

2017

Evaluación técnica-económica de proyectos de cogeneración con biogás en plantas de tratamiento de aguas residuales municipales

giz



MÉXICO
GOBIERNO DE LA REPÚBLICA



SENER
SECRETARÍA DE ENERGÍA

SEMARNAT
SECRETARÍA DE
MEDIO AMBIENTE
Y RECURSOS NATURALES



giz
Deutsche Gesellschaft
für Internationale
Zusammenarbeit (GIZ) GmbH



Diseño del curso:
M en C. Benly Liliana Ramírez Higareda

Programa de Aprovechamiento
Energético de Residuos Urbanos
(EnRes)
30/10/2017

Índice

INTRODUCCIÓN.....	5
OBJETIVO GENERAL.....	6
1. INTRODUCCIÓN.....	6
OBJETIVOS PARTICULARES DEL TEMA	6
ACTIVIDADES NECESARIAS PARA EL DESARROLLO DEL TEMA.....	6
1.1 POTENCIAL DE APROVECHAMIENTO DEL BIOGÁS EN MÉXICO.....	6
1.2 EXPERIENCIAS EN OTROS PAÍSES Y OBJETIVOS DEL PROGRAMA ENRes/GIZ	12
1.2.1 Experiencia en el aprovechamiento de biogás en PTARs en Alemania	12
1.2.2 Programa EnRes/GIZ	14
1.3 IMPORTANCIA Y ELEMENTOS DE LAS EVALUACIONES TÉCNICO-ECONÓMICAS ADECUADAS	15
SÍNTESIS Y CONCLUSIONES.....	15
EVALUACIÓN	16
2. ASPECTOS TÉCNICOS DEL APROVECHAMIENTO DE BIOGÁS	17
OBJETIVOS PARTICULARES DEL TEMA.	17
ACTIVIDADES NECESARIAS PARA EL DESARROLLO DEL TEMA.....	17
2.1 GENERACIÓN DEL BIOGÁS	17
2.1.1 Reactor UASB	17
2.1.2 Digestor de lodo.....	18
2.1.3 Co-digestión	19
2.1.4 Comparación entre los diferentes procesos que generan biogás en una PTAR	20
2.1 USOS DEL BIOGÁS	21
2.1.1 Calderas	21
2.1.2 Cogeneración	22
2.1.3 El secado de lodo.....	23
2.1.4 Otros	24
2.1.5 Comparación entre los requerimientos técnicos de cada uso de biogás.....	25
2.1 BALANCE DE MASA Y ENERGÍA	27
SÍNTESIS Y CONCLUSIONES	31
EVALUACIÓN.	31
3. COSTEO Y VARIABLES ECONÓMICAS	32
OBJETIVOS PARTICULARES DEL TEMA.	32
ACTIVIDADES NECESARIAS PARA EL DESARROLLO DEL TEMA.....	32

3.1	ESTIMACIÓN DE COSTOS	32
3.1.1	Costo de inversión	32
3.1.2	Costo de operación y mantenimiento	34
3.1.3	Costos de ahorro de electricidad y/o combustible	36
3.1.4	Ahorros	36
3.2	VARIABLES ECONÓMICAS	40
3.2.1	Valor Presente Neto (VPN)	40
3.2.2	Tasa interna de retorno (TIR)	41
		43
	SÍNTESIS Y CONCLUSIONES	45
	EVALUACIÓN	46
4.	EJERCICIOS PRÁCTICOS Y ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD	46
	OBJETIVOS PARTICULARES DEL TEMA.	46
	ACTIVIDADES NECESARIAS PARA EL DESARROLLO DEL TEMA.....	46
	SÍNTESIS Y CONCLUSIONES	46
	EVALUACIÓN	46
FUENTES.....		47

Presentación del Manual

La Cooperación Alemana al Desarrollo en México (GIZ), a través de su programa "Aprovechamiento Energético de Residuos Urbanos (EnRes)" busca – en conjunto con la Secretaría de Energía (SENER) y la Secretaría de Medio Ambiente de México (SEMARNAT)– impulsar, entre otros, el aprovechamiento energético de los lodos de plantas de tratamiento de aguas residuales (PTARs) en México. Para tal fin el programa EnRes contrató un equipo de expertos que trabajaron en conjunto con la Asociación Nacional de Empresas de Agua y Saneamiento de México (ANEAS), para establecer una red de intercambio duradera entre organismos operadores y empresas concesionarias, crear de grupos de trabajo que retroalimentaran la elaboración de guías técnicas elaborados por EnRes/GIZ, así como diseñar, impartir y difundir cursos de capacitación, todo lo anterior dentro del marco del aprovechamiento energético de los lodos de PTAR.

Bienvenido al curso de evaluación técnica-económica de proyectos de cogeneración con biogás en plantas de tratamiento de aguas residuales (PTAR), el cual es el resultado de la colaboración y el trabajo en conjunto entre la GIZ, SENER, SEMARNAT y ANEAS para impulsar proyectos de aprovechamiento de biogás en PTARs en México.

Este es un curso de nivel intermedio dirigido a Ingenieros químicos, bioquímicos, ambientales, civiles, mecánicos o formación afín que funjan como gerentes de planta, gerentes de operación, directores de organismos operadores y empresas concesionarias, ingenieros de proceso, asesores de instituciones bancarias y consultores independientes, los cuales deseen y/o requieran tener las bases técnicas y económicas para evaluar la viabilidad de proyectos de cogeneración de biogás en plantas de tratamiento de aguas residuales.

En este curso, aprenderás a determinar si un proyecto de aprovechamiento de biogás es viable o no, así como analizar qué factores técnicos y económicos podrían afectar de manera positiva o negativa dicha viabilidad. El contenido del curso es suficiente para quien pretende enlazar conocimientos técnicos y económicos para realizar una evaluación global e integral de proyectos de biogás en una PTAR.

El manual está organizado en cuatro partes principales. Después de una breve introducción, se describen los aspectos técnicos del aprovechamiento de biogás, posteriormente se repasan los elementos más importantes para una estimación de costos y evaluación económica, y finalmente, se incluye algunos ejercicios prácticos.

Se recomienda realizar los ejercicios correspondientes de la mano con el programa de Excel incluido en el curso. Aunque este curso no es exhaustivo en cuanto a aspectos técnicos y económicos, se recomienda seguir el manual paso a paso y consultar la bibliografía y referencias adicionales que se incluyen en caso de requerir información más detallada.

Esperamos que disfrutes este curso. ¡Bienvenidos!



Introducción

El capítulo 1, "Introducción", expondrá brevemente el potencial de aprovechamiento de biogás en PTARs en México, se comparará la situación en nuestro país con la que existe en Alemania para aprender de la experiencia en otros países, y a través de esto, se sensibilizará acerca de la necesidad de realizar evaluaciones técnico-económicas integrales para impulsar el aprovechamiento de biogás en México.

En el capítulo 2, "Aspectos técnicos del aprovechamiento de biogás", se repasarán los conceptos más importantes en proyectos de biogás, como son las fuentes de generación de biogás, los usos que puede tener el biogás, así como los criterios y relaciones típicas a considerar para el cálculo de balances de masa y energía.

En el capítulo 3, "Costeo y variables económicas", se distinguirán los principales factores a considerar al realizar costeos, así como también se repasarán los conceptos y significados de las principales variables económicas involucradas en las evaluaciones, como son el tiempo de retorno de la inversión, la tasa interna de retorno, el valor presente neto y la rentabilidad.

El capítulo 4, "Ejercicios prácticos y análisis de sensibilidad", contiene cuatro ejercicios con el fin de reforzar los conocimientos expuestos y, además, ejemplificar casos típicos que pueden encontrarse en este tipo de proyectos.

Al final, este curso será una herramienta que los participantes podrán utilizar para la toma de decisión en cuanto a la inversión en proyectos aprovechamiento del biogás, traduciéndose en mayor sustentabilidad de las PTARs, posicionamiento de las empresas, organismos e instituciones participantes, así como un mayor cuidado al medio ambiente a través de la reducción de GEI.

El enfoque didáctico del curso es principalmente cognitivo-constructivista, durante el curso se reconocerán los conocimientos y experiencias previas de los participantes, así como también se promoverá la participación y discusión de los temas en grupos de trabajo.

Objetivo General

Al término del curso teórico de 15 hrs, los ingenieros, gerentes de operación y consultores evaluarán de forma integral proyectos técnico-económicos de sistemas de cogeneración de biogás en plantas de tratamiento de aguas residuales (PTARs) municipales con la finalidad de determinar de manera confiable la viabilidad de dichos proyectos, esto mediante la discusión entre los participantes y la resolución de ejercicios prácticos.

1. Introducción

Objetivos Particulares del tema

Al finalizar el tema 1, el participante apreciará la necesidad de realizar evaluaciones técnico-económicas integrales como herramienta indispensable de apoyo para la toma de decisiones, esto mediante la exposición de los beneficios del aprovechamiento de biogás en PTARs, y un breve intercambio de experiencias entre los participantes.

Actividades necesarias para el desarrollo del tema

Los primeros dos subtemas se realizarán mediante una exposición de parte del instructor, con un intercambio grupal de preguntas y experiencias a lo largo de la presentación. El tercer y último subtema será un ejercicio de diálogo grupal y lluvia de ideas de parte de los participantes.

1.1 Potencial de aprovechamiento del biogás en México

La recuperación de energía a partir del biogás es muy común en países como Alemania, Inglaterra y Estados Unidos, aun cuando sus condiciones climáticas son, en general, poco favorables para la digestión anaerobia. Sin embargo, en México y el resto de los países de Latinoamérica la mayor parte de las PTAR no utilizan procesos anaerobios, y donde sí lo hacen no se aprovecha el biogás generado, con lo que se desperdicia su potencial energético, lo mismo que los beneficios económicos, sociales y ambientales que ello implica.

En Brasil, estudios recientes de factibilidad económica para la producción de energía eléctrica han demostrado una viabilidad a partir de 100,000 habitantes o 5 tonDBO/d. En México, los asesores de EnRes/GIZ para aprovechamiento de lodos de PTAR estimaron que el biogás es potencialmente aprovechable en plantas de tipo municipal con capacidad superior a los 300 L/s en términos de flujo volumétrico, o bien, 7.5 tonDBO/d en términos de flujo másico influente.

En la tabla 1 se muestra cómo se distribuyen las PTARs en México de acuerdo con su caudal de diseño (CIEEMAD-IPN, 2013, II-UNAM, 2013):

Tabla 1. Número de PTARs en México mayores a 200 L/s

CAUDAL	NÚMERO DE PTARs EN MÉXICO
200 L/s – 300 L/s	43
300 L/s – 600 L/s	25
600 L/s – 1000 L/s	14
1000 L/s – 3000L/s	19
Mayor a 3000 L/s	4

Como se puede observar, existen 62 PTARs mayores a 300L/s, en las cuales potencialmente se podría obtener y aprovechar el biogás. Además, hay otras 43 PTARs con un caudal entre 200 y 300 L/s que están ligeramente por debajo de lo recomendado en términos de caudal, pero en los cuales se podría evaluar de manera individual su viabilidad en caso de que la concentración de contaminantes sea mayor al promedio usual, y por lo tanto la carga orgánica en términos de tonDBO/d en la PTAR sea adecuada, o bien, en caso de que se desee plantear una co-digestión (recibir carga adicional a partir de residuos sólidos externos, como residuos alimenticios y estiércol).

Sin embargo, a pesar del gran potencial que existe en México, hoy en día en sólo nueve plantas de tratamiento de aguas residuales (PTARs) en México se aprovecha el biogás, (CIEEMAD-IPN, 2013, II-UNAM, 2013) y son:

Tabla 2. PTARs que aprovechan (o aprovecharán) el biogás en México.

No.	PTAR	Estado
1	Juárez Norte-Sur	CHIH
2	Purísima del Rincón	GTO
3	Principal	COAH
4	León	GTO
5	San Pedro Mártir	QRO
6	El Ahogado	JAL
7	Agua Prieta	JAL
8	Hermosillo	SON
9	Atotonilco	HGO

En ninguna de las anteriores hoy en día se practica la co-digestión.

A corto plazo se recomienda impulsar proyectos de biogás en PTARs donde a) ya exista la generación de biogás y sólo falte instalar el cogenerador y, b) en aquellas cuyo flujo de diseño es mayor a 300 L/s que ya operen a un caudal muy cercano a su flujo de diseño, o por lo menos al 80% del mismo.

A mediano plazo, también sería importante incluir PTARs que actualmente cuentan con sistemas de tratamiento aerobios, ya que al convertirlos a un proceso anaerobio podría existir no sólo la posibilidad de generación de energía, sino principalmente un ahorro significativo al no consumir electricidad para la aireación.

Estudios recientes hechos para México y América Latina indican que la adopción de la vía anaerobia para tratar aguas residuales de carácter doméstico, típicamente con reactores UASB (reactores anaerobios de flujo ascendente), es la que se debe privilegiar por sus mejores resultados según el análisis de ciclo de vida (ACV) (ENRES, 2017). El ACV es la mejor herramienta para la evaluación ambiental integral de las tecnologías de tratamiento de aguas residuales, y es una metodología que evalúa los efectos ambientales que tienen productos o servicios desde la extracción de la materia prima hasta la disposición final de sus subproductos y residuos, tomando en cuenta todos los vectores implicados (aire, agua, suelo). Se trata de una herramienta normada bajo la serie ISO 14040 e ISO 14044 (Noyola et al., 2013).

Compromisos de México en el Acuerdo de París

El Acuerdo de París es un acuerdo dentro la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (CMNUCC) que establece medidas para la reducción de las emisiones de GEI mediante la mitigación, adaptación y resiliencia de los ecosistemas a los efectos del Calentamiento Global. El acuerdo fue negociado durante la XXI Conferencia sobre Cambio Climático (COP 21) por los 195 países miembros y adoptado el 12 de diciembre de 2015.

México ocupa el 13° lugar en el mundo en cuanto a las emisiones globales de dióxido de carbono (CO₂), según se observa en la figura 1.

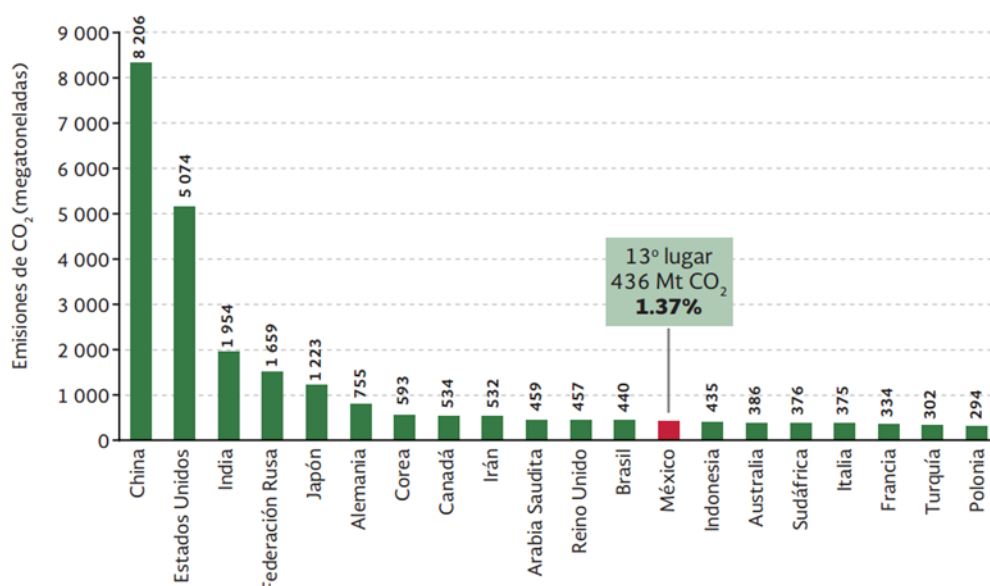


Figura 1. Contribución de México a las emisiones de CO₂ en el año 2012.

Fuente: IEA (2015).

México tiene en la puerta diversos compromisos que cumplir en cuanto a sustentabilidad. El compromiso expresado por México en la COP 15 de Copenhague, y ratificado por el Congreso de la Unión en la Ley General de Cambio Climático (LGCC), estipula que México tendrá una reducción de sus emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) de un 30% sobre la línea base en el 2020 y de un 50% (con respecto a sus emisiones del año 2000) en el 2050; de tal manera que en el 2024 el 35% de la electricidad provenga de energías limpias (véase figura 2) (Comisión Intersecretarial de Cambio Climático, 2015). Además, de acuerdo con la Ley de Transición Energética, la SENER fijará como meta una participación máxima de 65% de combustibles fósiles en la generación de energía eléctrica para el año 2024, del 60% en el 2035 y del 50% en el 2050. Lo anterior es un gran reto, considerando que para el año 2014 las energías fósiles equivalían al 73% de la generación eléctrica en México (véase figura 2).

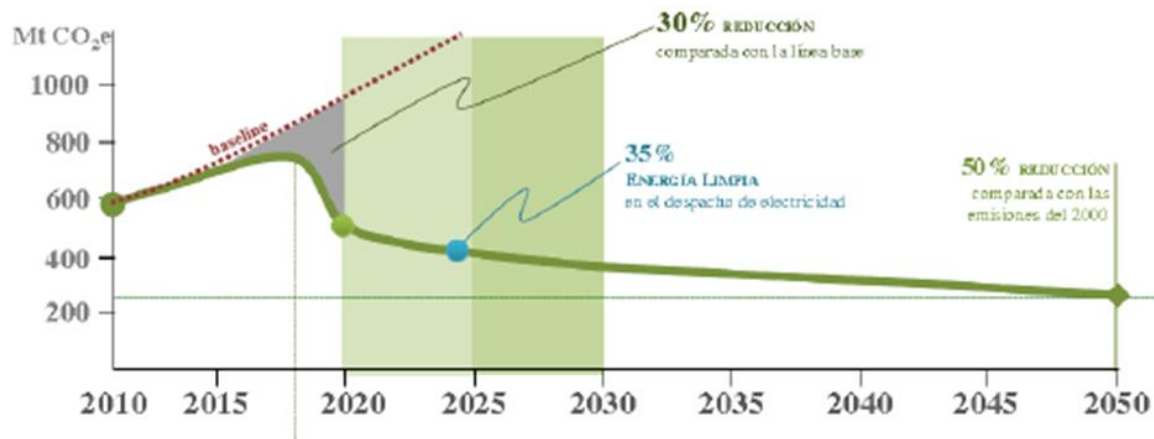


Figura 2. Compromiso en cuanto a la reducción de emisiones con respecto al año 2000.
Fuente: Gobierno de la República (2015)

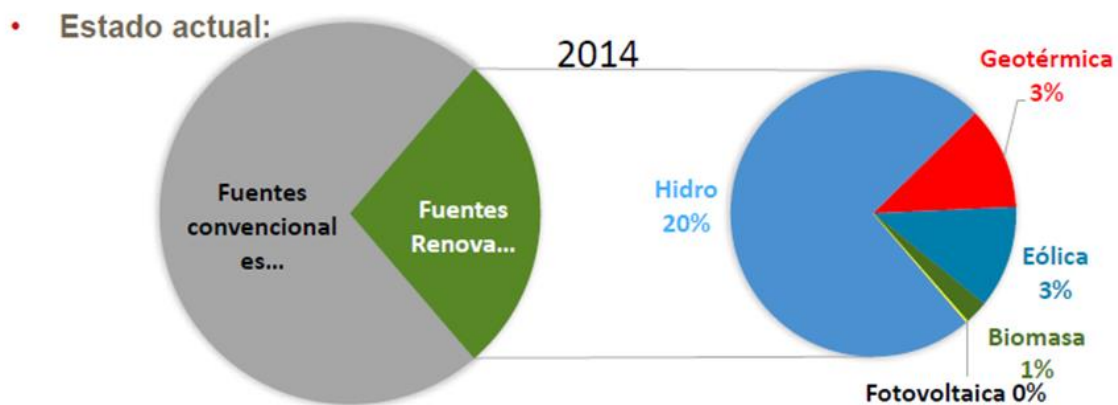


Figura 3. Distribución de las fuentes de energía renovables en México (2014)
Fuente: SENER (2015)

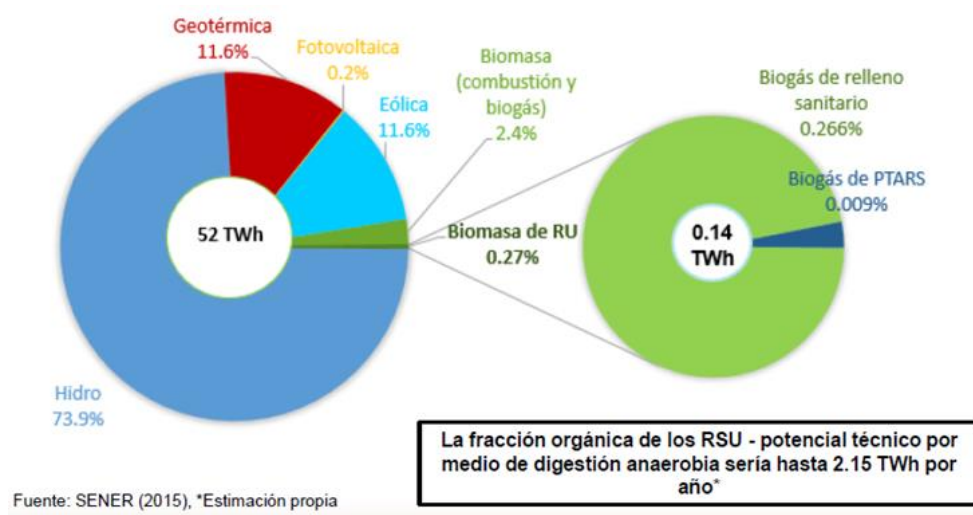


Figura 4. Contribución de los residuos urbanos (RU) a la energía renovable en México (2014) en TWh
Fuente: SENER (2015) y EnRes/GIZ (2015)

Aunque en comparación con otros sectores como el transporte, la generación de electricidad, la industria y la agricultura el sector de residuos contribuye, relativamente poco (4%) en cuanto a las emisiones de GEI en el país, en realidad la valorización energética de los residuos tiene beneficios colaterales que impactan en otros sectores económicos. Por ejemplo, los residuos tratados pueden ser empleados como mejoradores de suelos en la agricultura, lo cual fomenta el reciclaje, disminuye la demanda de fertilizantes así como las emisiones debido al transporte de los mismos. Además, cuando se obtiene metano y con ellos electricidad de los rellenos sanitarios y plantas de tratamiento de aguas residuales, esto disminuye la demanda de electricidad en el sitio lo cual de manera colateral evita la emisión de GEI.

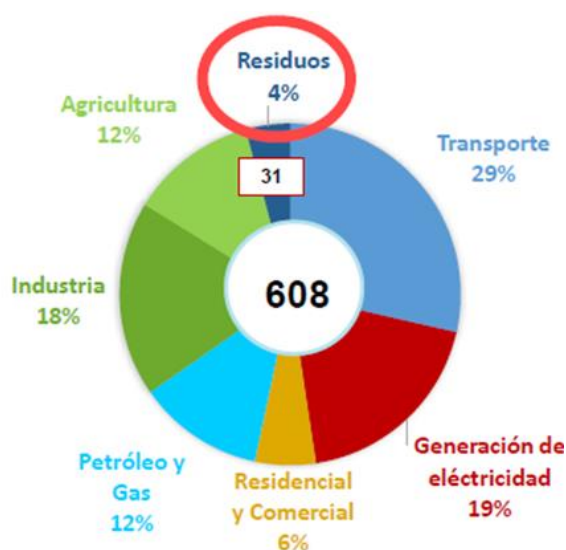


Figura 5. Emisiones por sector en MtCO₂ en el 2013

Fuente: SEMARNAT (2015)

1.2 Experiencias en otros países y objetivos del Programa EnRes/GIZ

1.2.1 Experiencia en el aprovechamiento de biogás en PTARs en Alemania

En Alemania, a través de la Ley de Economía Circular (*KrWG- Kreislaufwirtschaftsgesetz*) del Ministerio de Medio Ambiente, se sigue política en cuanto a la jerarquía de manejo de los residuos sólidos, en el cual se privilegia las medidas de prevención de generación del residuo, y en caso de que se produzcan, se privilegia su reúso o reciclado y después su recuperación energética. La última de las opciones, en caso de que ninguna de las anteriores sea posible, es la disposición final de los residuos. Lo anterior, es posible a través de un apropiado diseño del producto, de la extensión de la responsabilidad del productor a través de la cadena productiva y se prohíben los rellenos sanitarios. El aprovechamiento energético de los residuos sólidos se ubicaría en el cuarto escaño.



Figura 6. Ley de Economía Circular

Las medidas que ha tomado Alemania han permitido que la energía obtenida a partir de residuos urbanos contribuya el 5.6% de total de energía requerida en el país, lo cual equivale a 8.9 TWh (63 veces más que en México).

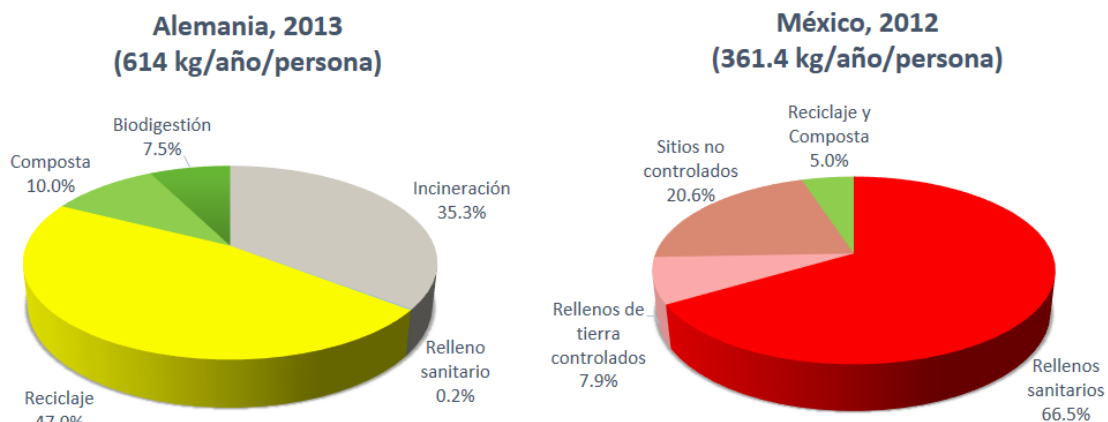


Figura 7. Manejo de residuos sólidos urbanos

Fuente: OCDE, 2015; Eurostat 2014; SEMARNAT, 2014

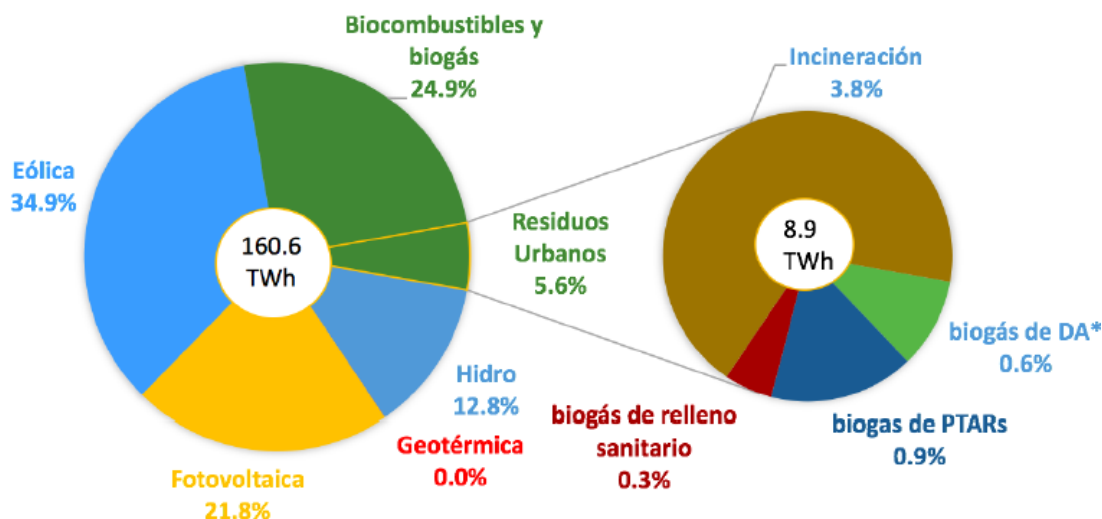


Figura 8. Contribución de los residuos urbanos a la electricidad renovable en Alemania en 2014 (TWh).

Fuente: BMWi (2015) y DBFZ (2010); *Estimación propia

Actualmente Alemania es el mayor productor de biogás en Europa. Su mercado de biogás se ha fortalecido gracias a diversos mecanismos económicos y legislativos, entre los cuales se encuentran:

- El principal instrumento legal en cuanto a energías renovables es la Ley de Fuentes de Energía Renovable (EEG, Erneuerbare-Energien-Gesetz, 2012)
- El productor de electricidad de fuentes renovables recibe una tarifa fija preferencial para la energía que alimenta a la red.
- La electricidad producida por digestión anaerobio de residuos sólidos obtiene mayor subsidio que otro tipo de sustratos

La Asociación Alemana de Biogás tiene un rol importante para impulsar los intereses del gremio. Ésta agrupa a 23 regiones en Alemania y tiene 4900 socios que incluyen operadores de plantas de biogás, empresas y fabricantes, proveedores, instituciones científicas, personas interesadas, autoridades públicas, abogados, bancos, consultores y laboratorios.

1.2.2 Programa EnRes/GIZ

Desde 1997 la Cooperación Alemana al Desarrollo Sustentable (GIZ) asesora al Gobierno de México por encargo del Gobierno Federal Alemán en diversos sectores de la protección ambiental, energías renovables y en la lucha contra el cambio climático. Uno de los programas en curso es el Programa de

Aprovechamiento Energético de Residuos Urbanos (EnRes), cuyos datos principales se muestran en la siguiente tabla:

Tabla 3. Generalidades del Programa EnRes

Objetivo	El aprovechamiento energético ha sido introducido como opción para la gestión de residuos en México
Contrapartes principales	 
Comitente	Ministerio Federal Alemán de Cooperación Económica y Desarrollo (BMZ)
Duración	2014 - 2018

La estrategia a seguir en el Programa EnRes para lograr su objetivo es:

1. Coordinación y colaboración interdisciplinaria (intra-/ interinstitucional).
2. Generar las condiciones facilitadoras (marco regulatorio, instrumentos económicos, desarrollo de capacidades).
3. Demostrar la viabilidad de proyectos concretos (generar casos exitosos).

El presente curso sigue la segunda estrategia, en cuanto al desarrollo de capacidades para facilitar las condiciones que impulsen el aprovechamiento de biogás a partir de lodos de PTAR (uno de los residuos sólidos aprovechables).

1.3 Importancia y elementos de las evaluaciones técnico-económicas adecuadas

ACTIVIDAD GRUPAL 1

Lluvia de ideas

Instrucciones: Cada participante deberá de mencionar un aspecto o factor que debe ser considerado en una evaluación técnico-económica (especialmente aquellas que generalmente son subestimadas y al final afectan de manera importante la viabilidad de un proyecto de biogás). Posteriormente, y bajo la conducción del instructor.

Síntesis y Conclusiones.

La experiencia que tiene Alemania en cuanto al aprovechamiento energético de los residuos sólidos, es una palanca que puede impulsar este tema en México, a través del Programa EnRes/GIZ.

La correcta realización de evaluaciones técnico-económicas integrales son una herramienta indispensable de apoyo para la toma de decisiones. Una evaluación no realizada o ejecutada de manera errónea, puede ocasionar pérdidas económicas a la empresa u organismo operador, ya sea porque haya sido ejecutada y la inversión no llegó a recuperarse, o debido a un proyecto que nunca se realizó (costo de oportunidad).



Figura 9. Etapas de la evaluación de un proyecto técnico-económico

Fuente: Adaptado de Probiogás (2015a)

Evaluación

Este tema no necesita evaluación.

2. Aspectos técnicos del aprovechamiento de biogás

Objetivos Particulares del tema.

Al finalizar el tema 2, los participantes reconocerán sus conocimientos previos mediante técnicas grupales, así como también distinguirán los conceptos técnicos más importantes en proyectos de biogás para poder aplicar herramientas de cálculos en PTARs a escala real, esto mediante la exposición del tema y desarrollo de ejemplos.

Actividades necesarias para el desarrollo del tema

El primer y segundo subtema se realizarán mediante una exposición de parte del instructor con un intercambio grupal de preguntas y experiencias a lo largo de la presentación para finalmente cerrar con un ejercicio de lluvia de ideas y trabajo grupal de parte de los participantes. Y el tercer y último subtema será un ejercicio demostrativo grupal de balance de masa y energía.

2.1 Generación del biogás

2.1.1 Reactor UASB

Gracias a la granularidad del lodo y a las características hidrodinámicas de los reactores UASB el tiempo de retención celular en este sistema es grande (más de 30 días) en comparación con el corto tiempo de retención hidráulica (TRH) (normalmente entre 6 y 10 horas). En el tratamiento de aguas residuales municipales, su eficiencia típica respecto a la eliminación de la materia orgánica (medida como DQO) es de 60 a 70%. Una característica específica del reactor UASB es la alta concentración de metano en el biogás producido en la digestión, que varía de 60 a 85% v/v.

Los reactores UASB tratan el agua residual municipal sometida previamente a una etapa de remoción de sólidos gruesos, sólidos finos y arenas. Las unidades que componen el tratamiento preliminar (rejas, tamices y desarenadores) son críticos para el buen funcionamiento del UASB (NBR 12209, 2011).

El reactor anaerobio reúne en una sola unidad las funciones de sedimentador primario, reactor biológico, sedimentador secundario y digestor de la biomasa formada. Una representación esquemática de un reactor UASB se presenta en la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.10.**

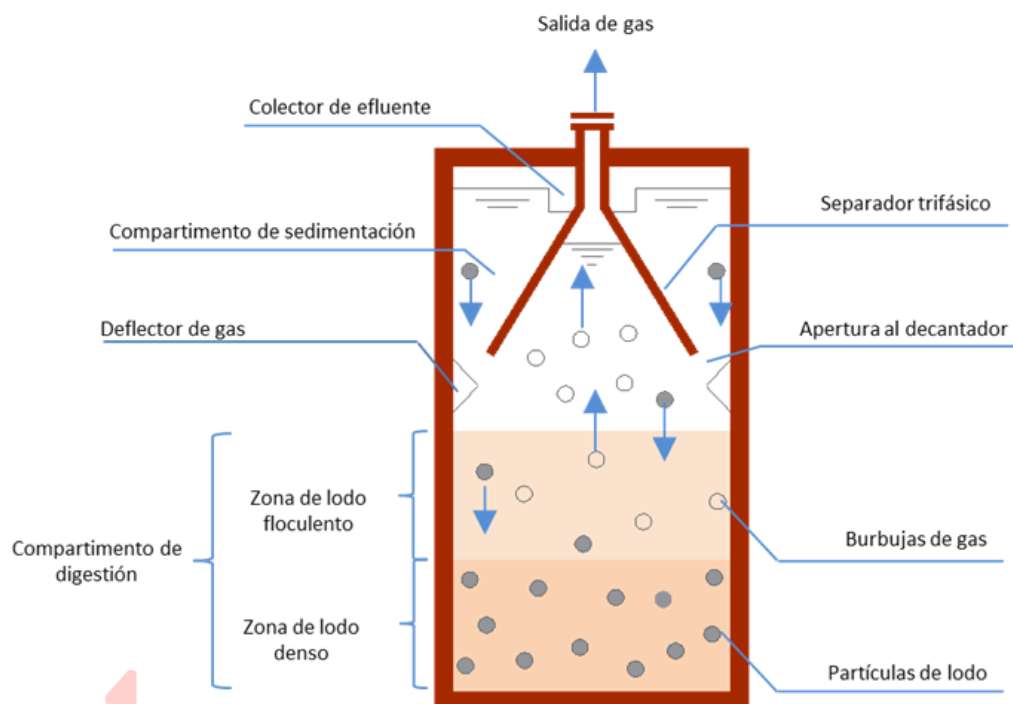


Figura 10. Diagrama esquemático de un reactor UASB.

Fuente: Adaptado de Chemicharo (2007).

2.1.2 Digestor de lodo

En los digestores de lodo agitados de flujo continuo, llamados CSTR (Continuously Stirred Tank Reactor, su acrónimo en inglés) son diseñados por tiempo de retención hidráulico (TRH), el cual equivale al tiempo de retención del lodo (TRC). En la práctica, el TRH de diseño es mayor al óptimo con la finalidad de compensar eventuales problemas operacionales como la fluctuación del volumen de lodo producido, la ineficiencia del sistema de mezclado, la variación de la temperatura ambiente y el azolvamiento provocado por material inerte (Andreoli et al., 2010).

Considerando que los digestores son diseñados principalmente por tiempo de retención hidráulico y que la carga orgánica del lodo a ser estabilizado es relativamente baja, en una PTAR los digestores anaerobios en general tienen capacidad para recibir cargas orgánicas adicionales, permitiendo así la co-digestión (ver sección 3.3).

En términos generales, la eficiencia de destrucción de material volátil por la vía de digestión anaerobia depende esencialmente del tiempo de retención del lodo en

el digestor, el cual a su vez depende de la temperatura de operación (ver **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**)

Tabla 4. Eficiencia de Destrucción de material volátil en digestores anaerobios mesofílicos completamente mezclados.

TIEMPO DE RESIDENCIA (d)	DESTRUCCIÓN DE SV (%)
30	65.5
20	60.0
15	56.6

Fuente: Metcalf & Eddy (2003).

2.1.3 Co-digestión

Aunque en México aún no se practica, la co-digestión se refiere al tratamiento simultáneo de ciertas cantidades de material orgánico que proviene de diferentes fuentes en un solo digestor. Eso puede exigir una adaptación técnica, así como un nuevo protocolo de operación. Los objetivos de la co-digestión son:

- Aprovechar la capacidad de un digestor existente, dado que los digestores normalmente poseen un potencial significativo no utilizado
- Optimizar las condiciones técnicas del proceso (mejorar el contenido orgánico del sustrato, la relación C:N, el ajuste del pH, etc.)
- Alcanzar cierta demanda de energía eléctrica requerida
- Responder a una demanda de utilización local de biogás (calentamiento o generación de vapor)

La situación más común es el uso del lodo del tratamiento de aguas residuales como sustrato principal, mezclado con una porción menor de otro sustrato o variedad de sustratos. El uso de un co-sustrato normalmente mejora la producción de biogás. Tasas típicas de adición de co-sustratos en digestores de lodos varían de 5 a 20%. La adición de co-sustratos puede aumentar la producción de biogás de 40 a 200% (Braun y Wellinger, 2002).

Bibliografía adicional:

- **Libro 28 del MAPAS de CONAGUA.** "Diseño de PTARs municipales: Reactores Anaerobios de Flujo Ascendente".
- Cap 3 de la **"Guía Técnica para el manejo y aprovechamiento de biogás en PTARs"** del Programa EnRes/GIZ.

2.1.4 Comparación entre los diferentes procesos que generan biogás en una PTAR

ACTIVIDAD GRUPAL 2

Lluvia de ideas.

Instrucciones: Se discutirá y realizará de manera grupal un cuadro comparativo de las diferentes tecnologías que pueden generar biogás para completar el cuadro como sigue:

Tabla 5. Comparación entre los diferentes procesos que generan biogás en una PTAR

Uso del biogás	Reactores UASB	Digestores de lodo	Co-digestión
Potencial			
Limitaciones			
Recomendable cuando			

2.1 Usos del biogás

El uso del biogás como vector energético es recomendable desde el punto de vista ambiental y económico. El poder calorífico inferior (PCI) de un biogás “típico” es de 21.5 MJ/Nm³ cercano al del gas natural, que tiene un PCI de 37.5 MJ/Nm³.

Después del tratamiento adecuado, la energía química del biogás puede ser transformada en energía térmica, eléctrica y mecánica por medio de motogeneradores a gas y calderas; o bien, utilizada directamente como combustible en vehículos o utilizada incluso cuando el biogás es inyectado en la red de gas natural.

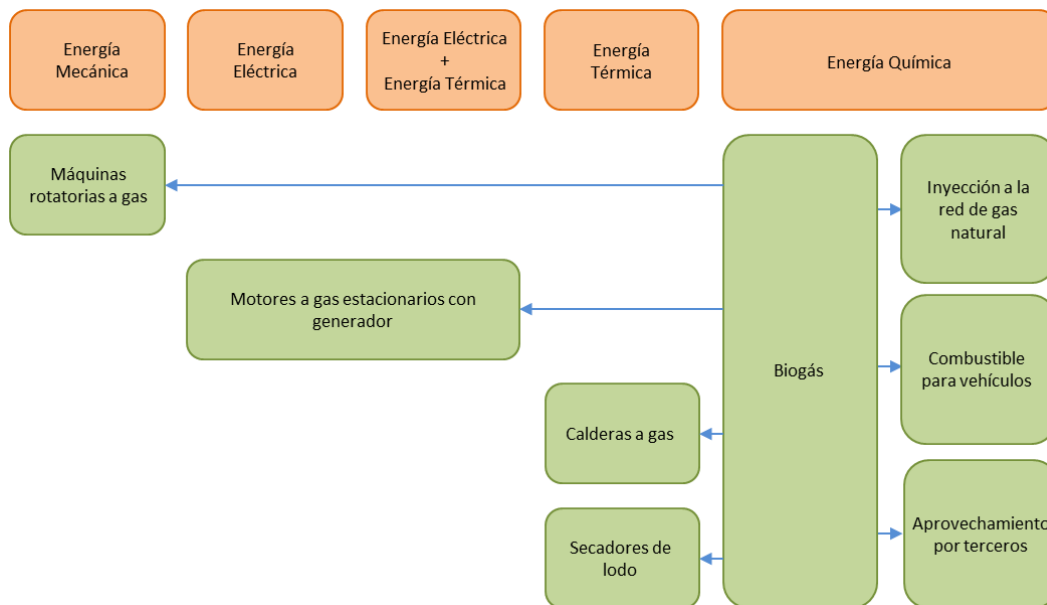


Figura 11. Uso del biogás

Fuente: Silveira et al. (2015).

El biogás no aprovechado necesariamente debe ser retirado del sistema de forma adecuada y segura por medio de su ignición en un quemador de biogás.

2.1.1 Calderas

En las calderas de biogás, la conversión en calor de la energía química contenida en el biogás se realiza por medio de la generación de agua caliente o vapor. En las calderas se utilizan generalmente quemadores de combustible duales, los cuales pueden quemar otros gases o aceites combustibles además de biogás (diesel, gas natural, gas LP). De esa forma, la escasez de biogás puede ser compensada

por otras fuentes de energía convencionales. La eficiencia de la caldera de gas es casi siempre superior a 90%.

Según el lugar de producción, el calor generado por el aprovechamiento del biogás generalmente se utiliza para calentar el digestor anaerobio de lodos. Como el biogás se acumula de forma continua y la demanda de calor está sujeta a las fluctuaciones estacionales, ocurren excedentes de biogás, el cual, por cuestiones de seguridad y para minimizar la emisión de contaminantes a la atmósfera, debe enviarse a un quemador.

2.1.2 Cogeneración

Un sistema de **cogeneración** se define como la generación secuencial o simultánea de múltiples formas de energía útil (en general, mecánica y térmica) en un único sistema integrado. Los sistemas de cogeneración consisten en cierto número de componentes individuales según la tecnología utilizada; pero en todo caso siempre quedan definidos por un **accionador primario**, que es el equipo que mueve todo el sistema (UNEP, 2009).

Así, los accionadores primarios pueden ser los siguientes:

- Motores reciprocantes de combustión interna
 - A gas (operan con el ciclo termodinámico Otto)
 - A gas/diésel (operan con el ciclo termodinámico Diésel)
- Turbinas de vapor (operan con el ciclo termodinámico Rankine)
- Turbinas de gas (operan con el ciclo termodinámico Brayton)
- Microturbinas de gas
- Celdas de combustible

Los accionadores primarios pueden utilizar una amplia variedad de combustibles, incluido gas natural, carbón, gas LP, diésel y combustibles alternativos como el biogás para producir potencia en el eje o energía mecánica. Esta energía mecánica proporcionada por el accionador primario se utiliza, en general, para mover un generador que produce energía eléctrica, a la vez que se genera energía térmica derivada de la expulsión de los gases calientes y las necesidades de enfriamiento del sistema, por lo que este tipo de sistemas se denominan unidades de cogeneración de electricidad y calor (CHP, Combined Heat and Power).

La energía térmica generada por el sistema se puede utilizar en aplicaciones de proceso directa o indirectamente para producir vapor, agua caliente, aire caliente para secado o agua fría para la refrigeración de otros procesos.

La integración de un motor de combustión interna se observa en la Figura 12, acoplado al eje del motor de combustión se encuentra un generador eléctrico que provee parte de la energía aprovechable.

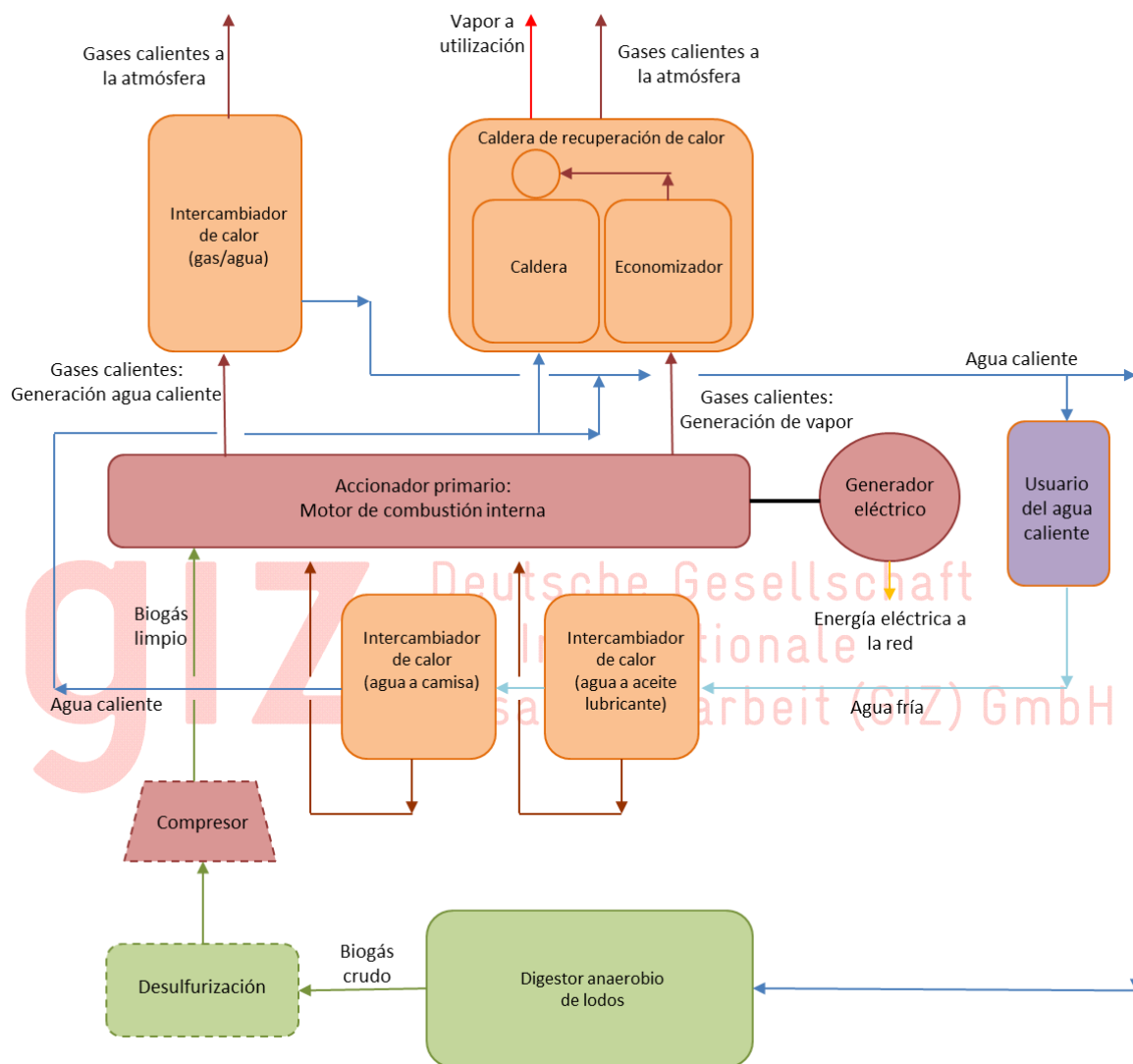


Figura 12. Diagrama del funcionamiento de un sistema CHP con base en un motor de combustión interna.

Fuente: ENRES (2017)

2.1.3 El secado de lodo

Una posibilidad muy interesante es el uso del biogás para el secado térmico del lodo proveniente de la PTAR, lo cual tiene como objetivo primordial la reducción

del volumen y la higienización del lodo, que como consecuencia reduce los costos relacionados con el transporte y su disposición final. De acuerdo con las condiciones, el lodo seco también puede emplearse como combustible.

Los principales tipos de secadores térmicos de lodo son:

- Secadores rotatorios directos e indirectos
- Secadores de cama directa
- Secadores de tolva directa con mezcladores internos
- Secadores solar-térmicos.

De acuerdo con el tipo del secador, el biogás puede ser utilizado como fuente de calor directa o indirecta, o por medio de radiación en pisos térmicos, en el caso de secadores solar-térmicos. Los pisos térmicos han sido señalados como opciones para el secado y la higienización de lodos en PTAR pequeñas y medianas (Possetti et al., 2012).

Para el secado de lodos, el principal parámetro que ha de considerarse en el balance es la energía necesaria para la evaporación del agua en el lodo. En general, la cantidad de energía requerida para evaporar el agua contenida en el lodo es del orden de 800 a 1 000 kcal/kg de agua evaporada (David, 2002). Esto equivale a aproximadamente 900-1 200 kWh por cada metro cúbico de agua evaporada.

2.1.4 Otros

Máquinas rotativas a gas

En el accionamiento directo de máquinas rotativas, la energía mecánica del motor a gas es transmitida directamente al eje de la máquina accionada. De esta forma se evitan las pérdidas de energía causadas por el generador y motor eléctrico, las cuales pueden llegar a 15%.

En caso de PTAR, los sopladores para aireación del sistema de lodos activados y bombas pueden ser accionados con gas.

Cesión del biogás a terceros/inyección en la red de gas natural (Biometano)

El biogás puede ser cedido a terceros e inyectado a la red de gas natural (purificado como biometano) para que lo aproveche como biocombustible. La

decisión de tratar o no el biogás debe ser discutida con la parte que lo recibirá considerando los aspectos técnicos y económicos.

Bibliografía adicional:

- **Libro 22 del MAPAS de CONAGUA.** "Aplicación de Fuentes de Energía Renovable en PTARs municipales"
- Cap 6 y 7 de la **"Guía Técnica para el manejo y aprovechamiento de biogás en PTARs"** del Programa EnRes/GIZ.

2.1.5 Comparación entre los requerimientos técnicos de cada uso de biogás

ACTIVIDAD GRUPAL 3

Lluvia de ideas.

Instrucciones: Se discutirá y realizará de manera grupal un cuadro comparativo de los diferentes usos que puede tener el biogás para completar el cuadro como sigue:

ACTIVIDAD GRUPAL 4

Ejercicio grupal.

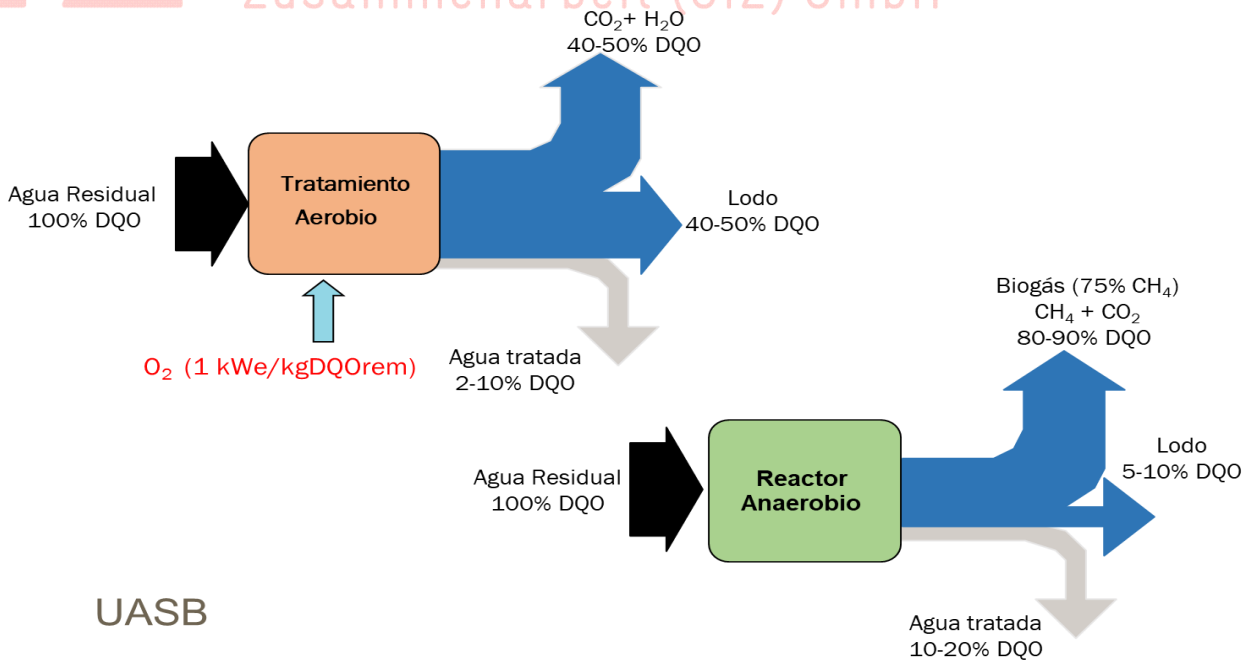
Instrucciones: Se formarán grupos de trabajo para integrar al final, un tren de tratamiento para aprovechar el biogás en una PTAR alimentando un co-generador eléctrico, donde la electricidad se aprovechará para autoabastecimiento de la PTAR, y donde el calor se aprovechará para calentar el digestor y secar los lodos.

Tabla 6. Comparación entre los requerimientos técnicos de cada uso de biogás

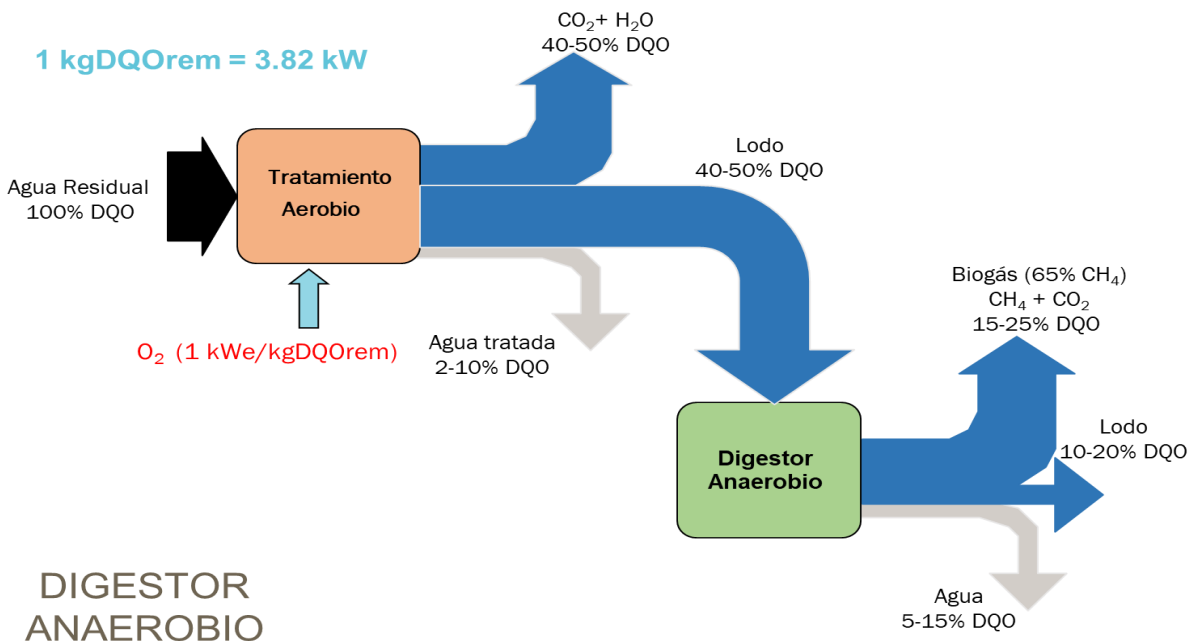
Uso del biogás	Caldera	Co-generador	Motores a gas	Microturbinas de gas	Caldera
Requerimientos técnicos					
Costo de inversión					
Recomendable cuando					

2.1 Balance de masa y energía

Para realizar un balance de masa y energía, es necesario contar con las siguientes relaciones típicas:



UASB



DIGESTOR ANAEROBIO

Producción de biogás en:

- Producción de lodos en reactores aerobios = 0.32 kgSST/kgDQO influente, pero puede variar de 0.25-0.60 kgSST/kgDQO influente dependiendo del TRC.
- **Digestores de lodo= 0.8 m³ CH₄/kg de compuestos orgánicos sólidos degradados**
- **En promedio, 14-16.5 L de biogas/hab.d**
- Cuando sea aprovechada únicamente la energía térmica del biogás, se deben utilizar los menores valores esperados para el dimensionamiento de la capacidad de almacenamiento de biogás. Si la instalación incluye motores a gas o plantas de cogeneración, la capacidad de almacenamiento debe tomar en cuenta los valores esperados más elevados, aunque esos valores sólo se presenten en determinadas épocas del año (varios meses).
- Las plantas de tratamiento con tasas específicas de biogás por encima de 25 L/(hab.d) sólo se deben considerar si la cifra proviene de mediciones reales realizadas durante varios años de operación

Tabla 7. Calidad del biogás proveniente de UASB y digestor anaerobio

Componente	Unidad	Biogás a partir de tratamiento anaerobio de aguas residuales (UASB)	Biogás a partir de tratamiento anaerobio de lodo (digestor)
Sulfuro de hidrógeno (H ₂ S)	Ppm	De 1.000 a 5.000	500 - 1500
Contenido de oxígeno (O ₂)	% en vol.	0- 2	0 - 1
Metano (CH ₄).	% en vol.	60 - 85	60 - 70
Dióxido de carbono (CO ₂)	% en vol.	5- 15	20 - 40
Nitrógeno (N ₂)	% en vol.	2- 25*	0 - 2
Hidrógeno (H ₂)	% en vol.	0- 3	0 - 1.5

Fuente: (Probiogás, 2015b)

Conversión de biogás en energía

$$1\text{m}^3 \text{CH}_4 \approx 10 \text{ kWh/m}^3$$

Ejemplo: Biogás con un 60% de CH₄ = 6 kWh/m³

Energía disponible

La eficiencia global de una planta de biogás deberá calcularse sumando las eficiencias térmicas y eléctricas, y se encuentra entre el 70% y el 85%.

$$P_d = Q_{\text{biogás}} \times C_{\text{CH}_4} \times P_{\text{ClCH}_4}$$

En el cual:

- P_d = energía disponible (J)
- $Q_{\text{biogás}}$ = caudal de biogás (m^3/s);
- C_{CH_4} = concentración de CH_4 en el biogás (%);
- P_{ClCH_4} = valor calorífico inferior de CH_4 (J/m^3).

Aplicaciones

- En calor - Calderas

Energía térmica de 75 a 85%

La cogeneración (CHP):

Energía eléctrica 30- 40% + energía térmica 40-60%
térmica + pérdidas

Comparación entre las diferentes formas de generación de electricidad con plantas de biogás:

Tabla 8. Comparación entre las diferentes formas de generación de electricidad con plantas de biogás

Parámetro	Motor-generator	Turbina de gas	Micro turbina	Motor Stirling	Celda de combustible.
La tapa. (kWel)	100 - 3000	3500 - 15000	30 - 300	<150.	300 - 1500
Eficiencia energética (%)	30 - 42	25 -40	25 - 30	30 - 40	40 - 45.
Pureza del biogas	Mediano	Mediano	Mediano	Baja/media	Alta
Inversión (EUR/kWel)	400 - 1100	900 - 1500	600 - 1200	1300 - 1500	3000 - 4000
El consumo de O&M (USD/kWel)	0.01 - 0.02	0,005 - 0,01	0.008 - 0.015	0.003 - 0.005	0.003 - 0.001

Nota importante: Todas las cifras presentadas más arriba son indicativos, para ayudar en el análisis de proyectos. No obstante, distintos valores pueden encontrarse en los proyectos, lo cual no quiere decir que están equivocados, sólo que deben estar justificadas.

Tabla 9. Factores de emisión de electricidad promedio [tCO₂e/MWh]

Año	Factor de emisión de electricidad promedio [tCO ₂ e/MWh]
2000	0.6043
2001	0.6188
2002	0.6046
2003	0.6080
2004	0.5484
2005	0.5557
2006	0.5246
2007	0.5171
2008	0.4698
2009	0.5057
2010	0.4946
2011	0.5002
2012	0.5165
2013	0.4999
2014	0.454
2015	0.458

Datos estimados por el Programa GEI México (<http://www.geimexico.org/factor.html>).

ACTIVIDAD GRUPAL 5

Ejercicio grupal.

Instrucciones: Realizar el balance de masa y energía para un digestor anaerobio.

Síntesis y conclusiones

La generación de biogás a partir de digestores de lodo son la aplicación más inmediata para generar el biogás en PTARs municipales, aunque no es la única y puede complementarse, por ejemplo, por medio de la co-digestión. Para proyectos nuevos de drenaje, sería recomendable ir considerando drenajes separados para emplear con mayor facilidad reactores UASB.

La cogeneración no es el único uso del biogás, aunque en la mayoría de los casos es la aplicación más inmediata para aprovechar el biogás, y por lo tanto este curso está enfocado a este tipo de uso.

Información más detallada sobre las tecnologías abordadas pueden encontrarse en la "Guía Técnica para el manejo y aprovechamiento de biogás en plantas de tratamiento de aguas residuales" publicado por el Programa EnRes (ENRES, 2017), así como en el Libro 22 ("Aplicación de Fuentes de Energía Renovable en PTARs municipales") y 28 ("Diseño de PTARs municipales: Reactores Anaerobios de Flujo Ascendente") del Manual de Agua Potable, Alcantarillado y Saneamiento (MAPAS) de la CONAGUA, el cual incluye recomendaciones importantes acerca del diseño de estas unidades (SEMARNAT y CONAGUA, 2015b).

La mejor opción de aprovechamiento debe elegirse teniendo en cuenta los aspectos económicos, técnicos y ambientales.

Evaluación.

Guía de observación (25%)

Elaboración del cuadro comparativo y ejercicio

3. Costeo y variables económicas

Objetivos Particulares del tema.

A lo largo del tema 3, los participantes calcularán (cognitivo 5) e interpretarán (cognitivo 5) las principales variables económicas involucradas en la evaluación económica de un proyecto, esto mediante la exposición de los temas y ejecución de breves ejercicios prácticos.

Actividades necesarias para el desarrollo del tema

En general todos los subtemas de esta sección se impartirán mediante una exposición de parte del instructor con un intercambio grupal de preguntas y experiencias a lo largo de la presentación. En el subtema 2 se trabajará con una hoja de cálculo de apoyo para calcular e interpretar las diferentes variables económicas.

3.1 Estimación de costos

3.1.1 Costo de inversión

Para calcular el costo de inversión, es necesario tener claridad en cuanto al proceso del tren de tratamiento, y con ello:

- Los equipos e instrumentos adicionales que se requieren
- Las adecuaciones necesarias al tren de tratamiento existente
- Si el proyecto se realizaría en una o varias etapas

Revisar exhaustivamente el proceso. Si el digestor tiene un tiempo de residencia muy corto, ¿se puede espesar más el lodo? Si tiene un tiempo de residencia muy largo, ¿se podría realizar una co-digestión con sustratos aledaños?

Si en la PTAR ya se produce biogás y prácticamente sólo falta el equipo de cogeneración, éste representaría aproximadamente el 80% del costo del equipamiento. **Debido a la importancia en cuanto al costo de este equipo, es vital la correcta selección y dimensionamiento del cogenerador.**

Con el fin de ayudar en una estimación muy gruesa de un equipo de cogeneración, se puede revisar la siguiente gráfica:

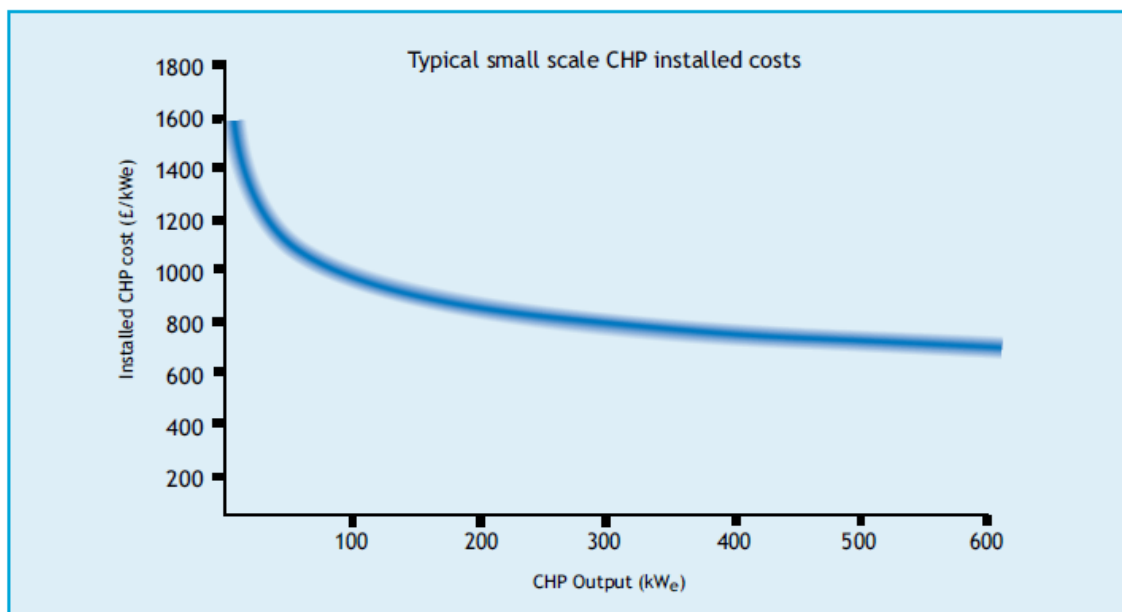


Figura 13. Precio de cogenerador vs Capacidad del equipo Fuente: XXXXX

Con base en la gráfica anterior, no es de extrañar que el aprovechamiento de biogás sea más factible entre mayor sea la capacidad del cogenerador. Es importante mencionar que la capacidad de los motores más pequeños de los fabricantes con representación en México son de 336 kWe para la marca GUASCOR (modelo SFGLD180, 146 m³ N/h de biogás en la alimentación), y 132 kWe, para la marca Caterpillar (Modelo G3406C, 76 m³ N/h de biogás en la alimentación).

A continuación se enumeran algunas recomendaciones para la selección del cogenerador:

- 1) Antes de seleccionar el equipo de cogeneración, asegurar que la producción de biogás asumida sea la máxima posible en condiciones reales. Es decir, es necesario analizar muy bien qué puntos del proceso pueden cambiar para maximizar la producción de biogás.
- 2) Se recomienda que la operación de este equipo sea lo más continua posible para que su capacidad sea menor (más económico), a menos que se desee instalar el equipo sólo para producir electricidad en las horas de tarifa punta. En dado caso se recomienda realizar una comparativa económica.
- 3) Cuidar que exista servicio técnico en el país (si un equipo sale fuera de operación, ¿cuánto tiempo no operaría debido al servicio de mantenimiento y envío de repuestos?).

- 4) Evaluar la conveniencia técnica y económica de incluir modularidad en caso de cogeneradores de gran capacidad y relevo.
- 5) Si ya se cuenta con generación de biogás, realizar una caracterización al mismo para medir su perfil de variación a lo largo de la semana y la concentración de los gases presentes (especialmente metano y H_2S). Con esto se debe de revisar que el tratamiento del biogás sea el más adecuado.
- 6) OJO: En una licitación, la mejor propuesta no necesariamente es la más económica, muchas empresas sacrifican elemento de seguridad y materiales adecuados para el manejo de biogás. Revisar el capítulo 9 de la Guía Técnica ENRES/lodos.

Los gastos generales (costos administrativos, gastos de trabajo, riesgos, seguros, garantías) y las utilidades del proyecto representan aproximadamente 25% para obras y servicios y 15% para el equipamiento.

3.1.2 Costo de operación y mantenimiento

En este capítulo, se presenta la base para el cálculo de los costos de operación y mantenimiento. Debido a la falta de experiencia e información en México en relación con este tipo de costos, se utilizó como referencia la experiencia que se tiene en Europa. Se consideran gastos de funcionamiento, mantenimiento y repuestos de unidades instaladas, así como los insumos, por ejemplo, el consumo de energía eléctrica del motor-generator, el consumo de aceite lubricante, los análisis de laboratorio de biogás y el aceite lubricante.

Mantenimiento y reparación de motor generador

El mantenimiento preventivo puede evitar un prolongado tiempo de inactividad para fallos y contribuir así a la consecución del objetivo de disponibilidad. En éste contexto, vale la pena señalar que la operación asistida (es decir, la subcocontratación de la operación del cogenerador por el mismo proveedor) puede ser una herramienta eficaz y eficiente, reduciendo el tiempo de respuesta, asegurando la viabilidad económica de la utilización de la energía de la planta de biogás (Pro-biogás, 2016).

El mantenimiento y la reparación del motor-generator consiste principalmente en el control de la secuencia de arranque, el control de la estanquidad, cambio de aceite lubricante y refrigerante, la medición de la contrapresión y calidad de

gases de escape, comprobación y sustitución de las bujías, ajustar el cierre de las válvulas, el apriete de las culatas, examen endoscópico de las cámaras de combustión y por lo tanto, intercambio de piezas de repuesto, como las camisas de los cilindros, pistones, bielas, cojinetes del cigüeñal, el control de las válvulas, etc. (Dreyer and Bosse, 2015).

Los costos específicos de mantenimiento y reparaciones en el motor-generador son €0.006 y 0.009€ por kWh generado por año, respectivamente (Döhler and Döhler, 2013).

Se estima que los costos de mantenimiento y reparaciones son tres veces menos que los arriba mencionados en caso de generadores donde sólo se aprovecha la electricidad y no así el calor.

Mantenimiento de otros sistemas

El mantenimiento del sistema para el tratamiento de biogás consiste principalmente en la reposición de material de consumo (carbón activado), así como en el mantenimiento preventivo y correctivo de biodesulfurización y el escape de biogás. El costo específico para el tratamiento de biogás es de 0.01€ por m³ biogás, refiriéndose a la cantidad de biogás tratado (Döhler and Döhler, 2013)

Para la estimación de los costos anuales de mantenimiento preventivo y correctivo de las otras unidades en el sistema de las plantas de biogás, se puede asumir que éste es un 2% del costo de la inversión de cada unidad (Döhler and Döhler, 2013)

Los análisis de laboratorio

El análisis periódico de aceite lubricante es necesario para la verificación de la posible necesidad de intercambio, que puede verse en la interpretación de los parámetros siguientes: viscosidad cinemática a 100°C, los niveles de hollín y metales, el grado de oxidación, y nitración, sulfatación, índice de basicidad total (TBN), entre otros (Bertinatto, 2014)

En un laboratorio de análisis de biogás se recomienda medir la composición del mismo dos veces al año en cuanto a contenido de metano, dióxido de carbono, el oxígeno y el hidrógeno sulfurado (Probiogás, 2015b), lo cual tiene un costo unitario aproximado de US\$ 580. También se recomienda analizar en el laboratorio una vez al mes el aceite lubricante, lo cual tiene un costo unitario estimado de US\$ 160. Debido a la falta de información en México, los precios de referencia que se tomaron fueron correspondientes a Brasil (Probiogás, 2016).

Mano de obra calificada del operador

Se estima que el número de horas de trabajo de un operador dedicado al sistema de co-generación en plantas de biogás es aproximadamente de 4.1 horas por kW instalado (Döhler and Döhler, 2013).

3.1.3 Costos de ahorro de electricidad y/o combustible

Consumo de energía eléctrica y consumo de aceite lubricante de CHP

El consumo de energía eléctrica se estima en el 2% de la cantidad generada (Döhler and Döhler, 2013). Se estima que el consumo de aceite es de 0.714 L al año de aceite por kWh instalado (de acuerdo con el fabricante Dreyer & Bosse). El costo del aceite lubricante es de US\$ 2.34 por litro aproximadamente.

3.1.4 Ahorros

Horas de operación del cogenerador

Las horas de operación al año del cogenerador determinarán la cantidad de electricidad y calor que puede ser generado, aprovechado y ahorrado en la PTAR.

Se recomienda que en una PTAR donde el proveedor del servicio del cogenerador tiene representación en el país y repuestos de rápida entrega, y donde el tren de biogás incluye todos los elementos de seguridad recomendados, se considere en el mejor de los casos una operación de la cogeneración de 22hrs al día o bien, de 8000 hrs al año, es decir, se asumiría que en suma aproximadamente un mes al año el equipo estaría fuera de operación por motivos de mantenimiento (a menos que se tenga un equipos de cogeneración de relevo).

En caso de que a entrega de los repuestos del cogenerador puedan demorar más de un mes, se puede asumir una operación de 7300hrs al año, es decir, que hasta dos meses el equipo podría estar fuera de operación.

En caso de que el proceso se diseñe para que el cogenerador opere durante las horas de tarifa punta, se recomienda que la operación no sea menor a 5000 horas al año. Por regla de dedo, un cogenerador que opere menos de esto no es económicamente viable.

Tarifa eléctrica

La evaluación técnica-económica es muy sensible a la tarifa eléctrica, se recomienda evaluar al menos dos escenarios (uno moderado y otro más conservador, sobre todo considerando que la tarifa eléctrica en México ha variado de manera importante en los últimos años. El precio promedio a nivel nacional del kilowatt-hora (kWh) de 1999 al 2012 registró un incremento de 260%, contra 82% de aumento en el Índice Nacional de Precios al Consumidor (INPC) en el mismo lapso. Sin embargo, a inicios del 2015 la Comisión Federal de Electricidad (CFE) bajó el precio de la electricidad.

En la siguiente figura se muestra el comportamiento de la tarifa para el sector de empresa mediana (H-M) en el periodo (2004-2014).

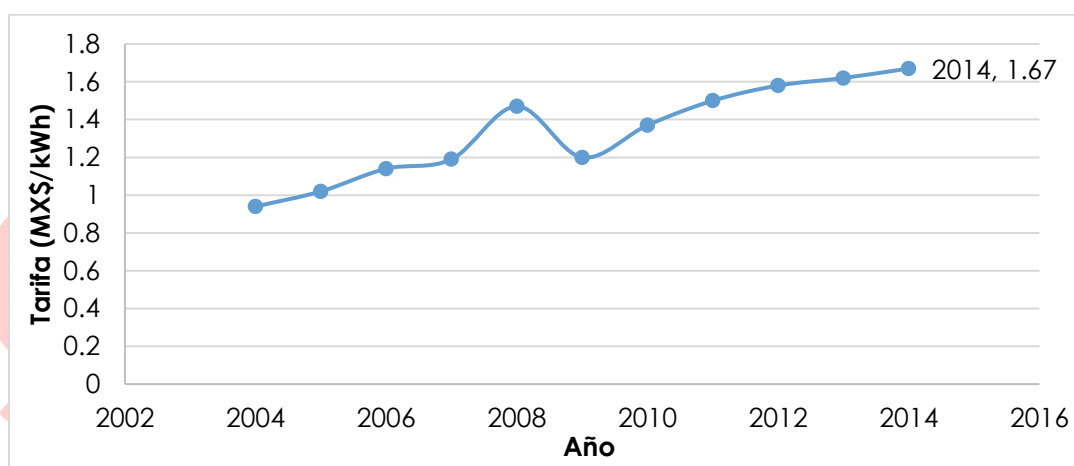


Figura 14. Precio de la electricidad para el sector empresa mediana (H-M)

Se asume que la energía eléctrica es para auto-consumo. A menos que el sistema de cogeneración produzca más de 500kW, habría que tramitar un permiso, y si se quisiera por algún motivo en particular subir la electricidad a la red (ya sea porque se prefiera venderla a auto-consumirla, o bien porque se produzca más electricidad que la que se consume gracias a una co-digestión), ésta se podrá vender dentro del mercado eléctrico.

Venta de energía eléctrica

Esto último está permitido a partir del Acuerdo de París el 25/Abril/2016, en el cual México se comprometió a incrementar la generación de energías limpias hasta llegar a una aportación del 60% de la energía total del país en el 2050. Uno de los mecanismos para incentivar la generación de energía limpia serán los

Certificados de Energía Limpia (CEL) emitidos por la Comisión Reguladora de Energía (CRE), los cuales podrán venderse en el mercado que a partir del 2018 con un costo aproximado de US\$ 23-25/MWh producido. Una planta que produzca electricidad a partir de biogás podría vender CELs si así lo desea. Sin embargo, hasta el momento parece complicado asegurar un financiamiento a través de este modelo de negocio, ya que no existe un precio fijo para los CELs, están sujetos al precio del mercado eléctrico.

Costo del gas natural

México importa gas natural de Estados Unidos de América. El precio histórico del gas natural ha muy variable y en estos momentos de ubica en un precio moderado-bajo, como se puede observar en la siguiente gráfica (fuente: <http://mx.investing.com/>).

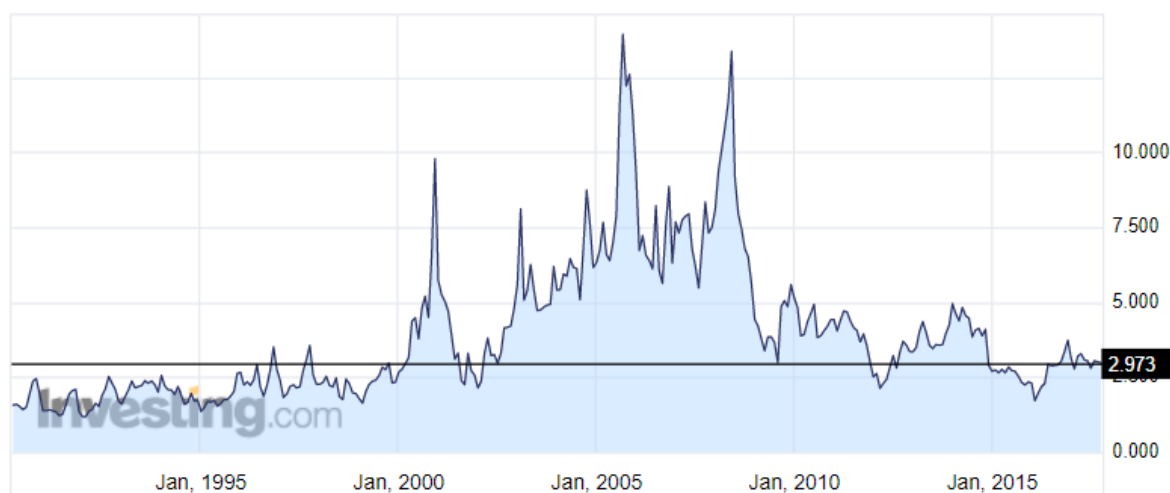


Figura 15. Precio histórico del gas natural (últimos 10 años)

El costo del gas natural asumido al día 23/10/2017 fue de **US\$ 2.97/MMBTU** (CME Group, citado por el Servicio Geológico Mexicano en el portal de la Secretaría de Economía de México).

Cabe mencionar que las tarifas de la electricidad no se consideraron en la demanda, ya que la existencia de un sistema de aprovechamiento de la planta de biogás no influye en la determinación de la demanda contratada, porque, para la seguridad de los sistemas de tratamiento de efluentes, es necesario que exista una garantía de una fuente constante de energía eléctrica.

Disposición de los lodos

Después de la deshidratación de los lodos de la PTAR (concentrados generalmente al 20-26%), los lodos pueden ser secados para reducir el volumen de disposición y con ello ahorrar el costo por transportación de lodos. Incluso, debido a que los lodos están estabilizados y cumplen con la NOM-004-SEMARNAT para ser aprovechados como mejorados de suelos, los lodos podrían disponerse en tierras agrícolas y con ello, eliminar los costos por disposición de lodos en rellenos sanitarios.

Ahorro en la aireación

El costo de la eliminación de lodos comprende el costo de recolección, transporte y disposición final de lodos en los rellenos sanitarios, y puede variar considerablemente de un proyecto a otro, dependiendo principalmente de la distancia entre la planta y el relleno sanitario, la humedad del lodo y la tarifa aplicada.

Flujo de caja de un proyecto

Un proyecto típico de biogás presenta una inversión y ganancias anuales netas (es decir, ahorros en cuanto a calor y electricidad principalmente), como se muestra en la siguiente figura:

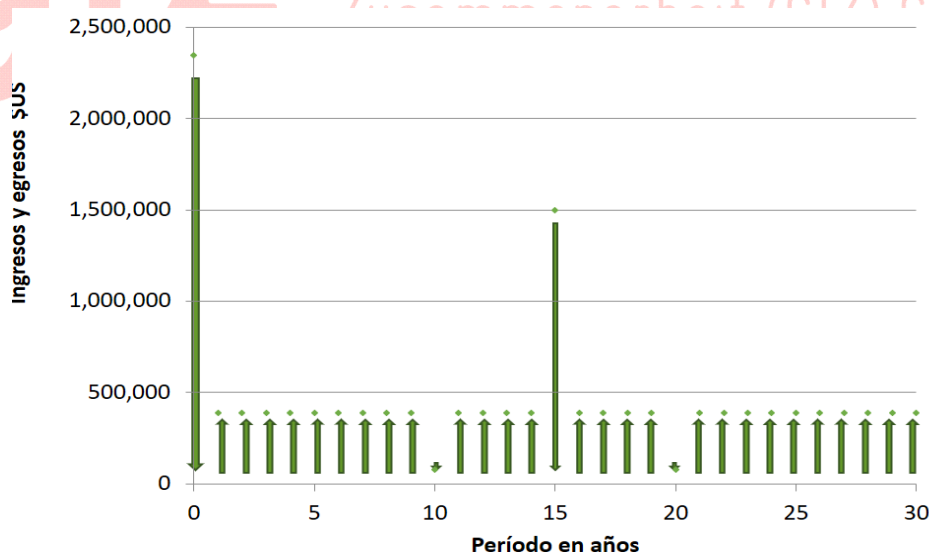


Figura 16. Flujo de caja típico de un proyecto de biogás

Fuente: (Probiogás, 2015a)

3.2 Variables económicas

A continuación, se explicarán algunas variables económicas, las cuales pueden ser calculadas a partir del flujo de caja de un proyecto. Tiempo de retorno de la inversión (TRI)

Es el periodo en el que se recupera el desembolso originado por el proyecto de inversión. Es el resultado de dividir la inversión total por los beneficios anuales. A igualdad de riesgo, las mejores inversiones serán aquellas que presenten un plazo de recuperación menor. Si los flujos no son constantes, se determina el pay-back acumulando los sucesivos flujos anuales hasta que su suma sea igual a la inversión (UCO, n.d.).

El tiempo de retorno de la inversión no puede usarse de manera aislada para tomar una decisión, ya que podría llevar a conclusiones erróneas y decir que es bueno invertir en un proyecto que al final no es rentable o no sea el mejor. Es preferible utilizar el criterio de Valor Presente Neto (VPN) en lugar del TRI (UCO, n.d.).

3.2.1 Valor Presente Neto (VPN)

El método del VPN, también conocido como Valor Actual Neto, es uno de los criterios económicos más ampliamente utilizados en la evaluación de proyectos de inversión. Consiste en determinar la equivalencia en el tiempo cero de los flujos de efectivo futuros que genera un proyecto y comparar esta equivalencia con el desembolso inicial. Cuando dicha equivalencia es mayor que el desembolso inicial, entonces, es recomendable que el proyecto sea aceptado (Coss Bu, 2005).

La fórmula utilizada es la siguiente:

$$VPN = S_0 + \sum_{t=1}^n \frac{S_t}{(1+i)^t} = \sum_{t=0}^n \frac{S_t}{(1+i)^t}$$

Donde:

VPN = Valor presente neto

S_0 = Inversión inicial

S_t = Flujo de efectivo neto del período t

n = Número de períodos de vida del proyecto

i = Tasa de recuperación mínima aceptable (TREMA*)

* La TREMA es la tasa que representa una medida de rentabilidad, la mínima que se le exigirá al proyectos de tal manera que permita cubrir la totalidad de la inversión inicial, los egresos de operación, los intereses que deberán pagarse por aquella parte de la inversión financiada con capital ajeno a los inversionistas, los impuestos, una prima por incurrir en el riesgo de invertir en el proyecto, y la rentabilidad que el inversionista exige (Agroproyectos, 2014)

Cuando los proyectos de inversión demandan desembolsos en su etapa inicial y generan ingresos en lo sucesivo, el valor presente para diferentes valores de i , se comporta como aparece en la figura 17.

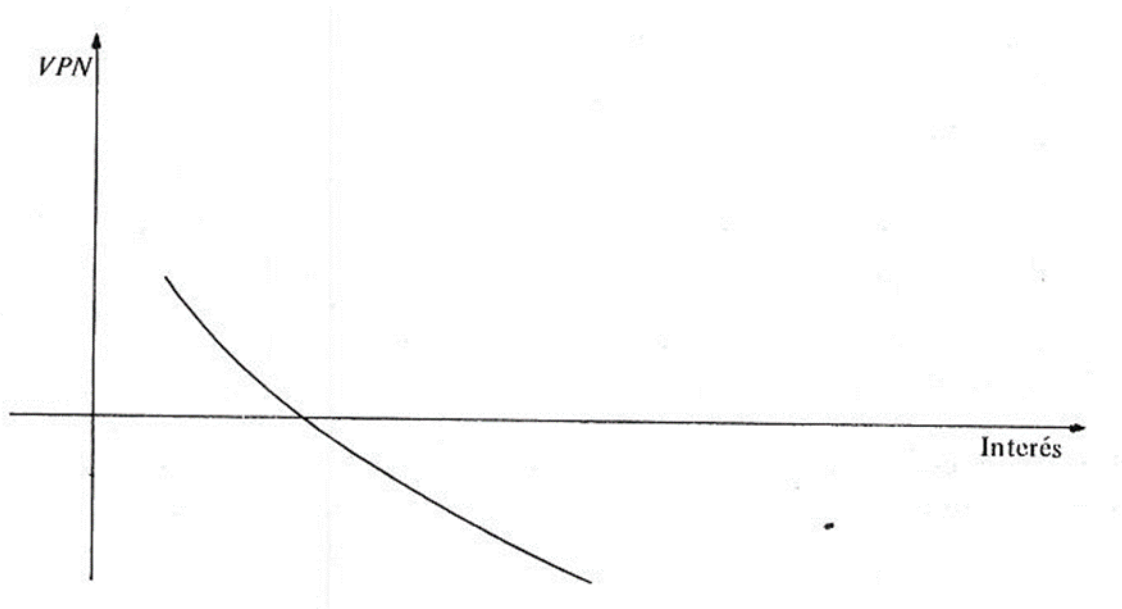


Figura 17. VPN vs Interés

La fórmula anterior considera el valor del dinero a través del tiempo al seleccionar un valor adecuado de i . Cuando el valor presente es positivo, significa que el rendimiento que se espera obtener del proyecto de inversión es mayor al rendimiento mínimo requerido por la empresa (TREMA), y esto a su vez va a incrementar el valor del capital de los accionistas (Coss Bu, 2005).

Cuando el valor presente es negativo, entonces, el proyecto debe ser rechazado.

3.2.2 Tasa interna de retorno (TIR)

La tasa interna de retorno (o de rendimiento, como se le llama frecuentemente) (TIR), es un índice de rentabilidad ampliamente aceptado. Está definida como la tasa de interés que reduce a cero el valor presente neto. Es decir, la tasa interna de rendimiento de una propuesta de inversión, es aquella tasa de interés i^* que satisface cualquiera de la siguiente ecuación (Coss Bu, 2005):

$$VPN = \sum_{t=0}^n \frac{S_t}{(1 + i^*)^t} = 0$$

Dónde:

S_t = Flujo de efectivo neto del período t .

n = vida de la propuesta de inversión.

El TIR es la tasa que el inversionista obtiene, en promedio, en cada período del proyecto sobre el capital invertido (Probiogás, 2015a). **En términos económicos la tasa interna de rendimiento es la tasa de interés que se gana sobre el saldo no recuperado de una inversión, de tal modo que el saldo al final de la vida de la propuesta es cero.** El saldo no recuperado de una inversión en cualquier punto del tiempo de la vida del proyecto, puede ser visto como la porción de la inversión original que aún permanece sin recuperar en ese tiempo (Coss Bu, 2005).

Una de las equivocaciones más comunes que se cometen con el significado de la TIR, es considerarla como la tasa de interés que se gana sobre la inversión inicial requerida por la propuesta. Sin embargo, lo anterior es correcto solamente en el caso de propuestas cuyas vidas sean de un período (Coss Bu, 2005).

Con el método de la tasa interna de rendimiento, es necesario calcular la tasa de interés (i^*) que satisface la ecuación anterior y compararla con la tasa de recuperación mínima atractiva (TREMA). Cuando i^* sea mayor que TREMA, conviene que el proyecto sea emprendido (Coss Bu, 2005).

Resumen del método TIR y VPN

Mediante el método de la TIR y el VPN se llegaría a la misma decisión de aceptar o rechazar el proyecto. Es decir, si i^* es mayor que TREMA, entonces VPN (TREMA₁) es mayor que cero. Por el contrario, si i^* es menor que TREMA, entonces VPN (TREMA₂) es menor que cero (Coss Bu, 2005).

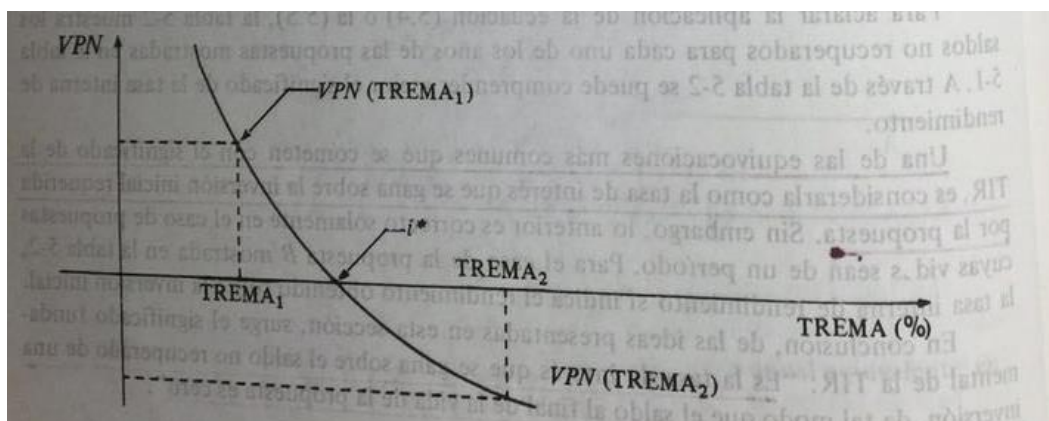


Figura 18. Valor presente neto y su relación con el método de la TIR

VPN > 0	TIR > TREMA	- Recuperación total de la inversión - Remuneración con TMA adoptada - Exceso monetario presente
VPN = 0	TIR = TREMA	Inversión indiferente
VPN < 0	TIR < TREMA	Inversión económicamente no viable

Figura 19. Resultados arrojados del método VPN

Fuente: Adaptado de Probiogás (2015a)

Evaluación de proyectos mutuamente exclusivos por el método TIR y VPN (Coss Bu, 2005).

Cuando se analizan alternativas mutuamente exclusivas, son las diferencias entre ellas lo que sería más relevante al tomador de decisiones. El VPN y TIR del incremento en la inversión precisamente determina si se justifican esos incrementos de inversión que demandan las alternativas de mayor inversión.

Cuando se comparan dos alternativas mutuamente exclusivas mediante este enfoque, lo primero que se debe hacer es determinar los flujos de efectivo netos de la diferencia entre los flujos de efectivo de las dos alternativas analizadas. Enseguida se determina si el incremento en la inversión se justifica. El incremento en la

inversión se considera aceptable si su rendimiento excede la TREMA, es decir, si el VPN del incremento en la inversión es mayor que cero, el incremento se considera deseable y la alternativa que requiere esta inversión adicional se considera como la más atractiva.

En la evaluación de proyectos mutuamente exclusivos, existen dos principios que se deben de tomar muy en cuenta (Coss Bu, 2005):

- Cada incremento de inversión debe ser justificado, es decir, la alternativa de mayor inversión será la mejor siempre y cuando, la tasa interna de rendimiento del incremento en la inversión sea mayor que TREMA, y el VPN sea mayor a cero.
- Solamente se puede comparar una alternativa de mayor inversión con una de menor inversión, si esta ya ha sido justificada.

Los pasos para comparar proyectos excluyentes son:

1. Poner las alternativas en orden ascendente de acuerdo a su inversión inicial.
2. Seleccionar como la mejor alternativa aquella de menor costo. Cabe señalar que la alternativa de menor costo siempre será "no hacer nada", es decir, esta alternativa sería la base contra la cual se comparará la siguiente alternativa de menor costo. La alternativa "no hacer nada" conviene siempre considerarla puesto que se puedan presentar casos en los cuales todas las alternativas disponibles tengan valores presentes negativos.
3. Comparar la mejor alternativa con la siguiente de acuerdo al ordenamiento del paso 1. La comparación entre estas dos alternativas se basa en determinar el valor presente del incremento de la inversión (flujos de efectivos diferenciales). Si este VPN es mayor de cero y/o el rendimiento es mayor a la TREMA, entonces la alternativa retadora se transforma en la mejor alternativa. En caso contrario, la mejor alternativa sigue siendo la defensora y la retadora se elimina de posterior consideración.
4. Repetir el paso 3 hasta que todas las alternativas disponibles hayan sido analizadas. La alternativa que maximiza el valor presente y proporciona un rendimiento mayor que TREMA, es la alternativa de mayor inversión cuyos incrementos de inversión se justificaron.

El criterio usual de selección al utilizar este método, es escoger el proyecto de mayor inversión para el cual todos los incrementos de inversión fueron justificados.

Debe ser notado que cuando el método de la TIR es utilizado, seleccionar el proyecto de mayor TIR podría conducir a decisiones sub-óptimas (Coss Bu, 2005).

3.2.3 Rentabilidad

La rentabilidad de una inversión es un indicador que mide la relación que existe entre la ganancia de una inversión y el costo de ésta, al mostrar qué porcentaje del dinero invertido se ha ganado o recuperado, o se va a ganar o recuperar. Conocer la rentabilidad de una inversión permite saber qué tan bueno ha sido el desempeño de la inversión o, en caso de tratarse de una rentabilidad ofrecida, saber qué tan atractiva es (CreceNegocios, n.d.).

La fórmula para hallar la rentabilidad de una inversión es:

$$\text{Rentabilidad} = \left(\frac{\text{Ganancia}}{\text{inversión}} \right) \times 100$$

En caso de tratarse de un proyecto de negocio, para hallar la rentabilidad debemos tomar en cuenta la inversión y la ganancia futura, la cual estará dada por las utilidades proyectadas (diferencia entre ingresos y egresos proyectados) (CreceNegocios, n.d.).

Síntesis y conclusiones

Es indispensable que se evalúe el proyecto de forma completa e integral para poder considerar todos los elementos necesarios para realizar un costeo. Es recomendable prestar especial atención a los mecanismos mediante los cuales se puede maximizar la generación de biogás (ej. calentamiento del digestor, adición de co-sustratos, pre-tratamiento adecuado para la operación más continua posible del sistema de cogeneración, etc).

Una vez que se tengan todos los costos, se puede estimar el flujo de caja del proyecto, cuyo horizonte es de generalmente de 10 a 15 años. Después de este tiempo, a pesar de que el equipo podría seguir operando con una reinversión en la planta, se recomienda asumir que el valor de rescate del proyecto es \$0.

Las variables económicas que se calculan en los proyectos (tiempo de retorno de la inversión, VPN, TIR, rentabilidad) no deben de considerarse de manera aislada para tomar una decisión, ya que el significado de los mismos refleja la viabilidad del proyecto desde diferentes ángulos.

Evaluación

Guía de observación (15%)

Elaboración de los ejercicios en la computadora personal.

4. Ejercicios prácticos y análisis de sensibilidad

Objetivos Particulares del tema.

Al finalizar el tema 4, los participantes calcularán, interpretarán y evaluarán la viabilidad económica de proyectos de biogás bajo diferentes escenarios, esto mediante el desarrollo de ejercicios en los cuales se apliquen los conceptos y herramientas anteriormente descritos, así como también la discusión de los resultados de manera grupal.

Actividades necesarias para el desarrollo del tema

En general todos los subtemas de esta sección es un mismo ejercicio de viabilidad económica, la cual se evaluará bajo diferentes escenarios. Al final de cada ejercicio y bajo la guía del instructor, se realizará un análisis de sensibilidad y discutirán de manera grupal los resultados.

EJERCICIO DE INTEGRACIÓN

Instrucciones: A continuación, se retomará el ejercicio realizado en el balance de masa y energía de la Actividad Grupal 5 para estimar la viabilidad económica y realizar un análisis de sensibilidad. Se puede utilizar la hoja de cálculo en Excel distribuida al inicio del curso.

Síntesis y conclusiones

Realizar un análisis de sensibilidad durante la evaluación de proyectos es indispensable para tomar decisiones de inversión. Se recomienda cambiar una variable a la vez y posteriormente volver a revisar las variables económicas. El análisis de sensibilidad nos permite conocer los escenarios optimistas, pesimistas y más probables ante un cambio en una variable que por lo general no se puede controlar (externo) pero que puede afectar de manera importante la viabilidad de un proyecto.

Evaluación

Guía de observación (20%)

Elaboración de los ejercicios en la computadora personal.

Fuentes

- AGROPROYECTOS, 2014. *Todo sobre proyectos: Tasa de Rendimiento Mínima Aceptable (TREMA)* [online]. México. Available from: <http://www.agroproyectos.org/que-es-la-trema/>.
- ANDREOLI, C.V., VON SPERLING, M., and FERNANDES, F., 2010. *Lodos de esgoto: tratamento e disposicao final*. 4th ed. Belo Horizonte: Universidad Federal de Minas Gerais.
- BERTINATTO, R., 2014. *Análise da contaminação e degradação do óleo lubrificante e desgaste de um motor otolizado alimentado por biogás. Dissertação (Mestrado) - Curso de Pós-graduação em Energia na Agricultura*. Cascavel, Brazil: Universidade Estadual do Oeste do Paraná.
- BRAUN, R. and WELLINGER, A., 2002. *Potential of Co-digestion* [online]. IEA Bioenergy. Available from: <http://www.iea-biogas.net/files/daten-redaktion/download/publi-task37/Potential%20of%20Codigestion%20short%20Brosch221203.pdf>.
- CHERNICHARO, C.A., 2007. Reactores anaeróbios. In: *Principios del tratamiento biológico de aguas residuárias*. Belo Horizonte: Departamento de Ingeniería Sanitaria y Ambiental. Universidad Federal de Minas Gerais. p. 380.
- CIEEMAD-IPN, 2013. *Diagnóstico de las plantas de tratamiento de aguas residuales municipales mayores de 100 L/s y determinación de estrategias y criterios para mantener en operación la infraestructura de tratamiento*. Centro Interdisciplinario de Investigaciones y Estudios sobre Medio Ambiente y Desarrollo. Instituto Politécnico Nacional.
- COMISIÓN INTERSECRETARIAL DE CAMBIO CLIMÁTICO, 2015. *2a. Sesión Ordinaria 2015 de la CICC*. México: Gobierno de la República.
- COSS BU, R., 2005. *Análisis y evaluación de proyectos de inversión*. 2da. edición. México: Limusa Noriega Editores.
- CRECENEGOCIOS, n.d. *Cómo calcular la rentabilidad de una inversión* [online]. Available from: <http://www.crecenegocios.com/como-calcular-la-rentabilidad-de-una-inversion/>.
- DAVID, A.C., 2002. *Secagem térmica de lodos de esgoto. Determinação da umidade de equilíbrio. Dissertação (Maestrado em Energia)*. Programa de Interunidades de Pós-graduação em Energia- PIPGE (EP/FEA/IEE/IF). Universidade de São Paulo, Sao Paulo.
- DÖHLER, H. and DÖHLER, S., 2013. *Faustzahlen Biogas*. 3er ed. Darmstadt: Kuratorium Für Technik Und Bauwesen In Der Landwirtschaft e.V. (KTBL),.
- DREYER and BOSSE, 2015. *Plano de manutenção Vita Pico/Grandis*.
- DWA-M 363, 2010. *Herkunft, Aufbereitung und Verwertung von Biogas*. Noviembre 2010. Hennef: DWA Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e.V.
- ENRES, 2017. *Guía técnica para el manejo y aprovechamiento de biogás en plantas de tratamiento de aguas residuales*. México: Cooperación Alemana al

- Desarrollo Sustentable (GIZ México); Asociación Nacional de Empresas de Agua y Saneamiento (ANEAS); Dirección General de Energías Limpias (SENER); Dirección General de Fomento Ambiental, Urbano y Turístico (SEMARNAT).
- GOBIERNO DE LA REPÚBLICA, 2015. *Compromisos de mitigación y adaptación ante el cambio climático para el periodo 2020-2030*. México.
- IEA, 2015. *CO2 emissions from fuel combustion*. Paris: International Energy Agency.
- II-UNAM, 2013. *Evaluación de las condiciones físicas y de operación de las plantas de tratamiento de aguas residuales municipales con capacidad menor a 100 L/s y formulación de las estrategias para optimizar su funcionamiento*. Instituto de Ingeniería, Universidad Nacional Autónoma de México.
- METCALF & EDDY, 2003. *Wastewater Engineering - Treatment and Reuse*. 4th Ed. New York: McGraw-Hill Companies.
- NBR 12209, N.B., 2011. *Projeto de Estações de Tratamento de Esgoto Sanitário*. Rio de Janeiro: ABNT Associação Brasileira de Normas Técnicas.
- NOYOLA, A., MORGAN SAGASTUME, J.M., and GÜERECA, L.P., 2013. *Selección de tecnologías para el tratamiento de aguas residuales municipales. Guía de apoyo para ciudades pequeñas y medianas*. Instituto de Ingeniería, UNAM.
- POSSETTI, G.R.C., JASINSKI, V.P., ANDREOLI, C.V., BITTENCOURT, S., and CARNEIRO, C., 2012. *Sistema térmico de higienização de lodo de esgoto movido a biogás para ETEs de médio e pequeno porte*. XV Simpósio Luso-Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental. Belo Horizonte.
- PROBIOGÁS, 2015a. *Avaliação da viabilidade econômica de instalações de aproveitamento energético de biogás em ETEs (curso de formação apresentação)*.
- PROBIOGÁS, 2015b. *Guia técnico de aproveitamento energético de biogás em estações de tratamento de esgoto*. Brasília, DF. Brasil: Secretaria Nacional de Saneamento Ambiental. Ministerio de las Ciudades.
- PROBIOGÁS, 2016. *Análise da viabilidade técnico-econômica de produção de energia elétrica em ETEs no Brasil a partir do biogás*. Brasília, DF. Brasil: Secretaria Nacional de Saneamento Ambiental. Ministerio de las Ciudades.
- SEMARNAT and CONAGUA, 2015a. *Manual de Agua Potable, Alcantarillado y Saneamiento (MAPAS)*. In: *Introducción al tratamiento de aguas residuales municipales (Libro 25)*. México: Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. Comisión Nacional del Agua.
- SEMARNAT and CONAGUA, 2015b. *Manual de Agua Potable, Alcantarillado y Saneamiento (MAPAS)*. In: *Diseño de Plantas de Tratamiento de Aguas Residuales Municipales: Reactores Anaerobios de Flujo Ascendente (Libro 28)*. México: Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. Comisión Nacional del Agua.
- UCO, n.d. *Capítulo III. Análisis de inversiones ganaderas*. España: Universidad de Córdoba.
- UNEP, 2009. *Energy Efficiency Guide for Industry in Asia*. [online]. Available from: <http://www.energyefficiencyasia.org/docs/hardcopies/EnergyGuideIndustryAsia.pdf>.