

UNIVERSIDAD DE CUENCA



FACULTAD DE CIENCIAS QUÍMICAS

MAESTRÍA EN PLANIFICACIÓN Y GESTIÓN ENERGÉTICA

EVALUACIÓN DEL POTENCIAL ENERGÉTICO DE LAS AGUAS RESIDUALES URBANAS GENERADAS EN CIUDADES DE ALTURA

TRABAJO DE TITULACIÓN PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE MAGISTER EN PLANIFICACIÓN Y GESTIÓN ENERGÉTICA

AUTOR: Ing. Juan Paúl Cordero Álvarez
C.I: 0102595501

DIRECTOR: Ing. Edgar Antonio Barragán Escandón
C.I: 0102516457

CUENCA – ECUADOR

2017



RESUMEN

La creciente demanda de energía de la sociedad moderna y la alta dependencia de las fuentes de energía no renovables, así como los problemas ambientales asociados, hace necesario que se busquen nuevas opciones de fuentes energéticas. En esta tesis se analiza el aprovechamiento energético de las aguas residuales urbanas en ciudades de altura. Se estudia su aprovechamiento considerando que se las somete a la materia orgánica contenida en ellas a un proceso de digestión anaerobia, en las condiciones que tienen las ciudades de altura, con el fin de obtener biogás. Se toma como ejemplo para esta evaluación a las aguas residuales urbanas generadas en la ciudad de Cuenca y se plantea el uso del biogás obtenido en dos aplicaciones, la cogeneración de energía eléctrica y calor y como combustible para autobuses urbanos en la ciudad de Cuenca. Se hace el análisis y ambiental de las dos opciones con el fin de determinar la viabilidad de cada alternativa.

PALABRAS CLAVE

Biogás, digestión anaerobia, fuente de energía no convencional, aguas residuales.



ABSTRACT

The growing energy demand of modern society and the high dependence on non-renewable energy sources, as well as the associated environmental problems, necessitate the search for new options for energy sources. This thesis analyzes the energy utilization of urban wastewater. Their use is studied considering that they are submitted to the organic matter contained in them to a process of anaerobic digestion, under the conditions that have the cities of height, in order to obtain biogas. The urban wastewater generated in the city of Cuenca is taken as an example for this evaluation and the use of the biogas obtained in two applications, the cogeneration of electric energy and heat and as fuel for urban buses in the city of Cuenca is proposed. The environmental analysis of the two options is done in order to determine the feasibility of each alternative.

KEYWORDS

Biogas, anaerobic digestion, unconventional energy source, wastewater.



CONTENIDO

RESUMEN	1
ABSTRACT	2
CONTENIDO	3
ÍNDICE DE TABLAS	6
ÍNDICE DE FIGURAS	7
CERTIFICADO DE PROPIEDAD INTELECTUAL	¡Error! Marcador no definido.
CERTIFICADO DE RESPONSABILIDAD DEL AUTOR	¡Error! Marcador no definido.
DEDICATORIA	10
AGRADECIMIENTO	11
OBJETIVOS	12
HIPÓTESIS.....	13
1. INTRODUCCIÓN.....	14
2. MARCO TEÓRICO.....	18
2.1. AGUAS RESIDUALES.....	18
2.1.1. CARACTERIZACIÓN.....	19
2.1.2. TIPOS DE TRATAMIENTO	25
2.1.2.1. PROCESOS FÍSICOS EN EL TRATAMIENTO.....	25
2.2. DIGESTIÓN ANAEROBIA.....	27



2.2.1. INTRODUCCIÓN.....	27
2.2.2. DESCRIPCIÓN DEL PROCESO.....	29
2.2.3. ETAPAS DEL PROCESO.....	30
2.2.4. TIPOS DE BIODIGESTORES	39
2.3. BIOGÁS.....	42
2.3.1. INTRODUCCIÓN.....	42
2.3.2. APLICACIONES	43
2.3.3. BENEFICIOS.....	48
2.4. APROVECHAMIENTO DE ESTE RECURSO A NIVEL MUNDIAL ...	49
3. METODOLOGÍA.....	54
3.1. CUANTIFICACIÓN DEL RECURSO DISPONIBLE.....	54
3.2. CARACTERIZACIÓN DEL AGUA RESIDUAL AFLUENTE.....	55
3.3. CUANTIFICACIÓN, CARACTERIZACIÓN DEL BIOGÁS Y DETERMINACIÓN DE SU POTENCIAL ENERGÉTICO.....	56
3.3.1. CUANTIFICACIÓN POTENCIAL DISPONIBLE.....	56
3.3.2. CARACTERIZACIÓN DEL GAS PRODUCIDO.....	57
3.3.3. DETERMINACIÓN DEL POTENCIAL ENERGÉTICO.....	58
3.3.4. CÁLCULO DE PRODUCCIÓN DE BIOGÁS Y DEL POTENCIAL ENERGÉTICO	58
3.3.5. ENERGÍA PARA MANTENER EL PROCESO A 40 °C.....	64
3.4. CUANTIFICACIÓN DE EMISIONES DE GEI EVITADAS.....	72



3.5. ANÁLISIS AMBIENTAL	74
3.6. IDENTIFICACIÓN DE BARRERAS PARA LA IMPLEMENTACIÓN DE ESTA TECNOLOGÍA	77
4. RESULTADOS, CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	79
4.1. RESULTADOS	79
4.2. RECOMENDACIONES	81
ANEXOS	83
BIBLIOGRAFÍA	88



ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1: Composición típica del biogás producido de residuos biológicos.....	32
Tabla 2: Rangos de Temperatura y Tiempo de fermentación Anaerobia.....	37
Tabla 3: Equivalencia calóricas del biogás.....	43
Tabla 4: Características energéticas del biogás vs otras fuentes	44
Tabla 5: Composición típica del agua residual sin tratamiento	55
Tabla 6: Concentraciones medias del afluente de la PTAR de Ucubamba.....	60
Tabla 7: Población conectada a la PTAR de Ucubamba	61
Tabla 8: Rendimiento para un motor CAT 352	69



ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1: Emisiones mundiales de metano por sector.	15
Figura 2: Esquema de reacciones de digestión anaerobia.	33
Figura 3: Composición del biogás en función del pH.	35
Figura 4: Producción de biogás en función de la temperatura.	37
Figura 5: Tiempo de retención en función de la temperatura.	38
Figura 6: Esquema de usos del biogás.	44
Figura 7: Diseño esquemático de un sistema CCE.	46
Figura 8: Celda de combustible.	48
Figura 9: Plantas de biogás instaladas en los países miembros de IEA.	50
Figura 10: Plantas de producción de biogás en EEUU.	50
Figura 11: Matriz energética ecuatoriana.	52
Figura 12: Matriz energética del sector eléctrico ecuatoriano.	52
Figura 13: Tratamiento de lodos activados con digestión anaerobia.	63
Figura 14: Balance energético completo de un motor de combustión interna. ..	68
Figura 15: Sistema de cogeneración con recuperación de calor.	68
Figura 16: Estructura del consumo de energía por sectores en Ecuador.	70



Universidad de Cuenca

Cláusula de licencia y autorización para publicación en el Repositorio Institucional

Juan Paúl Cordero Álvarez en calidad de autor y titular de los derechos morales y patrimoniales del trabajo de titulación "EVALUACIÓN DEL POTENCIAL ENERGÉTICO DE LAS AGUAS RESIDUALES URBANAS GENERADAS EN CIUDADES DE ALTURA", de conformidad con el Art. 114 del CÓDIGO ORGÁNICO DE LA ECONOMÍA SOCIAL DE LOS CONOCIMIENTOS, CREATIVIDAD E INNOVACIÓN reconozco a favor de la Universidad de Cuenca una licencia gratuita, intransferible y no exclusiva para el uso no comercial de la obra, con fines estrictamente académicos.

Asimismo, autorizo a la Universidad de Cuenca para que realice la publicación de este trabajo de titulación en el repositorio institucional, de conformidad a lo dispuesto en el Art. 144 de la Ley Orgánica de Educación Superior.

Cuenca, 4 de octubre de 2017.

Ing. Juan Paúl Cordero Álvarez

CI: 0102595501



Cláusula de Propiedad Intelectual

Juan Paúl Cordero Álvarez, autor del trabajo de titulación "EVALUACIÓN DEL POTENCIAL ENERGÉTICO DE LAS AGUAS RESIDUALES URBANAS GENERADAS EN CIUDADES DE ALTURA", certifico que todas las ideas, opiniones y contenidos expuestos en la presente investigación son de exclusiva responsabilidad de su autor.

Cuenca, 4 de octubre de 2017.

Ing. Juan Paúl Cordero Álvarez

Ci: 0102595501



DEDICATORIA

*Para mi razón de vivir, mi familia.
mi esposa Verónica,
mis hijos Sofía y Nicolás.
mis padres, hermanos y sobrina.*



AGRADECIMIENTO

De manera especial a mi esposa Verónica por su impulso y apoyo para alcanzar esta meta en mi vida y a mis hijos Sofía y Nicolás por ser mi motivación y la razón de buscar mi superación para ser su ejemplo.

A la Universidad de Cuenca en la persona de todos los profesores y funcionarios de esta maestría.

Al Ing. Antonio Barragán por su ayuda y guía en la dirección de este trabajo de tesis.



OBJETIVOS

OBJETIVO GENERAL.

- Cuantificar el potencial energético de las aguas residuales urbanas generadas en ciudades de altura sometiéndolas a la materia orgánica presente en estas al proceso de digestión anaerobia.

OBJETIVOS ESPECÍFICOS.

- Revisión del tema en el contexto mundial.
- Determinar las características, en base a revisión bibliográfica, de las aguas residuales urbanas.
- Evaluar la factibilidad técnica y ambiental del aprovechamiento energético de las aguas residuales urbanas.
- Proponer alternativas para el uso de la energía obtenida.
- Identificar barreras para la implementación de la tecnología a nivel local.



HIPÓTESIS

Tomando la materia orgánica presente en las aguas residuales urbanas generadas en ciudades de altura y sometiéndola a un proceso de digestión anaerobia se obtendrá biogás que puede ser utilizado como fuente primaria de energía.



1. INTRODUCCIÓN.

La sociedad actual es cada vez más demandante en el consumo de energía para satisfacer sus necesidades, esta situación obliga a buscar nuevas fuentes de energía que permitan satisfacer este requerimiento. Una de estas fuentes es la biomasa y entre esta la materia orgánica contenida en las aguas residuales de los asentamientos urbanos.

Para tratar las aguas residuales una opción es descontaminarlas sometiéndolas a procesos en Plantas de Tratamiento de Aguas Residuales (PTAR) que se constituyen en parte vital del funcionamiento de las ciudades modernas. Sin embargo, su operación tiene aspectos que deben ser superados, entre otros, el contenido de lodos del afluente que podrían llenar las lagunas de sedimento. Estos lodos representan un riesgo al manipularse, pues tienen un alto contenido bacteriano. En el proceso de depuración de las aguas residuales se genera biogás que a su vez contiene metano, se estima que este elemento, aunque se emite en cantidades pequeñas en comparación con el CO₂, es el responsable del 14 % de las emisiones a nivel mundial de GEI (Global Methane Initiative, 2010) y dentro de este, los procesos de depuración de aguas residuales aportan con el 17,68 % de la generación de metano como se ve en la Figura 1.

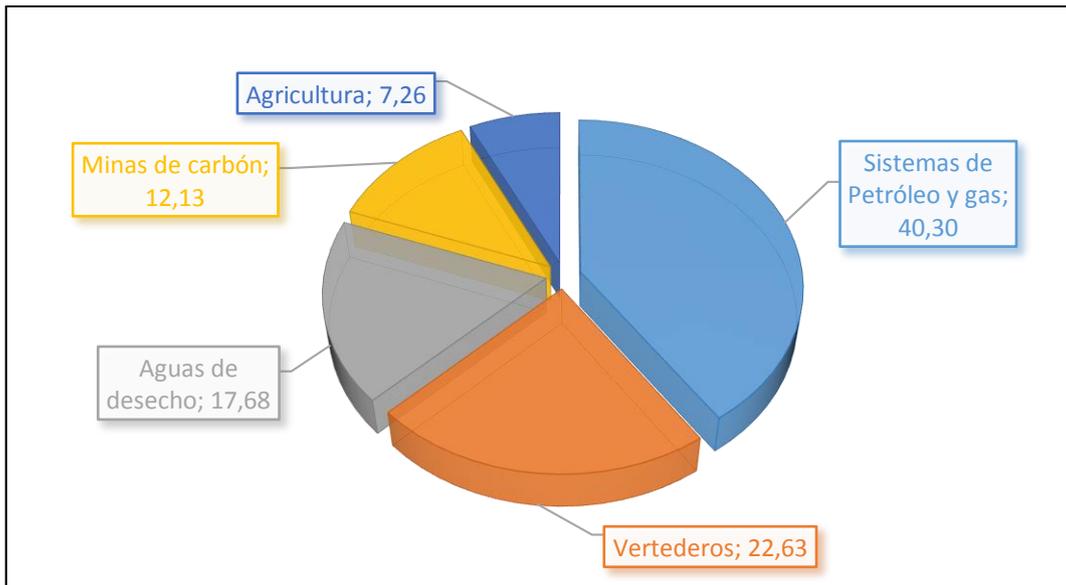


Figura 1: Emisiones mundiales de metano por sector.
Fuente: Elaboración propia con datos de (Global Methane Initiative, 2010)

En este trabajo se investiga la factibilidad del aprovechamiento energético del contenido orgánico presente en las aguas residuales en ciudades de altura. Se evalúa la implementación de tecnologías que permitan este aprovechamiento energético, para ello se cuantifica el potencial energético, y se evalúa su implementación en términos técnicos, ambientales y sociales.

En el Capítulo 2 de esta tesis se hace una revisión bibliográfica del manejo de los lodos residuales en las PTAR's. Se estudian los parámetros en base a los que se los caracteriza, los tipos de lodos residuales, el tratamiento que se les da para retirarlos del proceso de recuperación de las aguas residuales.

Posteriormente se hace la revisión bibliográfica del proceso de digestión anaerobia partiendo de sus aspectos generales. Se describe detalladamente el proceso en cada una de sus etapas, se analizan los factores que regulan su desempeño. Después se presenta la revisión de los tipos de biodigestores que existen, su clasificación, así como sus ventajas y desventajas.



Adicional a lo anterior se estudia la composición del biogás, su poder energético, las aplicaciones, los beneficios que conlleva y el estado actual del aprovechamiento de este recurso a nivel mundial.

Con el fin de tener una perspectiva de la importancia que tiene el producir energía de fuentes no convencionales se hace un análisis de la matriz energética en el Ecuador. Se evidencia una extrema dependencia de los combustibles fósiles, en ese mismo sentido al profundizar el análisis de la matriz energética del sector eléctrico esta dependencia se mantiene, a pesar de que se han dado pasos importantes para la descarbonización de este sector, principalmente con plantas hidroeléctricas.

En el Capítulo 3 se expone la metodología utilizada para conseguir los objetivos planteados. Para ello, se muestra diferentes metodologías para cuantificar el recurso disponible, se remarca la importancia de conocer la caracterización del agua residual que será objeto del estudio, se expone una metodología para cuantificar el biogás que se podría obtener la composición o caracterización que se esperaría que tenga y se determina su potencial energético.

Para ilustrar esta metodología se hace un ejemplo de cálculo tomando los datos de la ciudad de Cuenca, Ecuador. En este capítulo se considera también un apartado para calcular el aporte energético que deberá tener el biodigestor para mantener el proceso a una temperatura tal que beneficie al proceso de digestión anaerobia.

Para la utilización de este potencial energético se analizan dos opciones, que son, la cogeneración (generación de energía eléctrica y calor) y la utilización del biogás como combustible para vehículos.



Con el fin de analizar el impacto ambiental que tendría la implementación de un proyecto que utilice la materia orgánica contenida en las aguas residuales como fuente de energía se cuantifican las emisiones de GEI que se evitarían emitir al ambiente y posteriormente se hace un análisis ambiental.

Finalmente, en este capítulo se identifican las barreras para la implementación de esta tecnología en nuestro medio.

En el capítulo 4 se plasman los resultados para cada una de las opciones y alternativas estudiadas, las conclusiones y recomendaciones sobre el tema analizado en esta tesis.



2. MARCO TEÓRICO.

2.1. AGUAS RESIDUALES.

La generación de aguas residuales es una consecuencia insalvable de su uso por parte del ser humano, si a esto se suma el hecho de que, según el Programa de la Naciones Unidas para el Medio Ambiente UNEP, actualmente la población mundial es de alrededor de 7500 millones de seres humanos y el 54 % está concentrada en zonas urbanas (United Nations Environment Programme UNEP, 2009), la contaminación concentrada del agua es un problema latente.

Las aguas residuales tienen diversos orígenes y dependiendo de este se las puede clasificar en (Alianza por el Agua, 2008):

Aguas Residuales Domésticas (ARD):

Compuestas principalmente de aguas grises, (provenientes de duchas, tinas, lavamanos, lavaplatos, etc.), cuya composición es de sólidos, fósforo, grasas y coliformes y aguas negras provenientes de los inodoros, que transportan los excrementos humanos y orina y contienen sólidos suspendidos, nitrógeno y coliformes fecales.

Aguas Residuales Industriales (ARI):

Producto de efluentes de la industria, como residuos de la manufactura, aguas de lavado, etc. Debido a que la legislación municipal y nacional regula las características que deben cumplir las aguas de origen industrial se las puede considerar aguas poco contaminantes.

Aguas Residuales de servicios (ARS):

Provenientes de instalaciones de uso masivo como mercados, instituciones educativas, oficinas administrativas, etc. Su composición es muy parecida al de las ARD.



Aguas Residuales Urbanas (ARU):

Son las aguas residuales domésticas o la mezcla estas con aguas industriales o con aguas de infiltración.

Dependiendo del origen sus constituyente físicos, químicos y biológicos serán diferentes. Para los propósitos de este trabajo, la característica más importante de las aguas residuales es su contenido de sólidos los cuales están formados principalmente por materia flotante, sedimentable, coloidal y materia en solución. Esto se refleja en sus características físicas como la turbiedad, olor, temperatura, densidad y color (Metcalf & Eddy, 2003)

2.1.1. CARACTERIZACIÓN

2.1.1.1. CARACTERÍSTICAS FÍSICAS:

Los sólidos que se encuentran en las aguas residuales se los caracteriza en base a los siguientes parámetros (Metcalf & Eddy, 2003):

Sólidos Totales ST: El residuo que permanece después de que la muestra ha sido sometida a evaporación y secado a una temperatura específica (103 a 105°C).

Sólidos totales volátiles STV: Son aquellos que se volatilizan, cuando los ST son sometidos a quemados a temperaturas de 500°C ± 50.

Sólidos fijos totales: Residuos que permanecen luego de que los ST han sido quemados a 500 ± 50

Sólidos suspendido totales SST: Son la parte de los ST que se retienen en un filtro de un diámetro de poro específico (el más común es el filtro de Whatman con un diámetro de poro de 1.58 μm), medida después de ser secado a una temperatura constante (105°C).



Sólidos suspendidos volátiles SSV: Aquellos sólidos que pueden ser volatilizados cuando los SST son quemados ($500^{\circ}\text{C} \pm 50$).

Sólidos suspendidos fijos: Residuos que permanecen luego de que los SST han sido quemados a 500 ± 50 .

Sólidos disueltos totales (SDT): Los sólidos que pasan a través de un filtro y luego se evaporan y se secan a una temperatura específica. Los SDT están compuestos de coloidales y sólidos disueltos. Los coloides están típicamente en el rango de tamaño de $0,001$ a $1 \mu\text{m}$.

Sólidos disueltos volátiles totales (SDVT): Aquellos sólidos que pueden ser volatilizados cuando los SDT son quemados ($500^{\circ}\text{C} \pm 50$).

Sólidos disueltos fijos (SDF): Residuos que permanecen luego de que los SDT han sido quemados a 500 ± 50 .

Sólidos sedimentables: Sólidos suspendidos, expresados en mililitros por litro, que se sedimentarán durante un periodo específico de tiempo generalmente 60 minutos.

2.1.1.2. CONSTITUYENTES NO METÁLICOS INORGÁNICOS:

Los componentes químicos de las aguas residuales se clasifican en inorgánicos y orgánicos. Los constituyentes químicos inorgánicos de interés incluyen nutrientes, constituyentes no metálicos, metales y gases. Los constituyentes no metálicos inorgánicos son pH, nitrógeno, fósforo, alcalinidad, cloruros, azufre, otros constituyentes inorgánicos, gases y olores (Metcalf & Eddy, 2003).

pH

La concentración de iones de hidrógeno es un parámetro de calidad importante tanto de aguas naturales como de aguas residuales que se define como el



logaritmo negativo de la concentración de iones de hidrógeno. Las aguas residuales con una concentración extrema de iones hidrógeno son difíciles de tratar por medios biológicos y si la concentración no se altera antes de la descarga, el efluente de aguas residuales puede alterar la concentración en las aguas naturales.

Cloruros

El cloruro es un componente complejo de tratar en las aguas residuales, ya que puede afectar las aplicaciones de reutilización final. Los cloruros en agua natural resultan de la lixiviación de rocas y suelos cloruros ingreso de agua salada, las aguas residuales agrícolas, industriales y domésticas, ablandadores de agua y excretas humanas (alrededor de 6 g por persona al día).

Alcalinidad

La alcalinidad en las aguas residuales provoca la presencia de hidróxidos $[OH^-]$, carbonatos $[CO_3^{2-}]$ y bicarbonatos $[HCO_3^-]$ de elementos tales como calcio, magnesio, sodio, potasio y amoníaco. La alcalinidad en las aguas residuales ayuda a resistir cambios en el pH causado por la adición de ácidos. El agua residual es normalmente alcalina, recibiendo su alcalinidad del suministro de agua, aguas subterráneas y los materiales añadidos durante el uso doméstico. La concentración de alcalinidad en las aguas residuales es importante cuando se va a utilizar el tratamiento químico y biológico, en la remoción de nutrientes biológicos en donde el amoníaco debe eliminarse por extracción con aire.

Nitrógeno

Los elementos nitrógeno y fósforo, esenciales para el crecimiento de microorganismos, plantas y animales, se conocen como nutrientes o bioestimulantes, aunque también se necesitan cantidades de otros elementos,



como el hierro. Debido a que el nitrógeno es un componente esencial en la síntesis de proteínas, se necesitarán datos de nitrógeno para evaluar la tratabilidad de las aguas residuales mediante procesos biológicos. El nitrógeno insuficiente puede requerir la adición de nitrógeno para hacer que el residuo sea tratable.

Fósforo

El fósforo es esencial para el crecimiento de algas y otros organismos biológicos. Debido a las proliferaciones de algas nocivas que se producen en las aguas superficiales, es importante controlar la cantidad de compuestos de fósforo que entran en aguas superficiales en las descargas de desechos domésticos e industriales y escorrentía natural.

Azufre

El sulfato ionizado está presente en la mayoría de los suministros de agua y también está presente en las aguas residuales. El azufre es necesario en la síntesis de proteínas y se libera en su degradación. El sulfato se reduce biológicamente en condiciones anaerobias al sulfuro que, a su vez, puede combinarse con hidrógeno para formar sulfuro de hidrógeno (H_2S).

Gases

En las aguas residuales no tratadas usualmente se encuentran nitrógeno (N_2), oxígeno (O_2), dióxido de carbono (CO_2), sulfuro de hidrógeno (H_2S), amoníaco (NH_3) y metano (CH_4). Los tres primeros son gases comunes de la atmósfera y se encuentran en todas las aguas expuestas al aire. Los otros tres se derivan de la descomposición de la materia orgánica presente en las aguas residuales.



2.1.1.3. CONSTITUYENTES METÁLICOS:

En las aguas residuales no tratadas existe presencia de trazas de metales tales como cadmio (Cd), cromo (Cr), cobre (Cu), hierro (Fe), plomo (Pb), manganeso (Mn), mercurio (Hg), níquel (Ni) y zinc (Zn). La mayoría de estos metales son necesarios para el crecimiento de la vida biológica, y la ausencia de cantidades suficientes de ellos podría limitar el crecimiento de algas, por ejemplo. La presencia de cualquiera de estos metales en cantidades excesivas interferirá con muchos usos beneficiosos del agua debido a su toxicidad (Metcalf & Eddy, 2003).

2.1.1.4. CONSTITUYENTES ORGÁNICOS AGREGADOS

Los compuestos orgánicos son generalmente una combinación de carbono, hidrógeno y oxígeno en algunos casos junto con nitrógeno. Las aguas residuales no tratadas típicamente contienen materia orgánica compuesta por proteínas entre 40 % y 60 %, carbohidratos entre 25 % y 50 % y aceites y grasas entre 8 % y 12 %, en aguas residuales frescas se encuentra urea (Metcalf & Eddy, 2003).

Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO)

El parámetro más ampliamente utilizado de la contaminación orgánica aplicada tanto a las aguas residuales como a las aguas superficiales es el DBO de 5 días (DBO). Esta determinación implica la medición del oxígeno disuelto utilizado por los microorganismos en la oxidación bioquímica de la materia orgánica. Los resultados de la medición de DBO son utilizados para:

- a) Determinar la cantidad aproximada de oxígeno que se requerirá para estabilizar biológicamente la materia orgánica presente,
- b) Determinar el tamaño de las instalaciones de tratamiento de residuos,
- c) Medir la eficiencia de algunos procesos de tratamiento,



- d) Determinar el cumplimiento con los parámetros permitidos de descarga de aguas residuales.

Demanda Química de Oxígeno (DQO)

La Demanda Química de Oxígeno (DQO) determina la cantidad de oxígeno requerido para oxidar la materia orgánica en una muestra de agua, bajo condiciones específicas de agente oxidante (generalmente dicromato en una solución ácida), temperatura y tiempo.

Aunque se esperaría que la DBO y la DQO sean similares, esto generalmente no sucede puesto que algunas sustancias orgánicas (como la lignina) son difíciles de oxidar biológicamente, pero son fácilmente oxidables por medios químicos.

Carbono Orgánico Total (COT)

Es la medida de la cantidad total de carbono unidos a los compuestos orgánicos que tiene el agua residual. Se genera naturalmente en plantas y animales durante la metabolización, excreción y descomposición, otra fuente de carbono en el agua residual son los procesos industriales que utilizan compuestos orgánicos. Una alta concentración de COT en el agua residual propenderá a una disminución significativa del oxígeno disuelto lo que a su vez traerá como consecuencia una disminución en la presencia de organismos vivos.

Interrelaciones entre la DBO, la DQO y la COT

La relación DBO/DQO para aguas residuales no tratadas está típicamente entre 0,3 y 0,8. Cuando esta relación es 0,5 o mayor, el agua será fácilmente tratable por medios biológicos, en cambio si la relación es 0,3 o menor significa que el agua residual contiene componentes tóxicos o inorgánicos (Metcalf & Eddy, 2003).



La relación DBO/COT para aguas residuales no tratadas está entre 1,2 y 2,0 y su valor dependerá de la biodegradabilidad de los compuestas que estén presentes (Metcalf & Eddy, 2003).

2.1.2. TIPOS DE TRATAMIENTO

Para el tratamiento de las aguas residuales con el fin de depurarlas estas se someten a una serie de procesos físicos, químicos y biológicos que tienen como propósito reducir la concentración de contaminantes para posteriormente permitir su reutilización o ser devueltas a la naturaleza sin riesgos para el medio ambiente o las personas (Alianza por el Agua, 2008).

2.1.2.1. PROCESOS FÍSICOS EN EL TRATAMIENTO

Las operaciones utilizadas para el tratamiento de las aguas residuales en las que el cambio se produce mediante la aplicación de fuerzas físicas se conocen como operaciones de unidades físicas. Los procesos físicos más comúnmente usados en el tratamiento de aguas residuales son (Metcalf & Eddy, 2003):

- **Filtrado:** Se utiliza para retener los sólidos encontrados en las aguas residuales afluentes y su papel principal es eliminar los materiales gruesos de la corriente de flujo que podrían dañar el equipo utilizado para las subsiguientes etapas del proceso, reducir la eficacia y la confiabilidad del proceso de tratamiento general.
- **Reducción de sólidos gruesos:** Es una alternativa a la utilización de pantallas, con el proceso de reducción se disminuye el tamaño de la partícula y se la devuelve al flujo.
- **Igualación de flujo:** La igualación de flujo es amortiguamiento de las variaciones del caudal (provocado por aportes fluviales, variaciones en el



consumo doméstico a lo largo del día, etc.) para lograr un caudal casi constante. Se lo consigue represando el afluyente y enviándolo posteriormente hacia el proceso (por bombeo o por gravedad) con un caudal controlado.

- **Floculación:** Este proceso consiste en la adición y mezcla de las aguas residuales afluentes con alguna sustancia con el propósito de provocar que las partículas pequeñas de sedimentos se unan y se facilite su posterior precipitación y sedimentación.
- **Sedimentación:** Su objetivo es eliminar sólidos fácilmente sedimentables y material flotante para reducir el contenido de sólidos suspendidos. Se la utiliza como paso preliminar en el procesamiento posterior de las aguas residuales. Con este proceso se logra eliminar de 50 % a 70 % de los sólidos suspendidos y de 25 % a 40 % de la DBO.
- **Remoción de sólidos pesados (Desarenador):** Este proceso consiste en la eliminación arena, grava, cenizas u otros materiales sólidos pesados que tienen gravedad específica mayores que las de los sólidos orgánicos putrescibles en aguas residuales. Se lo ejecuta después del filtrado y antes de la sedimentación primaria.
- **Clarificación de alta velocidad:** Usa tratamientos físico-químico y sistemas especiales de floculación y sedimentación para lograr una rápida sedimentación. Los elementos esenciales de la clarificación de alta velocidad son la sedimentación de partículas mejorada (proceso químico) y el uso de placas o tubos de sedimentación inclinados (proceso físico).



- Flotación: Consiste en la introducción de burbujas de gas (generalmente aire) en el agua residual. Las burbujas se unen a las partículas suspendidas y la fuerza de flotación de las partículas combinadas con las burbujas de gas es hace que la partícula suba a la superficie. En el tratamiento de aguas residuales, la flotación se utiliza principalmente para eliminar materia en suspensión y para concentrar biosólidos. Las ventajas principales de la flotación sobre la sedimentación son que las partículas muy pequeñas o ligeras que se asientan lentamente pueden ser eliminadas más completamente y en un tiempo más corto. Una vez que las partículas flotan a la superficie, pueden ser recogidas en una operación de desnatado.
- Transferencia de oxígeno (Aireación): Se lo utiliza en los procesos de tratamiento biológicos aerobios de las aguas residuales y su objetivo es proporcionar el oxígeno para que el proceso de digestión aerobia se realice con mayor rapidez. Es necesaria la transferencia forzada de oxígeno debido a que la transferencia normal de este con el contacto aire-agua es muy lenta, para lograrlo se lo puede hacer inyectando aire forzado al agua o incluso inyectando burbujas de oxígeno.

2.2. DIGESTIÓN ANAEROBIA.

2.2.1. INTRODUCCIÓN.

En este apartado se presenta una revisión bibliográfica y descripción del proceso de digestión anaerobia, los microorganismos que operan en cada etapa, los factores determinantes para que se desarrollen de manera adecuada, los insumos que utilizan y los productos que entregan. Se estudian los principales factores tanto



ambientales como operacionales que deben ser considerados en el proceso de digestión anaerobia y la influencia que estos tienen en la duración del proceso y en la obtención y características de los productos finales. Para algunos de estos factores se dan valores recomendados para que el desarrollo del proceso se optimice y formas de controlar (aumentando o disminuyendo) ciertos niveles. Finalmente se hace una revisión de los tipos de biodigestores que se pueden utilizar para desarrollar este proceso. Se los clasifica por su forma de alimentación, por la temperatura en la que trabajan y por el número de etapas que utilizan. Se describen sus ventajas y desventajas y la factibilidad de utilizarlos.

El proceso de digestión anaerobia es conocido desde hace mucho tiempo. En el siglo XVII, Van Helmont registró que la materia orgánica en descomposición produce gas inflamable (Abbasi, Tauseef, & Abbasi, 2012), en 1776 Volta hace referencia a la producción de gas de forma natural y le llama gas de pantano (Díaz-Báez, Espitia Vargas, & Molina Perez, 2002), que este llamado gas de pantano es metano fue descubierto por John Dalton y Humphrey Davy a inicios del siglo XIX (Abbasi et al., 2012) y posteriormente en 1868 Bechamp experimento la obtención de gas metano en base a la digestión anaerobia de heces de conejo (Díaz-Báez et al., 2002) y determinó que este era producto de un proceso microbiológico (Abbasi et al., 2012).

En síntesis, el proceso de digestión anaerobia consiste en la descomposición de un sustrato con alto contenido de materia orgánica, sin la presencia de oxígeno, obteniéndose de esto varios subproductos, principalmente biogás y lodo estabilizado (AGRO WASTE, n.d.). Es, sin embargo, un proceso complejo, pues están involucradas un gran número de reacciones químicas provocadas por varios tipos de microorganismos (AGRO WASTE, n.d.). La materia orgánica



descompuesta pasa por cuatro etapas: Hidrólisis, Acidogénesis, Acetogénesis y Metanogénesis.

Existen, dentro del proceso de digestión anaerobia, varios factores que lo regulan y determinan su éxito tanto en la producción de biogás como la desactivación del sustrato y deben ser analizados en cada caso en particular para mejorar el proceso. Estas variables son entre otras: temperatura, agitación, tiempo de retención hidráulico, composición del sustrato, pH, tóxicos e inhibidores, etc.

La tecnología utilizada para el procesamiento de materia orgánica mediante el tratamiento de digestión anaerobia es variada y depende de las características del sustrato y de las condiciones ambientales del entorno en el que se instalará el biodigestor, los cuales se pueden clasificar por: la forma de alimentación, la temperatura de trabajo o el número de etapas (Guevara Vera, 1996).

2.2.2. DESCRIPCIÓN DEL PROCESO.

Como ya se ha dicho, el proceso de digestión anaerobia consiste en la fermentación de materia orgánica activa en ausencia de oxígeno, la digestión es realizada por microbios presentes en el sustrato o insertados externamente al proceso. El resultado del proceso es la generación de una mezcla de gases llamada biogás y los restos de sustrato desactivado. La característica principal de la materia prima utilizada para realizar el proceso de digestión anaerobia es que posea un alto contenido de humedad y materia orgánica.

La mezcla gaseosa contiene entre 50% y 70% de metano, 30% a 50% de dióxido de carbono y trazas de otros gases (nitrógeno, oxígeno, hidrógeno, sulfuro de hidrógeno) (Acosta & Obaya Abreu, 2005), este amplio rango de variabilidad en el contenido de los gases depende tanto de la materia prima utilizada como de la efectividad del proceso ejecutado, así también la cantidad de biogás



producido, aunque generalmente está alrededor de 350 l/kg de sólidos degradables (volátiles) (Acosta & Obaya Abreu, 2005). El proceso de digestión anaerobia consiste en un complejo y amplio número de reacciones bioquímicas producidas por microorganismos que trabajando en procesos en serie y serie-paralelo, degradan la materia orgánica en sucesivas etapas (Ministerio de Energía de Chile, 2011).

2.2.3. ETAPAS DEL PROCESO.

Estudiados los procesos bioquímicos y microbiológicos se ha determinado que la digestión anaerobia se divide en las siguientes etapas:

2.2.3.1. HIDRÓLISIS.

Es el primer paso en el proceso de digestión anaerobia, en este, enzimas extracelulares excretadas por microorganismos hidrolíticos (celulosa, amilasa, proteasa y lipasa) (Chen & Neibling, 2014) que actúan en el exterior celular (se las considera por lo tanto exoenzimas) (Acosta & Obaya Abreu, 2005) descomponen los polímeros complejos en monómeros solubles simples (Chen & Neibling, 2014). Por ejemplo la celulosa en azúcares o alcoholes y las enzimas hidrolíticas secretadas por los microbios convierten proteínas a péptidos o aminoácidos (Verma, 2002).

La etapa de hidrólisis puede ser determinante en la duración del proceso, depende de varios factores como el tamaño de la partícula, la temperatura en la que se desarrolla el proceso, la composición bioquímica del sustrato, valor de pH, contenido de amoníaco o tiempo de retención. (Ministerio de Energía de Chile, 2011). En algunas ocasiones y con el fin de reducir el tiempo de duración del proceso de digestión anaerobia se integran al sustrato reactivos químicos



con los que se consigue además mejorar el rendimiento en generación de metano.

2.2.3.2. FERMENTATIVA O ACIDOGÉNICA.

Durante esta etapa, los productos de la hidrólisis son convertidos en ácidos orgánicos como ácido acético, propiónico y butírico (Acosta & Obaya Abreu, 2005) y etanol (Verma, 2002), esto se da mediante la fermentación de las moléculas solubles. La presencia y acción de las bacterias fermentativas es muy importante para el proceso pues, no solamente producen los elementos que serán utilizados en las siguientes etapas del proceso sino porque también eliminan cualquier traza de oxígeno presente en el sistema (Ministerio de Energía de Chile, 2011). La acidogénesis es generalmente la etapa más rápida del proceso de digestión anaerobia.

2.2.3.3. ACETOGÉNICA.

En esta etapa, tanto los ácidos grasos de cadena larga como los ácidos grasos volátiles y alcoholes son transformados en hidrógeno, dióxido de carbono y ácido acético por acción de bacterias acetilénicas. Durante este proceso, la DBO (Demanda Biológica de Oxígeno) y la DQO (Demanda Química de Oxígeno) son mínimas y el pH disminuye (Vögeli, Riu Lohri, Gallardo, Diener, & Zurbrügg, 2014).

Un tipo de microorganismos acetogénicos, son los homoacetogénicos que son bacterias que crecen en presencia de azúcares. Estos producen como único producto acetato y al contrario que las bacterias acetogénicas no producen hidrógeno, sino que lo consumen, dando como resultado la posibilidad de contar con bajas presiones de hidrógeno lo que permite a su vez mantener la actividad de bacterias acidogénicas y acetogénicas (Ministerio de Energía de Chile, 2011).



En este punto dentro del proceso, las bacterias anaerobias han hecho su trabajo extrayendo el alimento de la biomasa y eliminan como deshecho ácidos volátiles sencillos que se utilizarán como sustrato las bacterias metanogénicas en la última etapa (Ministerio de Energía de Chile, 2011).

2.2.3.4. METANOGENÉISIS.

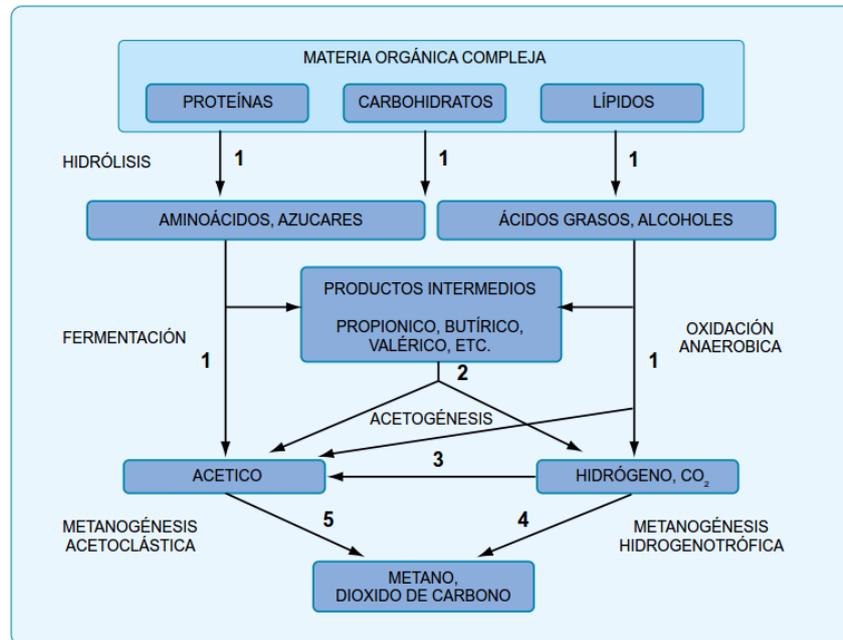
En la etapa final del proceso de digestión anaerobia, microorganismos metanogénicos forman metano a partir de sustratos monocarbonados o con dos átomos de carbono unidos por un enlace covalente: acetato, dióxido de carbono más Hidrógeno, formato, metanol y algunas metilaminas (Ministerio de Energía de Chile, 2011). Son dos tipos de microorganismos los encargados de esto, por una parte las bacterias metanogénicas acetoclásticas que degradan el ácido acético a metano y dióxido de carbono y las bacterias metanogénicas hidrogenófilas que transforman el dióxido de carbono con hidrógeno a metano y agua (AGRO WASTE, n.d.).

El producto gaseoso obtenido finalmente está compuesto principalmente de metano y dióxido de carbono, sin embargo, están presentes también en bajas proporciones otros gases como sulfuro de hidrógeno, nitrógeno, oxígeno e hidrógeno (Vögeli et al., 2014). En la Tabla 1 se presenta la composición típica del biogás obtenido luego del proceso de digestión anaerobia.

Tabla 1: Composición típica del biogás producido de residuos biológicos.
Fuente: (Vögeli et al., 2014)

COMPONENTE	SIMBOLO	CONCENTRACIÓN (% Vol)
Metano	CH ₄	55 - 70
Dióxido de carbono	CO ₂	35 - 40
Agua	H ₂ O	2 - 7
Sulfuro de Hidrógeno	H ₂ S	2 (2 - 20000 ppm)
Nitrógeno	N ₂	< 2
Oxígeno	O ₂	< 2
Hidrógeno	H ₂	< 1
Amoniaco	NH ₃	< 0.05

En la Figura 2 se presenta un esquema de las etapas que conforman el proceso de digestión anaerobia, los microorganismos encargados de ejecutar cada una de ellas y los productos que se generan.



(Pavlostathis y Giraldo-Gómez, 1991).

Los números indican la población bacteriana responsable del proceso: 1: bacterias fermentativas; 2: bacterias acetogénicas que producen hidrógeno; 3: bacterias homoacetogénicas; 4: bacterias metanogénicas hidrogenotróficas; 5: bacterias metanogénicas acetoclásticas.

Figura 2: Esquema de reacciones de digestión anaerobia.

Fuente: (Ministerio de Energía de Chile, 2011)

FACTORES QUE REGULAN SU DESEMPEÑO

El principio de la digestión anaerobia es la descomposición de la materia hecha por microorganismos, consecuentemente la velocidad de crecimiento de estos durante el proceso es fundamental; con el fin de propiciar las mejores condiciones para que este crecimiento se efectúe de manera adecuada es necesario controlar algunos factores en el proceso para de esta manera conseguir mejores resultados (Verma, 2002). Estos factores pueden ser ambientales u operacionales, los principales factores y su influencia se analizan a continuación.



2.2.3.5. FACTORES AMBIENTALES.

Composición bioquímica de la materia prima:

La primera característica que debe ser evaluada antes de someter a cualquier materia orgánica al proceso de digestión anaerobia es su composición bioquímica que debe ser tal que permita el desarrollo de la actividad microbiana responsable de la descomposición de la materia y generación de los productos finales.

Acidez (pH):

Para que el proceso de digestión anaerobia se desarrolle de manera estable y se maximice su generación de metano se ha llegado a determinar que el sustrato debe tener un pH que esté en el rango de 6.5 a 7.5 (Vögeli et al., 2014). Pequeños cambios en el nivel de pH afectan adversamente al proceso, los microorganismos más susceptibles a este cambio son los metanogénicos. El nivel de pH en el sustrato determinará no solo la cantidad de biogás producido sino su calidad (composición), de esta forma, si el nivel de pH disminuye por debajo de 6 la concentración de metano disminuye significativamente (del 65 % al 35 %) (Ministerio de Energía de Chile, 2011). En la Figura 3 se muestra esta situación.

Con el fin de controlar o mantener el nivel de pH óptimo y hacer más eficiente el proceso en ocasiones es necesario, adicionar algún químico (ácido o base) ya sea a la materia prima que ingresa al proceso o al digestor (Ministerio de Energía de Chile, 2011).

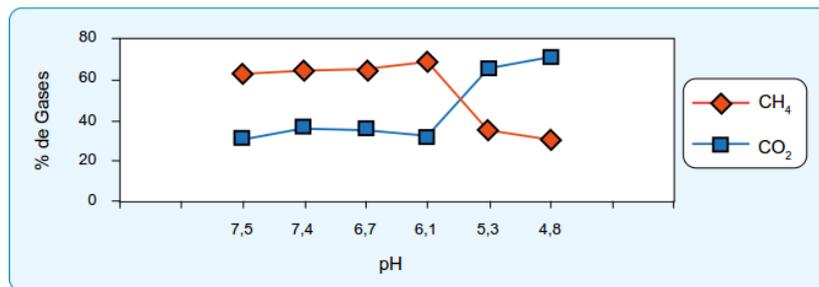


Figura 3: Composición del biogás en función del pH.
Fuente: (Ministerio de Energía de Chile, 2011)

Nutrientes:

Una de las ventajas del proceso de digestión anaerobia es su bajo requerimiento de nutrientes debido a su limitada capacidad de crecimiento. Los principales nutrientes requeridos son nitrógeno y fósforo. La masa celular bacteriana se compone de 12 % de nitrógeno y de 2 % de fósforo. Esta información es útil para calcular los requerimientos de estos elementos en el proceso y de ser deficitaria la materia prima, agregarlos. Además de estos elementos también son necesarios, aunque en mucha menor proporción hierro, cobalto, molibdeno, selenio, calcio, magnesio, zinc, cobre, manganeso, tungsteno y boro (Ministerio de Energía de Chile, 2011).

Relación Carbono/Nitrógeno:

Cualquier materia orgánica es capaz de producir biogás al someterse al proceso de digestión anaerobia, sin embargo, la cantidad y calidad de este depende de la composición de la materia. Es necesario que esta sea lo suficientemente nutritiva para alimentar a los microorganismos responsables de la descomposición. El carbono y el nitrógeno son los principales alimentos de las bacterias metanogénicas, el carbono como fuente de energía y el nitrógeno para formación celular (Ministerio de Energía de Chile, 2011). La relación óptima entre carbono y nitrógeno (C:N) dentro del proceso está entre 16 y 25. Esta relación



es muy alta si se tiene un consumo elevado de nitrógeno por parte de las bacterias metanogénicas y trae como resultado baja producción de biogás. En cambio una relación baja C:N provoca acumulación de amoníaco y aumento del pH lo cual es tóxico para las bacterias metanogénicas (Vögeli et al., 2014).

2.2.3.6. FACTORES OPERACIONALES

Temperatura:

La temperatura es, tal vez, el factor más importante dentro del proceso de digestión anaerobia que, en principio, se desarrolla en prácticamente todas las condiciones climáticas. Sin embargo, a temperaturas inferiores a 15 °C el proceso funciona más lentamente, consecuentemente en estas condiciones se deben tomar medidas para contrarrestar esta condición. Para ello se puede inyectar calor al proceso (aumentando la temperatura) o aumentar el tamaño del biodigestor (se incrementa el tiempo de retención del sustrato en el proceso) (Vögeli et al., 2014). Es importante considerar que no solo la temperatura media influye en el proceso, sino grandes variaciones de temperatura (p.e. la temperatura del día y la noche o variaciones estacionales) afectan su rendimiento (Vögeli et al., 2014).

El proceso de digestión anaerobia puede trabajar en tres rangos de temperatura, estos son: debajo de 25 °C en el que trabajan microorganismos psicrófilos, en el rango entre 25 °C y 45 °C intervienen microorganismos mesófilos y los termófilos trabajan entre 45 °C y 65°C. La velocidad de crecimiento aumenta conforme se incrementa el rango de temperatura mejorando consecuentemente la producción y rendimiento del sistema. La Tabla 2 muestra los rangos de operación y el tiempo de fermentación necesario (Ministerio de Energía de Chile, 2011).

Tabla 2: Rangos de Temperatura y Tiempo de fermentación Anaerobia.
Fuente (Ministerio de Energía de Chile, 2011)

Tipo de fermentación	Temperatura °C			Tiempo de fermentación (Días)
	Mínimo	Óptimo	Máximo	
Psicrofílica	4-10	15-18	20-25	Sobre 100
Mesofílica	15-20	25-35	35-45	30-60
Termofílica	25-45	50-60	75-80	10-15

La utilización del rango psicrofílico para someter materia orgánica al proceso de digestión anaerobia es mínima ya que resulta poco atractivo hacerlo pues para obtener una cantidad considerable de gas se requeriría un biodigestor muy grande. Los rangos más utilizados son el mesofílico y el termofílico, cada vez más se eleva la temperatura del proceso para disminuir el tamaño del reactor, así como se aumenta la velocidad de producción de gas. Esto tiene algunas variables que deben ser controladas, por ejemplo, a mayor temperatura el proceso es menos estable o algunos componentes pueden resultar más tóxicos y podrían llegar a inhibir el proceso. Como regla se tiene que, con un aumento de 10 °C dentro del rango de temperatura óptima (Ministerio de Energía de Chile, 2011), la actividad biológica se duplica, como se observa en la Figura 4.

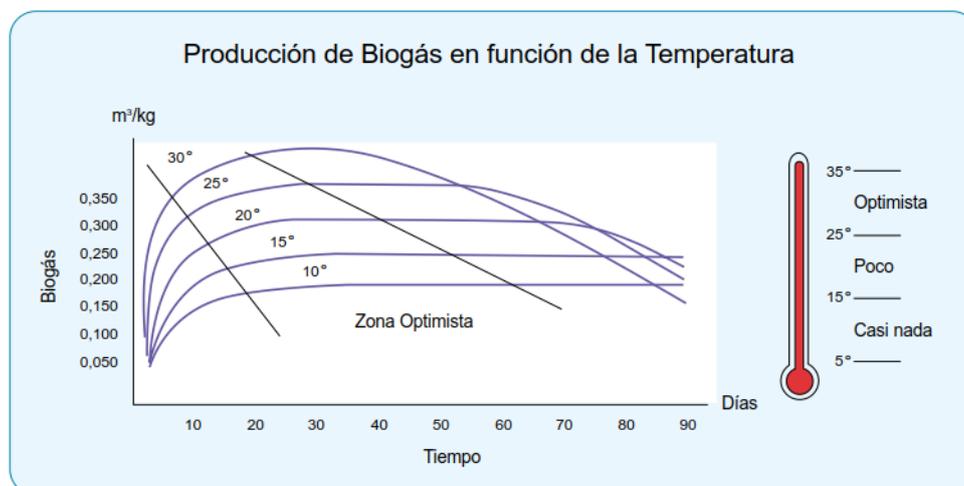


Figura 4: Producción de biogás en función de la temperatura
Fuente: (Ministerio de Energía de Chile, 2011)

También se puede trabajar combinando dos tipos de fermentación en el proceso de digestión anaerobia. Una primera etapa en el rango de temperatura termofílica



para arrancar el proceso y una vez alcanzada una velocidad de generación alta se le pasa a mesofílica con lo cual se gana estabilidad.

Una técnica interesante es la combinación de dos fases de digestión, una primera termofílica de elevada carga orgánica y una segunda mesofílica con menor carga. Con este sistema se aprovechan las ventajas del sistema termofílico, pero se reducen los problemas de inestabilidad.

Tiempo de retención hidráulico (TRH):

Es el tiempo que se necesita para que el proceso de digestión anaerobia se complete, o dicho en otras palabras el tiempo que la materia a descomponer debe permanecer en el digestor. Esta etapa depende de muchos factores (temperatura, pH, composición del sustrato, etc.). El tiempo requerido por un digestor mesofílico varía de 10 a 40 días en tanto que uno termofílico no supera los 14 días (Verma, 2002). Conocer el TRH es importante para poder dimensionar el digestor y se determina si hay la necesidad calentar o si se deberá insertar químicos al proceso. En la Figura 5 se muestra la dependencia de la temperatura en el tiempo requerido de digestión.

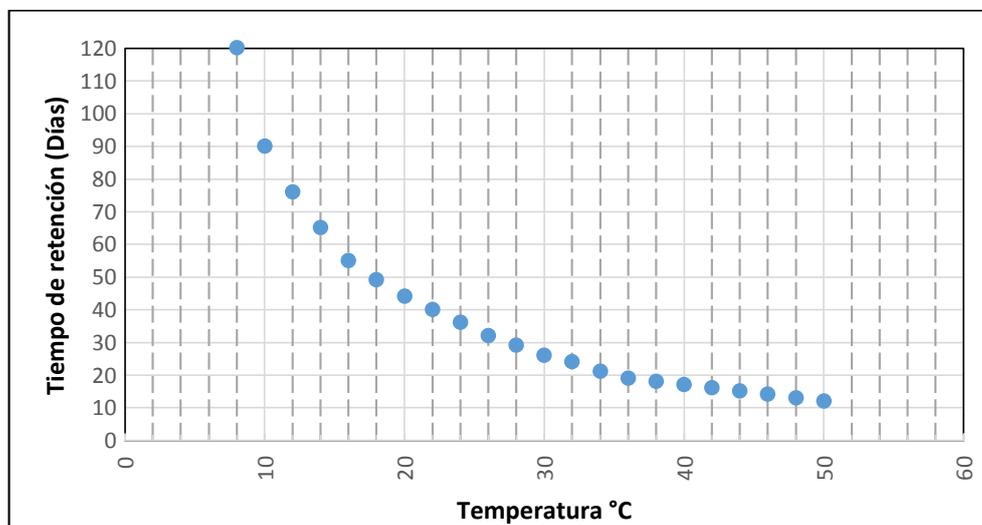


Figura 5: Tiempo de retención en función de la temperatura.

Fuente: Elaboración propia con datos de (German Association for Water Wastewater and Waste, 2003)



Agitación (mezclado):

Con la mezcla de la materia orgánica en el digestor lo que se pretende es que los microorganismos lleguen y se distribuyan en todo el sustrato, además se busca homogenizar la temperatura dentro del digestor y evitar la formación de espuma logrando de esta manera mejorar el rendimiento del proceso (Verma, 2002).

2.2.4. TIPOS DE BIODIGESTORES

Se los puede clasificar por: la forma de alimentación (continua, semi-continuo, por lotes), la temperatura en la que trabajan (termofílica, mesofílica, temperatura ambiente), número de etapas (una etapa, multi-etapa) (Guevara Vera, 1996).

2.2.4.1. POR LA FORMA DE ALIMENTACIÓN.

De régimen continuo:

Es utilizado para procesos de biodigestión ininterrumpida, el efluente es igual en cantidad al material que ingresa, la carga es diaria o interdiaria. En este tipo de digestores la producción de biogás es constante en el tiempo (Guevara Vera, 1996). Son diseñados para grandes cargas, generalmente de aguas negras. Requiere de sistema de mezcla y equipamiento para alimentarlos (Gómez Muñoz, 2012).

De régimen semi-continuo:

Es utilizado en aplicaciones agrícolas, en este caso se lo carga por gravedad (Gómez Muñoz, 2012). La primera vez con alrededor del 80 % de la capacidad de digestor quedando la restante capacidad para recargas que pueden ser diarias o interdiarias de acuerdo a como se comporte la producción de biogás. La primera carga debe tener materia que contenga alta concentración de



microorganismos y a medida que estos procesan el sustrato y se retira el efluente se lo va recargando (Guevara Vera, 1996).

Digestor por lotes (batch):

Se carga el digestor de una sola vez o por etapas durante algunos días hasta llenar la capacidad y se lo descarga cuando la producción de biogás cae por debajo de un valor o se detiene (Ministerio de Energía de Chile, 2011). El material cargado debe tener alta concentración de sólidos y debe ser inoculado con microorganismos, su principal ventaja es que solo necesita mano de obra al momento de la carga y la descarga (Guevara Vera, 1996).

2.2.4.2. POR LA TEMPERATURA DE TRABAJO.

Digestores mesofílicos:

Trabajan en el rango de temperaturas entre 28 °C y 35 °C la descomposición de la materia orgánica es lenta lo que se traduce en que el digestor debe ser de mayor tamaño (Guevara Vera, 1996). Una ventaja es que no requieren grandes cantidades de energía (calor externo) pues la temperatura que necesitan para trabajar no es muy alta. Como desventaja se tiene que no se reduce significativamente la concentración de patógenos como para producir biosólidos de buena calidad (Sieger et al., 2004).

Digestores termofílicos:

Requieren una temperatura entre 51 °C a 55 °C para trabajar, caracterizándose por realizar rápidamente el proceso, consecuentemente tiene un tiempo de retención corto y alta producción de biogás (Guevara Vera, 1996). En este caso se destruyen los patógenos de manera efectiva y rápida, además se tienen como ventajas: el aumento de la eliminación de sólidos volátiles del sustrato con el consecuente incremento de producción de biogás, los biosólidos efluentes



contienen menos patógenos y son más deshidratados. Como desventajas se presenta un olor intenso y alto contenido de amoníaco de los biosólidos efluentes, se requiere mayor energía (inyección de calor) para alcanzar las temperaturas de operación, y se produce un aumento de la humedad del biogás producido (Sieger et al., 2004).

Digestores a temperatura ambiente:

Recomendado para lugares tropicales, la principal ventaja es su nulo consumo de energía y la baja inversión necesaria. Sin embargo, tiene como desventaja que depende completamente de las condiciones climáticas, no tiene una producción regular durante el año y la composición del biogás varia (Guevara Vera, 1996).

2.2.4.3. POR EL NÚMERO DE ETAPAS.

De una etapa:

Son los reactores que realizan todo el proceso en un solo depósito o compartimento, tanto las fases hidrolíticas, acidogénica, acetogénica como la metanogénica (Verma, 2002). La ventaja de este tipo de digestores es que requiere menos trabajo pues no se deben trasladar los sustratos de un compartimento a otro y además son menos costosos (Guevara Vera, 1996). La desventaja es la formación de una capa más pesadas en el fondo del reactor y escoria flotante en la parte superior, lo que indica una falta de homogeneidad en la masa de reacción, problemas en el mezclado y consecuentemente una disminución en el rendimiento del proceso.

Multietapa:

El proceso de digestión anaerobia se da en uno o más depósitos. La materia orgánica del primer depósito luego de que ha producido biogás es transportada



a un segundo en donde tiene un nuevo proceso de digestión y vuelve a generar biogás (Guevara Vera, 1996). El objetivo es hacer más eficiente el proceso teniendo reactores separados por etapas, generalmente el primer reactor sirve para las etapas de hidrólisis, acetogénica y acidogénica y el segundo se encarga de la etapa metanogénica. Esta separación permite acelerar el proceso ya que en cada uno de los digestores se potencializa el rendimiento ya sea dándole al proceso condiciones mejores para cada etapa (primera etapa con inyección de oxígeno) o concentrando microorganismos “especialistas” en determinada función (fijando los microorganismos a un medio inerte dentro del reactor) (Verma, 2002). La principal ventaja de este tipo de biodigestores es que aumenta considerablemente el rendimiento del proceso (producción de biogás) aunque los procesos de digestión multietapa tienen también problemas en su desarrollo y son similares a los de los reactores de una sola etapa como cortocircuitos (diferente tiempo de retención para partes de la mezcla), formación de espuma, formación de capas de diferentes densidades, pretratamiento costoso. Además, los procesos multietapa son más complejos y por lo tanto requieren una mayor inversión de capital.

2.3. BIOGÁS.

2.3.1. INTRODUCCIÓN

El producto final del proceso de digestión anaerobia es el biogás que es una mezcla de gases combustibles y su composición depende del tipo de material orgánico utilizado para su producción y de las condiciones de operación de los reactores donde ocurre la transformación.



Debido a su alto contenido de metano el biogás obtenido del proceso de digestión anaerobia tiene un poder calorífico alto, las equivalencias caloríficas del biogás se muestran en la Tabla 3.

El sulfuro de hidrógeno es tóxico y mezclado con el vapor de agua en el momento de la combustión forman ácido sulfúrico. Este corroe las partes de los motores como tuberías de gas, sistema de escape de gas, etc. Los componentes con azufre también disminuyen el desempeño de los motores (Agencia de Recursos Renovables-Alemania, 2010).

Tabla 3: Equivalencia calóricas del biogás
Fuente (AGRO WASTE, n.d.)

1 m ³ Biogás	0,6 m ³	Gas Natural
	6,21 kWh	Electricidad
	0,8 l	Gasolina
	0,71 l	Fuel Oil
	0,3 kg	Carbón
	1,2 l	Alcohol Combustible
	1,5 kg	Madera

Es por esta causa, dependiendo del uso que se vaya a dar al biogás, este debe ser purificado sometiéndolo a procesos de desulfurado, secado, remoción del CO₂, remoción del oxígeno, remoción de otros gases de traza, mejoramiento para alcanzar la calidad de gas natural (Agencia de Recursos Renovables-Alemania, 2010).

2.3.2. APLICACIONES

Todas las aplicaciones del biogás obtenido del proceso de digestión anaerobia se decantan hacia su aprovechamiento energético mediante la combustión para la producción de calor o vapor, combustible para motores, celdas de combustible, generación de electricidad o combustible para vehículos, inyección del gas a la

red de gas natural, etc. Un esquema de las formas en las que el biogás puede ser utilizado se muestra en la Figura 6.

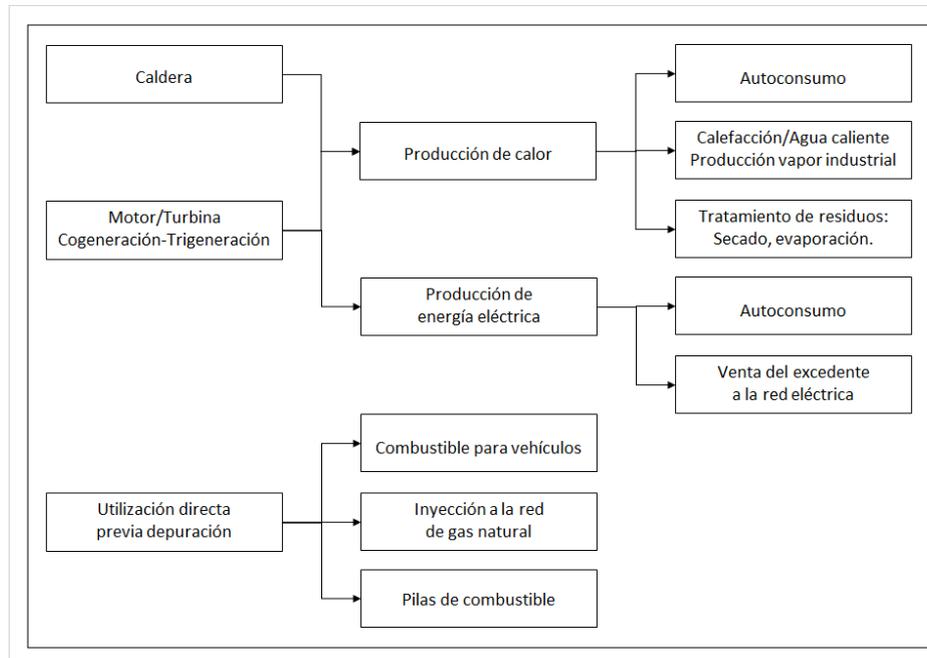


Figura 6: Esquema de usos del biogás

Fuente: (CEIC, 2011)

En la Tabla 4 se muestran algunas características energéticas del biogás en comparación con otras fuentes.

Tabla 4: Características energéticas del biogás vs otras fuentes

Fuente: (Ministerio de Energía de Chile, 2011)

Valores	Biogás	Gas Natural	Gas propano	Gas Metano	Hidrógeno
Valor Calorífico (kWh/ m ³)	7	10	26	10	3
Densidad (t/m ³)	1.08	0.7	2.01	0.72	0.09
Densidad con respecto al aire	0.81	0.54	1.51	0.55	0.07
Límite de explosión (% gas en aire)	6-12	5-15	2-10	5-15	4-80
Temperatura de encendido	687	650	470	650	585
Requerimiento teórico de aire (m ³ /m ³)	6.6	9.5	23.9	9.5	2.4

2.3.2.1. Producción de calor o vapor

Es la forma más sencilla para el uso de este recurso, principalmente usado en lugares alejados en donde el acceso a combustibles es complicado. Se lo utiliza principalmente para cocción, calentamiento de agua e incluso para iluminación.

Los requerimientos en cuanto a la calidad del biogás no son muy exigentes, se



requiere que el contenido de H_2O sea de menos de 100 ppm y que la presión esté entre 8 y 25 mbar, así mismo la adaptación de los quemadores es sencilla y solo se necesita cambiar la relación aire-gas (Ministerio de Energía de Chile, 2011). Otra opción para producción de calor con biogás es inyectarla a las redes de gas natural, esta opción exige que el biogás sea depurado eliminado el SH_2 y aumentando la concentración de metano a valores entre 91 % y 95 % (CEIC, 2011).

2.3.2.2. Generación de electricidad – cogeneración

El uso más difundido del biogás es como combustible para sistemas combinados de generación de calor y energía eléctrica (CCE) o cogeneración. En estos casos, un motor que gira a velocidad constante está acoplado a un generador y le suministra potencia mecánica para que este genere energía eléctrica (ver Figura 7).

Además, cuentan con sistemas de intercambio de calor para la recuperación de energía térmica de los gases de combustión, agua de enfriamiento y circuitos de aceite de lubricación, sistemas hidráulicos para la distribución del calor y conmutación eléctrica, así como equipo de control para la distribución de la potencia y el control de la unidad de CCE (Agencia de Recursos Renovables-Alemania, 2010).

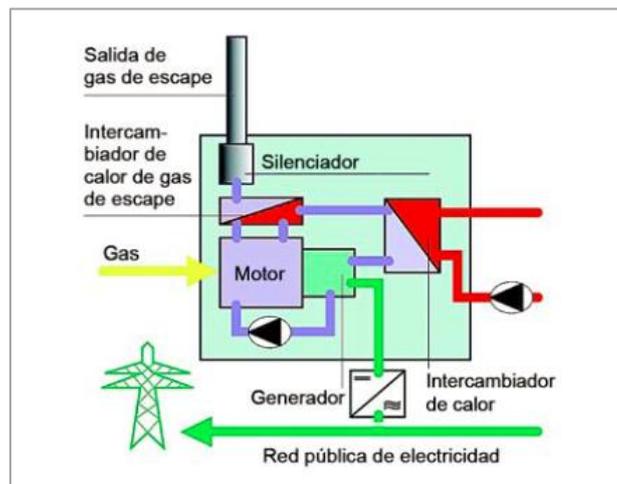


Figura 7: Diseño esquemático de un sistema CCE

Fuente: (Agencia de Recursos Renovables-Alemania, 2010)

Para la generación de electricidad se pueden utilizar principalmente motores de combustión interna, sin embargo, las exigencias sobre la calidad del biogás aumentan y se debe tener un máximo de 100 ppm de H_2S y eliminar la humedad (Ministerio de Energía de Chile, 2011).

La eficiencia de una unidad combinada de calor y energía está compuesta por una combinación de eficiencia eléctrica y térmica, y normalmente está entre 80 y 90%. En el caso ideal, por lo tanto, el 90% del insumo térmico medido puede utilizarse para la conversión de energía (Agencia de Recursos Renovables-Alemania, 2010).



2.3.2.3. Combustible para vehículos

Para este uso el biogás debe ser depurado y tener características similares al gas natural. Puede ser utilizado en motores de combustión interna de gasolina o diésel, el biogás obtenido de digestión anaerobia puede tener octanaje entre 100 y 110 (Ministerio de Energía de Chile, 2011). Con el fin de emplear el biogás como combustible para vehículos existen dos opciones para su almacenamiento, la primera como biogás comprimido (BGC) a presiones de alrededor de 200 kg/cm² y temperatura ambiente y la segunda como biogás licuado (BGL) que debe colocarse a temperaturas de -160 °C y a presión ambiente y de esta manera ocupa un volumen 600 veces menor que el biogás sin comprimir (CEIC, 2011). Con estas condiciones se logran rendimientos y autonomías comparables a las de los combustibles tradicionales sin embargo hay otros limitantes como el que el peso del tanque disminuye la capacidad de carga del vehículo, la adaptación que se debe realizar en los motores es costosa y se requeriría de una red de abastecimiento amplia (Ministerio de Energía de Chile, 2011).

2.3.2.4. Celdas de combustible

El principio de la celda de combustible es el inverso del electrólisis del agua, en esta la molécula de agua H₂O se divide en H₂ y O₂ mediante el suministro de energía eléctrica, en la celda de combustible, el H₂ y el O₂ reaccionan y en esta reacción liberan (generan) energía eléctrica. Para esta reacción se requiere por lo tanto hidrógeno y oxígeno. La Figura 8 muestra esquemáticamente una celda de combustible.

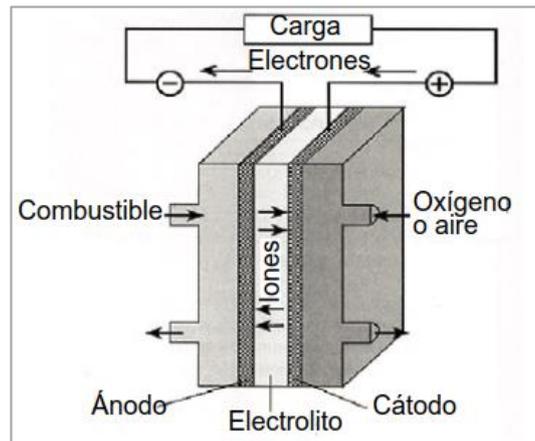


Figura 8: Celda de combustible

Fuente: (Agencia de Recursos Renovables-Alemania, 2010)

El biogás debe ser purificado antes de usarse en una celda de combustible. En el proceso, el metano CH_4 se convierte en hidrógeno. Existen varios tipos de celdas de combustible y se clasifican de acuerdo al tipo de electrolito que utilizan para la reacción, se las clasifica en celdas de baja temperatura y de alta temperatura (Agencia de Recursos Renovables-Alemania, 2010).

2.3.2.5. Inyección a la red de gas natural

Para inyectar el biogás a la red de distribución de gas natural es necesario que este cumpla con algunos requisitos de calidad como son su valor calórico (eliminación de CO_2), odorización, contenido de trazas minerales. Además, para ser inyectado se requiere que en el punto de ingreso el biometano sea presurizado por sobre el valor de presión de la red.

2.3.3. BENEFICIOS

El principal beneficio de la utilización del biogás producto de los lodos activados de las PTAR es contar con una fuente renovable no convencional de energía y la consecuente disminución del consumo de combustibles fósiles y la diversificación de fuentes de energía. Este aprovechamiento puede ser, como ya se ha tratado en este documento, desde las formas más sencillas y directas



como fuente de generación de calor, así como procesos complejos como pilas de combustible, combustible para motores de combustión interna, etc.

Un segundo beneficio está en que el sustrato resultante del proceso de biodigestión anaerobia contiene una carga mucho menor de microorganismos biopeligrosos. Dependiendo de su composición y concentración pueden ser utilizados en diversas aplicaciones dentro de la agricultura desde bosques, campos de pastoreo, cultivos de cereales, etc. Esta sustancia es rica en nutrientes esenciales como nitrógeno, fósforo, zinc y cobre y mejora las características del terreno en cuanto a la capacidad de absorción y retención de agua.

Existe un tercer beneficio en la generación de biogás de las aguas residuales y es el hecho de que al atrapar el gas generado en este proceso se evita que este vaya a la atmósfera y se aporte a la generación de Gases de Efecto Invernadero (GEI). Teniendo en cuenta que el efecto del metano en la atmósfera es 21 veces el del dióxido de carbono (Nolasco, 2010) se convierte en un factor importante a ser considerado dentro de la valoración en la implementación de un proceso para dar tratamiento a los lodos activos de las PTAR.

2.4. APROVECHAMIENTO DE ESTE RECURSO A NIVEL MUNDIAL

El aprovechamiento de este recurso a nivel mundial ha venido incrementándose en los últimos años y se ha llegado a tener una gran cantidad de plantas de producción de biogás, el país que lidera el aprovechamiento de este recurso es Alemania, en la Figura 9 se muestra el número de plantas de producción de biogás de los países miembros de la Agencia Internacional de Energía (IEA) al año 2015(IEA Bioenergy Task 37, 2015).

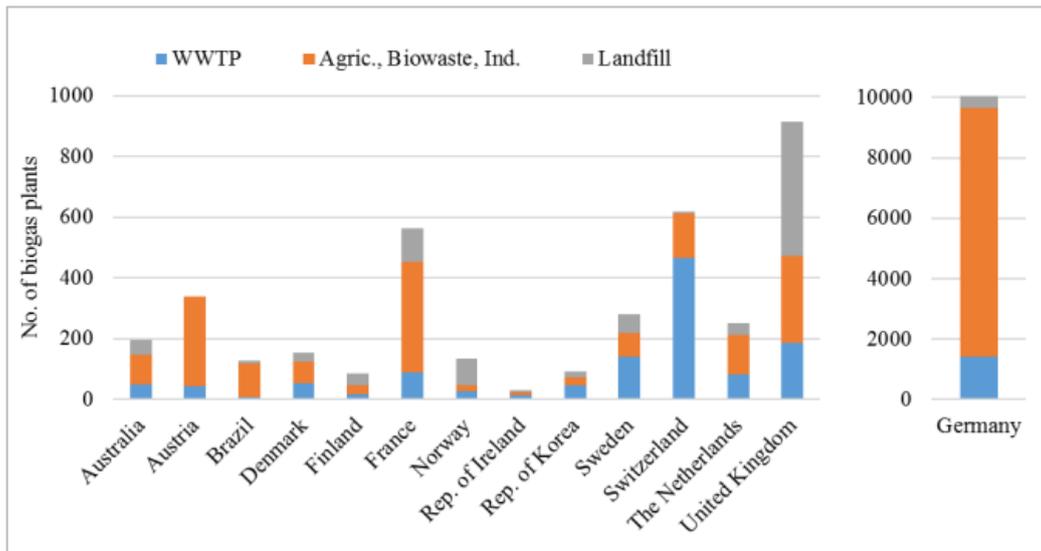


Figura 9: Plantas de biogás instaladas en los países miembros de IEA
Fuente: (IEA Bioenergy Task 37, 2015)

En los Estados Unidos existen más de 2000 sitios productores de biogás: 239 digestores anaeróbicos en granjas, 1241 plantas de tratamiento de aguas residuales que utilizan un digestor anaeróbico (860 utilizan actualmente el biogás que producen) y 636 proyectos de gas de vertederos de basura como se muestra en la Figura 10 (American Biogas Council, 2016).

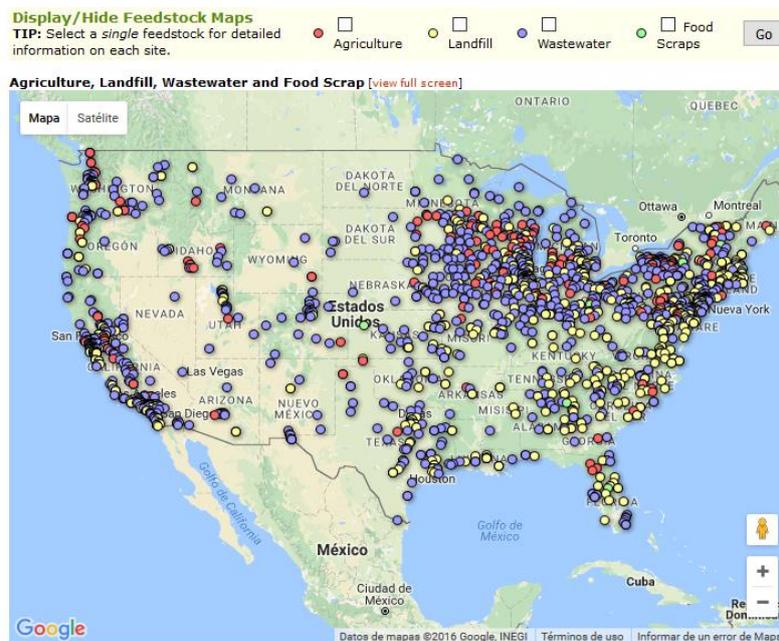


Figura 10: Plantas de producción de biogás en EEUU
Fuente: (American Biogas Council, 2016)



El potencial para el crecimiento de los EE.UU. es grande pues se cuenta con cerca de 11.000 lugares con potencial de ser productores de biogás (8.002 fincas lecheras y porcinas, 2.440 plantas de tratamiento de aguas residuales y 450 proyectos de gas de vertedero) (American Biogas Council, 2016). El potencial del metano proveniente de biogás en los Estados Unidos se estima en aproximadamente 7,9 millones de toneladas por año, lo que equivale a unos 420 mil millones de pies cúbicos o 431 billones de BTU. Esta cantidad podría desplazar alrededor del 5% del consumo actual de gas natural en el sector eléctrico y el 56% del consumo de gas natural en el sector transporte (NREL, 2013).

2.5. ANALISIS DE LA MATRIZ ENERGÉTICA ECUATORIANA

La matriz energética de energía primaria del Ecuador, tiene un componente fundamental que es el petróleo que alcanza un total de 88 % (dividida en 67 % en exportaciones de petróleo y 21 % en petróleo usado en refinerías nacionales). A este se le suma un 5 % de gas natural, de esta manera se llega a un 93 % de energía de origen fósil. Un 4 % corresponde a la energía hidroeléctrica, 2 % en productos de caña, 1 % leña y apenas un 0,03 % de otro tipo (fundamentalmente eólica y solar), el detalle se muestra en la Figura 11.

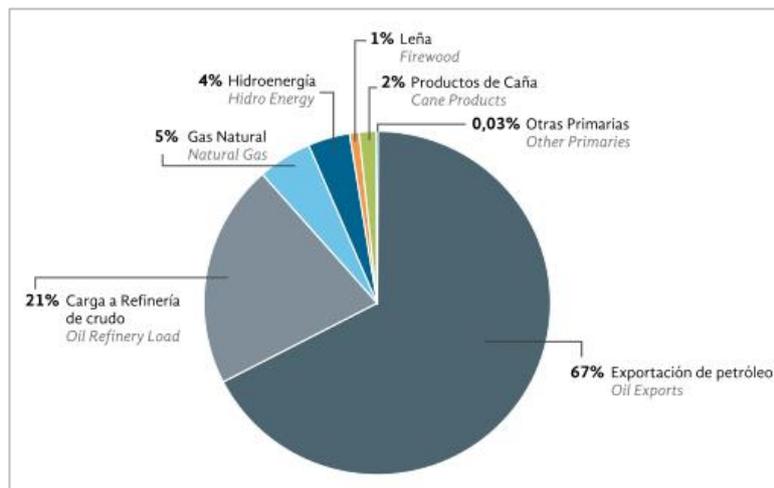


Figura 11: Matriz energética ecuatoriana.

Fuente: MICSE, 2015

Ahondando el análisis en el sector eléctrico, la matriz energética está compuesta al año 2015 con un 49,1 % de fuente térmica (en la que se tienen generadores de tipo turbogas, motores de combustión interna y turvovapor) a esta le sigue la fuente de generación hidroeléctrica con un aporte de 45,5 %, luego está la importación de energía con un 3,3 %. Apenas un 1,5 % de participación corresponde fuentes de biomasa (fundamentalmente bagazo de caña), eólica y solar fotovoltaica, esta distribución se la puede ver en la Figura 12.

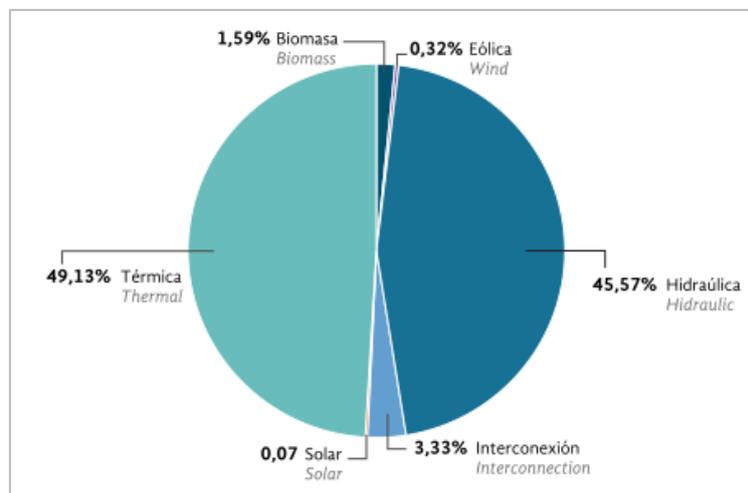


Figura 12: Matriz energética del sector eléctrico ecuatoriano.

Fuente: MICSE, 2015

Es necesario considerar que en el último año ha existido incorporación de gran cantidad de generación hidroeléctrica y se estima que hasta 2018 se lo siga



haciendo y se alcance una participación cercana al 90 % de la demanda., Esto implica una alta dependencia de la situación hidrológica del país, más aún si se considera que por la ubicación de las centrales hidroeléctricas, en su inmensa mayoría, tienen el mismo régimen de lluvia.

Es necesario notar que el aporte de fuentes de energía no convencional es mínimo con apenas 1,5 % razón que hace que el aprovechamiento de recursos energéticos, como el analizado en este trabajo de tesis, cobren importancia ya que aportarán a la diversificación de la matriz energética ecuatoriana más allá de la magnitud de su aporte.



3. METODOLOGÍA.

3.1. CUANTIFICACIÓN DEL RECURSO DISPONIBLE.

Las aguas residuales generadas en una ciudad o aguas residuales urbanas, como se dijo en el apartado 2.1 es la mezcla entre Aguas residuales residenciales, industriales, comerciales y aguas de infiltración.

Cada uno de los tipos de aguas aportantes al afluente tiene diferente composición y su porcentaje de aporte al total del afluente varía de acuerdo a diferentes aspectos como son, el nivel socio económico de la población, el grado de industrialización que tenga la ciudad, la temperatura ambiente, el estado del sistema de alcantarillado, etc.

Se pueden emplear varias metodologías para la determinar la cantidad de aguas residuales que se producen en una determinada población. La primera y la que tiene mayor precisión es la que se obtiene al medir el caudal afluente a la o las Plantas de Tratamiento de Aguas residuales que existan en la ciudad que se vaya a realizar la evaluación.

Una forma de medición indirecta es estimar la producción de aguas residuales en función del consumo de agua potable de la población a evaluar, en esta estimación se variará el porcentaje de aguas devueltas de acuerdo a varios factores, entre otros al nivel de vida de la población, al costo del agua, temperatura ambiente, etc. El porcentaje de aguas devueltas varía entre el 70 % y 75 % (CONAGUA, 2007).

Una tercera forma de estimar la cantidad de aguas residuales que una población generará es utilizando estadísticas de generación regional o local o de poblaciones con similitudes sociales, climáticas y de desarrollo industrial.



3.2. CARACTERIZACIÓN DEL AGUA RESIDUAL AFLUENTE.

Con el objeto de evaluar es potencial energético del agua residual generada en una determinada población, es necesario estudiar y conocer cada uno de los componentes que la forman y la cantidad de estos. Esta composición va a depender de varios factores entre otros del tipo de población, su desarrollo, costumbres, nivel de industrialización, etc. A manera de guía se presenta en la Tabla 5 la composición típica del agua residual sin tratamiento.

Tabla 5: Composición típica del agua residual sin tratamiento
Fuente: (Metcalf & Eddy, 2003)

Contaminantes	Unidad	Concentración		
		Débil	Media	Fuerte
Sólidos totales(ST)	mg/l	390	720	1230
Disueltos, totales (SDT)	mg/l	270	500	860
Fijos	mg/l	160	300	520
Volátiles	mg/l	110	200	340
Sólidos en suspensión (SS)	mg/l	120	210	400
Fijos	mg/l	25	59	85
Volátiles	mg/l	95	160	315
Sólidos sedimentables	mg/l	5	10	20
DBO: 5 días, 20°C(DBO5, 20°C)	mg/l	110	190	350
Carbono Orgánico Total (COT)	mg/l	80	140	260
Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO)	mg/l	250	430	800
Nitrógeno (total en la forma N)	mg/l	20	40	70
Orgánico	mg/l	8	15	25
Amoníaco libre	mg/l	12	25	45
Nitritos	mg/l	0	0	0
Nitratos	mg/l	0	0	0
Fósforo (total en la forma P)	mg/l	4	7	12
Orgánico	mg/l	1	2	4
Inorgánico	mg/l	3	5	10
Cloruros	mg/l	30	50	90
Sulfato	mg/l	20	30	50
Aceite y grasa	mg/l	50	90	100
Compuestos orgánicos volátiles (COVs)	mg/l	<100	100-400	>400
Coliformes totales	No/100ml	10E6-10E8	10E7-10E9	10E7-10E10
Coliformes fecales	No/100ml	10E3-10E5	10E4-10E6	10E5-10E8



3.3. CUANTIFICACIÓN, CARACTERIZACIÓN DEL BIOGÁS Y DETERMINACIÓN DE SU POTENCIAL ENERGÉTICO.

3.3.1. CUANTIFICACIÓN POTENCIAL DISPONIBLE

La cantidad de biogás que se puede producir con los componentes de las aguas residuales dependerá de varios factores, como los que ya fueron mencionados y explicados en el Capítulo anterior de este trabajo. Algunos de estos parámetros pueden ser manipulados durante el desarrollo del proceso de digestión anaerobia, entre estos la temperatura (calentando el biodigestor) por ejemplo, y con otros parámetros no pueden ser cambiados como la composición físico-química del afluente.

En la bibliografía consultada se encuentran varios criterios para poder calcular la cantidad de biogás que las aguas residuales pueden producir. Se lo puede calcular mediante la cantidad de sólidos volátiles que contiene el afluente, con este criterio se tiene que la cantidad de biogas producido está entre 0,75 a 1,12 m³/kg de sólidos volátiles digeridos. (Berkay & Nas, 2007)

Otro criterio establece que se producen 0,35 m³ de biogás /kg de DQO que contiene el afluente y que puede ser digerido, sin embargo, el rendimiento depende de las condiciones ambientales y se lo considera del 60 % (Berkay & Nas, 2007).

El rendimiento final del biogás está relacionado con la composición y biodegradabilidad de la materia prima orgánica, y su tasa de producción dependerá de la cantidad y tipo de microorganismos, sus condiciones de crecimiento y la temperatura de fermentación.



La producción de biogás también puede estimarse en términos per cápita. En este caso, la generación normal en plantas domésticas de tratamiento está entre 15 a 22 l/persona por día. (Berktoy & Nas, 2007).

Otra metodología utiliza la Demanda Bioquímica de Oxígeno para calcular la producción de biogás, para aplicar esta metodología se requiere de una cantidad mayor de información de varios parámetros tanto físicos como ambientales.

Hay que anotar un aspecto importante en este cálculo, las condiciones de generación de biogás adecuadas todos los factores y rendimientos descritos asumen que la temperatura en la que se desarrolla el proceso de digestión anaerobia está en alrededor de 30 °C a 40 °C por lo que, en caso de que el proceso vaya a ser implementado en ciudades cuya temperatura ambiente sea inferior a la señalada, se deberán hacer aportes energéticos, para calentar el biodigestor de manera que la temperatura del proceso alcance los valores ideales. Este aporte energético (calor) se lo podrá hacer como subproducto del uso principal que se le dé al biogás o directamente utilizando parte de este como fuente para generar calor.

3.3.2. CARACTERIZACIÓN DEL GAS PRODUCIDO

Es importante conocer las características del biogás obtenido del proceso de digestión anaerobio al que serán sometida la materia orgánica presente en las aguas residuales con el fin de evaluar si sus componentes permitirán usarlo directamente en la aplicación que se le dará o será necesario depurarlo antes de poder aprovecharlo.

Para esto se considera como referencia lo dado por (Nasqueo Enviroment, 2017), en donde se indica que el biogás proveniente de aguas residuales



contiene entre 60 % y 75 % de metano, entre 33 % y 19 % de CO₂, entre 0 % y 1 % de nitrógeno menos del 0,5 % de oxígeno, 6 % de agua y además trazas de sulfuro de hidrógeno entre 1000 y 4000 mg/m³. Esto indica que se debe “secar” el biogás, además si se lo va a utilizar en motores de combustión interna se debe retirar el sulfuro de hidrógeno para evitar daños en la máquina y el CO₂ para aumentar el poder calórico del biogás.

3.3.3. DETERMINACIÓN DEL POTENCIAL ENERGÉTICO

Para la determinación del potencial energético se tiene que la concentración de metano en el biogás está típicamente entre 65 % y 70 % y adicionalmente se toma como dato que el poder calórico del metano (CH₄) producido tiene un valor de 8569 kcal/m³ o 9.97 kWh/m³ (Chamy & Vivanco, 2007).

3.3.4. CÁLCULO DE PRODUCCIÓN DE BIOGÁS Y DEL POTENCIAL ENERGÉTICO

Se mostrará un ejemplo del cálculo del biogás que puede producirse con datos reales de una población para lo cual se tomará, tanto en este apartado como en los sucesivos, la información de las aguas residuales y condiciones ambientales de la ciudad de Cuenca.



Entorno de la ciudad:

La ciudad de Cuenca está ubicada en la zona andina de la República del Ecuador, está asentada a una altura de 2540 m.s.n.m. y tiene una temperatura ambiente promedio de 16,3 °C (INAMHI, 2015). La ciudad tiene una población de alrededor de 600000 habitantes (INEC, 2010).

Datos necesarios para el cálculo:

Caudal: La información del caudal de aguas servidas generadas en la ciudad de Cuenca la tomaremos de las mediciones hechas al ingreso de la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales de la ciudad el cual es de 1,718 m³/s (Garzón & Ortiz, 2017).

Caracterización de las aguas residuales: La composición del agua residual afluyente generada en Cuenca ha sido estudiada, sus principales componentes y que son de interés de esta tesis se muestran en la Tabla 6. En la Tabla se observa que la concentración de sólidos volátiles es de 125 mg/l (Espinosa C. & Campoverde O., 2013), se hace hincapié en este valor por ser fundamental en los cálculos posteriores que se harán en la determinación del potencial energético.

Población con servicio de aguas servidas: La población de Cuenca conectada a la red hidrosanitaria ha venido incrementándose a lo largo de los años como se muestra en la Tabla 7.



Tabla 6: Concentraciones medias del afluente de la PTAR de Ucubamba
Fuente: (Espinosa C. & Campoverde O., 2013)

Parámetro	Unidad	
pH	-	7,19
DBO	mg/l	118
DQO	mg/l	293
S Totales	mg/l	524
SS Totales	mg/l	247
SS Volátiles	mg/l	125
S. Sedimentables	ml/l	3,68
N. Amoniacal	mg/l	12
N. Orgánico	mg/l	9,6
Nitritos+Nitratos	mg/l	0,41
Fósforo	mg/l	5,2
Sulfatos	mg/l	47
Sulfuros	mg/l	< 0,16
SS Hexano	mg/l	33
Parásitos	Nº/l	3,4
Aluminio	µg/l	2657
Bario	µg/l	-
Cromo	µg/l	< 5,5
Cobre	µg/l	28
Níquel	µg/l	23
Zinc	µg/l	290
Plomo	µg/l	52
Cadmio	µg/l	< 6,1
Arsénico	µg/l	< 2,1
Hierro	µg/l	2052
Manganeso	µg/l	174
Mercurio	µg/l	< 0,19
P. Organoclorados	µg/l	2541
P. Organofosforados	µg/l	2521

Con fines comparativos se efectuarán los cálculos de la cantidad potencial de gas que se podría generar a partir de las aguas residuales producidas en la ciudad de Cuenca con los cuatro criterios descritos en el apartado 3.3.1.



Tabla 7: Población conectada a la PTAR de Ucubamba
Fuente: Elaboración propia con datos de (Bermeo Pazmiño, 2014)

POBLACIÓN CONECTADA A LA PTAR DE UCUBAMBA	
Año	Personas
1999	225950
2000	233950
2001	241950
2002	254002
2003	278105
2004	290156
2005	302208
2006	314259
2007	314259
2008	326442
2009	346219
2010	360303
2011	372837
2012	386847
2013	413345
2014*	431656
2015*	450779
2016*	470748

* Datos proyectados con la tasa de crecimiento anual promedio 1999-2013

Volumen afluente:

Volumen afluente diario:	
Caudal afluente	1,718 m ³ /s (Apartado 3.3.4)
Volumen diario afluente	148435.2 m ³ -día 148435200 l-día

Cuantificación por cantidad de sólidos volátiles:

Sólidos volátiles afluentes:	
Concentración de SV	125 mg/l (Tabla 9)
SV afluentes diario	18554400 g-día 18554,4 Kg-día
% de sedimentación	51 %
SV sedimentados	9462,74 Kg/día
Biogás producido:	
Productividad biogás *	0,8 m ³ /kg SV (Apartado 3.3.1)
Volumen biogás producido	7570,20 m³-día



* Varía entre 0,75 y 1,12

Quantificación por cantidad de DQO:

DQO afluente:	
DQO	293 mg/l(Tabla 9)
DQO afluentes diario	43491514 g-día
	43491,51 Kg-día
% de sedimentación	51 %
DQO sedimentados	22180,67 Kg/día
Biogás producido:	
Productividad biogás	0,35 m ³ /kg SV(Apartado 3.3.1)
Volumen biogás producido	7763,24 m³-día

Quantificación por producción per cápita:

Población servida	470748 Personas(Tabla 10)
Productividad	16 l/persona (Apartado 3.3.1)
	0,016 m ³ /persona
Volumen CH ₄ producido día	7531,97 m³-día

Quantificación por cantidad de DBO:

Para esta cuantificación se utilizará una herramienta preparada por el banco mundial dentro del programa llamado “Global Initiative Methane” la cual se la utiliza para realizar una evaluación preliminar de proyectos para producción de energía a partir de aguas residuales. La herramienta brinda varias opciones para tratar las aguas residuales con digestión anaerobia, se tomará la opción de captar el lodo activo y someterlo al proceso con una captura inicial de lodo en un Tanque de Sedimentación Primario y una secundaria en un Tanque clarificador luego de que las aguas residuales han pasado por el proceso de aireación. El proceso se muestra en la Figura 13.

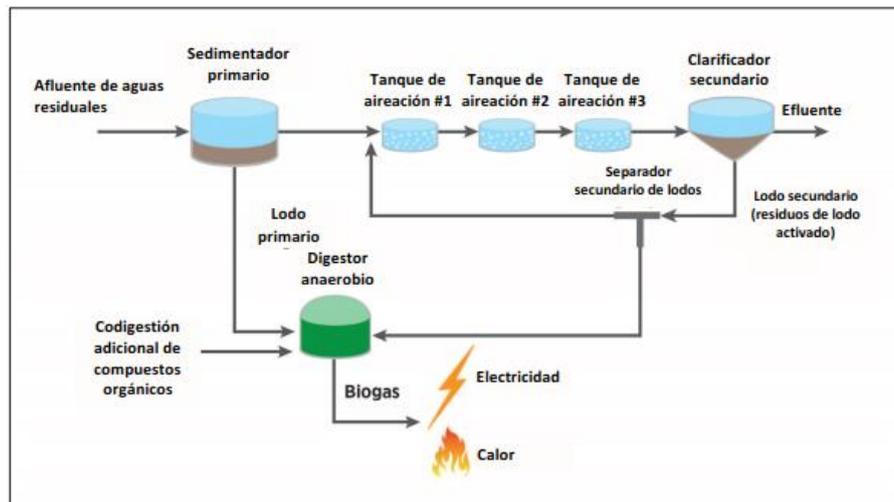


Figura 13: Tratamiento de lodos activados con digestión anaerobia
Fuente: (Global Methane Initiative, 2016)

La herramienta arroja que la cantidad de biogás producido para las aguas residuales de la ciudad de Cuenca será de **7874 m³/día**. Los cálculos en detalle se muestran en el Anexo 1.

Como se observa los cálculos realizados con los tres métodos dan valores cercanos entre si lo cual da un nivel alto de confianza de que los resultados son válidos.

Con ello se calcula la producción potencial de energía:

- Dado que los resultados obtenidos en las cuatro formas en las que se calculó la cantidad potencial de biogás que se obtendría de las aguas residuales de Cuenca son cercanos, para efectos de este cálculo se toma el promedio de estos, valores.

o Cuantificación por cantidad de SV:	7570,20 m ³ -día
o Cuantificación por cantidad de DQO:	7763,24 m ³ -día
o Cuantificación por producción per cápita:	7531,97 m ³ -día
o Cuantificación por cantidad de DBO:	7874,00 m ³ -día

Cuantificación promedio: 7684,85 m³-día

Concentración del metano en el biogás: 65 %



Poder calórico del metano: (Chamy & Vivanco, 2007)	9,97 kWh/m ³
Potencial energético del biogás producido:	49801,67 kWh-día
	18177,61 MWh-año

3.3.5. ENERGÍA PARA MANTENER EL PROCESO A 40 °C

Para favorecer la tasa de producción de biogás y disminuir el tiempo de retención hidráulico y consecuentemente el tamaño del biodigestor, es necesario que la temperatura durante el proceso de digestión anaerobia sea la adecuada. En la Figura 4 se muestra la dependencia entre estas variables. Lo recomendado en este caso es que el biogás obtenido en el proceso sea utilizado para calentar el digestor o, en caso de ser posible, como subproducto del uso principal que se le vaya a dar al biogás se podría recuperar el calor que se genere como es para el caso de generación de energía eléctrica.

Para mantener el proceso a la temperatura requerida se deberá: calentar la materia que ingresa al proceso y compensar las pérdidas de calor que tenga el biodigestor.

La cantidad necesaria para calentar el lodo a la temperatura del digestor es dada por la ecuación siguiente:

$$Q_1 = FI * Cp * (T_2 - T_1)$$

Donde:

Q₁: Calor requerido (kcal/d),

FI: Flujo del lodo de la alimentación (kg/d),

Cp: Calor específico del lodo (1 kcal/kg°C),

T₂: Temperatura de funcionamiento del digestor (°C) y

T₁: Temperatura de la alimentación del lodo (°C)

La cantidad de calor requerida para compensar pérdidas de calor es dada por:



$$Q_2 = U \cdot A \cdot (T_2 - T_a)$$

En donde

Q_2 : Pérdida de calor (J/s),

U: Coeficiente de traspaso térmico ($W/m^2 \cdot ^\circ C$),

A: Área de la superficie del digestor (m^2),

T_2 : Temperatura del lodo en el digestor ($^\circ C$) y

T_a : Temperatura ambiente (afuera del digestor) ($^\circ C$)

Se necesitan conocer para este cálculo las siguientes variables:

- Flujo de la materia que se someterá al proceso de digestión anaerobia.

Para determinar este valor se toma la metodología utilizada por (Global Methane Initiative, 2016) y cuyos resultados se muestran en el Anexo 1.

$$FI = 30277,03 \text{ m}^3 \text{ -día}$$

- Calor específico del lodo. (Se asume que es igual al del agua):

$$C_p = 1 \text{ kcal/kg} \cdot ^\circ C$$

- Temperatura inicial del lodo.

$$T_1 = 19,3 \text{ } ^\circ C \text{ (Espinosa C. \& Campoverde O., 2013)}$$

- Temperatura que se desea alcanzar en el digestor.

$$T_2 = 40 \text{ } ^\circ C$$

- Transmitancia térmica de las paredes del digestor, se asume que serán de hormigón.

$$U = 2,23 \text{ W/m}^2 \cdot ^\circ C \text{ (Universidad Nacional de Córdoba, 2014)}$$

- Área de la superficie del biodigestor. Se necesita conocer la capacidad que deberá tener el digestor (o digestores) para lo cual se toma la metodología utilizada por (Global Methane Initiative, 2016) y cuyos



resultados se muestran en el Anexo 1 y de arrojan como resultado que se requiere una capacidad de 12845 m³. Se determina que serán 4 biodigestores de 20 m de diámetro y 10,22 m de altura. Con esta información, el área en la cual se tendrán pérdidas térmicas es de:

$$A = 5082,27 \text{ m}^2$$

$$T_a = 16,3 \text{ °C (INAMHI, 2015)}$$

Cálculos:

La energía necesaria para calentar el lodo que ingresa al digestor es:

$$Q_1 = 30277,03 \text{ kg-día} * 1 \text{ kcal/kg °C} * (40 \text{ °C} - 19,3 \text{ °C})$$

$$Q_1 = 626734,50 \text{ kcal} - \text{ día}$$

$$Q_1 = 266,05 \text{ MWh} - \text{ año}$$

La energía necesaria para compensar las pérdidas de calor en el biodigestor es:

$$Q_2 = U * A * (T_2 - T_a)$$

$$Q_2 = 2,23 \text{ W/m}^2 \text{ °C} * 5082,27 \text{ m}^2 * (40 \text{ °C} - 16,3 \text{ °C})$$

$$Q_2 = 268603,27 \text{ W} - \text{ hora}$$

$$Q_2 = 2352,96 \text{ MWh} - \text{ año}$$

La energía total requerida es:

$$Q_T = Q_1 + Q_2$$

$$Q_T = 266.05 \text{ MWh} + 2352,96 \text{ MWh} = \mathbf{2619,01 \text{ MWh}}$$

3.3.6. UTILIZACIÓN DEL POTENCIAL ENERGÉTICO

Se analizarán dos alternativas para el uso del biogás producido, la primera en un proceso de cogeneración y la segunda utilizándola como combustible para vehículos.

Cogeneración.



La forma más difundida y en la que se obtiene un mejor rendimiento del biogás recuperado de materia orgánica es la cogeneración cuyo rendimiento global, térmico y eléctrico puede alcanzar valores entre 70 % y 80 % del potencial energético del biogás (Chamy & Vivanco, 2007).

La transformación en energía eléctrica varía entre un 30 y 40% dependiendo del tipo de motor utilizado. La recuperación del calor producido se lo hace de dos fuentes, desde los intercambiadores de calor con los que cuentan los motores y representa el 30 % de la energía de entrada y la segunda fuente son los gases de combustión o gases de escape, estos salen a temperaturas entre 350 °C y 550 °C y está entre el 25 % y 35% de la energía de entrada (Chamy & Vivanco, 2007). La Figura 14 enseña el balance energético de un motor de combustión interna.

Para la recuperación del calor se deben utilizar equipos adicionales como son calderas de recuperación de calor, cuya fuente energética son los gases de combustión. Si se desea calentar agua o incluso vapor y utilizarlos en algún proceso industrial y también intercambiadores de calor para calentar agua y se alimentan del calor producido por los sistemas de enfriamiento del motor, este calor puede ser utilizado para calentar el mismo proceso de digestión anaerobia y aumentar su producción. El esquema descrito se muestra en la Figura 15.

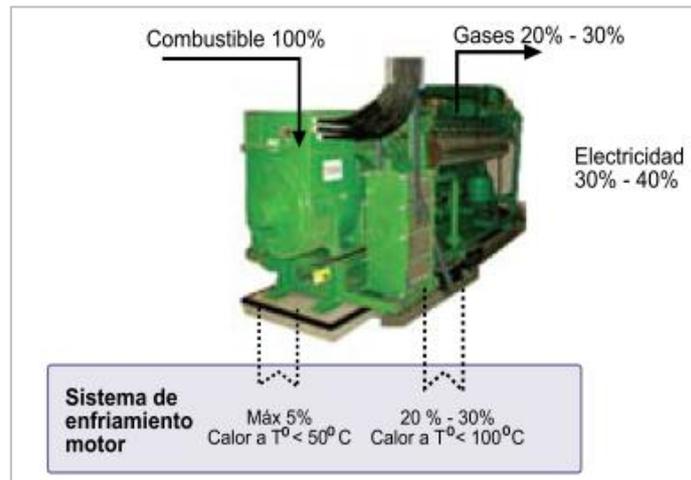


Figura 14: Balance energético completo de un motor de combustión interna
Fuente: (Chamy & Vivanco, 2007)

Para efectos de poder realizar los cálculos de energía recuperada en cada uno de las etapas antes mencionadas se toma como referencia los datos rendimiento que se muestran en la Tabla 8 y que corresponden a un motor CAT G3520 de 2000 kW.

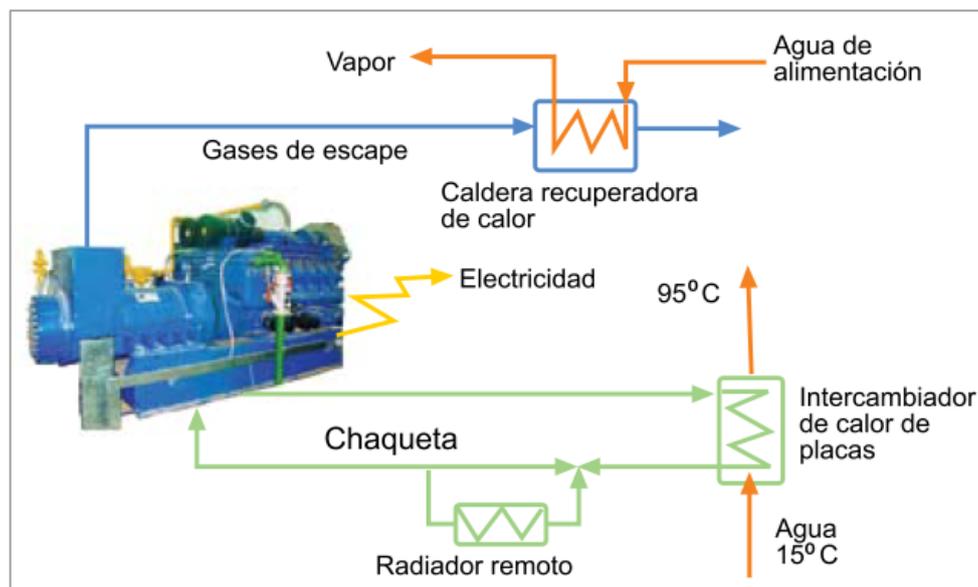


Figura 15: Sistema de cogeneración con recuperación de calor
Fuente: (Chamy & Vivanco, 2007)



Tabla 8: Rendimiento para un motor CAT 352

Fuente: ((Chamy & Vivanco, 2007)

Motor combustión interna CAT G3520	
Etapa	(%) energía recuperada
Eléctrico	38,0
Térmico (gases)	20,7
Térmico (refrigeración)	19,3

Energía potencial del biogás: $E_{pb} = 18177,61 \text{ MWh-año}$

Electricidad:

$$E_{el} = E_{pb} * \% \text{ Erec. elec.}$$

$$E_{el} = 18177,61 \text{ MWh-año} * 38 \%$$

$$\mathbf{E_{el} = 6907,49 \text{ MWh-año}}$$

Recuperación de calor:

Gases de combustión:

Se tomará como dato que la caldera de recuperación tiene un rendimiento del 65% y con los datos del porcentaje de energía que se recupera de los gases de la Tabla 12 tenemos que:

Energía recuperada de los gases de combustión:

$$E_{gc} = E_{pb} * \% \text{ Erecp. gases} * \text{rendim. caldera}$$

$$E_{gc} = 18177,61 \text{ MWh-año} * 20,7 \% * 65 \%$$

$$\mathbf{E_{gc} = 2445,80 \text{ MWh-año}}$$

Intercambiadores de calor:

Se tomará como dato que los intercambiadores de calor tienen un rendimiento del 98 % y con los datos del porcentaje de energía que se recupera de los intercambiadores de la Tabla 12 tenemos que:

$$E_{ic} = E_{pb} * \% \text{ Erec. inter.} * \text{rendim. Interc.}$$

$$E_{ic} = 18177,61 \text{ MWh-año} * 19,3 \% * 98 \%$$

$$\mathbf{E_{ic} = 3438,11 \text{ MWh-año}}$$

Energía total:

$$E_{total} = E_{gc} + E_{ic} + E_{el}$$

$$E_{total} = 2445,80 + 3438,11 + 6907,49$$

$$E_{total} = 12791,40 \text{ MWh-año}$$

Con esta energía y considerando que en la ciudad de Cuenca el consumo promedio por vivienda es de 201,4 kWh – mes (Baquero & Quesada, 2016) se podría suplir el consumo de alrededor de 2864 hogares, la energía que se puede recuperar en calor se la utilizaría para calentar el biodigestor ya que supera largamente a los requerimientos que para este fin que se calcularon previamente en 2619,01 MWH - año.

Combustible para vehículos:

Se analiza esta posibilidad debido a que en el país el 42 % de toda la energía que se consume está destinada al transporte como se ve en la Figura 16.

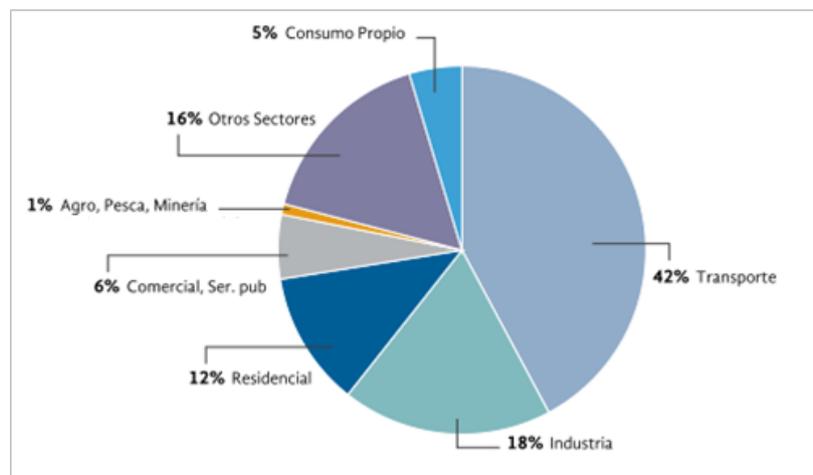


Figura 16: Estructura del consumo de energía por sectores en Ecuador
Fuente: (MICSE, 2015)

Dentro de este sector de consumo, el que mejor se presta para implementar un proyecto como el analizado en esta tesis es el del transporte público en buses de servicio urbano, esto por el alto consumo que tiene cada una de las unidades de transporte.



La energía disponible para utilizar será la disponible del biogás generado restándole la necesaria para calentar el biodigestor, esto es:

Energía disponible para usarla como combustible de vehículos:

$$E_d = 18177,61 \text{ MWh-año} - 2619,01 \text{ MWh} = 15558,60 \text{ MWh}$$

Datos de entrada

Cantidad de metano disponible: 4275,35 m³/día

Recorrido diario de un bus urbano en Cuenca: 174,92 km
Fuente: (Sarango & Moncayo, 2016)

Rendimiento de un motor diésel: 5,49 km/gal
Fuente: (Nadaletti et al., 2015)

Densidad del diésel: 850,00 kg/m³
3,22 kg/gal
Fuente: (Ortiz V., 2014)

Poder calorífico del metano: 39,90 MJ/m³
Fuente: (Lombarte, Villalonga, & Margarit, 2011)

Poder calorífico del diésel: 44,70 MJ/kg
143,83 MJ/gal
Fuente: (Torres C., Garza N., Ortiz M., & González G., 2015)

Cálculos:

Consumo de combustible por bus: 31,86 gal-día

Consumo calórico de un bus: 4582,54 MJ-día

Consumo de metano de un bus: 114,85 m³-día

Cantidad de buses abastecidos: 37,00 U

Con esta alternativa se podría abastecer de combustible a cerca del 8 % de la flota de buses urbanos de la ciudad de Cuenca.



3.4. CUANTIFICACIÓN DE EMISIONES DE GEI EVITADAS.

Es importante conocer cuál es el impacto ambiental de implementar un proyecto de este tipo. Para calcular la cantidad de GEI evitados al implementar una Planta de Tratamiento de Aguas Residuales que tenga un sistema de captación de biogás se utilizará la metodología dada en la Nota Técnica N° 116 del BID *Desarrollo de proyectos MDL en plantas de tratamiento de aguas residuales* (Nolasco, 2010).

El primer paso es tener una línea base para conocer cuál es la cantidad de emisiones que generaría el proceso de depuración de aguas residuales convencional sin captación de biogás.

Para aplicar la metodología de (Nolasco, 2010) primero se debe enmarcar la planta en alguna de las alternativas en las que existe emisión de metano y este es liberado a la atmósfera.

En el Anexo 2, se observa un cuadro en el que se mencionan los diferentes escenarios en los que pueden enmarcarse los diferentes tipos de PTAR. Para este análisis se asumirá que la planta tendría tratamiento aeróbico (con aireación forzada) y se la reemplaza por un sistema de tratamiento anaeróbico (lodo activado) con recuperación de metano y se aplicará la metodología AMS III.H.

En esta metodología se debe aplicar la siguiente fórmula:

$$BE = (Q \times CODd \times MCF \times Bo + S \times DOC \times MCFS \times DOC_F \times F \times 16/12) \times GWPCH_4 \times UF + EC \times EF$$

En donde:

BE: emisiones en la línea de base (tCO₂e/año).

Q: caudal de agua residual o lodos (m³/año).

CODd: demanda química de oxígeno degradada promedio (t/m³).



MCF: factor de corrección de metano para el tratamiento o sitio de descarga del agua servida.

Bo: Máxima capacidad de producción de metano del agua residual (valor conservador: 0,21 kgCH₄/kgDQO).

S: cantidad de lodo generado o tratado (t/año).

DOC: contenido de materia orgánica en el lodo generado (0,05 para lodo doméstico, 0,09 para lodo industrial).

DOC_F: fracción del DOC que se transforma en biogás (0,5).

F: fracción de metano en el biogás (0,5).

GWPCH₄: potencial de calentamiento global del metano (21 kgCO_{2e}/kgCH₄).

UF: factor de corrección por incertidumbre (0,94).

EC: energía consumida en forma de combustible fósil o electricidad (toneladas/año o MWh/año).

EF: factor de emisión de la red eléctrica o combustible fósil (tCO_{2e}/MWh).

La metodología señala que si el lodo extraído es tratado anaerobiamente o dispuesto en un relleno sanitario con recuperación de metano (como es el caso del relleno sanitario de la ciudad de Cuenca) el término:

$$S \times \text{DOC} \times \text{MCF}_S \times \text{DOC}_F \times F \times 16/12$$

no debe ser considerado.

Para las emisiones del proyecto se aplica lo siguiente;

$$\text{PE} = Q \times \text{COD}_d \times \text{Bo} \times \text{GWPCH}_4 \times L - \text{EG} \times \text{EF}$$

PE: emisiones del proyecto (tCO_{2e}/año).

L: fracción del biogás generado que se pierde en el sistema de captura, ruteo y utilización o quemado. Se aconseja utilizar un valor de 0,2.



EG: cantidad de energía generada excedente (= generación – consumo del proyecto) que desplace el uso de combustibles fósiles o electricidad (toneladas/año o MWh/año).

EF: factor de emisión de la red eléctrica o combustible fósil (tCO_{2e}/t o tCO_{2e}/MWh).

Aplicando la metodología se evalúa la emisión de GEI evitados en el apartado 3.5.

3.5. ANÁLISIS AMBIENTAL.

Se cuantifica a continuación la cantidad de GEI que cada opción analizada evitaría emitir a la atmósfera.

Cogeneración:

Emisiones en la línea base:

$$BE = Q \times CODd \times MCF \times Bo \times GWP_{CH4} \times UF + EC \times EF$$

$$\text{Caudal (Q)} = \begin{array}{l} 148435 \text{ m}^3\text{-día} \\ 54178775 \text{ m}^3\text{-año} \end{array}$$

$$\text{Demanda Química de Oxígeno (DQO)} = \begin{array}{l} 293 \text{ mg/l} \\ 0,000293 \text{ t/m}^3 \end{array}$$

$$\text{Demanda Química de Oxígeno degradado (DQO}_d) = 0,0001758 \text{ t/m}^3 \text{ (60 \%)}$$

$$\text{Factor de corrección de metano (MCF)} = 0,8$$

$$\text{Capacidad máxima de producción de metano (Bo)} = 0,21 \text{ kgCH}_4\text{/kgDQO}$$

$$\text{Potencial de calentamiento global del metano (GWP}_{CH4}) = 21 \text{ kgCO}_{2e}\text{/kgCH}_4$$

$$\text{Factor de corrección por incertidumbre (UF)} = 0,94$$



Para calcular la energía consumida por la planta (EC) se toma como valor referencial de consumo de energía dado por (Goldstein & Smith, 2002) que se muestra en la Tabla del Anexo 3, se ha extrapolado para conseguir el consumo de la planta asumiendo que será una con un caudal afluente de 148435 m³/día lo cual nos da 0,284 kWh/m³

$$\begin{aligned} & 148435 \text{ m}^3\text{-día} \times 0,284 \text{ kWh/m}^3 \\ \text{Energía consumida por la planta (EC)} = & \quad 42155,54 \quad \text{kWh-día} \\ & \quad 15386,77 \quad \text{MWh-año} \end{aligned}$$

$$\text{Factor de emisión de la red eléctrica (EF)} = 0,6071 \text{ tCO}_2\text{e/MWh}$$

Fuente: (MAE, MEER, CENACE, & CONELEC, 2013)

$$\text{BE} = 54178775 \times 0,0001758 \times 0,8 \times 0,21 \times 21 \times 0,94 + 15386,77 \times 0,6071$$

$$\text{BE} = 40928,03 \text{ tCO}_2\text{e/año}$$

Emissiones del proyecto:

$$\text{PE} = \text{Q} \times \text{CODd} \times \text{Bo} \times \text{GWPCH}_4 \times \text{L} - \text{EG} \times \text{EF}$$

$$\begin{aligned} \text{Caudal (Q)} = & \quad 148435 \text{ m}^3\text{-día} \\ & \quad 54178775 \text{ m}^3\text{-año} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Demanda Química de Oxígeno (DQO)} = & \quad 293 \text{ mg/l} \\ & \quad 0,000293 \text{ t/m}^3 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Demanda Química de Oxígeno degradado} \\ \text{(DQO}_d\text{)} = & \quad 0,0002637 \text{ t/m}^3 \text{ (90 \%)} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Capacidad máxima de producción de metano} \\ \text{(Bo)} = & \quad 0,21 \text{ kgCH}_4\text{/kgDQO} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Potencial de calentamiento global del metano} \\ \text{(GWP}_{\text{CH}_4}\text{)} = & \quad 21 \text{ kgCO}_2\text{e/kgCH}_4 \end{aligned}$$

$$\text{Fracción del biogás generado que se pierde (L)} = 0,2$$

$$\begin{aligned} \text{Cantidad de energía generada excedente (EG)} = & \quad -8479,28 \text{ Energía} \\ & \quad \text{generada -} \\ & \quad \text{consumida} \end{aligned}$$

$$\text{Factor de emisión de la red eléctrica (EF)} = 0,6071 \text{ tCO}_2\text{e/MWh}$$

Fuente: (MAE et al., 2013)



$$PE = 54178775 \times 0,0002637 \times 0,21 \times 21 \times 0,2 - (-8479,28 \times 0,6071)$$

$$PE = 17748,86 \text{ tCO}_2\text{e/año}$$

La reducción de emisiones neta será entonces:

$$ER = BE - PE$$

$$ER = 40928,03 - 17748,86$$

$$ER = 23179,17 \text{ tCO}_2\text{e/año}$$

Combustible para vehículos:

Emisiones de CO₂

Los GEI de línea base se mantienen:

$$BE = 40928,03 \text{ tCO}_2\text{e/año}$$

Las emisiones del proyecto son las siguientes:

$$PE = Q \times \text{CODd} \times \text{Bo} \times \text{GWP}_{\text{CH}_4} \times L - \text{EG} \times \text{EF}$$

$$\text{Caudal (Q)} = \begin{array}{l} 148435 \text{ m}^3\text{-día} \\ 54178775 \text{ m}^3\text{-año} \end{array}$$

$$\text{Demanda Química de Oxígeno (DQO)} = \begin{array}{l} 293 \text{ mg/l} \\ 0,000293 \text{ t/m}^3 \end{array}$$

$$\text{Demanda Química de Oxígeno degradado (DQO}_d\text{)} = 0,0002637 \text{ t/m}^3 \text{ (90 \%)}$$

$$\text{Capacidad máxima de producción de metano (Bo)} = 0,21 \text{ kgCH}_4\text{/kgDQO}$$

$$\text{Potencial de calentamiento global del metano (GWP}_{\text{CH}_4}\text{)} = 21 \text{ kgCO}_2\text{e/kgCH}_4$$

$$\text{Fracción biogás generado que se pierde (L)} = 0,2$$

$$\text{Cantidad de diésel no quemado (CNQ)} = 430290,46 \text{ gal-año}$$

$$\text{Emisiones de CO}_2 \text{ motor diésel (EMD)} = 0,00984 \text{ tCO}_2\text{e/MWh}$$

Fuente: (MAE et al., 2013)



$$PE = 38473920 \times 0,0002637 \times 0,21 \times 21 \times 0,2 - 430290,46 \times 0,00984$$

$$PE = 8366,13 \text{ tCO}_2\text{/año}$$

La reducción de emisiones neta será entonces:

$$ER = BE - PE$$

$$ER = 40928,03 - 8366,13 \text{ tCO}_2\text{/año}$$

$$ER = 32561,89 \text{ tCO}_2\text{/año}$$

3.6. IDENTIFICACIÓN DE BARRERAS PARA LA IMPLEMENTACIÓN DE ESTA TECNOLOGÍA.

La implementación de esta tecnología en nuestro medio tiene algunas dificultades o barreras que las podríamos enumerar en las siguientes (Willis et al., 2012).

- En algunos casos por la dificultad o incluso imposibilidad del aprovechamiento del biogás producido haría inviable que un proyecto de este tipo se sustente económicamente. Esto debido a que el uso del biogás, que podría ser inyectado en la tubería de distribución de gas natural, sería imposible en nuestro medio por no disponer de este tipo de distribución de gas (Willis et al., 2012).
- La industria en la ciudad de Cuenca tiene poco desarrollado el uso de gas natural y nulo de biogás por lo que venderlo para este fin sería muy difícil a más de que adecuar el gas (limpiarlo) resultará costoso, pues requiere una inversión de alrededor de 2600 USD por m³/día, para el caso del ejemplo desarrollado que tiene una producción de 7684.85 m³/día de biogás esta sería de alrededor de 860000,00 USD y además para transportarlo se requiere envasarlo a presiones muy altas que requerirán



dotar de más infraestructura no necesariamente barata a la planta (compresores de alta presión, tanquero, etc.).

- En el orden económico, el alto costo que representa construir la infraestructura y adquirir el equipamiento que requieren estos sistemas representan inversiones iniciales altas que por el momento económico del país se ven limitadas (Willis et al., 2012).
- Dificultades en el orden operacional del sistema de digestión anaerobio como producción de nitrógeno y fósforo en el líquido resultante del proceso que obligaría a tratar esta antes de que sea devuelta lo cual requiere una alta inversión (Willis et al., 2012).
- La inexistencia de incentivos para la implementación de proyectos para aprovechar las fuentes de energía no convencional y dado el alto costo de la inversión inicial hacen que sea muy poco atractivo emprender en nuestro país en este tipo de proyectos.



4. RESULTADOS, CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

4.1. RESULTADOS

- En el ejemplo aplicado, los componentes orgánicos de las aguas residuales tienen las condiciones físico químicas y bacteriológicas necesarias para ser sometidos al proceso de digestión anaerobia, su relación DQO/DBO es de 2,483 es muy cercana al valor para ser considerada materia fácilmente digerible.
- Los sólidos volátiles (materia que puede ser convertida en biogás) alcanza un valor de 7684,85 m³/día, este valor se obtuvo empleando cuatro métodos de cálculo cuyos resultados fueron muy cercanos entre sí, en ningún caso se alejan más de 2,46 % del valor promedio lo que confirma la validez del método.
- El potencial energético de la materia orgánica de las aguas residuales alcanza a 18177,61MWh-año si se somete a los lodos al proceso de biodigestión en un reactor o biodigestor.
- Se han analizado dos opciones para la utilización del recurso obtenido; la cogeneración de calor y energía eléctrica y la segunda utilizarlo como combustible de vehículos.
- De este potencial y utilizando el biogás generado como fuente de energía para un sistema de cogeneración (generación de energía eléctrica y recuperación de energía térmica) se pueden recuperar 12791,40 MWh-año cantidad de energía suficiente para suplir el consumo de energía eléctrica a 2864 hogares.



- Con este uso se logra evitar emitir al ambiente un total de 23179,17 tCO₂e/año.
- Si se utiliza el biogás obtenido como combustible para buses de transporte urbano, se dispondrían de 15558,60 MWh de energía, con la cual se podría abastecer a 37 buses urbanos.
- Usándolo con este fin se consigue evitar emisiones de gases de efecto invernadero en un valor neto de 32561,89 tCO₂e/año.

CONCLUSIONES

- El aprovechamiento de nuevas fuentes de energía no convencional, incluso de pequeña escala como la analizada en este trabajo, es importante dentro del contexto de diversificación de la matriz energética nacional por un lado y de quitar la dependencia de fuentes externas de energía para instalaciones de servicio público cuya paralización o inadecuado funcionamiento tendría alto impacto en la sociedad.
- El afluente considerado en el ejemplo tiene buenas características físico-químicas y bacteriológicas para ser sometidos a un proceso de digestión anaerobia para producir biogás y este pueda ser aprovechado para generación de energía.
- Si bien las condiciones de temperatura ambiente de la ciudad de Cuenca no son las ideales para que el proceso de digestión anaerobia se desarrolle y tenga un rendimiento (productividad) alto, este factor puede ser mejorado utilizando el mismo recurso (biogás) para calentar el biodigestor hasta valores de temperaturas ideales para potenciar la producción pues se demostró que con solo una parte del recurso



generado (14,41 %) se puede llevar al proceso de digestión anaerobia a una temperatura ideal de rendimiento.

- A más del aprovechamiento energético de las aguas residuales también se tiene una enorme ventaja al evitar la emisión de Gases de Efecto Invernadero que se tendrían si se somete a las aguas residuales a un tratamiento que no considere esta opción.
- Una ventaja adicional es que con la extracción de la materia orgánica de las aguas residuales afluentes es que se mitigarán la producción de olores que se esparcen a los lugares cercanos a las PTAR.

4.2. RECOMENDACIONES

- Considerar que para PTAR futuras tanto en Cuenca como en otras ciudades de país, se considere de entrada el aprovechamiento de este recurso. Incluso se debe tener en cuenta que en otras regiones del país con temperatura ambiente mayor a la analizada en esta tesis el proceso puede tener aún mejor rendimiento y se podría aprovechar la generación de calor para utilizarlo en otros procesos industriales.
- Existen varias fuentes de energía no-convencional que aún no han sido estudiadas a profundidad en nuestro medio y que podrían contribuir, al igual que el recurso analizado en esta tesis, a la diversificación de la matriz energética, entre otros podrían ser el aprovechamiento de los desechos forestales de la talas y podas de vegetación ornamental urbana, desechos agrícolas, residuos ganaderos (excremento animal y de plantas de faenamiento), etc., que deberían ser cuantificados y estudiados.



- Por las ventajas que representa la utilización de fuentes de energía no convencionales, tanto en el aspecto ambiental como social es necesario establecer un mecanismo de retribución adicional al de la venta de la energía generada a valor de fuente convencional. Estos incentivos se pueden dar en tres formas: 1) En el precio de la energía generada con esta fuente, 2) Reduciendo los costos de inversión (vía subsidio, eliminando impuestos, etc.) y 3) Inversión pública (Barragán E. & Espinoza A., 2015).



ANEXOS



ANEXO 1

BioWATT (Herramienta de evaluación tecnológica de producción de biogás a partir de aguas residuales)

v1.0 (11-may-2016)

Proyecto:
Fecha:

Cuenca
28/08/2017

DATOS GENERALES	Valor	Unidad	Comentario
AGUAS RESIDUALES QUE INGRESAN A LA PLANTA			
Carga hidráulica promedio	148,435	m ³ /d	
Concentración de afluencia BOD ₅ promedio	118	mg/l	
Concentración TSS/ BOD ₅ promedio	2.09	---	Tipicamente: 1.00 (0.8-1.2) [2,3,4,5]
Concentración de afluencia TSS promedio	247	mg/l	Tipicamente: el mismo valor para la concentración de BOD ₅
Concentración VSS/TSS promedio	0.51	---	Tipicamente: VSS/TSS = 0.75 (0.6-0.85) [2,3,4]; en caso del número dominante de tanques sépticos en la zona de captación, este dato podría bajar a 0.2-0.3 [2].
Concentración de afluencia VSS promedio	125	mg/l	
Producción específica per cápita de BOD ₅ local	40	gBOD ₅ /cap/d	Seleccione el valor apropiado del menú desplegable o use datos provenientes de otras fuentes [3,4,5]
Carga de contaminación (BOD ₅) promedio	17,515	kg/d	
Habitantes equivalentes 60	291,922	PE ₆₀	(Nota: 1 PE ₆₀ = 60 g BOD ₅ /d)
Capita equivalentes locales	437,883	cap	(Nota: 1 cap = xx g BOD ₅ /d, de conformidad con los datos de entrada específicos del proyecto)

CAS + DIGESTOR DE LODO	Valor	Unidad	Comentario
TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES			
Tanque Sedimentador primario (PST)			
¿Está previsto contar con un PST?	SI		Seleccione "SI" o "NO" del menú desplegable "SI" (se recomienda cuando el afluente de TSS > 80 mg/l), "NO" (se recomienda cuando el afluente de TSS < 80 mg/l)
Volumen del PST	4,639	m ³	
Tiempo de retención promedio en el PST	0.75	h	Tipicamente: 0.75 (0.50-1.5) en una carga hidráulica promedio [3,5]
Eficiencia de remoción de BOD ₅ del PST	30.0	%	Tipicamente: 30 (20-35) [3,5]
Eficiencia de remoción de TSS del PST	57.5	%	Tipicamente: 50 (50-65) [3,5]
Tanque de aireación (AT)			
Carga promedio del afluente de BOD ₅	12,261	kg/d	
Carga promedio del afluente de TSS	15,582	kg/d	
PRODUCCIÓN DE LODO			
Lodo primario			
Producción de PS diaria (DS)	21,081	kgDS/d	
DS del lodo primario después del espesamiento	3.5	%DS	Espesador de gravedad 2-6% [3,4]; Espesador mecánico: 5-7% [3,4]
VS/DS del lodo primario después del espesamiento	51	%VS	Tipicamente: VSS/TSS = 0.75 (0.6-0.85) [2,3,7]; en caso de muchos tanques sépticos, este dato podría bajar a 0.2-0.3 [2]
Producción de PS diaria, lodo espesado (m ³)	602.3	m ³ /d	
Lodo secundario			
Producción bruta diaria de WAS (DS)	9,196	kgDS/d	Tipicamente: 0.75 (0.5-1.2), dependiendo del afluente de TSS, tiempo medio de retención lodo, temperatura [3,4,5]
DS después del espesamiento del WAS	6.0	%DS	Espesador de gravedad 2-4% [3,4]; Espesador mecánico: 5-7% [3,4]
VS/DS después del espesamiento del WAS	65	%VS	(i) tiempo de retención lodo < 5-10 días: promedio de 70% (65-75%) [2,3,7,9]; (ii) tiempo de retención lodo < 10-15 días: promedio de 68% (62-75%) [2,3,7,9]; (iii) tiempo de retención lodo > 20 días: promedio de 65 (60-70%) [2,3,7,9]
Producción de WAS diaria, lodo espesado (m ³)	153.3	m ³ /d	
DIGESTOR			
Tiempo de retención en el digestor	26	días	(i) digestor mesofílico (30-38°C): >15 días (plantas WWTP grandes), >20 días (WWTP medianas y pequeñas) [2,3,4]; (ii) temperatura ambiente: véase la figura [2,7,9]
Volumen requerido del digestor	19,645	m ³	
m³/d de alimentación			
Alimentación promedio de PS	602	m ³ /d	
Alimentación promedio de WAS	153	m ³ /d	
Alimentación promedio de materia prima orgánica	0	m ³ /d	
Promedio total de alimentación	756	m ³ /d	
Alimentación del DS			
Alimentación promedio de PS	21,081	kgDS/d	
Alimentación promedio de WAS	9,196	kgDS/d	
Alimentación promedio de materia prima orgánica	0	kgDS/d	
Promedio total de alimentación	30,277	kgDS/d	
Alimentación del VS			
Alimentación promedio de PS	10,669	kgVS/d	
Alimentación promedio de WAS	5,977	kgVS/d	
Alimentación promedio de materia prima orgánica	0	kgVS/d	
Promedio total de alimentación	16,646	kgVS/d	
Destrucción de VS (%)			
VS promedio de la destrucción de PS	60	% de VS	Tipicamente: 55-60% [2,3,4]
VS promedio de la destrucción de WAS	40	% de VS	Tipicamente: 30-40% [2,3,4]
VS promedio de la destrucción de materia prima orgánica	85	% de VS	Seleccione el valor apropiado del menú desplegable o use datos provenientes de otras fuentes [2,3,8]
Destrucción de VS (kgVS)			
VS promedio de la destrucción de PS	6,401	kgVS _{destruido} /d	
VS promedio de la destrucción de WAS	2,391	kgVS _{destruido} /d	
VS promedio de la destrucción de materia prima orgánica	0	kgVS _{destruido} /d	
Promedio total de la destrucción de PS	8,792	kgVS _{destruido} /d	
LODO PARA ELIMINACIÓN / REUTILIZACIÓN			
DS después de la deshidratación de lodo	23	%DS	Tipicamente: 23 (18-35) [3,4]
Producción promedio total de DS	21,485	kgDS/d	
Producción total de DS específico	74	gDS/PE ₆₀ /d	
	49	gDS/cap/d	
Promedio total de producción de lodos deshidratados	93.4	m ³ /d	
	34,096	m ³ /año	



PRODUCCIÓN DE BIOGÁS			
Volumen del almacenador de biogás	20	% de producción de gas diaria	Tipicamente: 20 (10-30)% para plantas WWTP grandes a pequeñas [2,3]
Volumen requerido del almacenador de biogás	1,575	m ³	
• Producción de biogás			
Rendimiento de biogás a partir de PS	950	L/kgVS _{destroycd}	Tipicamente: 950 (900-1000) [2,3]
Rendimiento de biogás a partir de WAS	750	L/kgVS _{destroycd}	Tipicamente: 750 (700-800) [2,3]
Rendimiento de biogás a partir de la materia orgánica	1,000	L/kgVS _{destroycd}	Seleccione el valor apropiado del menú desplegable o use datos provenientes de otras fuentes [2,3,8]
• Producción de biogás			
Producción de biogás a partir de PS	6,081	m ³ /d	
Producción de biogás a partir de WAS	1,793	m ³ /d	
Producción de biogás a partir de la materia orgánica	0	m ³ /d	
Producción de biogás a partir del tratamiento de ultrasonido	0	m ³ /d	
Producción total de biogás	7,874	m ³ /d	
	2,874,130	m ³ /año	
Producción total de biogás específico	27	L/PE _{co} /d	
	18	L/cap/d	
• Contenido de metano del biogás			
Metano presente en el biogás a partir del PS+WAS	65	% CH ₄	Tipicamente: 65 (60-70%) [2,3,4,6]
Metano presente en el biogás a partir de materia prima orgánica	60	% CH ₄	Seleccione el valor apropiado del menú desplegable o use datos provenientes de otras fuentes [2,3,8]
Metano en la producción total de biogás	65.0	% CH ₄	
ENERGÍA A PARTIR DE BIOGÁS			
Valor calorífico del biogás	6.5	kWh/m ³	
• Generación de electricidad			
CHP: Eficiencia de la generación de energía eléctrica	38	%	Tipicamente: cogeneración: 30-40%, microturbina: 28-33%, o véase la figura [2,3]
Generación de electricidad a partir de biogás	19,450	kWh/d	
	24.3	kWh/PE _{co} /año	
	7,099,101	kWh/año	
Consumo de electricidad de CAS-WWTP	35	kWh/PE _{co} /año	Tipicamente: 20-50 [2], o véase la tabla [2,10]
	27,993	kWh/d	
	10,217,276	kWh/año	
Cobertura de electricidad de la planta de tratamiento (WWTP) a partir del biogás	69%	% de consumo	
• Generación de energía térmica			
CHP: Eficiencia de la generación de energía térmica	50	%	Tipicamente: 50 (50-55)% [2,3]
Generación de energía térmica	25,592	kWh/d	
	9,340,922	kWh/año	
REDUCCIÓN DE LAS EMISIONES DE GAS DE EFECTO INVERNADERO (GEI)			
Emisiones de GEI locales a partir de la generación de electricidad	607	g CO ₂ /kWh	
Producción de electricidad a partir de biogás renovable	7,099,101	kWh/año	
Reducción de las emisiones de GEI por medio de electricidad a partir de biogás	-4,309	toneladas de CO ₂ /año	Esta es la emisión de CO ₂ fósil (evitada) que se evade a través de la utilización de biogás renovable para la generación de energía.
Eliminación de las emisiones de GEI provenientes del digestor	0	toneladas de CO ₂ /año	El biogás en cuestión se puede tomar en consideración únicamente si la emisión del mismo ocurrió antes de este proyecto; si el biogás es generado y utilizado por el proyecto, este no se puede considerar como una reducción de emisión.
Reducción total de la emisión de GEI	-4,309	toneladas de CO ₂ /año	
AHORROS DE GASTOS DE FUNCIONAMIENTO			
Tarifa eléctrica	0.11	US\$/kWh	
Reducción del costo de electricidad	-2,139	US\$/d	(El ahorro es equivalente a la producción de electricidad a partir del biogás)
	-780,901	US\$/año	
Reducción del costo de aireación en el tanque de aireación	-5,039	kWh/d	(El valor, el cual se calcula aquí, se basa en la comparación con la aireación extendida sin PST. Se toman en cuenta los supuestos siguientes: (i) la aireación requiere 60% del total del consumo de electricidad de la WWTP, (ii) la introducción de PST reduce el requerimiento de aireación de acuerdo con su eficiencia de remoción de la demanda biológica de oxígeno.)
	-1,839,110	kWh/año	
	-202,302	US\$/año	
Costo unitario de evacuación de lodo	10.00	US\$/m ³	
Reducción del costo de evacuación de lodo	-38.2	m ³ /d	
	-13,953	m ³ /año	
	-139,527	US\$/año	
Costo por año de mano de obra adicional	10,000	US\$/personal/año	
	54,735	US\$/año	(El valor que aquí se calcula se basa en los supuestos siguientes: (i) una planta WWTP occidental y moderna requiere adicionalmente de 0.5 USD/PE _{co} /a para ejecutar un sistema de digestión, (ii) la WWTP de este proyecto requerirá 50% más de personal que una planta occidental debido a eficiencias no óptimas, (iii) el costo TOTAL de una planta WWTP occidental se asume en 40,000 US\$/año)
Costo de mantenimiento adicional	56,231	US\$/año	(El valor que aquí se calcula se basa en los supuestos siguientes: (i) El costo de mantenimiento adicional equivale a 1%/año del requerimiento CAPEX europeo para un sistema de mesófilos para digestión de lodos, (ii) el requerimiento CAPEX europeo para un sistema de digestión equivale a 81098 x PE60 ^(+0.644) , (iii) EUR/US\$ = 1.3)
Ahorro total de gastos de funcionamiento	-1,011,769	US\$/año	
REQUISITOS DE INSTALACIÓN			
Sedimentador primario	4,639	m ³	
Tratamiento previo de residuos orgánicos	NO	---	
Instalaciones de desintegración de lodo por ultrasonido	NO	---	
Reducción del volumen en el tanque de aireación	-30%	%	
Volumen del digestor	19,645	m ³	
Almacenador de biogás	1,575	m ³	
Potencia total de energía eléctrica (CHP)	972	kW	Supuesto: tiempo de operación promedio = 20 h/d
	486	kW / unidad	Basado en 2 unidades
Limpieza de biogás	---	---	
Sistema de tuberías de biogás, brote, etc.	---	---	



ANEXO 2

Línea de base	Proyectos potenciales	Metodologías aplicables	Cálculo simplificado de emisiones de base y proyecto	Comentarios
Tratamiento anaeróbico sin sistema de recuperación de metano	Implementación de un sistema de captura y utilización o quemado de metano	AMS III.H, ACM0014	BE = Q x COD _d x MCF x B ₀ x GWP _{CH4} x UF PE = Q x COD _d x B ₀ x GWP _{CH4} x L - EG x EF	Las emisiones del proyecto se deben a fugas e ineficiencias en la captura y quemado del biogás y a las emisiones por consumo de energía (EG x EF).
	Reemplazo por un sistema aeróbico	AMS III.I	BE = Q x COD _d x MCF x B ₀ x GWP _{CH4} x UF PE = Q x COD _d x MCF x B ₀ x GWP _{CH4} + EC x EF + S x DOC x MCF _S x DOC _F x F x 16/12 x GWP _{CH4}	Se considera que el lodo generado en el proyecto es tratado anaeróbicamente sin recuperación de metano. De lo contrario, no debe tenerse en cuenta el 3 ^{er} término de PE (S x DOC x MCF _S ...).
	Introducción de una primera etapa de tratamiento anaeróbica con recuperación de metano	AMS III.H, ACM0014	BE = Q x COD _d x MCF x B ₀ x GWP _{CH4} x UF PE = (0,14 + 0,25 x MCF) x Q x COD x B ₀ x GWP _{CH4} - EG x EF	P. ej. Introducción de un reactor anaeróbico con recuperación de metano anterior a un sistema existente de lagunas anaeróbicas. Se supone que en el reactor anterior se degrada 70% de la materia orgánica recibida y otro 25% en la laguna existente. El MCF corresponde a la laguna existente (ver cuadro B).
	Co-compostaje con residuos sólidos orgánicos	AMS III.F, AM0039	BE = Q x COD _d x MCF x B ₀ x GWP _{CH4} x UF PE = EC x EF	El agua residual se utiliza como fuente de humedad y nutrientes en el proceso de compostaje.
Tratamiento aeróbico (con aireación forzada)	Reemplazo por un sistema de tratamiento anaeróbico con recuperación de metano	AMS III.H	BE = (Q x COD _d x MCF x B ₀ + S x DOC x MCF _S x DOC _F x F x 16/12) x GWP _{CH4} x UF + EC x EF PE = Q x COD _d x B ₀ x GWP _{CH4} x L - EG x EF	A la cantidad de lodo generado en la línea de base (S) debe restársele lo que se estima que generará el proyecto. De esta forma sólo se incluye la generación adicional del sistema aeróbico. Se considera que el lodo generado en el tratamiento aeróbico de base es tratado anaeróbicamente (o dispuesto en un relleno sanitario) sin recuperación de metano; de lo contrario, no debe considerarse el segundo término de la primera parte de la ecuación (S x DOC x ... x 16/12).
Descarga directa a un curso de agua anóxico	Implementación de un sistema de tratamiento anaeróbico con recuperación de metano	AMS III.H	BE = Q x COD x MCF x B ₀ x GWP _{CH4} x UF PE = Q x COD x B ₀ x GWP _{CH4} x L - EG x EF	El MCF (ver cuadro B) de la línea de base corresponde al sitio de descarga. Para lograrse una reducción de emisiones, el proyecto debe incluir generación de energía para exportar.
Lodo no tratado se dispone en un relleno sanitario	Implementación de un sistema de combustión de lodos	AMS III.D	BE = S x DOC x MCF _S x DOC _F x F x 16/12 x UF x GWP _{CH4} PE = EC x EF	El MCF _S de la línea de base corresponde al del relleno sanitario donde se dispone (cuadro E). La energía consumida por el proyecto debe incluir el combustible auxiliar utilizado durante la combustión (además del combustible para otros usos y la electricidad). El proyecto debe contemplar el control de la calidad de los gases emitidos por el sistema de combustión, ya que éstos pueden presentar riesgos ambientales.
	Implementación de un sistema de compostaje	AMS III.F	BE = S x DOC x MCF _S x DOC _F x F x 16/12 x UF x GWP _{CH4} PE = Q x EC x EF	El MCF _S de la línea de base corresponde al del relleno sanitario donde se dispone (cuadro E). La energía consumida por el proyecto corresponde al gasto en transporte y movimiento del lodo.
Digestión aeróbica de los lodos generados	Implementación de un sistema de digestión anaeróbica con recuperación de metano	AMS III.H	BE = S x DOC x MCF _S x DOC _F x F x 16/12 x UF x GWP _{CH4} + EC x EF PE = S x DOC x DOC _F x F x 16/12 x L - EG x EF	El MCF _S de la línea de base (cuadro E) corresponde al de una planta de tratamiento aeróbica (bien o mal gestionada o sobrecargada, según sea el caso).
Tratamiento anaeróbico de los lodos generados	Reemplazo por un sistema aeróbico	ACM0014	BE = Q x COD _d x MCF x B ₀ x GWP _{CH4} x UF PE = Q x COD _d x MCF x B ₀ x GWP _{CH4} + EC x EF	El MCF corresponde al sistema de tratamiento según el cuadro B. Este tipo de proyectos es viable cuando en la matriz energética de la red eléctrica predominan las fuentes que emiten no CO ₂ (por ej. hidroeléctrica).
	Introducción de un sistema de recuperación de metano	ACM0014	BE = Q x COD _d x MCF x B ₀ x GWP _{CH4} x UF PE = Q x COD _d x B ₀ x GWP _{CH4} x L	El MCF corresponde al sistema de tratamiento según el cuadro B.

Fuente: (Nolasco, 2010)

**ANEXO 3****Consumo eléctrico para PTAR en función de su tamaño**

Treatment Plant Size million gallons/day (cubic meters per day)	Unit Electricity Consumption kWh/million gallons (kWh/cubic meter)			
	Trickling Filter	Activated Sludge	Advanced Wastewater Treatment	Advanced Wastewater Treatment Nitrification
1 MM gal/day (3,785 m ³ /d)	1,811 (0.479)	2,236 (0.591)	2,596 (0.686)	2,951 (0.780)
5 MM gal/day (18,925 m ³ /d)	978 (0.258)	1,369 (0.362)	1,573 (0.416)	1,926 (0.509)
10 MM gal/day (37,850 m ³ /d)	852 (0.225)	1,203 (0.318)	1,408 (0.372)	1,791 (0.473)
20 MM gal/day (75,700 m ³ /d)	750 (0.198)	1,114 (0.294)	1,303 (0.344)	1,676 (0.443)
50 MM gal/day (189,250 m ³ /d)	687 (0.182)	1,051 (0.278)	1,216 (0.321)	1,588 (0.423)
100 MM gal/day (378,500 m ³ /d)	673 (0.177)	1,028 (0.272)	1,188 (0.314)	1,558 (0.412)

Fuente: (Goldstein & Smith, 2002)



BIBLIOGRAFÍA

- Abbasi, T., Tauseef, S. M., & Abbasi, S. A. (2012). A Brief History of Anaerobic Digestion and “ Biogas ” Introduction : Discovery of Biogas. *SpringerBriefs in Environmental Science* 2, 11–24. <https://doi.org/10.1007/978-1-4614-1040-9>
- Acosta, Y. L., & Obaya Abreu, M. C. (2005). La digestión anaerobia. Aspectos teóricos. Parte I. *ICIDCA. Sobre Los Derivados de La Caña de Azúcar* 2005 XXXIX, 15.
- Agencia de Recursos Renovables-Alemania. (2010). *Guía sobre el Biogás Desde la Producción hasta el Uso. Agencia de Recursos Renovables.*
- AGRO WASTE. (n.d.). Digestión anaerobia, 9.
- Alianza por el Agua. (2008). Manual de depuración de aguas residuales urbanas. *Centa, Secretariado de Alianza Por El Agua, Ecología Y Desarrollo.*, 264. <https://doi.org/Z-2802/08>
- American Biogas Council. (2016). Current and Potential Biogas Production. Retrieved November 24, 2016, from www.americanbiogascouncil.org
- Baquero, M. T., & Quesada, F. (2016). Eficiencia Energética en el Sector Residencial de la ciudad de Cuenca, Ecuador. *Maskana*, 7(2), 147–165.
- Barragán E., A., & Espinoza A., J. L. (2015). Políticas para la promoción de las energías renovables en el Ecuador. In *Energías renovables en el Ecuador. Situación actual, tendencias y perspectivas* (p. 28).
- Berkday, A., & Nas, B. (2007). Biogas Production and Utilization Potential of Wastewater Treatment Sludge. *Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects*, (November 2014), 179–188. <https://doi.org/10.1080/00908310600712489>



- Bermeo Pazmiño, A. (2014). *Incidencia De Los Resultados De La Regularización Ambiental Por Efluentes Industriales En La Capacidad Proyectada De La Planta De Tratamiento De Aguas Residuales De Ucubamba*. Universidad del Azuay.
- CEIC. (2011). Estudio básico del biogás. *Agencia Andaluza de La Energía*, 166.
- Chamy, R., & Vivanco, E. (2007). *Potencial de biogás*.
- Chen, L., & Neibling, H. (2014). *Anaerobic Digestion Basics*, 1–6.
- CONAGUA. (2007). Manual de Agua Potable, Alcantarillado y Saneamiento “Datos Básicos Para Proyectos de Agua Potable y Alcantarillado,” 92.
- Díaz-Báez, M. C., Espitia Vargas, S. E., & Molina Perez, F. (2002). *Digestión Anaerobia*.
- Espinosa C., M. F., & Campoverde O., M. A. (2013). Evaluación del desempeño de los espesadores a gravedad de la planta de aguas residuales de Ucubamba, 66.
- Garzón, A., & Ortiz, G. (2017). *AJUSTE DE UN MODELO MATEMÁTICO PARA DETERMINAR EL COMPORTAMIENTO DE LAS LAGUNAS DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES DE UCUBAMBA*.
- German Association for Water Wastewater and Waste. (2003). *Biological Stabilisation of Sewage Sludge. Water*.
- Global Methane Initiative. (2010). Emisiones Mundiales de Metano y Oportunidades de Atenuación, 1–4.
- Global Methane Initiative. (2016). Herramienta de evaluación tecnológica de la producción de biogás a partir de aguas residuales (BioWATT).
- Goldstein, R., & Smith, W. (2002). *Water & Sustainability (Volume 4): U.S.*



Electricity Consumption for Water Supply & Treatment - The Next Half Century. Water Supply (Vol. 4).

<https://doi.org/10.1017/CBO9781107415324.004>

Gómez Muñoz, S. (2012). *Diseño, construcción y puesta en marcha de un biodigestor tubular.*

Guevara Vera, A. (1996). *Fundamentos básicos para el diseño de biodigestores anaeróbicos rurales.pdf.*

IEA Bioenergy Task 37. (2015). *IEA Bioenergy Task 37 Country Reports Summary 2015.* <https://doi.org/978-1-910154-11-3>

INAMHI. (2015). *Boletín climatológico mensual* (Vol. 31). Quito. Retrieved from <http://www.serviciometeorologico.gob.ec/clima/>

INEC. (2010). *Proyecciones poblacionales.* Retrieved August 21, 2017, from <http://www.ecuadorencifras.gob.ec/proyecciones-poblacionales/>

Lombarte, M., Villalonga, C., & Margarit, M. (2011). *Unidad 2 Propiedades de los combustibles gaseosos Unidad 2 Propiedades de los combustibles gaseosos.*

MAE, MEER, CENACE, & CONELEC. (2013). *Factor de emisión de CO2 del SNI del Ecuador.* Quito.

Metcalf, E., & Eddy, H. (2003). *Wastewater engineering: treatment and reuse. Tata McGraw-Hill Publishing Company Limited, 4th Edition. New Delhi, India.* [https://doi.org/10.1016/0309-1708\(80\)90067-6](https://doi.org/10.1016/0309-1708(80)90067-6)

MICSE. (2015). *Balance Energético Nacional 2015.*

Ministerio de Energía de Chile. (2011). *Manual de biogás.*

Nadaletti, W. C., Cremonez, P. A., De Souza, S. N. M., Bariccatti, R. A., Belli Filho, P., & Secco, D. (2015). *Potential use of landfill biogas in urban bus*



- fleet in the Brazilian states: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 41, 277–283. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.08.052>
- Nasqueo Enviroment. (2017). The biogas - Biogas composition. Retrieved from http://www.biogas-renewable-energy.info/biogas_composition.html
- Nolasco, D. A. (2010). *Desarrollo de proyectos MDL en plantas de tratamiento de aguas residuales. Banco Interamericano de Desarrollo* (Vol. Nota Técnica).
- NREL. (2013). Biogas Potential in the United States, 1–4. <https://doi.org/NREL/FS-6A20-60178>
- Ortiz V., M. A. (2014). *Estudio Comparativo del Uso del Diesel Entre Europa y Ecuador , Utilizado para Motores de Vehículos . Mario Andrés Ortiz Vallejo Facultad de Ingeniería en Mecánica Automotriz Universidad Internacional del Ecuador Certificado de autenticidad* : Retrieved from <http://repositorio.uide.edu.ec/bitstream/37000/610/1/T-UIDE-0560.pdf>
- Sarango, D., & Moncayo, P. (2016). *Determinación del indicador kilómetros-vehículo recorrido (KVR) para la ciudad de Cuenca*. Retrieved from <http://dspace.ups.edu.ec/bitstream/123456789/12152/1/UPS-CT006103.pdf>
- Sieger, R., Hill, C. H. M., Brady, P., Technology, A., Donovan, J., Reviewer, P., ... Hill, C. H. M. (2004). High Performance Anaerobic Digestion White Paper on High Performance Anaerobic Digestion, (January), 1–17.
- Torres C., A., Garza N., M. A., Ortiz M., U., & González G., I. (2015). Candelilla del semidesierto mexicano como fuente de biocombustible. *Ingenierías*, XVIII(69), 22–29.
- United Nations Environment Programme UNEP. (2009). Environmental Data



Explorer. Retrieved June 22, 2017, from <http://geodata.grid.unep.ch/>

Universidad Nacional de Córdoba. (2014). *Tablas y Ábacos para resolución de trabajos prácticos.*

Verma, S. (2002). *Biodegradable organics in municipal solid wastes.*

Vögeli, Y., Riu Lohri, C., Gallardo, A., Diener, S., & Zurbrügg, C. (2014).

Anaerobic Digestion of Biowaste in Developing Countries.

Willis, J., Stone, L., Durden, K., Beecher, N., Hemenway, C., & Greenwood, R.

(2012). *Barriers to Biogas Use for Renewable Energy.*