la adquiere del distribuidor (precio minorista).

Fiscales

Mediante la ley 27.191, Argentina lanza una serie de beneficios fiscales para promover la inversión en fuentes de energía renovable. La ley, establece para inversiones realizadas entre el 1° de enero de 2022 y el 31 de diciembre de 2025, los siguientes beneficios:

- Amortización acelerada en el Impuesto a las Ganancias: En bienes amortizables adquiridos, elaborados, fabricados o importados en dicho periodo, como mínimo en cinco cuotas anuales, iguales y consecutivas.
- Devolución anticipada del IVA: Para inversiones realizadas entre el 1° de enero de 2022 y el 31 de diciembre de 2025, inclusive, este beneficio se hará efectivo luego de transcurridos como mínimo tres periodos fiscales contados a partir de aquel en que se hayan realizado las respectivas inversiones.


PLANOS



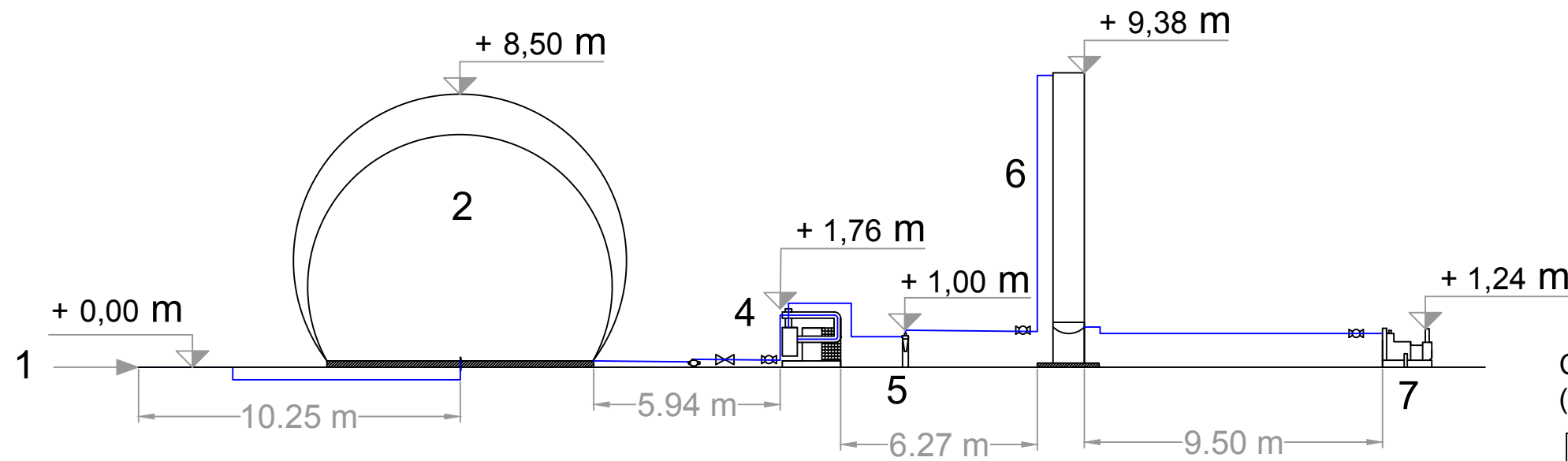
Cota Nivel del terreno : 77 m

REFERENCIAS			
SIMBOLO	DETALLE	DN	MATERIAL
	TUBERÍA CIRCULACIÓN BIOGAS	90 MM	ACERO INOXIDABLE
	TUBERÍA CIRCULACIÓN AIRE DE REGENERACIÓN	20 MM	ACERO INOXIDABLE
	TUBERÍA CIRCULACIÓN BARROS	65 MM	PVC
	TUBERÍA CIRCULACIÓN AGUA CALIENTE	40 MM	ACERO INOXIDABLE
	CANALETA	100 MM	ACERO INOXIDABLE
	VALVULA RETENCIÓN	90 MM	ACERO INOXIDABLE
	VÁLVULA DE BOLA	90 MM	ACERO INOXIDABLE
	VALVULA DE GLOBO	40 MM	ACERO INOXIDABLE
	CIMIENTO HORMIGON	-	HORMIGÓN ARMADO
	VEREDAS Y CAMINOS DE CIRCULACIÓN	-	CEMENTO
	SOPLADOR		
	BOMBA		

REFERENCIAS		
Nº	DETALLE	MATERIAL
1	UASB	ACERO INOXIDABLE
2	GASÓMETRO	DOBLE MEMBRANA DE POLIESTER
3	ANTORCHA	ACERO INOXIDABLE
4	CHILLER	ACERO AL CARBONO
5	SEPARADOR CICLÓNICO	PRFV
6	COLUMNAS DE ADSORCIÓN	ACERO AL CARBONO ANTICORROSIVO
7	COGENERADOR	
8	GENERADOR ELÉCTRICO	
9	INTERCAMBIADOR DE CALOR	
10	ALMACENAMIENTO DE LODOS	ACERO INOXIDABLE
11	DIGESTOR ANAEROBIO DE LODOS	HORMIGÓN ARMADO

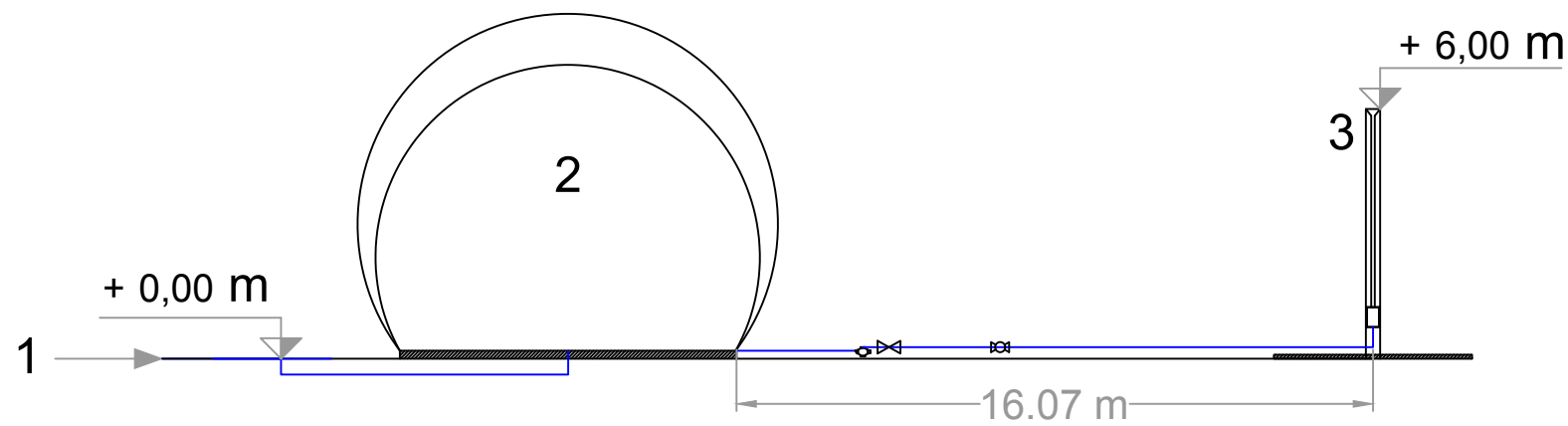
PLANO Nº 1	TÍTULO DEL PROYECTO Acondicionamiento del biogas producido en la planta de tratamiento de efluentes líquidos de una cervecería para cogeneración de energía	 UNIVERSIDAD NACIONAL DEL LITORAL Facultad de Ingeniería y Ciencias Hídricas
TÍTULO DEL PLANO: Vista en planta		
ALUMNO: Invinkelried, Caren Fani		CARRERA: Ingeniería Ambiental
ESCALA: 1:200	FECHA: 04/04/2022	

LINEA GASOMETRO - CHILLER - SEPARADOR CICLONICO . COLUMNA DE ADSORCION . COGENERADOR

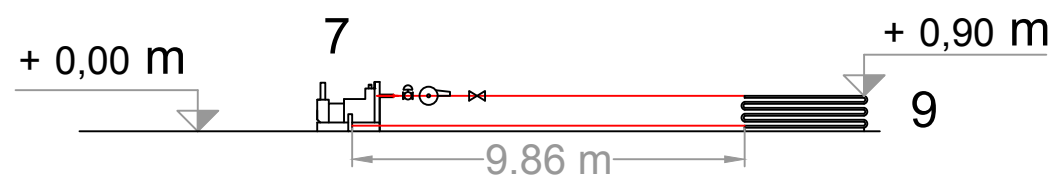


Cota Nivel del terreno : 77 m
(Representa la cota 0 m en el plano)


LINEA GASOMETRO - ANTORCHA

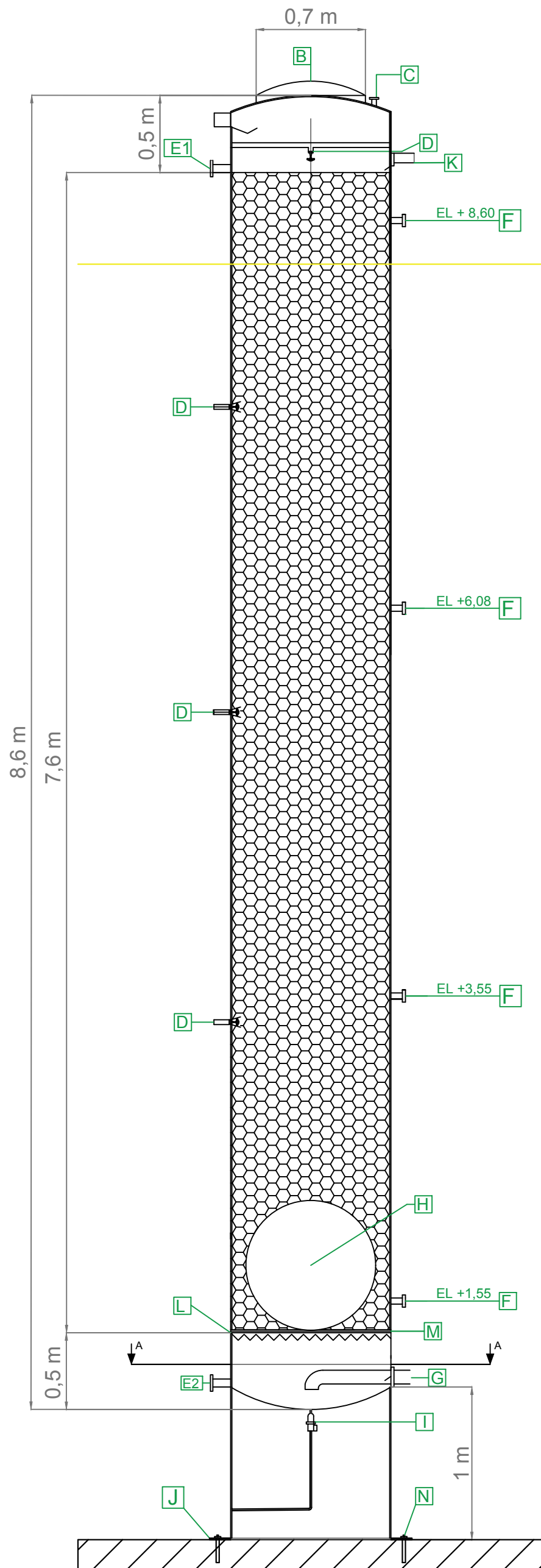


LINEA AGUA CALIENTE

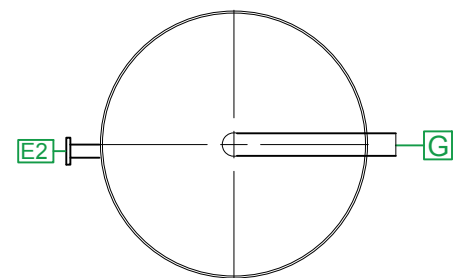
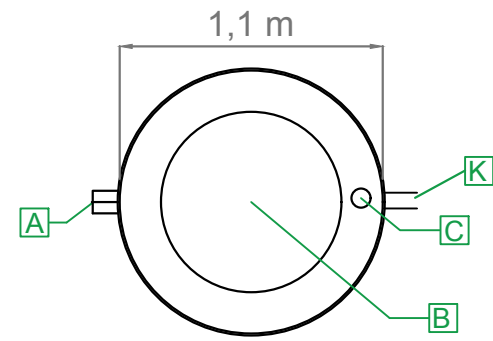


REFERENCIAS			
SIMBOLO	DETALLE	DN	MATERIAL
	TUBERÍA CIRCULACIÓN BIOGAS	90 MM	ACERO INOXIDABLE
	TUBERÍA CIRCULACIÓN AGUA CALIENTE	40 MM	ACERO INOXIDABLE
	VALVULA RETENCIÓN	90 MM	ACERO INOXIDABLE
	VÁLVULA DE BOLA	90 MM	ACERO INOXIDABLE
	VALVULA DE GLOBO	40 MM	ACERO INOXIDABLE
	CIMIENTO HORMIGON	-	HORMIGÓN ARMADO
1	UASB		ACERO INOXIDABLE
2	GASÓMETRO		DOBLE MEMBRANA DE POLIESTER
3	ANTORCHA		ACERO INOXIDABLE
4	CHILLER		ACERO AL CARBONO
5	SEPARADOR CICLÓNICO		PRFV
6	COLUMNAS DE ADSORCIÓN		ACERO AL CARBONO ANTICORROSIVO
7	COGENERADOR		
8	GENERADOR ELÉCTRICO		
9	INTERCAMBIADOR DE CALOR		
10	ALMACENAMIENTO DE LODOS		ACERO INOXIDABLE
11	DIGESTOR ANAEROBIO DE LODOS		HORMIGON ARMADO

PLANO N° 2	TITULO DEL PROYECTO Acondionamiento del biogas producido en la planta de tratamiento de efluentes líquidos de una cervecería para cogeneración de energía	 UNIVERSIDAD NACIONAL DEL LITORAL Facultad de Ingeniería y Ciencias Hídricas
TITULO DEL PLANO: Perfil de las distintas corrientes		
ALUMNO: Imvinkelried, Caren Fani		ESCALA: 1:190 FECHA: 04/04/2022 CARRERA: Ingeniería Ambiental



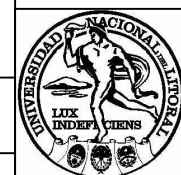
VISTA SUPERIOR



A-A

REFERENCIAS		
MARCA	DESCRIPCION	DN
A	ENTRADA DE BIOGAS	90 MM
B	ESCOTILLA DE CARGA	720 MM
C	VALVULA DE SEGURIDAD	76,2 MM
D	ROCIADOR AUTOMATICO	
E1	MEDIDOR DE PRESIÓN A LA ENTRADA	12,7 MM
E2	MEDIDOR DE PRESION A LA SALIDA	12,7 MM
F	SENSORES DE TEMPERATURA	10,20 MM
G	SALIDA DE BIOGAS	90 MM
H	ESCOTILLA DE LIMPIEZA	850 MM
I	VALVULA DE CONDENSADOS	12,7 MM
J	ANILLO DE BASE	-
K	ENTRADA DE AIRE DE REGENERACION	63 MM
L	SOPORTE DE RELLENO	
M	REJILLAS DE ACERO INOXIDABLE	
N	PERNO DE ANCLAJE	40 MM
	RELLENO COLUMNA DE ADSORCIÓN	
	HORMIGON ARMADO	

PLANO N° 3	TITULO DEL PROYECTO Acondicionamiento del biogas producido en la planta de tratamiento de efluentes líquidos de una cervecería para cogeneración de energía
TITULO DEL PLANO: Columna de Adsorción	
ALUMNO: Invinkelried, Caren Fani	
ESCALA: 1:30	FECHA: 04/04/2022



UNIVERSIDAD NACIONAL
DEL LITORAL
Facultad de Ingeniería y
Ciencias Hídricas

CARRERA: Ingeniería Ambiental

ANEXOS.

ANEXO I: CÁLCULO DE LA DENSIDAD DEL BIOGAS

Debido a que se diseña la torre considerando que el gas se comporta como un gas ideal, y se tiene como dato que la densidad del biogás a 20°C y 1 atm es 1,20 kg/m³, la densidad a 1 atm y 30° se la calcula de la siguiente manera:

$$PV = n \cdot RT$$

$$n = \text{Masa} / PM_{\text{Biogas}}$$

Para las condiciones a 20° y 1 atm, se tiene:

$$P_1 V_1 = \frac{\text{Masa}}{PM_{\text{Biogas}}} \cdot RT_1$$

$$T_1 = \frac{P_1 V_1 PM_{\text{Biogas}}}{\text{Masa} \cdot R} = \frac{P_1 V_1 PM_{\text{Biogas}}}{\rho_1 R}$$

Para las condiciones de 30° y 1 atm:

$$P_2 V_2 = \frac{\text{Masa}}{PM_{\text{Biogas}}} \cdot RT_2$$

$$T_2 = \frac{P_2 V_2 PM_{\text{Biogas}}}{\text{Masa} \cdot R} = \frac{P_2 V_2 PM_{\text{Biogas}}}{\rho_2 R}$$

Como R es constante, P₁=P₂=1 atm, se tiene:

$$T_1 * \rho_1 = \frac{P * V * PM_{\text{Biogas}}}{R}$$

$$T_2 * \rho_2 = \frac{P * V * PM_{\text{Biogas}}}{R}$$

$$T_1 * \rho_1 = T_2 * \rho_2$$

$$\rho_2 = \frac{T_1 * \rho_1}{T_2} = \frac{20^\circ\text{C} * \left(\frac{1,2 \text{ kg}}{\text{m}^3}\right)}{30^\circ\text{C}} = 0,8 \text{ kg/m}^3$$

ANEXO II: PRESUPUESTOS Y FICHAS TÉCNICAS DE EQUIPOS

PELLETS DE OXIDO DE HIERRO:

Julia Gu 2020-09-22 04:48



280 usd/ton iron oxide desulfurizer for biogas with full conatiner

Julia Gu 2020-10-25 22:31



1. Oxygen in the air is sufficient for regeneration of the desulfurizer.

2. During regeneration, the temperature should be strictly controlled under 100 degrees, and the temperature should be as high as possible when conditions permit to speed up the regeneration.

3. Never add water to control the temperature during regeneration, just control the air intake.

Pay attention to these three matters during regeneration, which can make the regeneration effect of desulfurizer better, and at the same time, it can ensure that the effect of reuse will not be weakened

Regeneration method:

When the H₂S in the outlet of the desulfurization tower exceeds 1ppm or exceeds the required index, and the saturated sulfur capacity has not reached 30%, the regeneration of the desulfurizer should be carried out.

The operating conditions as follows:

Airspeed: 0.5-140h⁻¹ (adjusted according to changes in regeneration temperature)

Pressure: normal pressure;

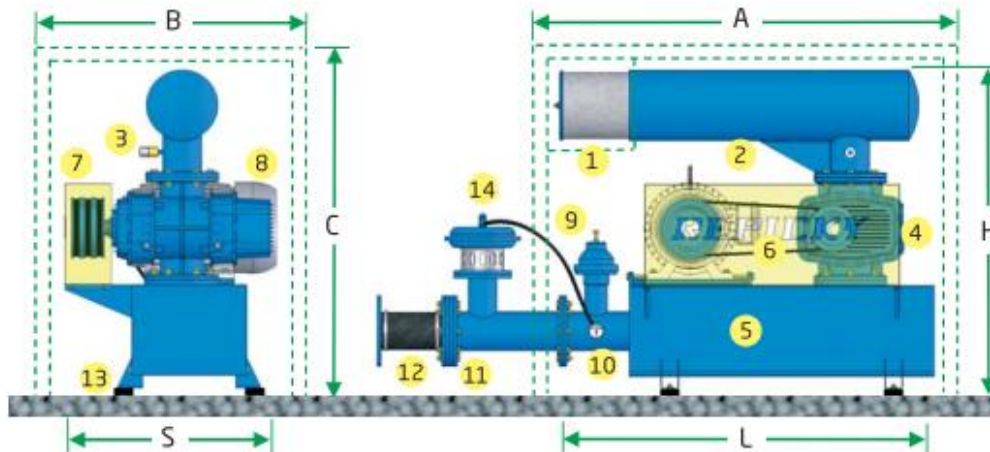
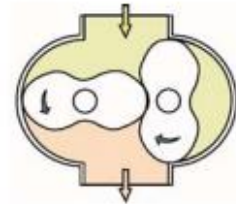
Temperature: 30-60°C (adjust the airspeed and control the O₂ content in the regeneration gas), the desulfurizer activity gradually decreases as the increasing regenerations.



SOPLADOR REPICKY R200:

Sopladores y Bombas de Vacío de Lóbulos Rotativos

Equipo con accesorios



Referencias:

- 1- Filtro de aire
- 2- Silenciador de admisión (para equipos de vacío lleva brida ANSI para conexión a proceso)
- 3- Indicador de filtro obstruido (IFO)
- 4- Soplador o Cabezal
- 5- Base compacta con silenciador de impulsión incluido
- 6- Transmisión por correas y poleas o acople elástico.
- 7- Cubretransmisión
- 8- Motor normalizado (puede ser provisto por el cliente)
- 9- Válvula de alivio por presión o vacío.

- 10- Manómetro en baño de glicerina
- 11- Válvula de retención a clapeta
- 12- Amortiguador de vibraciones de caucho
- 13- Tacos antivibratorios (pueden ser provistos por el cliente)

Opcionales:

- 14- Válvula automática para arranque sin carga y pieza Tee.
- Cabina acústica panelizada con reducción entre 15 y 20 db (A) dependiendo condiciones operativas.
- Termómetro con o sin contacto de máxima
- Presóstato y/o vacuóstato
- Amortiguador de vibraciones de acero inoxidable
- Motores especiales.

Caren buenas tardes, paso precio de Cabezal R200 punta de eje libre sin accesorios Precio unitario es de \$ 154.000.- más impuestos

Plazo de entrega: 30 días

Forma de pago: Anticipo, saldo contra entrega

Lugar de entrega: Capital Federal

Mantenimiento oferta: 10 días

Saludos

CHILLER:

E-mail: rosemary.chen@hzlinuo.com Website: www.hzlinuo.com

Quotation

To: La Tranquera SRL

Date:2021-9-14

Product	Model	Capacity	Quantity (PC)	Unit Price (USD/PC)
Explosion proof type Biogas Refrigeration Dryer	LNLS-200-EX	200Nm ³ /h	1	12200.00

Notes:

1. Trade Term: FOB Shanghai.
2. Payment Terms: 50% prepaid, and the balance before shipment.
3. Package: Standard export package (Plywood case)
4. Date of Delivery: within 30 working days after receiving the deposit.
5. This quotation is valid for 30 days.
6. Pictures:



Technical Data

No.	Specification(LNLS-200-Ex)	
1	Gas Medium	Biogas
2	Gas capacity	200Nm ³ /h
3	Gas Inlet Temperature	35℃
4	Working pressure	1-30kpa
5	Pressure drop	2kpa
6	Gas Outlet temperature	5 ℃
7	Refrigerant	R22
8	Cooling type	Water Cooling
9	Electrical protection grade	IP54
10	Anti-explosion Grade	ExdIIBT4
11	Power Consumption	3.3KW
12	Cooling water volume	4T/H
13	Inlet and outlet connection	DN80
14	Dimension	1860*1214*1760mm (The final size refers to the confirmed drawing)
15	Weight	480kgs
16	Main Material	304 Stainless steel The box of machine is carbon steel
17	Power Supply	380V/3PH/50HZ
18	Warranty	12 months
19	Refrigerant compressor brand	Danfoss or Panasonic

COLUMNAS DE ADSORCIÓN:



1. PROJECT OVERVIEW

1.1 Basic Information

The amount of biogas to be purified in this project is 4000m³/d, and the content of hydrogen sulfide is calculated at 3000ppm, and the content of hydrogen sulfide at the outlet after desulfurization is less than 200ppm.

1.1.1 Raw material information

Biogas composition as sheet 1-1:

sheet 1-1 biogas composition

Item	Content
Gas Volume	4000m ³ /d
H ₂ S	3000ppm
Temperatur	Normal
Gas Pressure	-

1.1.2 Processing requirements

After desulfurization and purification, the biogas produced by the project is required as follows sheet 1-2:

sheet 1-2

Item	Content
H ₂ S	<200ppm

1.1.3 Main equipment and cost

sheet 1-3

No.	Item	Data	QTY	Unit	Unit Price (USD)	Total Price (USD)
1	Desulfurization Tank	2pcs of Φ1.5×H5.8m, material: anticorrosion of carbon steel (1 tank for duty + 1 tank for standby) including platform and ladder	1	set		18000

MOTOR DE COGENERACIÓN

TEDOM

Cento 100, biogas, open module

Technical specification

Datasheet

Basic Technical Data

nominal electrical output	106			kW
maximum heat output ¹⁾	143			kW
load	50	75	100	%
maximum heat output	106	121	143	kW
fuel input	186	235	291	kW
electrical efficiency	28,6	33,9	36,4	%
heat efficiency	57,1	51,7	49,2	%
total efficiency (fuel utilization)	85,7	85,6	85,6	%
gas consumption	28,6	36,1	44,7	Nm ³ /h

The Basic Technical Data are applicable for the standard conditions pursuant to the "Technical instructions" document.
 The minimum permanent electrical output must not drop below 50 % of the nominal output.
 Gas consumption is mentioned for biogas with methane content 65%, at normal conditions (0°C, 101,325 kPa)
 Gas consumption tolerance, or fuel input tolerance, at 100% load is +5%.
 Tolerances of other parameters are mentioned in "Technical Instructions-Validity of Technical Data" document.
 1) Maximum heat output is a sum of heat outputs of secondary circuit with exhaust gas cooled to 150°C

Observance of Emission Limits

emissions	NOx	CO	
with 5% of O ₂ in exhaust gases	500	650	mg/Nm ³

Generator

used type	LSA 44.3 L10
producer	LEROY SOMER
cos φ	1,0
efficiency in the working point	94,6 %
voltage	400 V
frequency	50 Hz

Engine

type	TB 110 G5V TX 86
producer	TEDOM
number of cylinders	6
arrangement of cylinders	in series
bore x stroke	130/150 mm
displacement	11946 cm ³
compression ratio	12 : 1
speed	1500 rpm
oil consumption, normal / max.	0,3 / 0,5 g/kWh
max. engine output	112,5 kW

TB 110 G5V TX 86_850; revision B: 21.5.2014/28.5.2012

Thermal System

Secondary circuit

heat carrier	water
circuit's heat output	143 kW
nominal water temperature, input / output	70/90 °C
nominal temperature drop	20 °C
return water temperature, min / max	40/70 °C
nominal flow rate	1,7 kg/s
max. working pressure	600 kPa
water volume in CHP unit circuit	10 dm ³
pressure loss at the nominal flow rate	15 kPa

Utilization of exhaust gas output for other purposes

heat output of exhaust gases (cooling to 150°C)	67 kW
exhaust gas temperature	519 °C

Primary circuit

circuit's heat output	143 kW
max. working pressure	250 kPa
water volume in CHP unit circuit	110 dm ³

TEDOM

Cento 100, biogas, open module

Technical specification

Datasheet

Fuel, Gas Inlet

methane content	65	%
low heat value	23,4	MJ/Nm ³
gas pressure	5 + 10	kPa
max. pressure change under varying consumption	10	%
max. gas temperature	30	°C

Combustion and Ventilation Air

unused heat removed by the ventilation air	19	kW
aspirated air temperature, min / max	10/35	°C
amount of combustion air	440	Nm ³ /h

Exhaust Gas and Condensate Outlet

amount of exhaust gases	472	Nm ³ /h
exhaust gas temperature, nominal / max	150/180	°C
max. back-pressure of exhaust gases downstream the CHP unit flange	20	mbar
pressure loss of the freely delivered silencer	10	mbar
permissible pressure loss of the interconnecting exhaust piping	10	mbar
speed of exhaust gases at the outlet (DN 125)	16,5	m/s

Lubricant Charges

amount of lubrication oil in the engine	56	dm ³
replenishment oil tank volume	125	dm ³

Noise Parameters

CHP unit at 1m	93	dB(A)
exhaust gas outlet at 1m from the silencer flange ¹⁾	65	dB(A)

¹⁾ the noise parameter can be reduced by optimizing the exhaust silencer to the required acoustic pressure level or by applying the exhaust silencer beyond the standard range designed for 60 dB(A) at 1 m

Electrical Parameters

nominal voltage	230/400	V
nominal frequency	50	Hz
power factor ¹⁾	0.8	
nominal current at cos φ=0.8	191	A
generator circuit breaker	NSX250B 3P	
short-circuit resistance of switchboard	20	kA
contribution of the actual source to the short-circuit current	< 2	kA

protection of switchboard's power part closed/open	IP 31/00	
protection of switchboard's control part closed/open	IP 31/00	
recommended superior protection	225	A

recommended connection cable ²⁾ (length < 50m, at 1<35°C)	NY-Y-J 3×120 +70	
--	------------------	--

¹⁾ Power factor adjustable from 0,8C + 1 + 0,8L (range from 0.8C + 1 must be verified according to the various types of generators).

L = inductive load - overexcited

C = capacitive load - underexcited

Operation of the generator with a power factor of less than 0.95 causes a power limitation sets the following table:

power factor [-]	1	0.95	0.8
output [% Pnom]	100	100	98

²⁾ The stated cables are for information only. A check calculation for temperature rise and voltage drop must be made according to the actual length, placement and type of the cable (maximum allowed voltage drop is 10 V)

Colour Version

base frame, engine, and generator	RAL 5015 (blue)
-----------------------------------	-----------------

Unit Dimensions and Weights¹⁾

length total / transport	4 420 / 3 350	mm
width	1 500	mm
total height	2 225	mm
service weight of the entire CHP unit	4 100	kg

¹⁾ approximate values

Caution

Manufacturer reserves the right to alter this document and the linked source materials.

ANEXO IV: CÁLCULO DE COSTOS AUXILIARES COSTOS SISTEMA DE CONDUCCIÓN

Item	Detalle	Unidad	Cantidad	Precio Unitario	Precio total
1	Tuberías				
1.1	Tubería Acero Inoxidable DN 3''	m	40	\$ 3.325	\$ 133.000

1.2	Tubería Acero Inoxidable DN 1 ¼"	m	18	\$ 2.800	\$ 50.400
1.3	Tubería Acero Epoxi DN ¾"	m	20	\$ 618	\$ 12.369
	Subtotal				\$ 195.769
2	Valvulería				
2.1	Válvula Globo Acero Inoxidable DN 1 ¼"	Unidad	1	\$ 27.767	\$ 27.767
2.2	Válvula Esférica de Bola de Acero Inoxidable DN 3"	Unidad	6	\$ 18.000	\$ 108.000
2.3	Válvula de retención Acero Inoxidable DN 3"	Unidad	1	\$ 23.511	\$ 23.511
2.4	Válvula de retención Acero Inoxidable DN 1 ¼"	Unidad	1	\$ 17.864	\$ 17.864
2.5	Válvula Esférica DN ¾" Acero Epoxi	Unidad	2	\$ 537	\$ 1.074
	Subtotal				\$ 178.217
3	Accesorios				
3.1	Codo Acero Inoxidable 90° DN 3"	Unidad	11	\$ 3.415	\$ 37.560
3.2	Tee Acero inoxidable DN 3"	Unidad	4	\$ 5.727	\$ 22.909
3.3	Codo Acero Inoxidable 90° DN 1 ¼"	Unidad	2	\$ 1.143	\$ 2.287
3.4	Codo 90° acero Epoxi DN ¾"	Unidad	4	\$ 262	\$ 1.048
3.5	Tee Acero Epoxi ¾"	Unidad	1	\$ 537	\$ 537
	Subtotal				\$ 64.342

COSTOS DE IMPORTACIÓN

EQUIPO	Chiller	Pellets	Columna de adsorción
PRECIO FOB	\$ 1.284.000,00	\$ 379.680,00	\$ 2.034.000,00
Flete y seguro	\$ 154.080,00	\$ 45.561,60	\$ 244.080,00
SIM	\$ 1.050,00	\$ 1.050,00	\$ 1.050,00
PRECIO CIF	\$ 1.439.130,00	\$ 426.291,60	\$ 2.279.130,00
Tasa estadística	\$ 7.190,40	\$ 2.126,21	\$ 11.390,40
Derecho de importación	\$ 287.616,00	\$ 85.048,32	\$ 455.616,00
Gastos despacho	\$ 34.513,92	\$ 10.205,80	\$ 54.673,92
Honorarios despachante	\$ 67.589,76	\$ 19.986,36	\$ 107.069,76
Flete retiro	\$ 23.009,28	\$ 6.803,87	\$ 36.449,28
Total	\$ 1.859.049,36	\$ 550.462,15	\$ 2.944.329,36

COSTOS DE OPERACIÓN

Mano de obra:

La planta funciona las 24 horas todos los días, con un operario por turno, ya que las tareas a realizar son principalmente de vigilancia de parámetros y control de los equipos. Para ellos se contrata 5 empleados, con turnos rotativos. El salario obtenido para cada operario se basa en la información del recibo de sueldo de un empleado perteneciente al gremio de Sindicatos Trabajadores Cerveceros de Santa Fe. Al salario neto, se le sumo un 35 %, el cual corresponde a los costos asociados a los aportes patronales que realiza el empleador.

Concepto	Cantidad	Haberes remunerativos	Haberes no remunerativos	Descuento
Horas simples	240	\$ 116792,83		
Horas feriado	16	\$ 7.789,19		
Horas trabajo nocturno	65	\$ 6.326,28		

Premio Puntualidad	4	\$ 2.557,13		
Premio Asistencia	0	\$ 5.649,80		
Asignación por titulo	0	\$ 7.535,68		
Asignación NR acumulada 2011	0	\$ -	\$ 7.888,32	
Nivelador de cambio	0	\$ -	\$ 0,65	
Jubilacion	11	\$ -		\$ 16.131,60
Ley 19032	3	\$ -		\$ 4.399,53
Obra social OSPACA	3	\$ -		\$ 4.399,53
Cuota sindical	0	\$ -		\$ 903,30
Sindicato cervecero		\$ 146.650,91	\$ 7.888,97	\$ 25.833,95
Sueldo bruto		\$ 128.705,93		
Sueldo Neto + Contribuciones		\$ 173.753,00		

Servicio de energía eléctrica:

Tabla 0.1. Precio del kwh y clasificación horaria

CLASIFICACION	CANT. DE HORAS	PRECIO/KWH
Resto	13	\$ 7,69
Pico	5	\$ 8,03
Nocturno	6	\$ 7,36

Fuente: <https://www.enersa.com.ar/>

Clasificación	Consumo (kwh)	Precio/día
Resto	99,87	\$ 768,26
Pico	38,41	\$ 308,36
Nocturna	56,51	\$ 415,73
Total por día		\$ 1.492,35
Total por bimestre		\$ 89.541,03

AMORTIZACIONES

Detalle	Valor Nominal	Valor residual	Vida útil	Amortización
Oficina	\$ 730.683,00	\$ 146.136,60	25	\$ 23.381,86
Baños	\$ 922.968,00	\$ 184.593,60	25	\$ 29.534,98
Cortina forestal	\$ 29.480,56		25	\$ 1.179,22
Porton de ingreso	\$ 25.100,00		10	\$ 2.510,00
Cerco de alambrado	\$ 498.700,00		10	\$ 49.870,00
Canaletas	\$ 756.000,00	\$ 75.600,00	10	\$ 68.040,00
Gasómetro doble membrana	\$ 6.051.875,00		10	\$ 605.187,50
Antorcha PROGECO serie EMR	\$ 1.052.500,00		10	\$ 105.250,00
Chiller Modelo CNLS-200-EX*	\$ 1.859.049,36	\$ 199.975,00	10	\$ 165.907,44
Separador Ciclónico	\$ 66.492,87		10	\$ 6.649,29
Columna de Adsorción*	\$ 2.437.865,36	\$ 243.786,54	10	\$ 219.407,88
Soplador de lóbulos rotativos modelo R200 Repicky	\$ 154.000,00		10	\$ 15.400,00
Soplador 0,1 HP	\$ 22.416,81		10	\$ 2.241,68
Electrobomba centrifuga VASSER QC-75	\$ 14.699,00		10	\$ 1.469,90

Motor Cogenerador de Energía CENTO T100	\$ 10.188.200,00		25	\$ 407.528,00
Motor generador eléctrico CAT G3516A	\$ 9.872.450,00		25	\$ 394.898,00
Válvula Globo Acero Inoxidable DN 1 ¼"	\$ 27.767,47		10	\$ 2.776,75
Válvula Esférica de Bola de Acero Inoxidable DN 3"	\$ 108.000,00		10	\$ 10.800,00
Válvula de retención Acero Inoxidable DN 3"	\$ 23.511,00		10	\$ 2.351,10
Tubería Acero Inoxidable DN 3"	\$ 133.000,00	\$ 6.650,00	20	\$ 6.317,50
Tubería Acero Inoxidable DN 1 ¼"	\$ 50.400,00	\$ 5.040,00	20	\$ 2.268,00
Tubería Acero Epoxi DN ¾"	\$ 12.368,75	\$ 1.236,88	10	\$ 1.113,19
Válvula de retención Acero Inoxidable DN 1 ¼"	\$ 17.864,00	0	10	\$ 1.786,40
Válvula Esférica DN ¾" Acero Epoxi	\$ 1.074,40	0	10	\$ 107,44
Codo Acero Inoxidable 90° DN 3"	\$ 37.560,49	0	20	\$ 1.878,02
Tee Acero inoxidable DN 3"	\$ 22.909,44	0	20	\$ 1.145,47
Codo Acero Inoxidable 90° DN 1 ¼"	\$ 2.286,82	0	20	\$ 114,34
Codo 90° acero Epoxi DN ¾"	\$ 1.048,04	0	20	\$ 52,40
Tee Acero Epoxi ¾"	\$ 537,20	0	20	\$ 26,86
Intercambiador de calor tubos concéntricos	\$ 191.250,00	0	10	\$ 19.125,00
Manómetro	\$ 3.716,00	0	10	\$ 371,60
Batea contenedora de residuos.	\$ 123.900,00	\$ 12.390,00	20	\$ 5.575,50

Bibliografía

- Castillo Figueroa, R. (2011). *Utilización de GN en Sistemas de Refrigeración*. Lima, Peru. Obtenido de https://www.sistemamid.com/panel/uploads/biblioteca/2013-07-08_03-25-091.-Rafael_Castillo-CIPERPERU.pdf
- Chacón Romero, J. (2015). *Separadores de vapor en instalaciones térmicas industriales*. Proyecto fin de grado, Sevilla. Obtenido de <http://bibing.us.es/proyectos/abreproy/90314/fichero/Memoria+v3.4.pdf>
- Fernandez Perez, M. A. (2017). *Dimensionamiento de una planta para la valorización mediante digestión anaerobia de los purines generados en una granja porcina*. Proyecto Final de Grado. Obtenido de <https://rodin.uca.es/xmlui/bitstream/handle/10498/20082/927446.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Fernandez Prad, B. (2014). *Ingeniería básica de una planta de acondicionamiento de biogás para uso en pilas de combustible de carbonatos fundidos*. Trabajo Fin de Grado. Obtenido de <http://bibing.us.es/proyectos/abreproy/90166/fichero/Memoria+TFG.pdf>
- Fernandez, M., & Zarza, R. (2019). *Planta de tratamiento de biogás proveniente del complejo Ambiental Ensenada para generación de Energía Eléctrica*. Obtenido de <https://1library.co/document/qvvjo50q-tratamiento-proveniente-complejo-ambiental-ensenada-generacion-energia-electrica.html>
- Frailé, D. (2008). *Cogeneración: Aspectos Tecnológicos*. Madrid, España. Obtenido de <https://www.eoi.es/es/savia/publicaciones/20203/cogeneracion-aspectos-tecnologicos>
- García Cascallana, J. (2019). Evaluación energética de la cogeneración mediante biogás procedente de la digestión anaerobia de fangos de una estación depuradora de aguas residuales. *Energía & Minas: Revista profesional, técnica y cultural de los Ingenieros Técnicos de Minas*, 28-51.
- Gil Martínez, J. (2017). *Propuesta de recuperación del biogás de la EDAR de la fábrica de Heineken de Valencia*. Valencia. Obtenido de <https://riunet.upv.es/handle/10251/90712>
- Gilabert Armengod, D. (2019). Cogeneración: energía eficiente para la industria. *Energética 21*. Obtenido de <https://www.energetica21.com/articulos-y-entrevistas-online-ver/cogeneracion-energia-eficiente-para-la-industria>
- Marín, L. (2011). *Purificación Biológica de Biogás*. Tesis de grado, Santiago, Chile.
- Moreno, M. T. (2011). *Manual de Biogás*. Santiago de Chile: Proyecto CHI/00/G32.
- Morero, B. (2014). *Purificación de biogás con tecnologías de producción limpias*. Tesis Doctoral, Santa Fe.
- Morero, B., Gropelli, E., & Campanella, E. (2010). *Revisión de las principales tecnologías de purificación de biogás*. Ciencia y Tecnología.
- Okoro, O., & Sun, Z. (2019). *Desulphurisation of Biogas: A Systematic Qualitative and Economic-Based Quantitative Review of Alternative Strategies*. Otago, New Zealand. Obtenido de https://res.mdpi.com/d_attachment/ChemEngineering/ChemEngineering-03-00076/article_deploy/ChemEngineering-03-00076.pdf
- Ortega Viera, L., Rodríguez Muñoz, S., Fernández Santana, E., & Barcenás Pérez, L. (2015). *Principales métodos para la desulfuración del biogás*. Obtenido de http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1680-03382015000100004

-
- Petit, H., Pico, L., & Barbosa, M. (2012). *Influencia de la longitud del cono de un ciclón sobre las variables de flujo*. Avances en Ciencia e Ingeniería. Obtenido de <https://www.redalyc.org/comocitar.oa?id=323627687011>
- Quiroz Marchant, H., & De la Cerda, C. (2016). *Curso de Formación Especializada en Biogás para Profesionales. Modulo 4*. Santiago de Chile. Obtenido de <https://docplayer.es/77503776-Modulo-4-disenos-de-plantas-medianas-y-grandes.html>
- Universidad Complutense de Madrid. (s.f.). *Lluvia ácida. Aspectos Ambientales*. Madrid. Obtenido de https://webs.ucm.es/info/diciex/proyectos/agua/contaminacion_aerea_central.html
- Universidad del Atlántico, Universidad Autónoma de Occidente. (s.f.). *Cogeneración*. Proyecto de la Unidad de Planeación Minero Energética de Colombia. Obtenido de <http://www.si3ea.gov.co/Portals/0/Gie/Tecnologias/cogeneracion.pdf>
- Varnero Moreno, M. (2011). *Manual del Biogás*. Santiago de Chile. Obtenido de <http://www.fao.org/3/as400s/as400s.pdf>
- Villa Briongos, J. (2015). *Obtención de biogás a partir de Residuos Sólidos Urbanos para su inyección a Red*.