

ENERGÍA A PARTIR DE LAS AGUAS RESIDUALES



11/10/2010

Diferentes alternativas a los procesos de los tratamientos de aguas residuales para obtener energía ecológicamente limpia

El objetivo de este trabajo es describir los diferentes procesos que existen a nivel mundial para tratar las aguas residuales urbanas y, de paso, obtener energía limpia. Las posibilidades son múltiples: biogás, climatización con el calor constante del agua, o electricidad a partir de las bacterias de los residuos o mediante su uso en centrales hidroeléctricas

Editorial de la Universidad Tecnológica Nacional – edUTecNe

<http://www.edutecne.utn.edu.ar>

edutecne@utn.edu.ar

CONTENIDO

CONTENIDO	1
DEFINICIONES.....	3
Objetivo del trabajo:	3
TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES	5
El problema ambiental. Impactos:.....	6
Impactos Directos.....	6
Impactos Indirectos.....	6
Impactos Estéticos	7
Medición de impactos.....	7
Cuadro de contaminantes típicos del agua.....	7
MICROBIOS PARA LIMPIAR EL AGUA Y OBTENER ENERGÍA	8
Introducción.....	8
Principio de funcionamiento de una pila de combustible	8
Las celdas de Combustible Microbianas.....	13
Introducción.....	13
Principio de funcionamiento.....	15
Inóculos utilizados en las celdas de combustibles microbianas.....	17
Producción de energía de la celda	20
La celda de combustible en las plantas de tratamiento de aguas residuales.....	23
Otros Avances en las pilas microbianas.....	24
APROVECHAMIENTO ANAERÓBICO DEL TRATAMIENTO SECUNDARIO.....	26
Ventajas y fundamentos del tratamiento anaerobio.	26
Biogás	26
Bioquímica del Proceso.....	26
Diferentes procesos de tratamiento anaeróbico.....	27
Reactores Anaeróbicos.....	28
Metodología de operación y evaluación del proceso.....	31
Puesta en marcha del proceso	31
Guía para la primera puesta en marcha de un reactor UASB, usando lodo de desagüe digerido como semilla (inoculo)	31
Seguimiento de la Biodigestión.....	31
Tipos de Reactores anaeróbicos:.....	32
Reactor de flujo ascendente:.....	32
El reactor tipo EASA.....	39
Ventajas del reactor tipo EASA.....	39
El Biogás como Subproductos del tratamiento anaeróbico	41
Producción promedio de biogás:.....	41
Características.....	42
Consumo de biogás típico.....	42
Purificación.....	42
Planta de tratamiento de aguas con un sistema de cogeneración para la producción de electricidad y calor.....	43

Resumen.....	43
Contexto	43
Proceso	43
Resultados	44
Descripción técnica	44
Datos energéticos	45
OTRAS FORMAS DE EXTRAER ENERGÍA DE LAS AGUAS RESIDUALES.	47
Utilización como calefacción/Refrigeración.....	47
Bomba de Calor: Principio de funcionamiento.	47
Rendimiento.....	48
Usos	49
Capacidad calorífica específica	49
Aguas residuales para Calefacción doméstica.	49
Potencial enorme	52
Mercado prometedor	52
Factores económicos.....	52
Centrales Hidroeléctricas.....	54
Introducción	54
Generalidades.....	54
Ventajas.....	55
CONCLUSIONES.....	56
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	58
ÍNDICE DE ILUSTRACIONES	62

Energía a partir de las aguas residuales

DIFERENTES ALTERNATIVAS A LOS PROCESOS DE LOS TRATAMIENTOS DE AGUAS RESIDUALES PARA OBTENER ENERGÍA ECOLÓGICAMENTE LIMPIA

DEFINICIONES.

El agua residual, también llamada negra o fecal, es la que usada por el hombre ha quedado contaminada. Lleva en suspensión una combinación de heces fecales y orina, de las aguas procedentes del lavado con detergentes del cuerpo humano, de su vestimenta y de la limpieza, de desperdicios de cocina y domésticos, etc.

También recibe ese nombre los residuos generados en la industria. El crecimiento de las ciudades y las fábricas, ha contribuido a la magnitud y complejidad del problema de la contaminación ambiental, generando situaciones de costosa corrección, poniendo en peligro la salud pública, encareciendo el proceso de potabilización y degradando el medio.

Objetivo del trabajo:

Sabemos que existen muchas posibilidades de reducir el costo de la energía utilizada en el proceso de tratamiento de aguas residuales. Por lo tanto es natural considerar la importancia de la instrumentación de medidas de eficiencia energética en las plantas de tratamiento de aguas residuales, ya que este proceso muchas veces representa del 25 al 50% del presupuesto operativo de una planta. Algunos procesos consumen más energía que otros y deberán recibir una atención más cuidadosa. Por ejemplo, en una planta de tratamiento de lodos activados, la fase biológica representa del 30 al 80% de los costos de energía de la planta.

El objetivo de este trabajo es describir los diferentes procesos que existen a nivel mundial para tratar las aguas residuales urbanas y, de paso, obtener energía limpia. Las posibilidades son múltiples: biogás, climatización con el calor constante de esta agua, o electricidad a partir de las bacterias de los residuos o mediante su uso en centrales hidroeléctricas.

Nuestro trabajo intenta mostrar que en ocasiones estas plantas pueden producir energía utilizando los procesos existentes. Por ejemplo, la opción de digestión anaeróbica para el procesamiento del lodo cloacal produce metano, que puede quemarse como una fuente de combustible. La captura del gas de digestor puede producir tanto calor como electricidad, a través de la cogeneración. Además, la instalación de una turbina para generar electricidad en la descarga del efluente puede generar energía hidroeléctrica en ciertas instalaciones. Las plantas con un flujo de 57 millones de litros (15 millones de galones) por día y una caída vertical de 5 metros pueden ser candidatas a la generación de energía hidroeléctrica por efluente, generando aproximadamente 24 kW de energía.

Si bien todas algunas de estas tecnologías no son de uso habitual, varias ciudades utilizan ya alguno de estos sistemas. Por ejemplo: en Alemania, los habitantes de Wolfsburg disponen de un sistema que extrae energía de diversas maneras a partir de las aguas residuales urbanas. El tratamiento de estos desechos líquidos permite obtener biogás, que se puede aprovechar en la propia planta depuradora, en instalaciones de generación eléctrica o incluso como combustible para vehículos. Asimismo, gracias a la energía térmica para el secado de los lodos de depuración, se obtiene un **combustible** sustitutivo con un poder calorífico similar al lignito. En ninguno de los casos se utiliza energía fósil, por lo que se evita su impacto en el cambio climático.

También aseguran que el agua residual depurada en esta instalación puede ser utilizada también en usos agrícolas. Por un lado, se pueden obtener sustancias como nitrógeno y fosfato como complemento a abonos durante el periodo de vegetación, por otro lado, las aguas tratadas sin estos nutrientes pueden abastecer a los sistemas de riego, evitando acudir a las aguas subterráneas.

TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES

El tratamiento de las aguas residuales consiste en una serie de procesos físicos, químicos y biológicos que tienen como fin eliminar los contaminantes físicos, químicos y biológicos presentes en el agua efluente del uso humano. El objetivo del tratamiento es producir agua limpia (o efluente tratado) o reutilizable en el ambiente y un residuo sólido o fango (también llamado biosólido o lodo) convenientes para su disposición o reuso. Es muy común llamarlo depuración de aguas residuales para distinguirlo del tratamiento de aguas potables.

Típicamente, el tratamiento de aguas residuales comienza por la separación física inicial de sólidos grandes (basura) de la corriente de aguas domésticas o industriales empleando un sistema de rejillas (malllas), aunque también pueden ser triturados esos materiales por equipo especial; posteriormente se aplica un desarenado (separación de sólidos pequeños muy densos como la arena) seguido de una sedimentación primaria (o tratamiento similar) que separa los sólidos suspendidos existentes en el agua residual. A continuación sigue la conversión progresiva de la materia biológica disuelta en una masa biológica sólida usando bacterias adecuadas, generalmente presentes en estas aguas. Una vez que la masa biológica es separada o removida (proceso llamado sedimentación secundaria), el agua tratada puede experimentar procesos adicionales (tratamiento terciario) como desinfección, filtración, etc. Este efluente final puede ser descargado o reintroducidos de vuelta a un cuerpo de agua natural (corriente, río o bahía) u otro ambiente (terreno superficial, subsuelo, etc). Los sólidos biológicos segregados experimentan un tratamiento y neutralización adicional antes de la descarga o reutilización apropiada.

En la Figura 1 podemos ver un esquema típico del tratamiento de aguas.

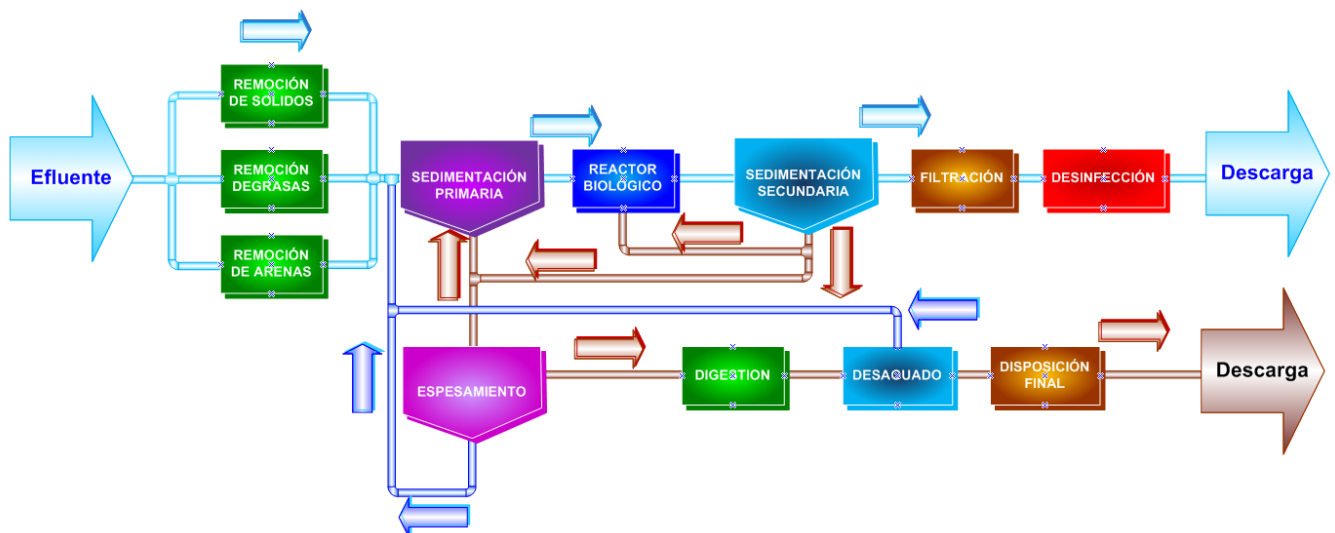


FIGURA 1: ESQUEMA DE UNA PLANTA CONVENCIONAL DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES.

Estos procesos de tratamiento son típicamente referidos a un:

- Tratamiento primario (asentamiento de sólidos)
- Tratamiento secundario (tratamiento biológico de la materia orgánica disuelta presente en el agua residual, transformándola en sólidos suspendidos que se eliminan fácilmente)
- Tratamiento terciario (pasos adicionales como lagunas, micro filtración o desinfección)

El tratamiento de las aguas residuales, a nivel del tratamiento secundario se revela como un campo promisor a la disposición de los ingenieros e investigadores, principalmente los sistemas de bajo costo de

implantación, para competir con el grave panorama de la polución de los cuerpos receptores de agua, o también del reúso inadecuado de los desagües crudos, en los países en desarrollo.

El problema ambiental. Impactos:

Los problemas básicos que genera la contaminación del agua los podemos agrupar en tres tipos:

Impactos Directos.

Transmisión de enfermedades (aguas de consumo o de recreación o irrigación de alimentos o toxicidad). Los contaminantes de las aguas servidas municipales, o aguas servidas domésticas, son los sólidos suspendidos y disueltos que consisten en: materias orgánicas e inorgánicas, nutrientes, aceites y grasas, sustancias tóxicas, y microorganismos patógenos. Los desechos humanos sin un tratamiento apropiado, eliminados en su punto de origen o recolectados y transportados, presentan un peligro de infección parasitaria (mediante el contacto directo con la materia fecal), hepatitis y varias enfermedades gastrointestinales, incluyendo el cólera y tifoidea (mediante la contaminación de la fuente de agua y la comida). Cabe mencionar que el agua de lluvia urbana puede contener los mismos contaminantes, a veces en concentraciones sorprendentemente altas.

Los proyectos de aguas servidas son ejecutados a fin de evitar o aliviar los efectos de los contaminantes descritos anteriormente en cuanto al ambiente humano y natural. Cuando son ejecutados correctamente, su impacto total sobre el ambiente es positivo.

Los impactos directos incluyen la disminución de molestias y peligros para la salud pública en el área de servicio, mejoramientos en la calidad de las aguas receptoras, y aumentos en los usos beneficiosos de las aguas receptoras. Adicionalmente, la instalación de un sistema de recolección y tratamiento de las aguas servidas posibilita un control más efectivo de las aguas servidas industriales mediante su tratamiento previo y conexión con el alcantarillado público, y ofrece el potencial para la reutilización beneficiosa del efluente tratado y de los fangos.

Impactos Indirectos

Cuando las aguas servidas son recolectadas pero no tratadas correctamente antes de su eliminación o reutilización, existen los mismos peligros para la salud pública en las proximidades del punto de descarga. Si dicha descarga es en aguas receptoras, se presentarán peligrosos efectos adicionales (p.ej. el hábitat para la vida acuática y marina es afectada por la acumulación de los sólidos; el oxígeno es disminuido por la descomposición de la materia orgánica; y los organismos acuáticos y marinos pueden ser perjudicados aún más por las sustancias tóxicas, que pueden extenderse hasta los organismos superiores por la bio-acumulación en las cadenas alimenticias). Si la descarga entra en aguas confinadas, como un lago o una bahía, su contenido de nutrientes puede ocasionar la eutrofización, con molesta vegetación que puede afectar a las pesquerías y áreas recreativas. Los desechos sólidos generados en el tratamiento de las aguas servidas (grava, cerniduras, y fangos primarios y secundarios) pueden contaminar el suelo y las aguas si no son manejados correctamente. Resumiendo: Existe un mayor consumo de productos químicos para el tratamiento de las aguas de consumo o industrial, menor productividad en agua para la agricultura, menor valor de propiedades costeras, afectación de recursos pesqueros y deterioro de estructuras y embarcaciones. Los impactos indirectos del tratamiento de las aguas residuales deben incluir la provisión de sitios de servicio para el desarrollo, mayor productividad y rentas de las pesquerías, mayores actividades y rentas turísticas y recreativas, mayor productividad agrícola y forestal o menores requerimientos para los fertilizantes químicos, en caso de ser reutilizado el efluente y los fangos, y menores demandas sobre otras fuentes de agua como resultado de la reutilización del efluente.

Impactos Estéticos

Va a existir una alteración del aspecto naturalmente agradable que debe presentar el cuerpo superficial, e imposibilidad de usarlo con fines recreativos.

Medición de impactos

De éstos, varios potenciales impactos positivos se prestan para la medición, por lo que pueden ser incorporados cuantitativamente en el análisis de los costos y beneficios de varias alternativas al planificar proyectos para las aguas servidas. Los beneficios para la salud humana pueden ser medidos, por ejemplo, mediante el cálculo de los costos evitados, en forma de los gastos médicos y días de trabajo perdidos que resultarían de un saneamiento defectuoso. Los menores costos del tratamiento de agua potable e industrial y mayores rentas de la pesca, el turismo y la recreación, pueden servir como mediciones parciales de los beneficios obtenidos del mejoramiento de la calidad de las aguas receptoras. En una región donde es grande la demanda de viviendas, los beneficios provenientes de proporcionar lotes con servicios pueden ser reflejados en parte por la diferencia en costos entre la instalación de la infraestructura por adelantado o la adecuación posterior de comunidades no planificadas.

A menos que sean correctamente planificados, ubicados, diseñados, construidos, operados y mantenidos, es probable que los proyectos de aguas servidas tengan un impacto total negativo y no produzcan todos los beneficios para los cuales se hizo la inversión, afectando además en forma negativa a otros aspectos del medio ambiente.

Cuadro de contaminantes típicos del agua

Es necesario conocer los distintos tipos de contaminantes que encontramos en las aguas residuales y los efectos que estos causan en el cuerpo de vertido. Los mismos los encontramos descriptos en la Tabla 1: Típicos Contaminantes del agua.

TABLA 1: TÍPICOS CONTAMINANTES DEL AGUA.

Contaminantes	Razón de la Importancia
Sólidos	Los sólidos sedimentables pueden dar lugar al desarrollo de depósitos de fango y de Condiciones anaeróbicas Cuando se Vierte agua residual sin tratar al entorno acuático. O en el caso de Que sean sólidos suspendidos pueden causar turbiedad e incluso impedir el ingreso de los rayos solares a los cuerpos de agua.-
Materia orgánica biodegradable	Compuesta principalmente por proteínas, carbohidratos, grasa y aceites... Si los efluentes se descargan al entorno sin tratar, puede llevar al Agotamiento de los recursos naturales de oxígeno y desarrollo de condiciones sépticas.-
Nutrientes	Tanto el nitrógeno como del fósforo, son nutrientes esenciales para el crecimiento. Cuando se vierten al entorno acuático, estos nutrientes pueden favorecer al crecimiento desmedido de una vida acuática no deseada. Cuando se Vierten al terreno en cantidades excesivas también puede provocar la contaminación del agua subterránea.-
Metales pesados	Los metales pesados son, frecuentemente añadidos al agua residual como excedente de ciertas actividades industriales, estos metales presentan distintos niveles de toxicidad.
Materia orgánica refractaria	Esta materia orgánica tiende a resistir los métodos convencionales de tratamiento. Ejemplos típicos son los agentes tensioactivos, los fenoles y pesticidas agrícolas.-
Sustancias inorgánicas disueltos	Los constituyentes inorgánicos tales como el calcio, sodio, magnesio, potasio, sulfatos y otros pueden estar presentes en el agua como desecho de algunas actividades estos compuestos pueden ser tóxicos o darle ciertas características al agua no siempre deseada por lo que en muchas ocasiones deben ser removidos.-
Patógenos	Pueden transmitirse enfermedades contagiosas por medio de los organismos patógenos presentes en el agua residual. Proviene fundamentalmente de las redes cloacales y de alcantarillado.-

MICROBIOS PARA LIMPIAR EL AGUA Y OBTENER ENERGÍA

Introducción

La conversión de energía química en eléctrica es posible en ciertos dispositivos electroquímicos denominados células o pilas de combustible (Fuel Cells), donde la electricidad se obtiene a partir de una fuente externa de combustible química que suele ser hidrógeno o etanol. Algunos de los vehículos de transporte público de muchas ciudades del mundo desarrollado utilizan ya esta tecnología limpia que tiene al inocuo vapor de agua como único residuo.

Una variante reciente de esta célula de combustible es la célula de combustible microbiana (Microbial Fuel Cell, MFC). En las MFC se utilizan microorganismos para oxidar el combustible, materia orgánica, y transferir los electrones a un electrodo (ánodo), que está conectado a un cátodo a través de un material conductor que contiene una resistencia. Las cámaras que albergan estos electrodos, la anódica (anaerobia) y la catódica (aerobia), están comunicadas por una membrana de intercambio catiónico que permite el paso de protones. De esta forma, los protones generados en la oxidación de la materia orgánica se combinan con oxígeno y con los electrones que llegan al cátodo para formar agua. Existe también la posibilidad de alojar una pila de combustible en un hábitat natural y obtener energía eléctrica a partir de las comunidades microbianas naturales. En este caso, el diseño recibe el nombre de célula de combustible sedimentaria y requiere el enterramiento del ánodo en un sedimento anaerobio que hace las veces de cámara anódica, mientras que el cátodo queda expuesto en la fase acuosa aeróbica que cubre el sedimento.

Antes de entrar en más detalles nos detendremos para averiguar los principios de funcionamiento de la pila de combustible.

Principio de funcionamiento de una pila de combustible

Cuando se desarrollan distintas posibilidades de obtener energía eléctrica a partir de un combustible como vector energético primario, es de notar que en general, el combustible es el punto de partida, la generación debía entonces partir de una combustión con el fin de producir el primer paso. Hasta aquí la generación convencional térmica de la cual no redundaremos en mucha información.

Pero si se piensa en el tipo de reacción que es la combustión, en la cual un elemento (combustible) se oxida frente a otro que se reduce (comburente¹), se puede decir entonces que toda combustión es una reacción de **óxido – reducción**.

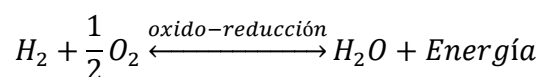
Analizando más el proceso, en ese tipo de reacción, la oxidación del elemento combustible consiste en la pérdida de uno o más electrones (de valencia) que son los que capta el elemento comburente al reducirse. O sea que se puede resumir considerando el proceso de combustión de un elemento combustible frente a otro comburente, como la cesión de electrones de uno a otro, y la liberación de energía (térmica en este caso).

Pero entonces, si para producir energía eléctrica, que consiste también en sostener un flujo de electrones, se parte de un proceso similar (óxido – reducción), es evidente que en los procesos descriptos, y a causa de los rendimientos de cada una de las transformaciones, el flujo de electrones obtenido finalmente nunca podrá ser ni siquiera igual al flujo original, del proceso primario (combustión).

¹ <http://es.wikipedia.org/wiki/Comburente>

Entonces, se podría decir que el mayor flujo de electrones que se puede obtener a partir de un combustible es justamente el que se produce en su combustión, por lo que si se pudiese efectuar la óxido reducción pero sin que entren en contacto directo combustible y comburente, y se pudiese tener un sistema que actúe como “intermediario” en el proceso, la cantidad de energía eléctrica que se obtendría (flujo de electrones en un circuito de carga) sería el máximo posible, es decir, sería la transformación con el mayor rendimiento posible.

Se puede analizar el caso más sencillo, el de la combustión de hidrógeno con oxígeno como comburente:



Entonces, si se pudiese lograr que el hidrógeno ceda su electrón a una parte del sistema, conectada eléctricamente con otra similar que sea capaz de ceder ese electrón al oxígeno en forma separada, y que los iones así formados puedan finalmente formar agua en un medio electrolito, se tendría solucionado el problema.

De esa forma, todo electrón cedido por el combustible que se oxida deberá pasar por un circuito eléctrico antes de llegar al comburente que se reduce.

El esquema funcional se muestra en la Figura 2

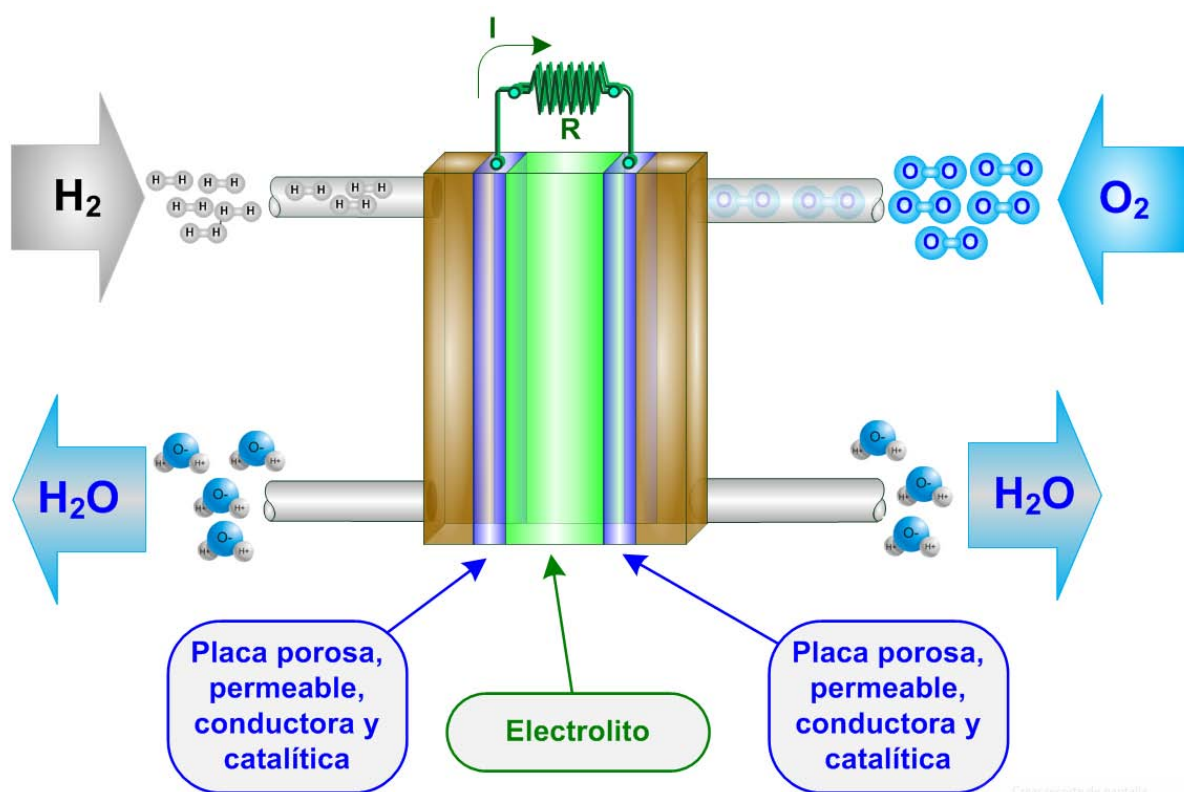


FIGURA 2: ESQUEMA FUNCIONAL DE UNA CELDA DE COMBUSTIBLE.

Las placas señaladas, además de semipermeables y conductoras, deben ser catalíticas. Ello significa que deben poseer la capacidad de adsorción, es decir, que en presencia del material de las mismas, las moléculas del combustible y comburente pasen a estado atómico, que es la forma en la cual realmente se producen las reacciones de óxido - reducción.

La propiedad de adsorción la presentan algunos elementos determinados, cuyas estructuras cristalinas, además de poseer electrones libres que proporcionen la conductibilidad eléctrica, dichos electrones tengan mayor afinidad que en las estructuras cristalinas metálicas normales para interactuar con electrones de valencia de átomos externos. Tal es el caso del Platino.

Asimismo, se requiere que el material además de catalítico y conductor, sea poroso semipermeable. Tal condición puede esquematizarse como se indica en la Figura 3:

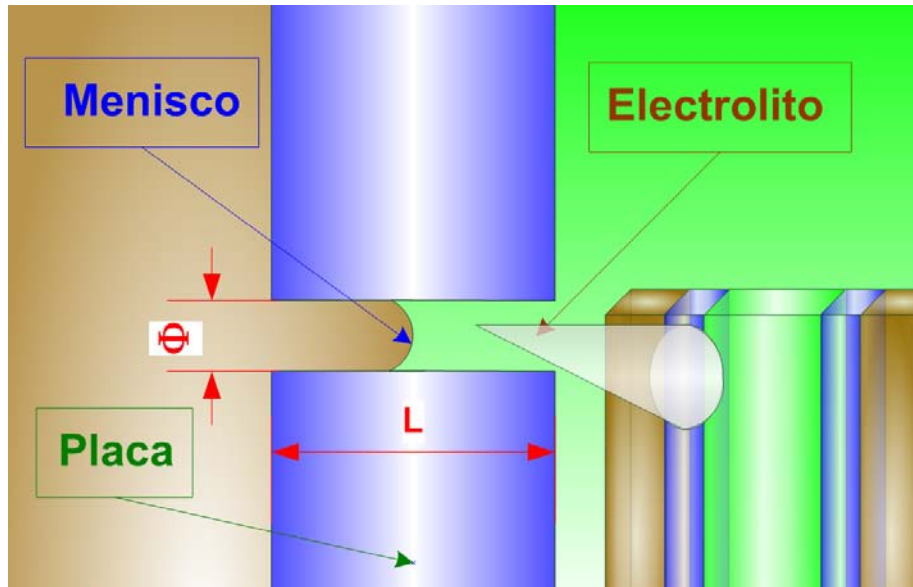


FIGURA 3: DETALLE DEL MATERIAL CATALÍTICO POROSO NECESARIO PARA LA PILA DE COMBUSTIBLE

La relación entre el diámetro $\varnothing$ de la porosidad, que en el esquema se supuso recta, y el largo de la misma L , debe ser tal que la capilaridad compense la diferencia de presiones entre el gas y líquido como para que el menisco quede en el medio y no burbujee el gas en el electrolito ni éste gotee en el recinto del gas.

La razón de ello se puede entender en el siguiente esquema, en el que se representa la un detalle aumentado superficie interna del poro en el lugar del menisco: (Figura 4)

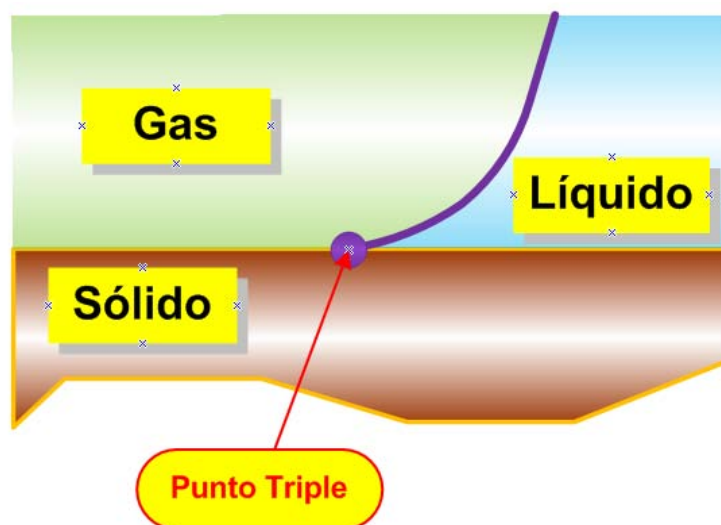
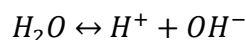


FIGURA 4: DETALLE AUMENTADO SUPERFICIE INTERNA DEL PORO EN EL LUGAR DEL MENISCO

Ese punto triple, que corresponderá al perímetro del menisco, será el escenario de las siguientes reacciones, considerando previamente que el electrolito, compuesto por agua, se puede entender de la siguiente manera:



Del lado del hidrógeno: (Figura 5)

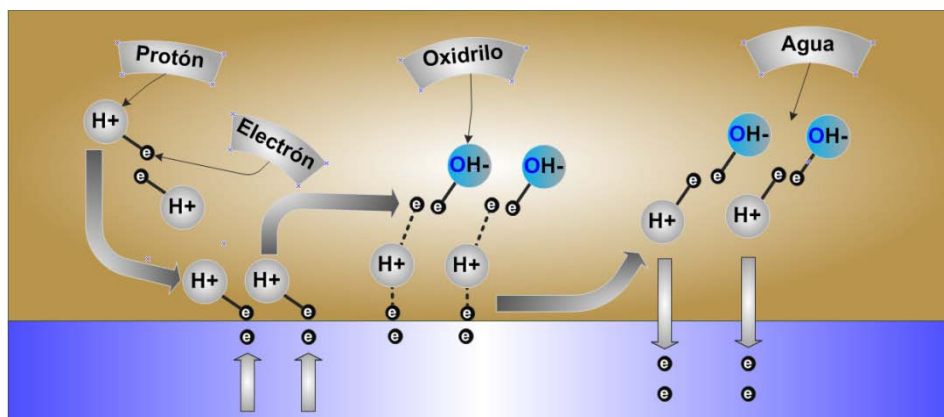
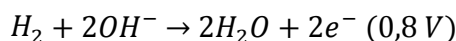


FIGURA 5: PASAJE DE ELECTRONES DEL LADO DEL HIDRÓGENO

O sea que la ecuación correspondiente en esta placa será:



En la molécula de hidrógeno, cada átomo tiene mayor afinidad con uno de los electrones de la red cristalina que con el de su vecino, por lo que queda adsorbido a la superficie sólida, pero ya en estado atómico, es decir, como hidrógeno reactivo.

Si por estar en el punto triple, se acercan dos oxidrilos del electrolito, los protones desarrollarán mayor afinidad con los electrones de valencia de los oxidrilos que con los propios adsorbidos, abandonándolos para que se integren a la red cristalina, y formando moléculas de agua, con lo cual la placa adquirirá polaridad negativa.

En la otra placa, del lado del oxígeno, ocurrirá algo similar: (Figura 6)

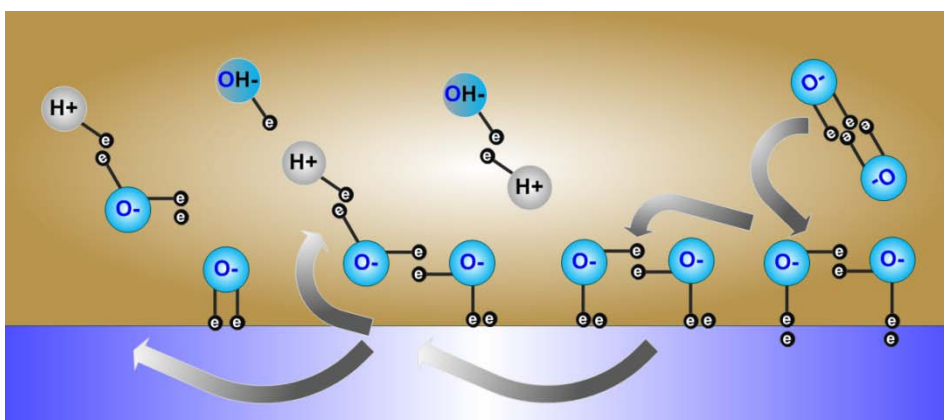
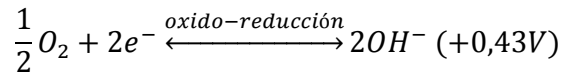


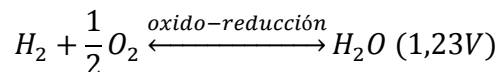
FIGURA 6. PASAJE DE ELECTRONES DEL LADO DEL OXÍGENO

La molécula de oxígeno se adsorbe parcialmente levantando de la red cristalina un par de electrones; al aproximarse una molécula de agua, uno de los átomos de oxígeno experimenta mayor avidez por el protón de la molécula de agua que por su ligadura adsorbida, por lo que la levanta, captura el protón, formando el ión peroxhidrilo, que decae y se transforma en un átomo de oxígeno totalmente adsorbido y un oxhidrilo, quedando entonces dos, el formado más el remanente de la molécula de agua destruida.

En este caso la ecuación es:



Sumando miembro a miembro ambas ecuaciones resulta:



Por lo que se genera una diferencia de potencial de 1,23 V al efectuar la “combustión” de una molécula de hidrógeno, capaz de sostener una corriente en un circuito externo.

Este es el principio de funcionamiento de las celdas de combustible en general, existiendo diversas variantes en cuanto a material de las placas, tipo de electrolito, combustible y comburente, y temperatura de funcionamiento.

Como regla general se puede decir que se tiende a suplantarse el contenido de platino en los materiales de las placas, compensando la disminución del poder catalítico con un aumento de la temperatura de trabajo.

Asimismo, se trata de utilizar aire como comburente en vez de oxígeno puro; de igual forma, se prefieren combustibles más tradicionales como el gas natural por el momento, antes que el hidrógeno en gran escala.

En líneas generales, se pueden distinguir algunos tipos de celdas de combustible; las de baja temperatura (temperatura ambiente), las de temperaturas medias (100 a 250°C), y las de alta temperatura (más de 500°C).

En las de alta temperatura los electrolitos utilizados son sales en fusión, dado que solamente se pueden usar soluciones acuosas de hidróxidos o ácidos a temperaturas cercanas a los 100°C, como el caso de las celdas que funcionan con gas natural y electrolito de solución de ácido fosfórico (4 MW eléctricos).

La generación de energía eléctrica mediante celdas de combustible presenta las siguientes ventajas y características:

- No tiene problemas de escala
- No produce ruido eléctrico porque no hay ni corte de campos magnéticos ni conmutaciones
- Por lo antedicho representa la transformación de mayor rendimiento a partir de un combustible determinado
- Puede usar cualquier combustible al que se pueda rectificar separándole el hidrógeno de su composición
- Si se aprovecha el calor generado en dicha rectificación, el rendimiento total de generación supera el 80%

Las celdas de Combustible Microbianas

Introducción

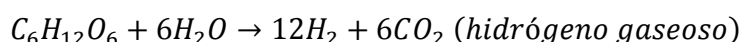
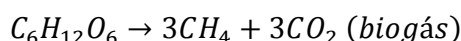
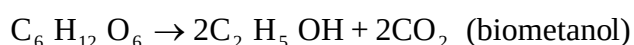
El concepto de microorganismos usados como catalizadores en celdas de combustibles microbianas (MFC) fue explorado desde los años 70 y 80². La MFC utilizada para tratar agua residual doméstica fue introducida por Habermann y Pommer³ (1991). Sin embargo, recientemente han vuelto a ser dispositivos atractivos para generar electricidad desarrollando oportunidades para aplicaciones prácticas⁴. Una MFC convierte un sustrato biodegradable directamente a electricidad. Esto se consigue cuando las bacterias, a través de su metabolismo, transfieren electrones desde un donador, tal como la glucosa⁵, a un aceptor de electrones.

En una MFC las bacterias no transfieren directamente los electrones producidos a su aceptor Terminal, sino que éstos son desviados hacia el ánodo (Figura 2). Esta transferencia puede ocurrir de varias formas, bien sea a través de la membrana celular o a partir de un mediador soluble, y los electrones fluyen a través de un circuito externo⁶.

Las MFC tienen ventajas sobre otras tecnologías usadas para la generación de energía a partir de materia orgánica:

- La conversión directa de sustrato a electricidad permite altas eficiencias de conversión.
- Operan eficientemente a temperatura ambiente, incluidas bajas temperaturas.
- No requieren del tratamiento del biogás generado en la celda.
- No requieren de energía extra para airear el cátodo, pues éste puede ser aireado pasivamente.
- Tienen aplicación potencial en lugares alejados con ausencia de infraestructura eléctrica, convirtiéndose en una opción más de energía renovable para los requerimientos de energía a nivel mundial.

A partir de la biomasa orgánica presente en residuos sólidos y líquidos se puede obtener una variedad de biocombustibles y subproductos, siendo la glucosa la principal fuente de carbono⁷. Entre las reacciones estequiométricas principales del metabolismo fermentativo microbiológico están:



² Suzuki, 1976; Roller et al., 1984

³ http://www.worldlingo.com/ma/enwiki/es/Microbial_fuel_cell

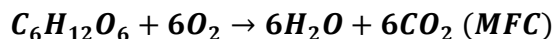
⁴ Increased performance of single-chamber microbial fuel cells using an improved cathode structure Shaoan Cheng a, Hong Liu b, Bruce E. Logan (2004).

http://www.bioe.orst.edu/Faculty/Liu/Liu%20webpage%202007_files/documents/2006-Cheng-et-al-ElecComm.pdf

⁵ <http://es.wikipedia.org/wiki/Glucosa>

⁶ Anode process: microbial oxidation of substrate. <http://www.microbialfuelcell.org/www/index.php/General/Anode-process-microbial-oxidation-of-substrate.html>

⁷ Energy recovery in wastewater decontamination: Simultaneous photocatalytic oxidation of an organic substrate and electricity generation. http://www.sciencedirect.com/science?_ob=ArticleURL&_udi=B6V73-4VXXSSC-4&_user=10&_coverDate=06%2F30%2F2009&_rdoc=1&_fmt=high&_orig=search&_origin=search&_sort=d&_docanchor=&view=c&_acct=C000050221&_version=1&_urlVersion=0&_userid=10&md5=7823e0f3615abbe9f0369c0c8698addd&searchtype=a



Entre las MFC con membrana de intercambio protónico⁸ (PEM, siglas del inglés proton Exchange membrane) existen tres configuraciones típicas:

- Bioreactor desacoplado de la MFC: los microorganismos generan H_2 que se emplea como combustible en una celda de combustible. (Figura 7)
- Bioreactor integrado a la MFC: los microorganismos generan H_2 que se convierte a electricidad en una única celda. (Figura 8)
- MFC con transferencia directa de electrones: generación eléctrica microbiológica y transferencia directa al ánodo⁹. (Figura 9)

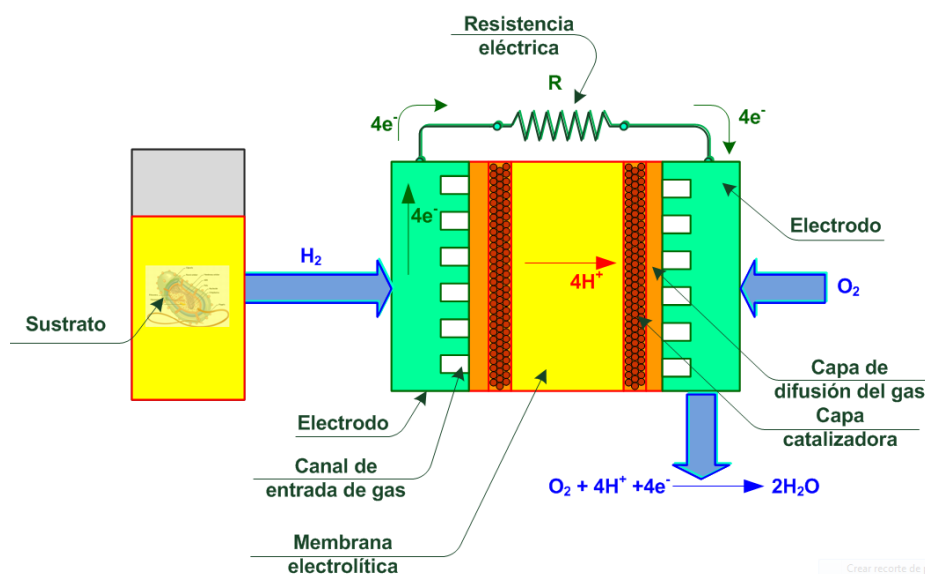


FIGURA 7: BIOREACTOR DESACOPLADO DE LA MFC

⁸ http://en.wikipedia.org/wiki/Proton_exchange_membrane_fuel_cell

⁹ Microbial fuel cells: novel biotechnology for energy generation. Korneel Rabaey and Willy Verstraete.
http://web.mit.edu/pweigle/www/SoBEI/Info_files/Rabaey%202005%20Trends%20Biotechnol.pdf

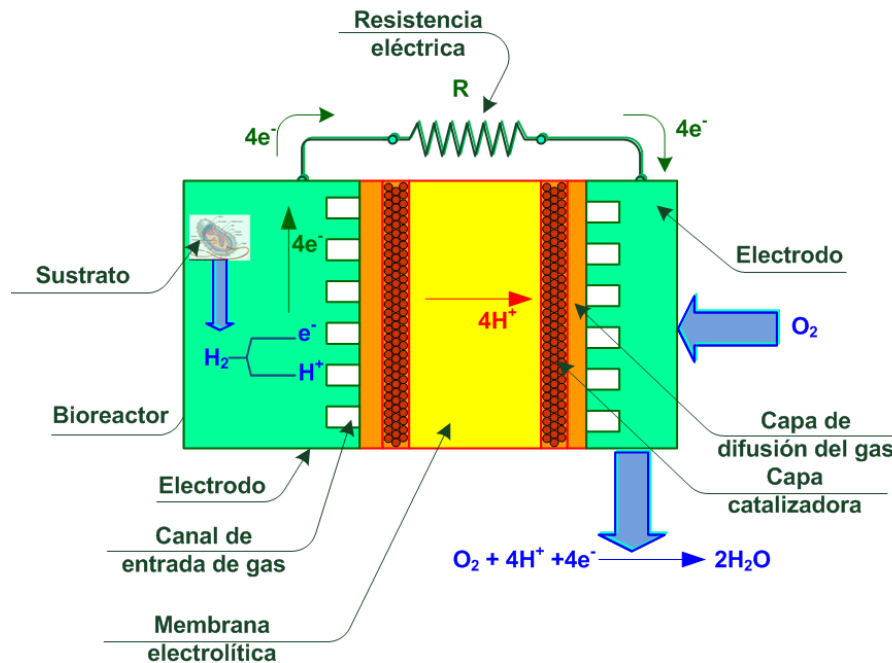


FIGURA 8: BIOREACTOR INTEGRADO A LA MFC

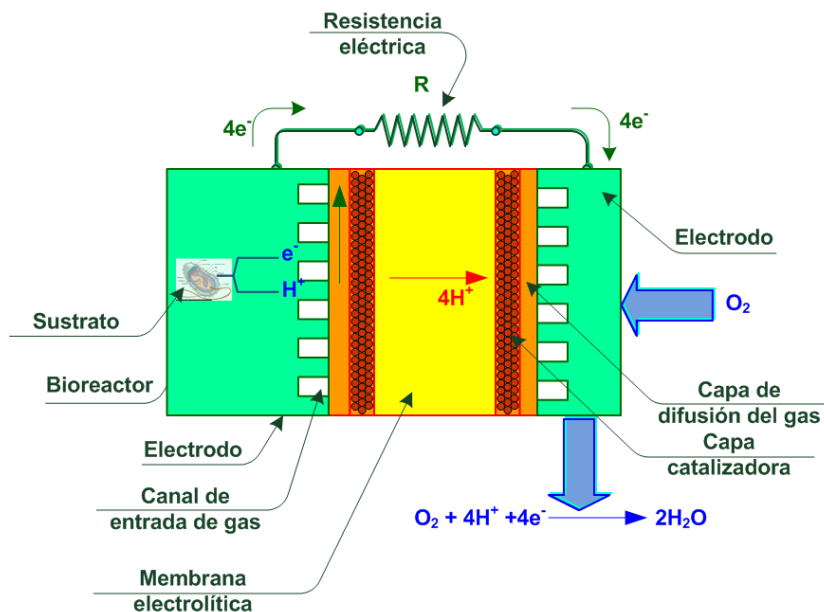


FIGURA 9: MFC CON TRANSFERENCIA DIRECTA DE ELECTRONES

Las MFC pueden ser monitoreadas a través de parámetros electroquímicos tales como densidad de potencia, corriente eléctrica generada y voltaje. De igual forma, un parámetro biológico muy importante es la carga orgánica del sustrato a emplear, expresada en $\frac{Kg.m}{m^3.d}$.

Principio de funcionamiento

Las celdas de combustible microbianas (MFC) se han utilizado experimentalmente para el tratamiento de aguas residuales municipales principalmente, sin embargo cabe destacar la utilización de este tipo de sistemas en la generación de electricidad en sedimentos marinos o de origen lagunar como una

aplicación tecnológica para comunidades distantes al suministro de energía¹⁰ (Bond et al., 2002; Holmes et al., 2005). El objetivo principal en tales tecnologías ha sido la obtención de energía en forma de electricidad o hidrógeno, con la adicional disminución de la demanda química de oxígeno (DQO¹¹).

El proceso global (Figura 10, Figura 11 y Figura 12) se desarrolla en la MFC compuesta de dos cámaras separadas por una membrana polimérica, la cual es permeable al paso de protones. La muestra éste proceso, en la primera cámara se encuentra el ánodo, el cual captura los electrones liberados en el medio como consecuencia de la degradación de la materia orgánica. Estos electrones que se generan, fluyen hacia el cátodo a través de un circuito externo a la celda, lo que permite la generación de corriente eléctrica. Por otro lado, los protones pasan a través del polímero permeable. Una vez dentro de la cámara catódica, los protones reaccionan con electrones y oxígeno contenido en el aire para formar agua.

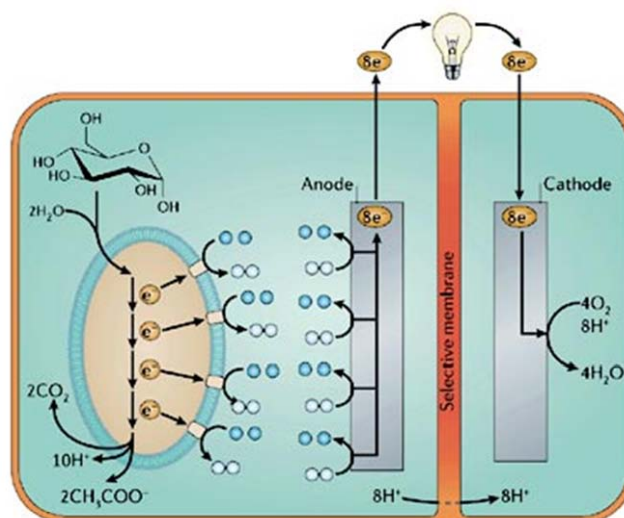


FIGURA 10: PROCESO DE OBTENCIÓN DE ENERGÍA DE UNA MFC

¹⁰ *Electrode-Reducing Microorganisms That Harvest Energy from Marine Sediments*. Daniel R. Bond, Dawn E. Holmes, Leonard M. Tender, Derek R. Lovley. <http://www.sciencemaq.org/cgi/content/abstract/295/5554/483>

¹¹ Demanda química de oxígeno. http://es.wikipedia.org/wiki/Demanda_qu%C3%ADmica_de_ox%C3%ADgeno

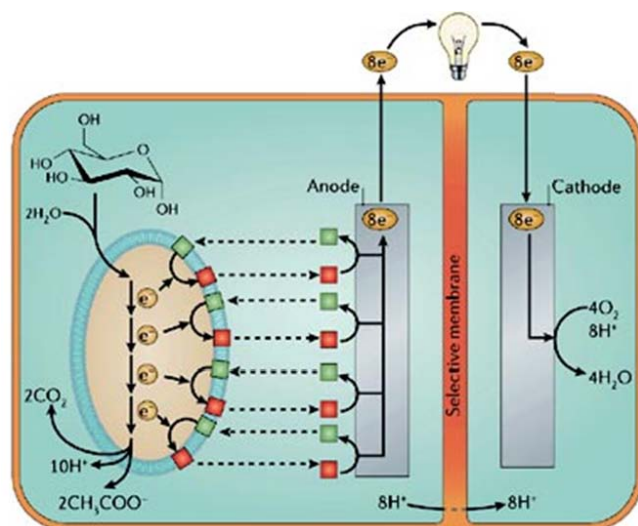


FIGURA 11: PROCESO DE OBTENCIÓN DE ENERGÍA DE UNA MFC

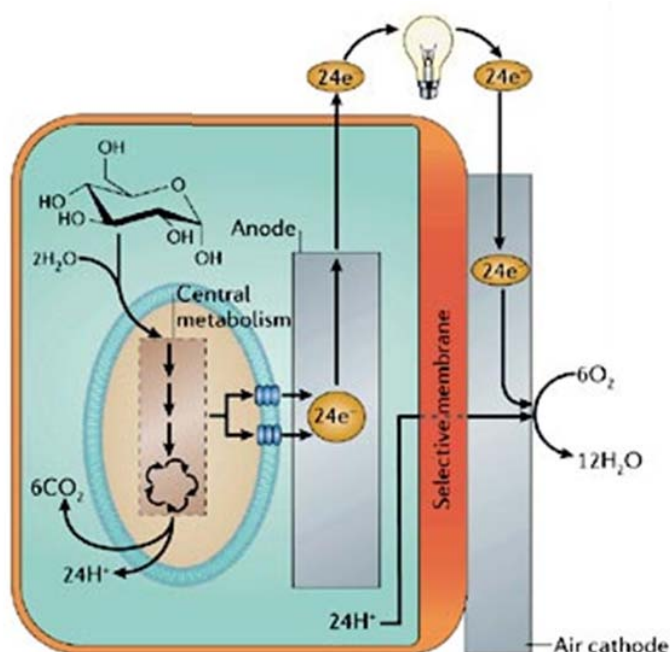


FIGURA 12: PROCESO FINAL DE LA OBTENCIÓN DE ENERGÍA A TRAVÉS DE UNA MFC

Por otro lado, existe una configuración considerada novedosa, en la cual el oxígeno que es necesario en el cátodo, se suministra mediante convección natural (Figura 12). Esto gracias a que el cátodo se encuentra en contacto directo con el ambiente, evitando de esta forma rociar aire al medio o mejor aún suministrar aire u oxígeno puro al sistema como en el caso de las celdas electroquímicas de H_2 convencionales.

Inóculos utilizados en las celdas de combustibles microbianas

La Tabla 2 muestra una compilación de diversos trabajos en el área de las MFCs.

Sustrato	Cultivo	Tipo de electrodo	Mediador redox	Densidad de potencia mW.m ²	Eficiencia coulombica (%)
Lactato	Shewanella Oneidensis	Grafito	Ferrocianuro potásico	3600	89
Agua residual doméstica	Bacterias presentes en aguas residuales	Grafito Plano	No	24	3 - 12
Glucosa	Cultivo mixto	Papel Carbón	Hexacianoferrato de potasio	24	2,4
Acetato	Bacterias presentes en agua residual doméstica	Papel Carbón	No	286 ±3	65
Glucosa	Bacterias presentes en agua residual doméstica	Papel Carbón	No	494	9 - 12
Acetato	Geobacter metallireducens	Papel Carbón	No	40 ±1	19
Peptona	Bacterias presentes en agua residual doméstica	Papel Carbón	No	269 ±14	6
Acetato	Lodos activados	Papel Carbón	No	0,097	63 - 78
Glucosa	Bacterias presentes en agua residual doméstica	Papel Carbón	No	262	40 - 55
Acetato	Lodos activados	Grafito Plano	Ferrocianuro en cátodos de Mn ⁴⁺ ánodo de grafito y Fe ³⁺ catodo de grafito	788	No reportó
Glucosa	Bacterias presentes en aguas residuales	Fibra de Carbón	No	1430	23
Glucosa	Cultivo mixto	Papel Carbón	No	336 y 640	60

TABLA 2 COMPARACIÓN DE PARÁMETROS DE DESEMPEÑO DE DIFERENTES CONFIGURACIONES EN CELDAS DE COMBUSTIBLE MICROBIANAS TIPO PEM.

Los estudios con cultivos puros parecen predominar (miembros de la familia proteobacteriana Geobacteraceae), aunque hay algunos estudios recientes donde consorcios microbianos como aquellos presentes en aguas residuales son utilizados como inóculos (Figura 13).

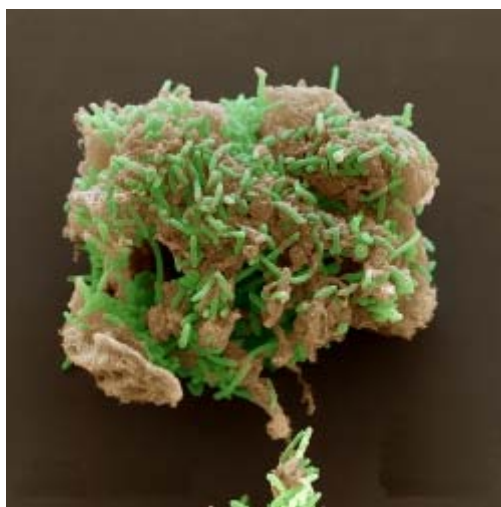


FIGURA 13: INÓCULOS PRESENTES EN AGUAS RESIDUALES.

Los análisis de las comunidades microbianas asociadas a los ánodos de las MFC muestran una gran diversidad de géneros bacterianos dependiendo de la naturaleza del inóculo, del combustible y del tipo de MFC utilizada.

Uno del grupo de microorganismos que se ha mostrado como muy eficaz en la transferencia de electrones a una MFC es el de la deltaproteobacterias, y en concreto el género *Shewanella oneidensis*. (Figura 14)



FIGURA 14: DELTAPROTEOBACTERIA SHEWANELLA ONEIDENSIS

La gran revolución en el campo de las MFC se ha producido en el último lustro, con el descubrimiento de microorganismos electrogénicos que son capaces de transferir los electrones al ánodo en ausencia de mediadores redox artificiales. Podemos distinguir dos tipos de bacterias electrogénicas, aquellas que producen sus propios mediadores redox, que son secretados al medio y reaccionan con el electrodo, y aquellas que interaccionan de forma directa con el electrodo sin mediador soluble alguno. Así por ejemplo se han descrito que *Shewanella* secreta riboflavinas que actúan como mediadores redox entre la bacteria y el electrodo. En el segundo grupo, el de la transferencia directa por contacto bacteria-electrodo se encuentran las bacterias del género *Geobacter*.

Las bacterias del género *Shewanella oneidensis* son habitantes de forma natural del subsuelo y durante millones de años han utilizado los óxidos de hierro insolubles como aceptores de electrones para oxidar la materia orgánica. Los mecanismos responsables de establecer una comunicación redox entre la bacteria y la superficie de los óxidos de hierro han contribuido a “dar forma” a la corteza terrestre, y comprenderlos constituye uno de los retos de la microbiología medioambiental. *Shewanella oneidensis* es capaz de producir magnetita en ambientes sedimentarios, así como de respirar uranio, biodegradar anaeróbicamente compuestos aromáticos contaminantes, respirar ácidos húmicos en ambientes naturales o transferir electrones a electrodos, con la consiguiente producción de electricidad.

La razón de utilizar cultivos puros en vez de consorcios microbianos ha sido principalmente la ventaja que representa estudiar MFCs con biocatalizadores en los cuales un modelo predecible puede obtenerse acerca de cómo la transferencia de electrones es llevada a cabo¹². Por ejemplo, se ha propuesto que diversas especies del género *Geobacter* y *Shewanella* pueden liberar electrones al ánodo a través de acarreadores ya sea producidos por los mismos microorganismos o suministrados artificialmente. De estos últimos se desprenden desde compuestos pequeños como la antroquinona 2,6-disulfo hasta compuestos orgánicos complejos como las sustancias húmicas.

En este sentido Bond y Lovley (2002)¹³ utilizaron para su estudio “*Geobacter sulfurreducens*” en un medio con la siguiente composición (por litro):

- 0,1 gr de KCl
- 0,2 gr de NH₄Cl
- 0,6 gr de NaH₂PO₄
- 10 ml de mezcla de vitaminas
- 10 ml de trazas de medio mineral.

El pH del medio fue ajustado a 6,8. Además fueron adicionados 2 gr de NaHCO₃ y el medio fue gaseado con N₂-CO₂ (en una relación 80% y 20% respectivamente) para remover el oxígeno antes de esterilizar el medio en frascos tapados. Como donador de electrones se utilizó, Acetato (5 mM).

Para mantener las células viables, se utilizó óxido de hierro (III) como aceptor de electrones antes de inocular la celda (100-120 mM). Las células entonces fueron transferidas a un medio que contenía 40 mM de fumarato como el aceptor de electrones antes de ser inoculadas a las cámaras que contenían los electrodos. El medio contenido en las cámaras fue modificado con 2,9 g de NaCl. Cuando el medio fue reemplazado con una solución amortiguadora salina anóxica en los experimentos del electrodo, la solución amortiguadora contenía (por litro) lo siguiente:

- 0,1 g de KCl,
- 0.6 g de NaH₂PO₄
- 2.9 g de NaCl,
- 2 g de NaHCO₃.

Producción de energía de la celda

- **Aclimatación de la celda:** Cuando la MFC es inoculada con el cultivo bacteriano existe una fase de latencia seguida de un rápido incremento en el voltaje, alcanzando un voltaje en el cual se estabiliza (este valor es de alrededor de 0,4 Volt). Posteriormente el voltaje disminuye (Figura

¹² Hernandez & Newman, 2001; Shyu et al., 2002. <http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1111/j.1472-4669.2008.00155.x/full#b15>

¹³ <http://www.geobacter.org/research/microbial/>

15) gradualmente a medida que la materia orgánica contenida en el inóculo fue consumida. En la se muestra distintas transferencia de inóculo y su comportamiento ante este circunstancia.

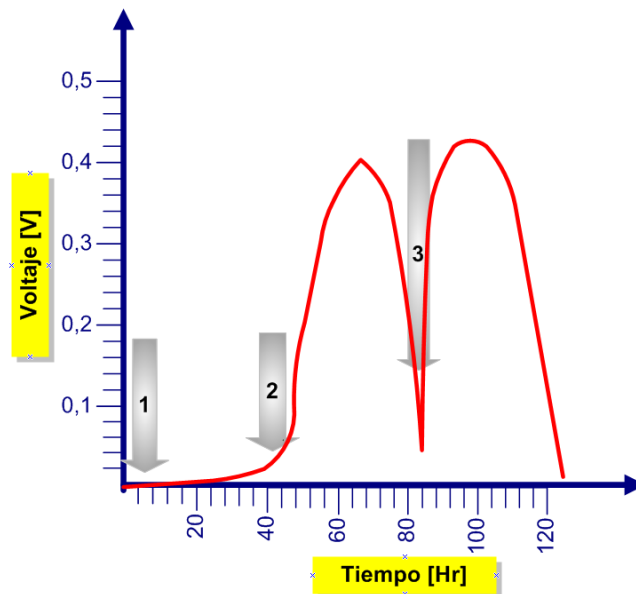


FIGURA 15: VARIACIÓN DE VOLTAJE EN FUNCIÓN DE LA MATERIA ORGÁNICA.

Al adicionar la tercera transferencia de inóculo a la CCM el comportamiento tiende a ser similar, produciéndose un intervalo de estabilidad. Una vez que el sustrato es consumido, cesa el crecimiento y sobreviene la muerte celular, viéndose afectada la generación de voltaje.

- **Efecto de la concentración del sustrato:** La producción de voltaje en la MFC (Figura 16) sigue una cinética de saturación; es decir, de utilización del sustrato en sistemas biológicos en función de la concentración y la velocidad de transporte.

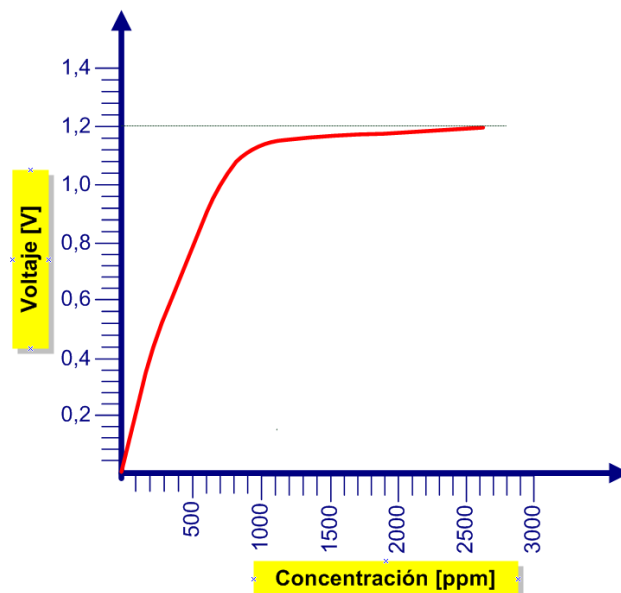


FIGURA 16: PRODUCCIÓN DE VOLTAJE VERSUS CONCENTRACIÓN Y VELOCIDAD DE TRANSPORTE

Como se puede observar en la figura, el voltaje se incrementa a medida que la concentración de glucosa aumenta, manteniéndose constante a partir de una concentración de 1000ppm. Así, el máximo radio de utilización del sustrato ocurre en altas concentraciones del mismo.

- **Generación de potencia en la CCM:** La densidad de potencia generada por la MFC se mide en $\frac{mW}{m^2}$, y para los cálculos se emplea la ecuación de la potencia. La producción de la densidad de potencia típica de este tipo de celda se muestra en la Figura 17

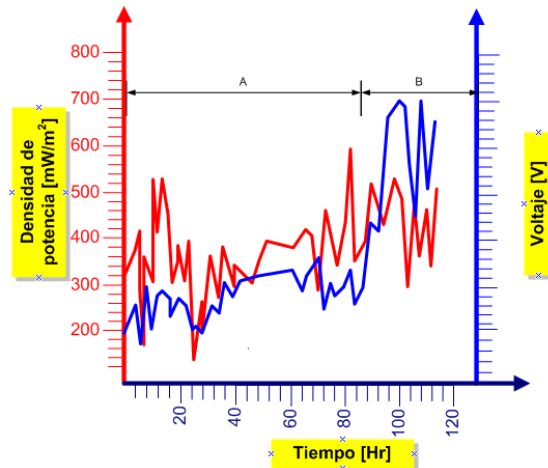


FIGURA 17: DENSIDAD DE POTENCIA TÍPICA DE CELDA MFC

- **Influencia del pH:** Otro parámetro importante en el desempeño de la MFC es el pH del compartimiento anódico. La densidad de potencia disminuye ligeramente a medida que el pH aumenta. Para valores mayores de 7 el sistema se estabiliza teniendo un valor constante.
- **Eficiencia obtenida en la CCM:** La eficiencia se determina, como ya se dijo, con base a la eficiencia coulombica (EC), la cual se define como la cantidad de materia orgánica que se recupera como electricidad. La EC se calcula con la siguiente ecuación:

$$Ec = \frac{Cp}{Cti}$$

Donde CP es el total de coulombs calculados por la integración de la corriente en el tiempo y Cti, es la cantidad teórica de coulombs, calculada a partir de:

$$Cti = \frac{F \cdot b \cdot S \cdot v}{M}$$

Donde:

- F: constante de Faraday
- b: número de moles de electrones producido por mol de sustrato.
- S: concentración de sustrato
- V: volumen del líquido
- M: peso molecular del sustrato empleado en la MFC.

Para determinar Cp se utiliza la gráfica de la corriente en función del tiempo de operación de la MFC (Figura 18). Del análisis del inóculo y del sustrato podemos obtener Cti, con lo cual la eficiencia calculada para distintos experimentos se obtuvo que este representaba **cerca del 60%**.

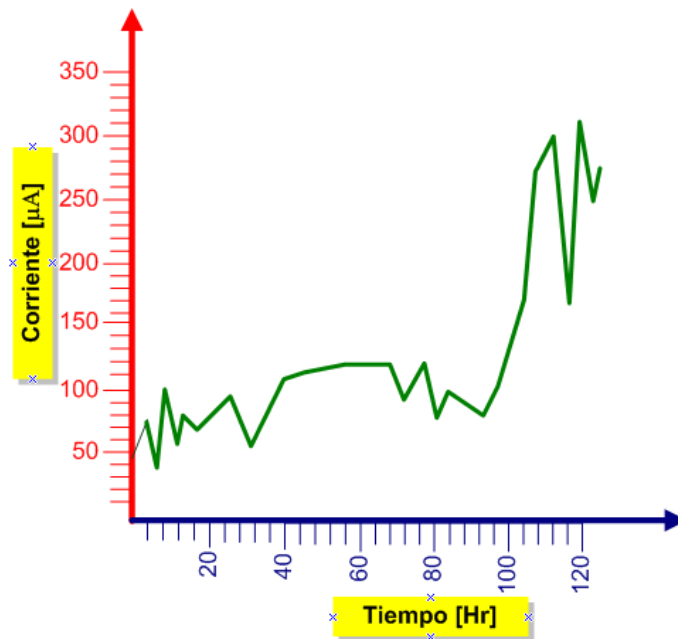


FIGURA 18: CORRIENTE EN FUNCIÓN DEL TIEMPO DE OPERACIÓN DE LA MFC

La celda de combustible en las plantas de tratamiento de aguas residuales

Una planta de tratamiento convencional está formada por las etapas ya mostradas en la Figura 1

En ella puede observarse:

- Tratamiento primario: Aquellos que aprovechan las propiedades físicas de los componentes que se desean separar y aquellos que aprovechan las propiedades químicas
 - Mecánico: Reja (gruesa, Mediana, fina), Trituradores.
 - Hidráulico: Desarenador, desengrasador, cámaras sépticas y Sedimentadores.
 - Químico: Coagulación y floculación.
- Tratamiento secundario: Aquellos que aprovechan las propiedades biológicas
 - Cuerpos filtrantes: Filtros de arena, lechos percoladores (comunes o recirculados)
 - Barros activados: Por inyección de aire, aireación mecánica, prolongada, aireación extendida.
 - Lagunas.
- Tratamiento Terciario: Son tratamientos que sirven para el pulido del agua. Desinfección, intercambio iónico, adsorción con carbón activado, etc.

La ubicación de la MFC dentro de la planta deberá estar, obviamente antes del reactor biológico es decir del tratamiento secundario. Existen en la actualidad dos posibilidades para su ubicación:

- Antes del Sedimentador primario (Figura 19)
- Después del Sedimentador primario (Figura 20)

En el primer caso y ante la situación de que la salida de la MFC se tiene aguas residuales con mucho menor contenido de materia orgánica, el tiempo de retención hidráulico será menor en todos los procesos posteriores. Por otro lado su implementación en instalaciones existentes es muy sencilla

En el segundo caso se coloca posterior a los sedimentadores en los cuales se produce la coagulación para su posterior floculación. Esta situación tiene una ventaja de que la materia orgánica presente se

encuentra más concentrada y por ello los niveles de energía serán mayores. Esta situación es más difícil de implementar en plantas que ya están funcionando.

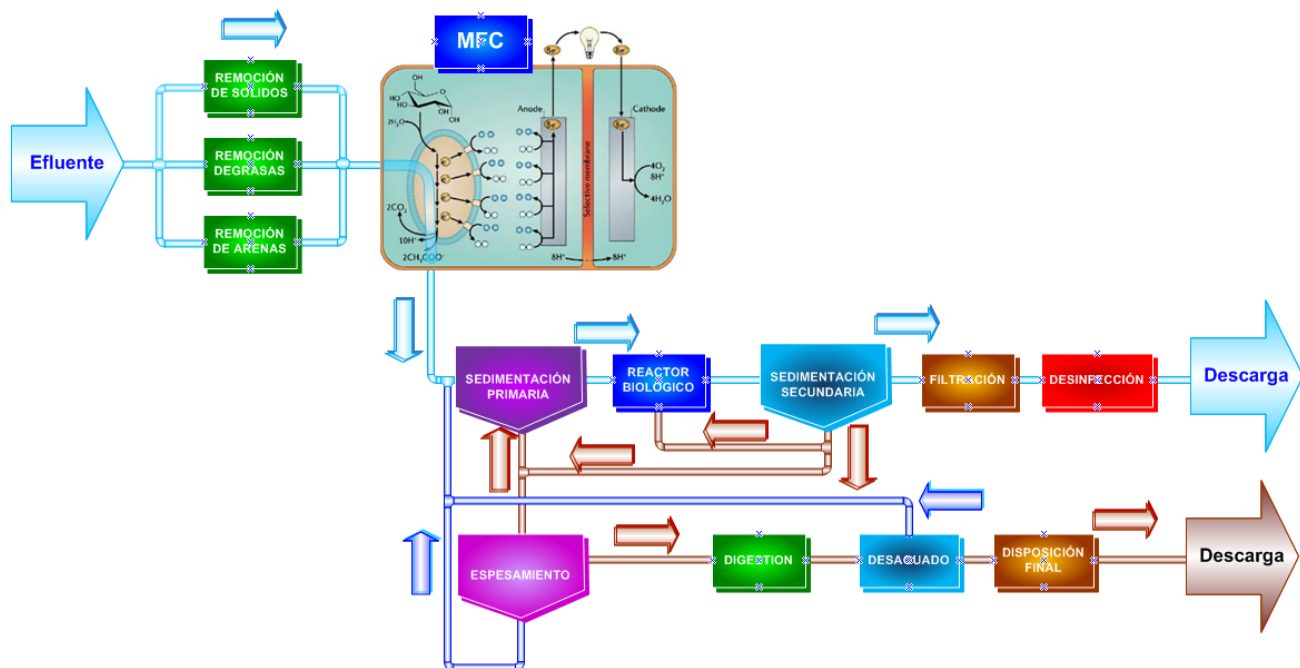


FIGURA 19: MFC UBICADA ANTES DEL SEDIMENTADOR PRIMARIO.

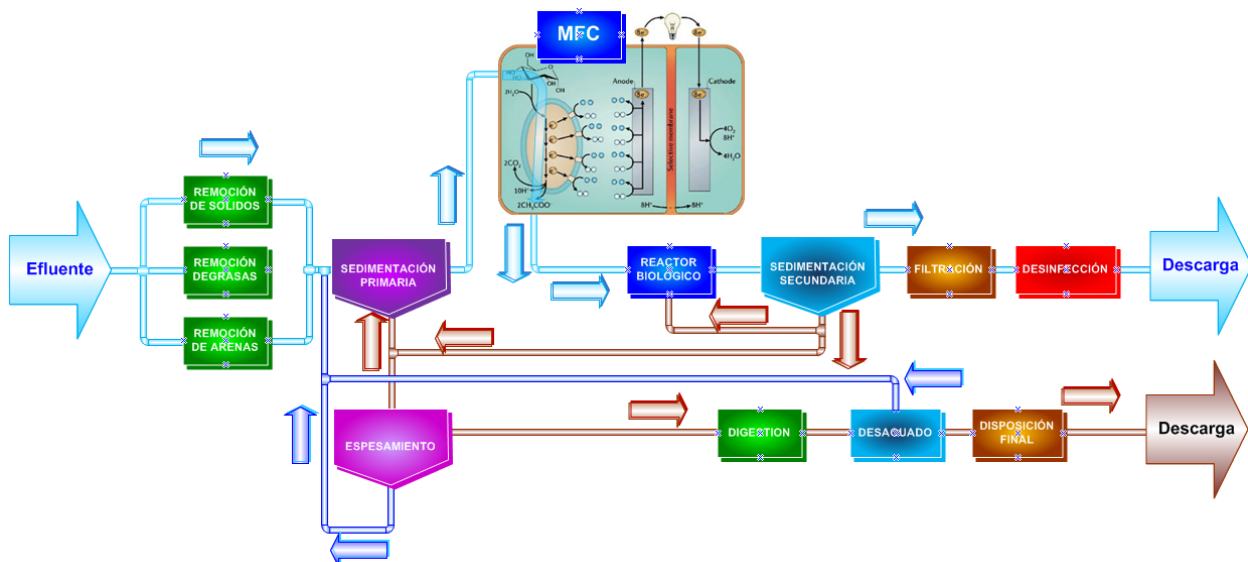


FIGURA 20: MFC UBICADA DESPUÉS DEL SEDIMENTADOR PRIMARIO.

Otros Avances en las pilas microbianas

En la Oregon State University, ya han planteado mejoras de la generación de electricidad a partir de microbios. Ellos proponen que potencialmente la nanotecnología podría ser útil en los procesos de tratamiento de agua.

Con esta tecnología, las bacterias de los residuos biológicos, como las aguas residuales se colocan en una cámara del ánodo de una pila de combustible (una célula de electrólisis microbiana multi-ánodo, el MEC), donde forman un biofilm. Tales bacterias como *Shewanella oneidensis*, consumen los nutrientes y crecen, liberando en este proceso electrones. En este contexto, las aguas residuales son literalmente el combustible para la producción de electricidad.

Los investigadores de Oregon State University publicaron su trabajo recientemente en *Biosensores y Bioelectrónica*¹⁴. Ellos descubrieron que los ánodos de grafito recubiertos con una capa de nanopartículas de oro, puede ayudar a producir 20 veces más cantidad de electricidad que los ánodos de grafito, sin el revestimiento. Un recubrimiento de paladio también ayuda, aunque no significativamente. En esta investigación plantean que posiblemente un recubrimiento de capas de nanopartículas de hierro (que sería mucho más barato que el oro) puede producir niveles de energía similares, por lo menos para este tipo de bacterias.

Estos investigadores son líderes mundiales en el desarrollo de esta tecnología, que podría reducir significativamente el costo del tratamiento de aguas residuales. El resultado de estas investigaciones puede ser la creación de plantas de tratamiento de aguas residuales que son completamente autosuficientes en términos de consumo de energía, útiles especialmente en áreas remotas.

Frank Chaplen, Profesor asociado de la ingeniería biológica y ecológica, realizó la siguiente declaración:

*“Este es un paso importante hacia nuestra meta. Todavía tenemos que realizar algunas mejoras en el diseño de la cámara de cátodo, y una mejor comprensión de la interacción entre las diferentes especies microbianas. Pero el nuevo planteamiento, es claramente producir más electricidad.”*¹⁵

¹⁴ Ver más información en http://www.sciencedirect.com/science?_ob=ArticleURL&_udi=B6TFC-50297BX-2&_user=851947&_coverDate=05%2F11%2F2010&_rdoc=1&_fmt=high&_orig=search&_sort=d&_docanchor=&view=c&_acct=C000045885&_version=1&_urlVersion=0&_userid=851947&md5=ae39bc17cf245b20230bbb032099c798

¹⁵ <http://oregonstate.edu/ua/ncs/archives/2010/jul/nanotech-coatings-produce-20-times-more-electricity-sewage>

APROVECHAMIENTO ANAERÓBICO DEL TRATAMIENTO SECUNDARIO.

Ventajas y fundamentos del tratamiento anaerobio.

Los métodos anaeróbicos de depuración de agua son, comúnmente, utilizados cuando la DQO, demanda química de oxígeno, del agua excede los 1500 mg/l; y son, especialmente, útiles en la industria alimenticia. Requieren de menor energía para trabajar que los aerobios porque no necesitan oxigenación forzada. Algunos sistemas anaeróbicos pueden recuperar una parte de la energía química de las aguas residuales, generando biogás. Son comunes los diseños de digestores anaerobios para el tratamiento directo de las aguas residuales. Los digestores anaerobios contienen gran cantidad de materia orgánica suspendida. Valores entre 20 y 100 g/L se consideran adecuados. Una parte importante de este material, se encuentra compuesta por la biomasa bacteriana cuyos recuentos pueden llegar a 10⁹ o 10¹⁰ bacterias por ml. Esta cantidad, normalmente, es de dos a tres veces la cantidad normal usada en los reactores de lodos activados y compensa la menor velocidad de reacción de las bacterias anaerobias. La respiración bacteriana, en este caso, no es tan eficiente como en el sistema aerobio por lo que las bacterias tienen una tasa de reproducción mucho más lenta. Esto conduce a baja generación de lodos residuales y el sedimento generado cumple con la norma de disposición de lodos.

En definitiva, el tratamiento anaeróbico permite:

- Posibilidad de altas cargas orgánicas (hasta 20 Kg. mg./l de DQO/ m³.d)
- Baja producción de lodos.
- Bajo consumo de energía.
- Bajo requerimiento de nutrientes.
- Posible reutilización del metano producido.
- Poca necesidad de espacio.
- Cogeneración Eléctrica o El gas obtenido en nuestros reactores puede ser utilizado en la generación de electricidad usando alguna de nuestras opciones de generadores, los cuales funciona con biogás.

Biogás

En este trabajo nos interesa destacar la dinámica de los procesos anaerobios, con el objetivo del aprovechamiento energético de los efluentes.

Se llama biogás a la mezcla constituida por metano (CH₄) en una proporción que oscila entre un 40% a un 70% y dióxido de carbono (CO₂) entre un 30% a un 60%, conteniendo pequeñas proporciones de otros gases como hidrógeno (H₂), nitrógeno (N₂), oxígeno (O₂) y sulfuro de hidrógeno (H₂S).

Bioquímica del Proceso

En condiciones anaeróbicas suelen ocurrir diversos procesos: desnitrificación, reducción de sulfatos, hidrólisis y fermentación acetogénica y metanogénica (ver Figura 21 para los dos últimos procesos).

El rol de las bacterias metanogénicas se define por el tipo de sustrato disponible. En el capítulo Reactores Anaeróbicos se muestran varios aspectos referentes a la bioquímica del proceso.

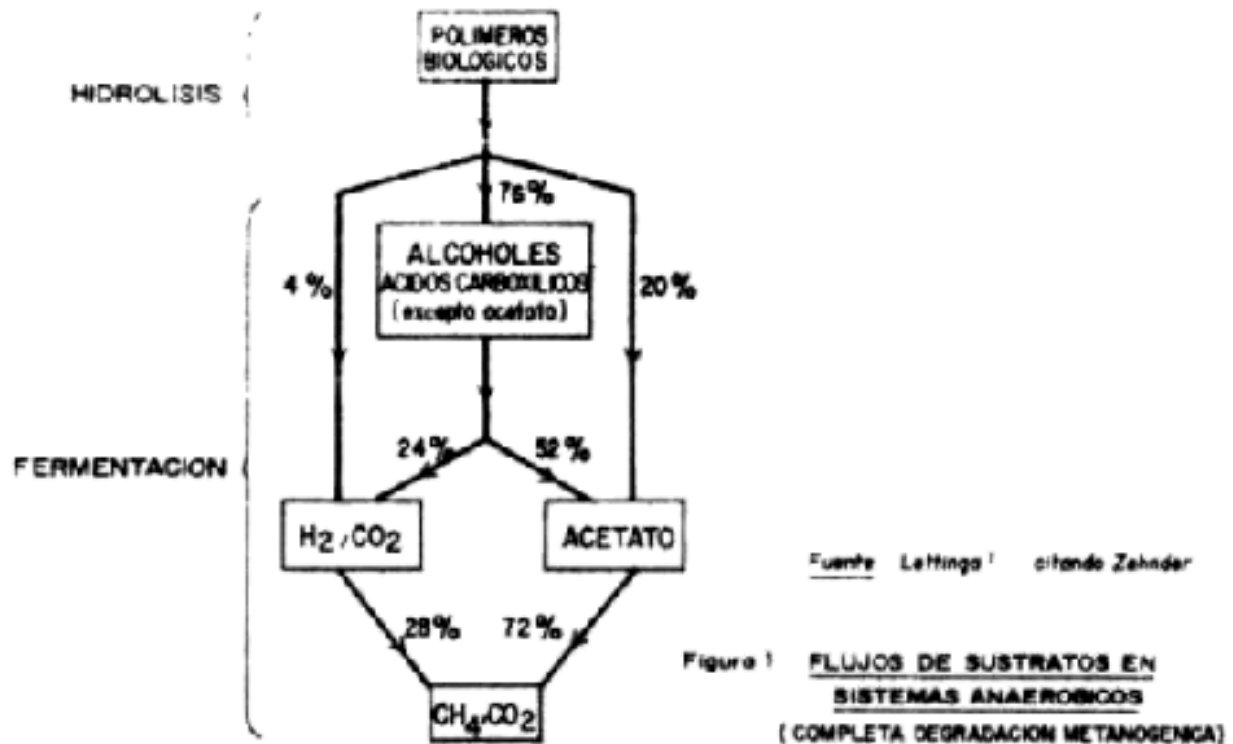


FIGURA 21: PROCESOS DE FERMENTACIÓN ACETOGENICA Y METANOGENICA

Diferentes procesos de tratamiento anaeróbico

Diversos procesos de tratamiento anaeróbico se encuentran disponibles y son aplicados en función de las características del sustrato afluente y del manejo del tiempo de retención de la biomasa (Figura 22).

La separación de las fases en el tratamiento de desagües solubles complejos, puede parecer atractiva en la eliminación de compuestos tóxicos, en la remoción de nitratos y sulfatos o sulfitos. De esta forma, un reactor acidogénico puede ser utilizado por separado de un reactor metanogénico.

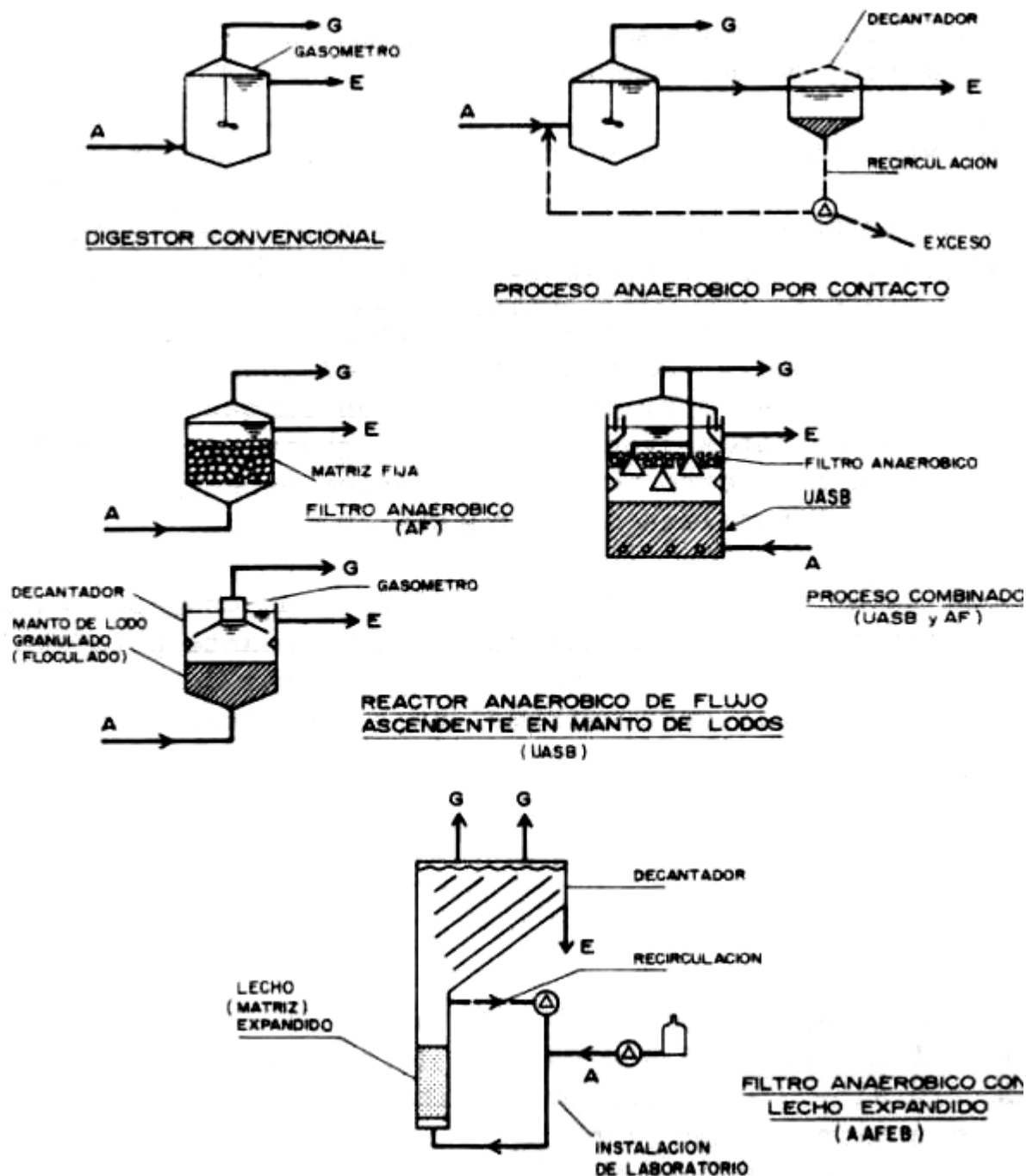


FIGURA 22: PROCESOS CONTINUOS DE TRATAMIENTO ANAERÓBICO.

Reactores Anaeróbicos

A continuación se ilustran algunos tipos de reactores.

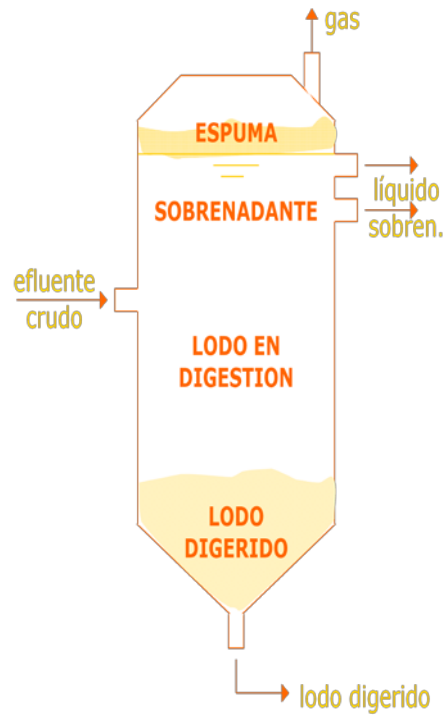


FIGURA 23: DIGESTORES ANAEROBIOS DE BAJA CARGA

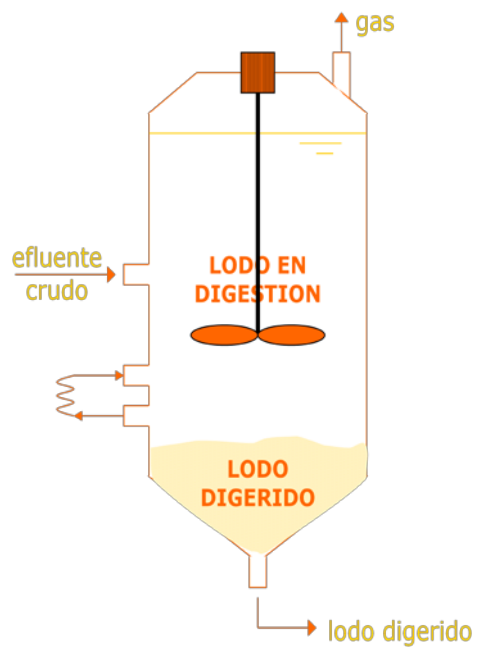


FIGURA 24 DIGESTORES ANAEROBIOS DE ALTA CARGA

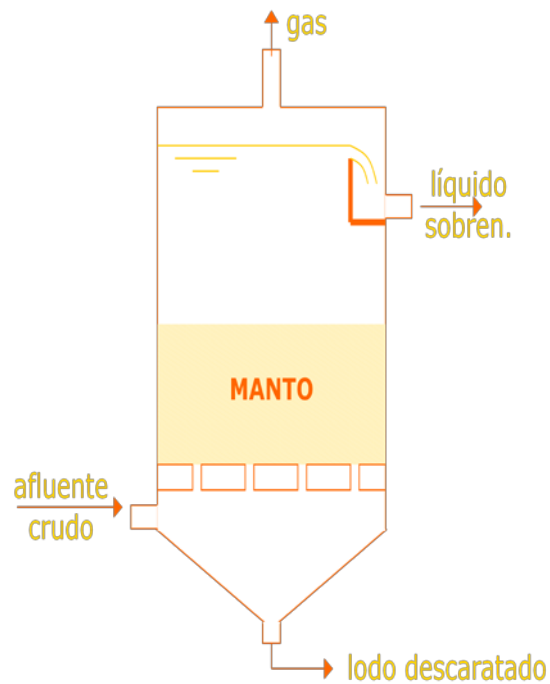


FIGURA 25 REACTORES DE LECHO FIJO (FILTROS ANAEROBIOS)

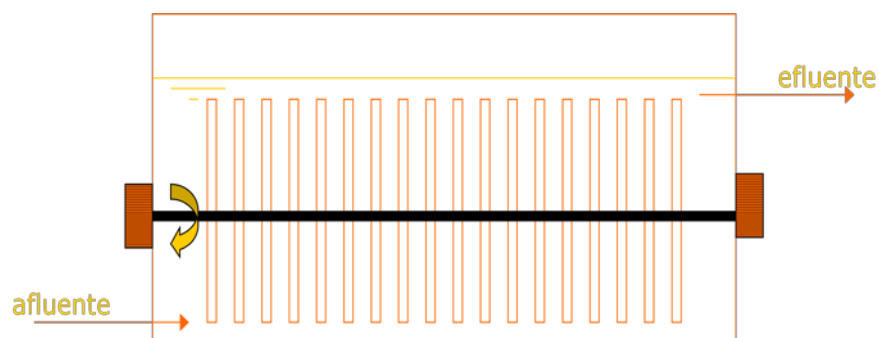


FIGURA 26: REACTORES DE LECHO ROTATIVO (BIODISCOS ANAEROBIOS)

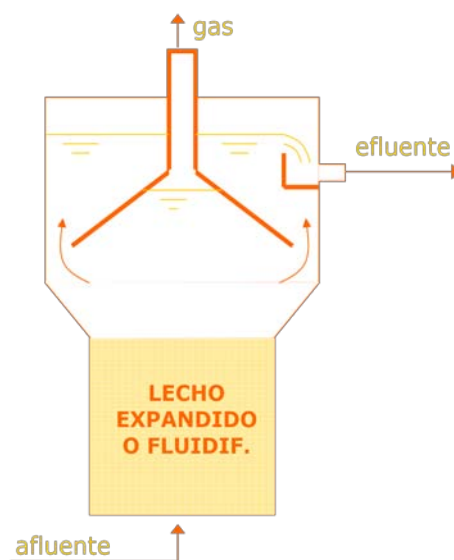


FIGURA 27 REACTORES DE LECHO EXPANDIDO O FLUIDIFICADO (RALF)

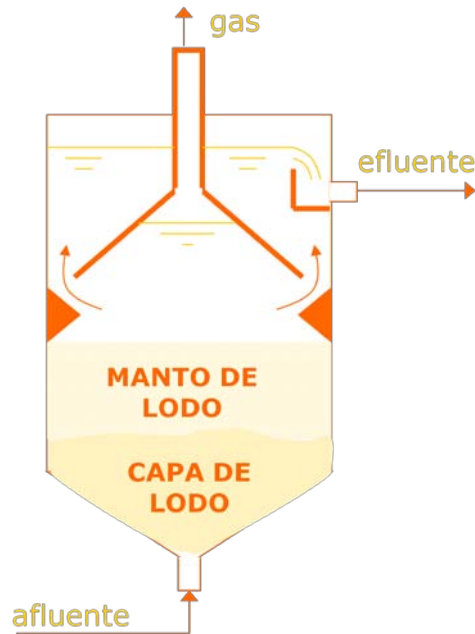


FIGURA 28 REACTORES DE MANTO DE LODOS (UASB-RAFA-DAFA)

Metodología de operación y evaluación del proceso

PUESTA EN MARCHA DEL PROCESO

El siguiente enumerado presenta, en forma tentativa, una guía para la primera puesta en marcha de un reactor anaeróbico, usando lodo de desagüe digerido como semilla (inóculo). Otros materiales pueden ser utilizados como lodo de estiércol bovino digerido o contenido de tanques sépticos.

GUÍA PARA LA PRIMERA PUESTA EN MARCHA DE UN REACTOR UASB, USANDO LODO DE DESAGÜE DIGERIDO COMO SEMILLA (INOCULO)

1. Cantidad de lodo sembrado: 10 - 15 kg SSV/m³
2. Carga inicial: 0.05 - 01 kg DQO/kg SSV. Día
3. No aumentar la carga hasta que los ácidos volátiles estén degradados en menos de 80%
4. Permitir el lavado ("wash-out") de lodo abultado (de sedimentación pobre)
5. Retener la parte pesada del lodo

SEGUIMIENTO DE LA BIODIGESTIÓN

Las condiciones necesarias para el buen funcionamiento de un proceso de digestión anaeróbica son las siguientes:

- No ocurrencia de variaciones bruscas de temperatura;
- Mantener el pH, a través de parámetros de proceso o de la adición de "nutrientes", entre 6.5 y 7.5;
- Someter el proceso a cargas orgánicas y tiempos de detención hidráulica y celular compatibles con el residuo a ser digerido y con el tipo de digester empleado;
- No existencia, en el residuo a ser digerido, de cantidades elevadas de compuestos tóxicos como son metales pesados, metales alcalinos y alcalinotérreos;
- No existencia, en el residuo de ser digerido, de cantidades elevadas de compuestos que pueden transformarse en tóxicos durante el proceso como N (NH₄⁺, NH₃), S (S₂⁻), etc.

- No ocurrencia de sobrecargas orgánicas o tóxicas además del límite soportable o el proceso;
- Existencia de cantidades de N y P en el residuo, compatibles con la cantidad de carbono.

Los principales parámetros utilizados en la evaluación de un proceso de digestión anaeróbica son los siguientes: volumen y composición de gases producidos, temperatura, pH, ácidos volátiles, alcalinidad, potencial de oxi-reducción, DBO/DQO, sólidos totales y volátiles, C/N/P, amoníaco, sulfatos/sulfitos, metales pesados y metales alcalinos y alcalinotérreos.

Se puede prescindir de muchas de estas determinaciones, dependiendo de las características del residuo.

En el caso de lodo de desagües primarios, el rango de alcalinidad se sitúa entre 2500 y 4000 mg/l como CaCO_3 , y los ácidos volátiles oscilan entre 50 y 150 mg/l como HAc. En cuanto al pH, la mayoría de los autores considera que 6.8 a 7.2 corresponde a una condición óptima, aunque la digestión solo sea posible entre los límites extremos de 6.5 a 7.5. En general, estando los digestores funcionando bien, el E. (potencial de oxi-reducción) es del orden de -500 mV, que indica un elevado estado de anaerobiosis y capacidad reductora del medio. En cuanto a los nutrientes, las proporciones recomendadas son: C/N = 30 y N/P = 53.

Tipos de Reactores anaeróbicos:

REACTOR DE FLUJO ASCENDENTE:

Concepto

El proceso anaeróbico de flujo ascendente consiste básicamente de un tanque Imhoff, "al revés", presentando las cámaras de decantación y digestión anaeróbica superpuestas. Las principales condiciones que se deberán encontrar en estos reactores son:

- Una efectiva separación del biogás, del desagüe y del lodo;
- El lodo anaeróbico debe presentar una buena capacidad de sedimentación y, principalmente, se debe desarrollar como un lodo granular;
- El desagüe debe ser introducido en la parte inferior del reactor.

Uno de los aspectos más importantes de los reactores es, con toda seguridad, su capacidad de producir el gránulo típico del lodo anaeróbico. Este lodo presenta una alta actividad específica (p.e. 1.0 g DQO/g SSV.día). Además de estos aspectos se debe citar el bajo valor del IVL, cerca de 50 ml/g o menos, y la velocidad de sedimentación que varía de 2 a 90 m/h en sistemas no "cargados". De todas formas, el lodo granulado, con una velocidad de sedimentación de 40 m/h, puede flotar en cargas muy altas. Se pueden desarrollar diferentes tipos (formas) de lodo granular, tales como bastón, filamentosos y "con puntas" y esto depende de varios aspectos como son la composición del sustrato y la naturaleza de la puesta en marcha.

Por tratarse de un proceso simple, compacto y no costoso, el reactor de flujo ascendente constituye una alternativa muy interesante para emplearse con desagües domésticos crudos. Es efectivo en temperaturas del orden de los 10° C o más, aunque su uso en condiciones extremas de temperatura no puede ser excluido.

Aspectos constructivos

(a) Parámetros

- ✓ Remoción del DQO (en tiempo seco) = 65 a 85% ($T = 8$ a 20°C);
- ✓ Carga hidráulica = 0.6 a 3.8 $\text{m}^3/\text{m}^3 \cdot \text{día}$ (citando varios trabajos);
- ✓ Carga superficial = 0.04 a 0.16 m/h (citando varios trabajos);
- ✓ Tiempo de detención = 14 a 17 h;
- ✓ Velocidad ascensional = 0.13 m/h ;
- ✓ Carga orgánica = 1 a 2 $\text{kg DQO}/\text{m}^3 \cdot \text{día}$;
- ✓ Producción de biogás = 7.1 a 7.3 $\text{m}^3 \text{CH}_4/\text{PE año}$ ($= 20\text{l CH}_4/\text{hab.día}$);
- ✓ Producción de biogás = 0.19 $\text{m}^3 \text{biogás}/\text{m}^3 \text{reactor}$
- ✓ Exceso de lodo = 5.0 a 8.6 $\text{kg}/\text{PE.año}$;
- ✓ Población equivalente (PE) = 0.135 kg DQO y 175 l.

(b) Carga orgánica

No obstante lo citado anteriormente en Parámetros, se pueden obtener cargas de 50 $\text{kg DQO}/\text{m}^3 \cdot \text{Día}$ cuando el reactor se encuentra todo lleno de lodo granular.

(c) Orificios

Se requiere cierto cuidado en cuanto al número de orificios (difusores) en la parte inferior del reactor, a fin de prevenir el acanalamiento ("channeling") del lecho del lodo, así como el elevado riesgo de este proceso cuando se aplica en tratamientos a baja temperatura o en desagües diluidos, debido a la baja producción de gas, inadecuada para la mezcla del lodo. Se sugieren valores de 1 a 5 $\text{m}^2/\text{orificio}$ en función del tipo de lodo y de carga aplicada.

(d) Agitación

Aunque los reactores experimentales están dotados de agitación interna, éstos escasamente fueron empleados durante el período de investigación. Algunos trabajos más recientes indican que la agitación mecánica afecta adversamente la puesta en marcha de la digestión, cuando se ha utilizado una mezcla de ácidos grasos volátiles como sustrato.

(e) Sedimentador

El diseño del sedimentador ("Gas - Solid Separator") debe ser de construcción simple, pudiéndose evitar el "compartimiento de expansión" tal como lo ha citado Meer & Vletter, según Lettinga y colaboradores.

(f) Diseño

La Figura 29 presenta al concepción del reactor de flujo ascendente tipo UASB ("Up-flow anaerobic sludge blanked").

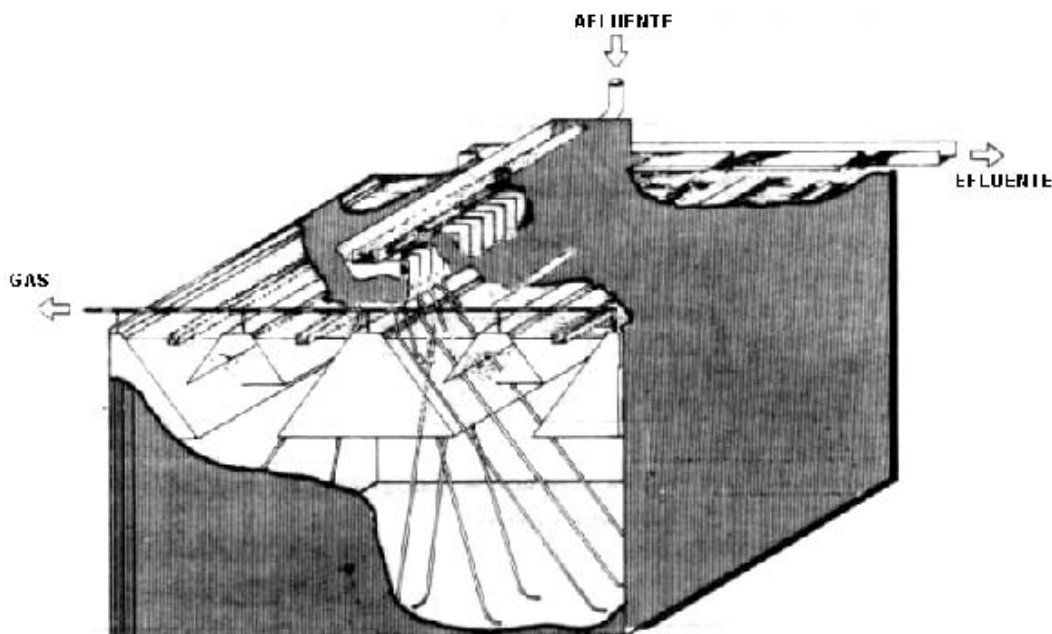


FIGURA 29: POSIBLE INSTALACIÓN UASB, EN ESCALA REAL, TRATANDO DESAGÜE DOMÉSTICO CRUDO.

TANQUES DEL TIPO IMHOFF

La forma del tanque será semejante a la mostrada en la figura 1, con dos tolvas en su fondo.

L = largo del estanque

1. Dimensiones de la cámara de sedimentación.

$$2bL = 1.893 / 24,4 = 78,0 \text{ m}^2.$$

Tomemos $b = 2,5 \text{ m}$; $l = 15,6 \text{ m}$.

De lo que $V = 15,6 / 120 = 0,13 < 0,3 \text{ m/seg.}$

$$\text{Volumen } S1 = (1.893 \times 2) / 24 = 157,8 \text{ m}^3$$

A = área transversal = $157,8 / 15,6 = 10,1 \text{ m}^2$ (requerida)

Tomemos $c = 1,25 \text{ m}$

$$A = 2[bc + 0,375 b^2] = 2[(2,5 \times 1,25) + 0,375(2,5)^2]$$

$$A = 11,00 \text{ m}^2$$

2. Dimensiones de la cámara de digestión:

$$S2 = \text{volumen de la cámara de digestión} = 5.000 \times 0,10$$

$$S2 = 500 \text{ m}^3$$

$$S2 = (fhL) + 2 = fhL + h^2L/12$$

De lo que:

$$f = \dots = 3,82 \text{ m}$$

Profundidad total del tanque = $c + d + e$ (zona neutral) + $f + g$, en donde:

$$G = 0.$$

$$D = 1,25 + 1,87 + 0,50 + 3,82 + 1,81 = 9,25 \text{ m}$$

Nota: $y = \text{borde libre} = 0,60 \text{ m}$ (mínimo).

Obtenemos :

$a = 0,75 \text{ metros}$

$b = 2,50 \text{ metros}$

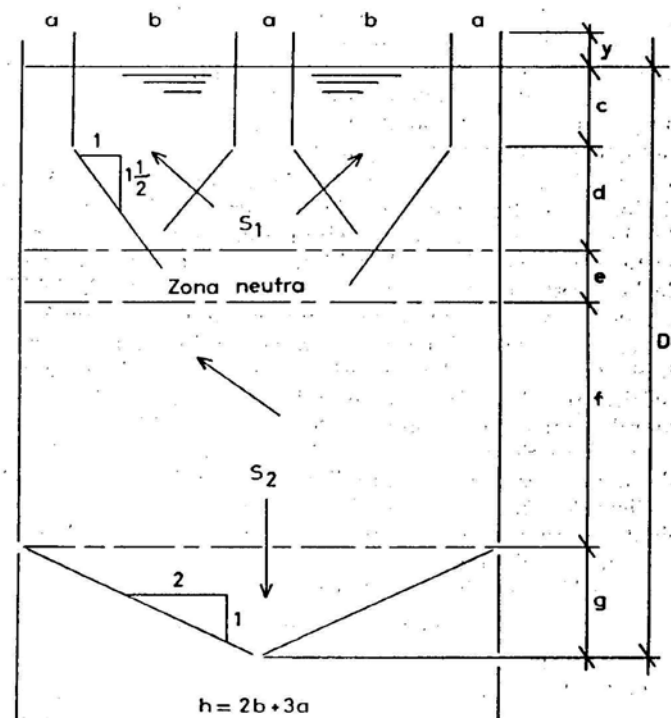
$c = 1,25 \text{ metros}$

$d = 1,87 \text{ metros}$

$e = 0,50 \text{ metros}$

$f = 3,82 \text{ metros}$

$g = 1,81 \text{ metros}$



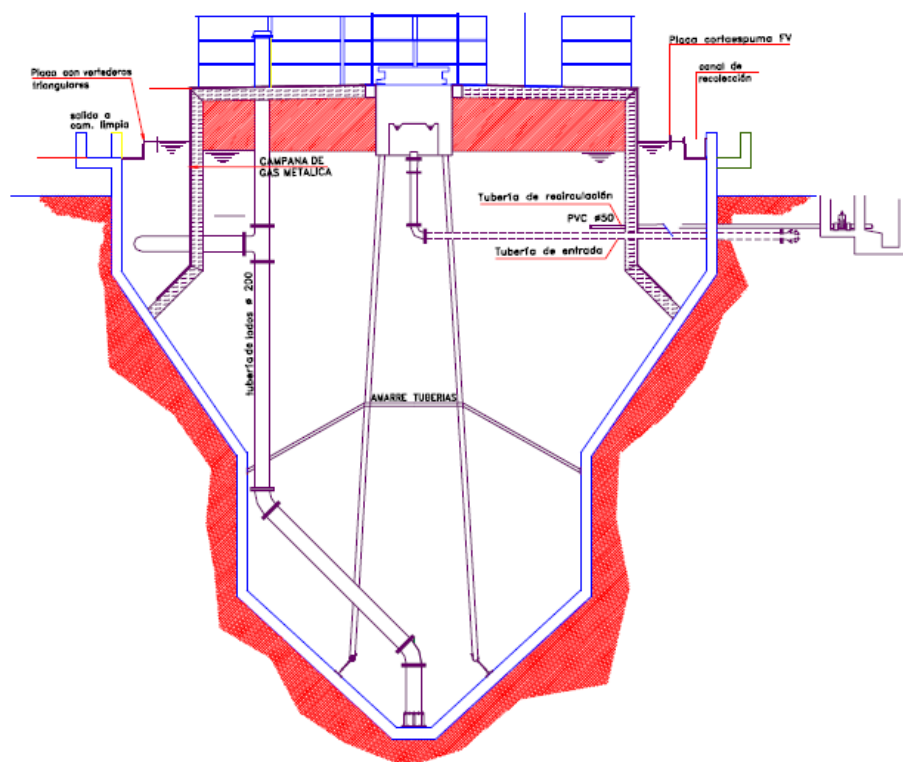


FIGURA 30: CORTE TRANSVERSAL DEL REACTOR

OPERACIÓN.

Al entrar en operación, un tanque Imhoff debe sembrarse para poner en marcha el proceso de digestión. Esto se hace utilizando lodos digeridos de otro tanque, o a falta de éstos, materia nutritiva, tal como unas cuantas paladas de abono o estiércol. Puede desarrollarse una espuma o nata excesiva, como resultado de condiciones ácidas, teniéndose que usar medios correctivos, tales como adiciones de cal en poca cantidad, a fin de ajustar así el pH hasta el punto neutro. En su funcionamiento normal, un tanque Imhoff debe ser vigilado diariamente, aunque para hacerlo no exija mucho trabajo en su manejo ni muchas herramientas. Al subir los gases para salir por las ventosas, llevan algunos sólidos a la superficie, y pueden formar espuma o nata gruesa flotante. Los gases pueden levantar las masas sobrenadantes aun hasta rebosar las paredes, estorbando así el paso normal de ellos, haciendo que pasen hacia arriba a través de la ranura de las cámaras de sedimentación, se vuelven sépticos, a menos que sean removidos. Sin embargo, pueden prevenirse la mayoría de las dificultades o mal funcionamiento del tanque por medios sencillos. La espuma o nata se dispersa u obliga a bajar por medios de chorros de agua con manguera, y los sólidos de la cámara de sedimentación se obligan a bajar utilizando una cadena pesada, suelta, de rastreo. Hay que conocer el nivel de los lodos de cuando en cuando, para lo cual se usa un palo y placa o una bomba de mano con manguera, para mantener este nivel bajo control, sacando mensualmente los lodos digeridos, o cuando se requiera, para obtener buen resultado. Los lodos se descargan sobre lechos de arena para secarlos.

En igualdad de las demás condiciones, la misma profundidad y complejidad de un tanque Imhoff pueden regir a veces en contra de su elección. Es obvio que la mayoría de los emplazamientos para las estaciones depuradoras han de estar en tierras bajas, o sea, cerca de un río o lago, que sería el cuerpo receptor para los efluentes. Por eso deben tenerse presentes los problemas de diseño y de construcción que se plantean debidos a las presiones desequilibradas de las aguas freáticas, del encofrado y muchos otros factores.

REACTOR ANAEROBIO DE FLUJO ASCENDENTE (UASB) TAMBIÉN CONOCIDO COMO RAFA

El aumento de conciencia de que el tratamiento de efluentes es de vital importancia para evitar la contaminación ambiental, resultó en la necesidad de desarrollar procesos que combinen una alta eficiencia de tratamiento con bajos costos de construcción y mantenimiento (Van Haandel y Lettinga). El UASB (Reactor Anaeróbico de Flujo Ascendente y Manto de Lodos) aparece entonces como una opción viable para el tratamiento de efluentes orgánicos líquidos. El concepto de reactor UASB fue desarrollado en los años 70 por Lettinga y colaboradores, ahora aplicado mundialmente para el tratamiento de efluentes cloacales en países de clima tropical (Seghezzo et al). En climas templados y subtropicales no ha sido utilizado, principalmente por limitaciones de temperatura, la cual afecta la tasa de hidrólisis del material particulado y reduce la eficiencia del tratamiento. En el país no existen antecedentes de tratamiento anaeróbico de líquidos cloacales. La principal característica de un reactor UASB, además del flujo ascendente, es la formación de un manto de lodo floculento o granular con buena capacidad de sedimentación, en donde se realiza la actividad biológica. La granulación es un proceso que ha sido citado en pocas oportunidades durante el tratamiento de líquidos cloacales (Barbosa y Sant'Anna).

A temperaturas moderadas, la presencia de sólidos en suspensión constituye un inconveniente para el tratamiento anaeróbico. Para superar este inconveniente, se han propuesto sistemas anaeróbicos en dos etapas. En la primera etapa se retienen e hidrolizan parcialmente los sólidos y en la segunda se degradan los compuestos solubles presentes en el líquido, y aquellos generados durante la primera etapa.

El Tiempo de Retención Hidráulica (TRH) es uno de los parámetros más importantes en todo sistema de tratamiento de aguas residuales. En el caso de los líquidos cloacales, donde la presencia de sólidos en suspensión es considerable, existe un tiempo de retención óptimo que permite una máxima remoción de sólidos y materia orgánica expresada como Demanda Química de Oxígeno (DQO).

Los objetivos del presente trabajo fueron los siguientes:

- ✓ Estudiar la eficiencia de remoción de materia orgánica en un reactor UASB durante el tratamiento de líquidos cloacales presedimentados en un sedimentador primario convencional.
- ✓ Evaluar el efecto del tiempo de retención hidráulica sobre la eficiencia de remoción de materia orgánica.

EJEMPLO DE OPERACIÓN DE UN REACTOR UASB (REACTOR ANAERÓBICO DE FLUJO ASCENDENTE Y MANTO DE LODOS) A ESCALA PILOTO.

El trabajo fue llevado a cabo en la ciudad de Salta, cuyo clima está definido como subtropical con estación seca. La temperatura media ambiente es de 16,5°C (Arias y Bianchi). El proyecto de investigación se llevó a cabo en un reactor UASB a escala piloto instalado en la planta depuradora de líquidos clocales, ubicada en la zona sur de la ciudad de Salta. Las dimensiones del reactor son las siguientes: diámetro: 0.50 m; altura de líquido: 2.55 m; volumen útil: 500 L; área transversal: 0.196 m².

El cuerpo principal del reactor y el dispositivo interno de separación de fases fueron construidos con poliéster reforzado con fibra de vidrio (PRFV) y las cañerías empleadas para las conexiones de entrada y salida y el distribuidor del líquido influente son de PVC estándar de 1/2 o 3/4 de pulgada. El reactor cuenta con 15 válvulas esféricas de PVC para la toma de muestras, distribuidas a lo largo del reactor y espaciadas 0.15 m entre sí. El líquido influente es sometido previamente a un tratamiento primario que consiste en el pasaje a través de rejillas, desarenadores y sedimentadores primarios.

Durante la operación, se realizan ensayos de Actividad Metanogénica Específica, expresada como gDQO-CH₄/gSSV.d (gramos de metano en términos de demanda química de oxígeno por gramo de sólidos volátiles en suspensión por día) en el lodo anaeróbico desarrollado en el reactor.



FIGURA 31: FOTOS DE REACTOR UASB

El reactor tipo EASA

El Reactor tipo EASA consiste en un tanque de sección cuadrada en su parte superior, y pirámide truncada con pendientes de 45° en su sección inferior, parecido a un sedimentador tipo Dortmund. La alimentación del tanque se efectúa por un tanque deflector central de sección cuadrada concéntrica, el cual desciende hasta el fondo del reactor obligando al líquido residual a ponerse en contacto con los lodos concentrados en el fondo.

La operación hidráulica es similar a la de un tanque Dortmund: alimentación central a través de un deflector, el cual obliga al agua a ingresar al tanque por su sección inferior en forma radial uniformemente distribuida, con recolección del agua decantada mediante un vertedor perimetral, o alternativamente, mediante una serie de tuberías perforadas horizontales, similares a las utilizadas en la salida de un sedimentador laminar.

En la parte superior del Reactor tipo EASA se ha diseñado un fondo falso en viguetas prefabricadas, que permite la instalación de una capa de material poroso (escoria volcánica) que actúe bajo el concepto de un Filtro Anaeróbico de Flujo Ascendente (FAFA), con la diferencia que su tamaño es menor que el que habría correspondido a un diseño de FAFA convencional. La relación volumétrica se basa en un 60% para el proceso UASB y un 40% para el FAFA, respecto del volumen total del tanque sin contar el tanque de carga.

El primer Reactor tipo EASA se implementó en 1991 en un complejo turístico denominado Jacó Beach – Jacó Princess, el cual fue evaluado con apoyo de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de Costa Rica, en donde el consultor ha fungido como profesor durante los últimos 12 años. Posteriormente se evaluó en 1995 la operación sanitaria de otra unidad similar, con aguas residuales de naturaleza industrial. En ambas investigaciones se obtuvieron excelentes resultados en la depuración, con eficiencias en remoción de DBO superiores al 60% durante los primeros meses de operación (no incluye la eficiencia del tratamiento primario, únicamente eficiencia del reactor).

Los detalles constructivos y operacionales, hidráulicos y sanitarios, así como los resultados de las evaluaciones técnicas efectuadas, serán expuestos en la presentación oral de la ponencia, apoyado con múltiples diapositivas ilustrativas basadas en cinco proyectos reales, que se encuentran operando actualmente en Costa Rica, con aguas residuales de diferente naturaleza.

Con base en las evaluaciones técnicas y experiencia profesional del consultor, es posible asegurar una serie de ventajas comparativas del Reactor tipo EASA con respecto a los reactores convencionales, como se verá a continuación.

VENTAJAS DEL REACTOR TIPO EASA

Sistema de distribución de caudal afluente: el Reactor tipo EASA cuenta con tabiques a 45° en el fondo del tanque, utilizados como concentradores de lodos que permiten un mejor contacto entre el agua residual y el manto de lodos, además de facilitar un efecto decantador del material suspendido afluente. Este es uno de los problemas típicos de diseño del proceso convencional: la distribución uniforme del agua durante su trayectoria ascendente dentro del reactor, problema que es superado en el Reactor tipo EASA en razón de su diseño geométrico con dos ejes de simetría, eliminándose los volúmenes muertos.

- a) Inclusión de un FAFA: la inclusión de un pequeño FAFA dentro del mismo reactor, permite la aplicación de un proceso biológico anaeróbico en serie, hecho que aumenta la eficiencia del sistema en remoción de materia orgánica, y permite eliminar los requerimientos de estructuras de separación de fases, dado que el filtro actúa en tal sentido, con excelente clarificación del agua tratada. El FAFA permite además mejorar la eficiencia bacteriológica del reactor, dada la

actividad biológica ocasionada en la zooglea adherida al material granular. Esta condición mejora la eficiencia en remoción de patógenos, la cual es mínima en el caso del proceso convencional de manto de lodos.

- b) Sistema de recolección de agua tratada: la existencia de un vertedor perimetral de recolección de agua tratada, con una tasa de derrame lineal mínima debido a la gran longitud desarrollada en el vertedor, colabora al establecimiento del flujo pistón ascendente, de tal forma que se eliminan zonas muertas, efectos de corto circuito y arrastre de sólidos. Opcionalmente se puede implementar un sistema de tuberías perforadas o vertedores superficiales de recolección, colocados en forma horizontal, como se mostrará en diapositivas.
- c) Efecto sedimentador: debido a la forma geométrica del tanque, cuya operación hidráulica semeja un sedimentador del tipo Dortmund, facilita la decantación de sólidos suspendidos, que son posteriormente digeridos en el manto de lodos, en la zona de mayor concentración de biomasa.
- d) Maduración de lodos: el inmediato adensamiento de lodos anaeróbicos producidos en el Reactor tipo EASA es evidente, en razón de su forma cónica, misma utilizada para la medición del material sedimentable en el laboratorio (cono Imhoff). Esta situación promueve la maduración de los lodos anaeróbicos granulares en un tiempo más pequeño que el requerido en los procesos convencionales.
- e) Velocidad ascensional: la presencia de un FAFA en la parte superior del reactor permite operar con tasas de derrame mayores que las normalmente utilizadas para el proceso convencional, sin que esto ocasione pérdida de biomasa por arrastre. Los criterios utilizados por el consultor para el diseño de la velocidad de ingreso en el deflector central, y la velocidad ascensional en la sección prismática del proceso UASB, corresponden a tasas de derrame un 50% menores que las normalmente aplicables al diseño de sedimentadores Dortmund. Obsérvese que el gradiente de velocidad ascensional es descendente, similar a un proceso Langelier, debido a la amplificación gradual de la sección transversal al flujo, propia del Reactor tipo EASA.
- f) Tamaño del reactor: el Reactor tipo EASA ocupa una menor área constructiva que los procesos convencionales debido a su forma geométrica, presentando una relación Área/Volumen pequeña. Así por ejemplo, una unidad de 500 m³ de volumen, ocuparía no más de 100 m² de área superficial (10 m x 10 m).
- g) Purga de lodos: las purgas de lodos biológicos requeridos para mantener en equilibrio la eficiencia del reactor son altamente eficientes en el Reactor tipo EASA, debido a la existencia de un concentrador de lodos en el fondo, similar al tanque Dortmund. Debido a ello se garantiza una purga altamente concentrada, con volumen mínimo a evacuar, sin posibilidad de sedimentos remanentes. Esta situación no se logra en los sistemas convencionales, dada su fondo plano.
- h) Costo del reactor: los costos constructivos del Reactor tipo EASA compiten con los costos típicos de unidades convencionales UASB ó FAFA, y pueden ser aún menores, dependiendo de las técnicas constructivas empleadas. A manera de ejemplo, una unidad de 500 m³ de volumen puede construirse con US\$ 48.000.00 , guardando en el diseño una correcta calidad estructural.
- i) Control de olores: debido a su forma geométrica y altura, se acostumbra construir el Reactor tipo EASA parcialmente enterrado, con la sección prismática a la vista. Esta situación, aparte de tornar agradable el diseño arquitectónico y optimizar el diseño estructural, ocasiona un efecto

de "chimenea" que facilita la dilución del biogás en el aire (en caso de no desearse cerramiento superficial). En caso de cerrarse la superficie del reactor, el costo del cerramiento es mínimo, debido a su menor área superficial comparativa con reactores convencionales. Ante esta posibilidad, resulta atractivo el aprovechamiento de biogás.

- j) **El Reactor tipo EASA presenta todas las demás ventajas que pudieran derivarse de la aplicación de la tecnología de reactores anaeróbicos de flujo ascendente convencionales.**

El Biogás como Subproductos del tratamiento anaeróbico

El biogás, con alto porcentaje de CH_4 (gas de efecto invernadero) no se debe emitir al aire; aunque tampoco debemos quemarlo, sino promover su aprovechamiento energético: Electricidad / Calefacción / etc.

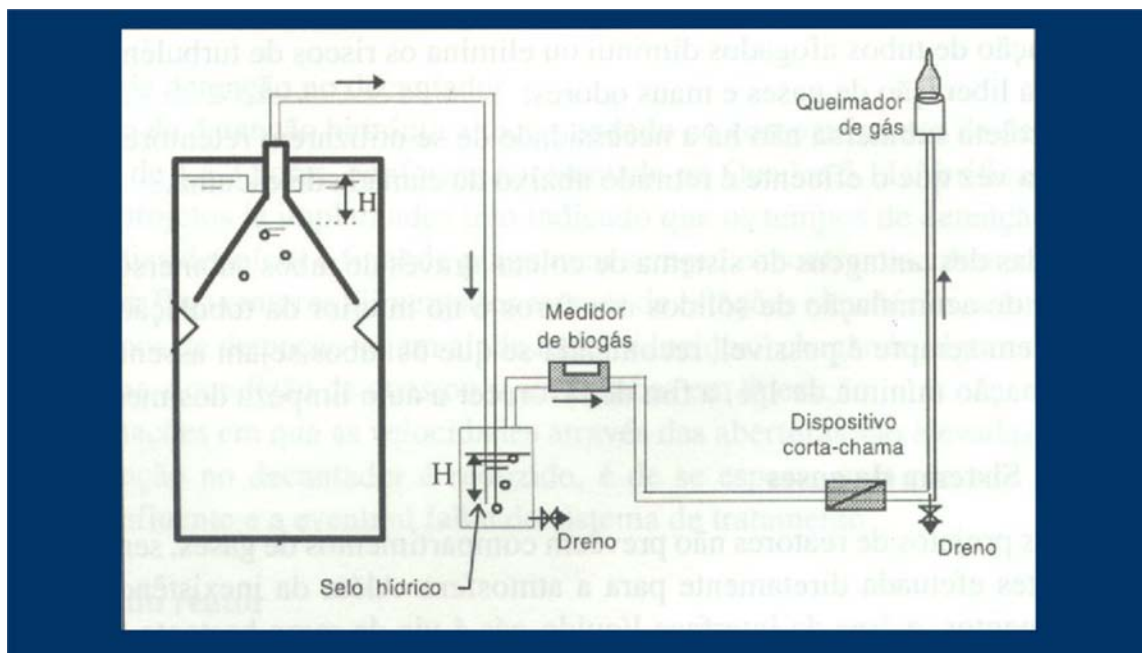


FIGURA 32: INSTALACIÓN TÍPICA DE APROVECHAMIENTO DEL BIOGAS

Producción promedio de biogás:

Se muestran valores de producción de biogás en la Figura 33, para reactores convencionales.

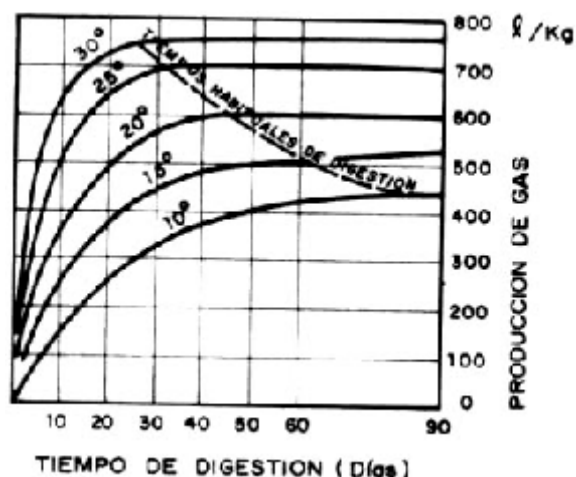


FIGURA 33: PRODUCCIÓN DE GAS A PARTIR DE 1KG DE RESIDUO ORGÁNICO DE LODO FRESCO INYECTADO EN UN DIGESTOR, SOMETIDO A VARIAS TEMPERATURAS, SEGÚN IMHOFF – FAIR.

Características

Se puede afirmar de manera general que la composición del biogás es de cerca del 70% de metano (CH_4), y 30% de gas carbónico (CO_2), con trazas de gas sulfídrico (H_2S). También se citan pequeños porcentajes de N_2 , H_2 y O_2

Consumo de biogás típico

La Tabla 3 presenta el consumo de biogás en algunas actividades, La SANEPAR, en la ciudad de Pirai do Sul, distribuye el biogás producido, en la digestión **de aguas residuales** y residuos sólidos urbanos, en aproximadamente 286 residencias, utilizando una red de distribución pública. Se debe destacar también la intensa investigación y desarrollo de tecnología que se observa en Brasil en cuanto al uso automotriz del biogás.

Purificación

Se debe proceder a la remoción de H_2S y del CO_2 contenidos en el biogás. La presencia del primero es objetada debido a problemas de corrosión, y del segundo cuando el objetivo es el uso de combustible automotriz.

TABLA 3: CONSUMO DE BIOGÁS EN ALGUNAS ACTIVIDADES.

Destino	Características	Consumo promedio
Lamparín	Camiseta 100 velas	0,12 m ³ /h
	Camiseta 500 velas	0,105 m ³ /h/injector Ø 1,1
Cocina	Quemador Ø 2"	0,32 m ³ /h
	Por persona/día	0,33 m ³ /día
	02 quemadores inyector Ø 2,0" ¹	0,50 m ³ /día
Horno	Cocina doméstica	0,44 m ³ /hora

Refrigerador	Quemador Inyector Ø 1,1 ¹⁶	0,077 m ³ /h
	Porte mediano	2,20 m ³ /día
Motor	Ciclo Otto	0,45 m ³ /HP-hora
Ducha a gas	Para baño	0,80 m ³
Incubadora	Espacio interno	0,60 m ³ /h
Campana de rayos infra-rojos	1.500 Kcal; inyector Ø 2,0 ¹⁷	0,162 m ³ /h
Calentamiento de agua	100 ° c	0,08 m ³ /t
Electricidad	1 Kw/h	0,62 m ³ /h

Planta de tratamiento de aguas con un sistema de cogeneración para la producción de electricidad y calor.

Resumen

La planta de tratamiento de aguas Portinho da Costa¹⁸ cubre aproximadamente el 24% del tratamiento de aguas residuales en el municipio de Almada. El biogás producido se utiliza en un sistema de cogeneración para producir electricidad y calor. Gracias a este sistema de cogeneración, el consumo de gas natural y energía eléctrica se ha reducido en un 67%, lo que equivale a una reducción de 2000 Mwh al año. En el plano medioambiental, el uso de esta tecnología ha reducido las emisiones de gases de efecto invernadero (CO₂) en un 38%, es decir 687 toneladas. Esta planta de tratamiento de aguas cuenta con las mejores y más avanzadas tecnologías y tiene una alta eficiencia de tratamiento (el porcentaje de eliminación de sustancia orgánica es del 96%).

Contexto

En el municipio de Almada se trata casi el 100% de las aguas residuales. Este objetivo se concretó gracias a una estrategia del municipio para cubrir todo el concejo con sistemas de tratamiento y buenos sistemas de drenaje. Para ello, el municipio posee cuatro plantas de tratamiento de aguas. Una de ellas es Portinho da Costa, una planta respetuosa con el medio ambiente y energéticamente eficiente que transforma los residuos en calor y electricidad.

Proceso

La planta de tratamiento de aguas de Portinho da Costa se construyó con una instalación de sistema de cogeneración que transforma el biogás en calor y electricidad. El biogás se obtiene mediante la gestión anaeróbica de los lodos procedentes del tratamiento de las aguas residuales.

¹⁶ Medidas de "Jackwall" para presión de 150 mm de agua

¹⁷ Estos valores representan un promedio de 8 autores

¹⁸ Servicios Municipales de Agua y Saneamiento. SMAS Portugal. <http://www.ageneal.pt/>

Esta planta de tratamiento de aguas cubre el 24% de las aguas residuales del municipio de Almada. Con la construcción de esta planta, el municipio consigue tratar el 100% de las aguas residuales sin incrementar las emisiones de gases de efecto invernadero.

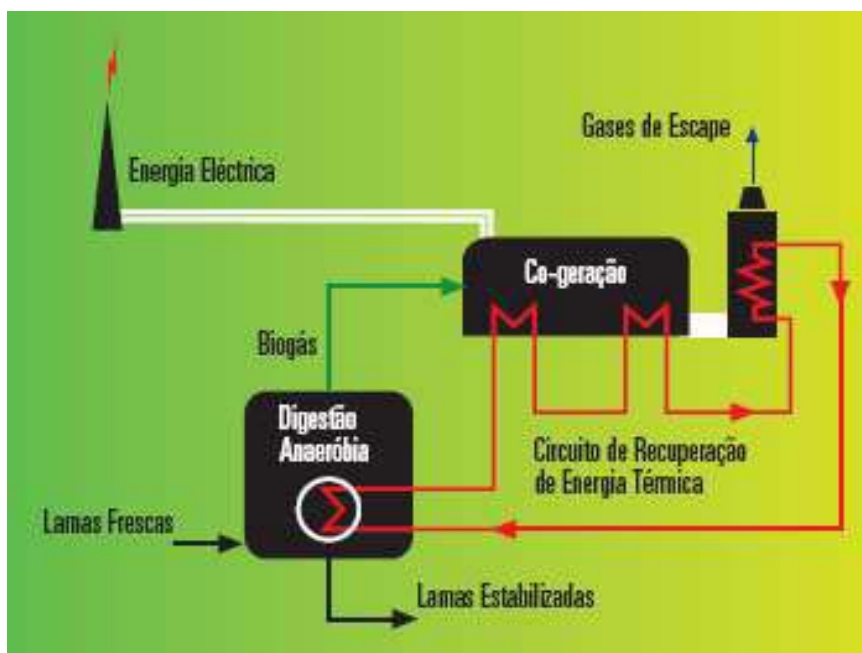


FIGURA 34: ESQUEMA DE LAS INSTALACIONES DE LA PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUAS PORTINHO DA COSTA

Resultados

Gracias al uso del sistema de cogeneración, se redujeron los consumos de gas natural y electricidad en un 67%, lo que en vatios supone una reducción de 2000 Mwh al año. En el plano medioambiental, el uso de esta tecnología ha reducido las emisiones de gases de efecto invernadero (CO₂) en un 39%, es decir 687 toneladas.

La planta de tratamiento de aguas del municipio de Almada ya está tratando todas las aguas residuales y, gracias a la instalación de un sistema de cogeneración que transforma el biogás en energía eléctrica y térmica, no se emiten gases de efecto invernadero a la atmósfera.

Descripción técnica

La figura Figura 35 se muestra un esquema del proceso de tratamiento de la planta de tratamiento de aguas de Portinho da Costa.

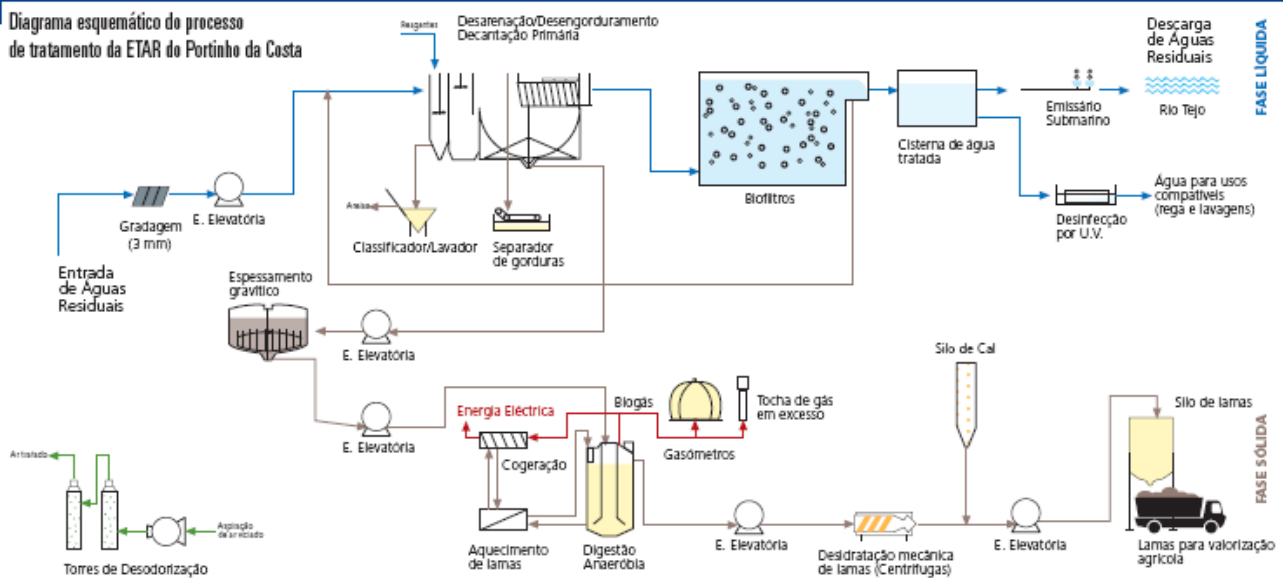


FIGURA 35: ESQUEMA DE PROCESO DE PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUAS DE PORTINHO DA COSTA

En la planta de tratamiento de aguas de Portinho da costa, los lodos (producto del tratamiento de las aguas residuales) se utilizan para producir biogás por medio de una digestión anaeróbica. El biogás producido se utiliza después en un sistema de cogeneración para producir electricidad y calor.

Datos energéticos

Los lodos son uno de los subproductos del proceso de tratamiento de aguas residuales y se utilizan para producir biogás. Los lodos están compuestos por sustancias orgánicas del alcantarillado y son el mejor producto para la digestión anaeróbica (degradación biológica sin oxígeno). El producto final de este proceso es el biogás, una fuente renovable de energía, que está compuesto principalmente de CH_4 (metano) y CO_2 .

La composición del biogás depende de las características de los residuos y de las condiciones del proceso de digestión anaeróbica, pero, de media, el biogás está compuesto por un 60% de CH₄ y un 40% de CO₂.

En la planta de tratamiento de aguas de Portinho da Costa la composición del biogás es de un 69% de CH₄, un 28% de CO₂ y un 3% de N₂ y O₂.

El biogás producido se utiliza en un sistema de cogeneración que genera electricidad y calor. El sistema de cogeneración está compuesto por dos líneas de generación de electricidad (2x250 Kw) que transforman aproximadamente el 33% de la energía contenida en el biogás en electricidad, y aproximadamente el 60% del contenido de energía del biogás también se recupera a través de los gases de escape y los circuitos de refrigeración de motor. El biogás se almacena en dos tanques flotantes de doble membrana (2x200 m3).

Gracias a este sistema de cogeneración es posible reducir el consumo de electricidad y gas natural en un 67%, lo que equivale aproximadamente a 2000 Mwh al año (véase la tabla más abajo).

	Forma de energía	Consumo (Mwh/año)	Energía (Mwh/año)	Energía (%)
Sin cogeneración	Energía eléctrica	1778		
	Gas natural	1282		
	Biogás (no se utiliza)	3007		
Con cogeneración	Energía eléctrica	967	812	46%
	Gas natural	51	1232	96%
	Biogás (se utiliza)	3007		

La tabla siguiente resume los datos medioambientales, con y sin un sistema de cogeneración.

	Forma de energía	Emisiones de CO ₂ (Ton CO ₂ equi/año)	Total (Ton CO ₂ equi/año)	Reducción de emisiones de CO ₂ (Ton CO ₂ equi/año)	Reducción de emisiones de CO ₂ (%)
Sin cogeneración	Energía eléctrica	959	1223		
	Gas natural	260			
	Biogás (no se utiliza)	4,9			
Con cogeneración	Energía eléctrica	521	536	687	39
	Gas natural	10,2			
	Biogás (se utiliza)	4,9			

Gracias a este sistema el municipio redujo sus emisiones en unas 687 toneladas CO₂ equi/año.

OTRAS FORMAS DE EXTRAER ENERGÍA DE LAS AGUAS RESIDUALES.

Utilización como calefacción/Refrigeración

Asimismo, otros dispositivos existen para extraer energía al proceso de tratamiento de aguas residuales. Uno de estos es proponer la utilización de éstas en sistemas de climatización. Por ejemplo, la empresa alemana Eco-S comercializa una tecnología que aprovecha durante todo el año la temperatura constante de las aguas residuales en la planta de tratamiento, entre 10 y 20 grados, para hacer funcionar bombas de calor. En invierno, puede proporcionar calefacción, salvo en los días más fríos, en los que se recurre al gas convencional. En verano, la bomba de calor puede utilizarse para enfriar el ambiente. Por ello, diversas ciudades alemanas como Berlín, Singen, Waiblingen y Leverkusen cuentan con instalaciones de este tipo.

En Suiza, gracias al programa SuisseEnergie, el ingeniero suizo Ernst A. Müller ha desarrollado una tecnología similar que ya se ha utilizado en Basilea. Por su parte, el ingeniero Urs Studer ha inventado otro sistema, denominado Rabtherm, que también recupera el calor de las aguas que pasan por las canalizaciones residuales y emplea el mismo en calentar/refrigerar departamentos o casas particulares. En este caso, su método se utilizará para calentar la ciudad olímpica de Vancouver en 2010, así como la Fundación Bill Gates de Seattle y el estadio Ernst Happel de Viena.

Bomba de Calor: Principio de funcionamiento.

El principio de funcionamiento de las Bombas de Calor no es reciente. Sus orígenes provienen del establecimiento por Carnot en 1824, de los conceptos de ciclo y reversibilidad, y por la concepción teórica posterior de Lord Kelvin. Un gas evolucionaba cíclicamente, era comprimido y posteriormente expandido, obteniendo frío y calor. La Bomba de Calor aporta soluciones energéticas y medioambientales acordes con la demanda de la época actual ya que es capaz de forzar el flujo de calor en la dirección contraria, utilizando una cantidad de trabajo relativamente bajo.

Una bomba de calor¹⁹ es una máquina térmica que permite transferir energía en forma de calor de un ambiente a otro, según se requiera. Para lograr esta acción es necesario un aporte de trabajo acorde a la segunda ley de la termodinámica, según la cual el calor se dirige de manera espontánea de un foco caliente a otro frío, y no al revés, hasta que sus temperaturas se igualan.

Este fenómeno de transferencia de energía calorífica se realiza -principalmente- por medio de un sistema de refrigeración por compresión de gases refrigerantes, cuya particularidad radica en una Válvula inversora de ciclo que forma parte del sistema, la cual puede invertir el sentido del flujo de refrigeración, transformando el condensador en evaporador y viceversa.

¹⁹ http://es.wikipedia.org/wiki/Bomba_de_calor

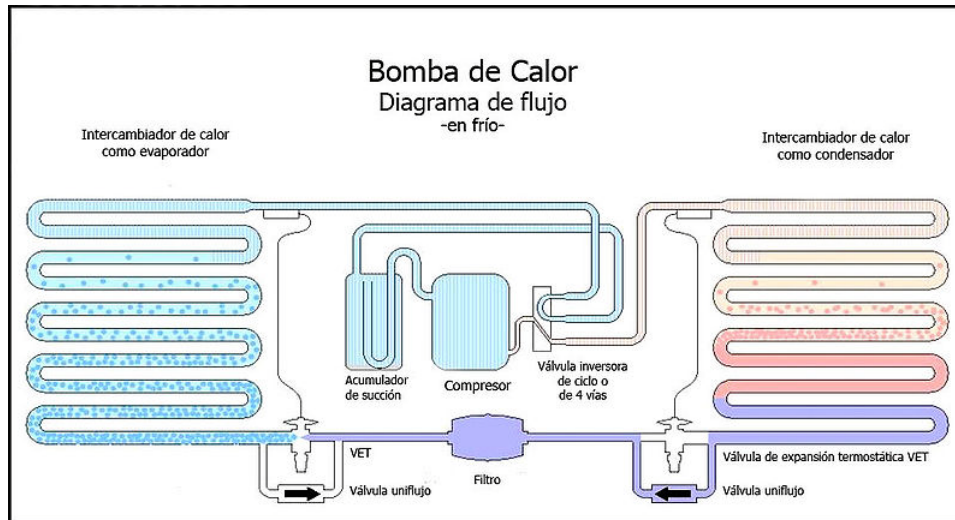


FIGURA 36: DIAGRAMA DE FLUJO DE UNA BOMBA DE CALOR.

Una bomba de calor de refrigeración por compresión emplea un fluido refrigerante con un bajo punto de ebullición. Éste requiere energía (denominada calor latente) para evaporarse, y extrae esa energía de su alrededor en forma de calor.

El fluido refrigerante a baja temperatura y en estado gaseoso pasa por un compresor, el que eleva su presión aumentando así su energía interna. Éste, al pasar por el intercambiador de calor llamado condensador, cede calor al foco caliente porque está aún más caliente que éste, donde cambia su estado a líquido. Después se le hace pasar por una válvula de expansión, donde recupera la presión inicial y se enfría bruscamente. Luego pasa por otro intercambiador de calor, el evaporador, donde absorbe calor del foco frío, puesto que está más frío que dicho foco. El fluido, que se ha evaporado, regresa al compresor, cerrándose el ciclo.

La válvula inversora de ciclo o válvula inversora de cuatro vías se encuentra a la salida (descarga) del compresor y, según la temperatura del medio a climatizar (sensada en la presión de refrigerante antes de ingresar al compresor), invierte el flujo del refrigerante.

RENDIMIENTO

La cantidad de calor que se puede bombear depende de la diferencia de temperatura entre los focos frío y caliente. Cuanto mayor sea ésta diferencia, menor será el rendimiento de la máquina.

Las bombas térmicas tienen un rendimiento, denominado **COP** (coefficient of performance) mayor que la unidad. Aunque esto puede parecer imposible, se debe a que en realidad se está moviendo calor usando energía, en lugar de producir calor como en el caso de las resistencias eléctricas. Una parte muy importante de este calor se toma de la entalpía del aire atmosférico. En toda bomba de calor se verifica que el calor transmitido al foco caliente es la suma del calor extraído del foco frío más la potencia consumida por el compresor, que se transmite al fluido.

$$Q_C = Q_F + W$$

Dado que el efecto útil de una bomba de calor depende de su uso, hay dos expresiones distintas del COP. Si la máquina se está usando para refrigerar un ambiente, el efecto útil es el calor extraído del foco frío:

$$COP = \frac{Q_F}{W}$$

Si la bomba de calor está usándose para calentar una zona, el efecto útil es el calor introducido:

$$COP = \frac{Q_C}{W} = \frac{Q_F + W}{W}$$

Una bomba de calor típica tiene un COP de entre dos y seis, dependiendo de la diferencia entre las temperaturas de ambos focos.

Un COP de cuatro significa que por cada unidad de energía que consumen, ellas generan cuatro. Los consumos de las calderas no son medidos en COP, pero para que nos hagamos una idea, podemos decir que por cada unidad que consume una caldera de gas o gasóil, produce menos de uno, mientras que por cada unidad que consume una bomba de calor, produce cuatro. Como vemos, la eficiencia energética de la bomba de calor es enorme, en comparación con una caldera, aunque ésta sea de alto rendimiento. Frente a las calderas, la climatización mediante bomba de calor tiene la gran ventaja de que puede producir tanto calefacción como refrigeración, que junto a su gran eficiencia, las colocan en el ranking número uno de la eficiencia energética y del ahorro de energía.

USOS

El principio de la bomba de calor se utiliza en sistemas de climatización o HVAC, así como en sistemas domésticos de aire acondicionado, dado que el ciclo reversible que tiene este sistema otorga la posibilidad tanto de extraer como de ingresar energía al medio -"enfriar" o "calentar"- con un mismo equipo, controlando arranques, paradas y el ciclo reversible en forma automática. Gracias a su versatilidad, es posible encontrar bombas de calor tanto para calentar una piscina como para controlar el ambiente de un invernadero.

En la actualidad, y en pos del ahorro energético, cada vez es más usual encontrar arreglos de bombas de calor asistidos por colectores solares y en sistemas geotérmicos.

Capacidad calorífica específica

El agua tiene el segundo índice más alto de capacidad calorífica específica —sólo por detrás del amoníaco— así como una elevada entalpía de vaporización ($40.65 \text{ kJ mol}^{-1}$); ambos factores se deben al enlace de hidrógeno entre moléculas. Estas dos inusuales propiedades son las que hacen que el agua "modere" las temperaturas terrestres, reconduciendo grandes variaciones de energía.

También es esta característica la que permite desarrollar máquinas y artilugios que a continuación se describen.

Aguas residuales para Calefacción doméstica.

¿Se puede calentar una casa recuperando el calor de sus aguas usadas? Es posible, gracias a la tecnología desarrollada por un ingeniero suizo. Ante el alza del precio del petróleo, el sistema resulta muy interesante. En 2010, esta innovadora forma de calefacción se utilizará en la ciudad olímpica de Vancouver, Canadá.

La oferta de calor de las aguas residuales es increíblemente alta, ya que la temperatura media de estas es constante y oscila entre 12 a 16°C , dependiendo de la profundidad por la que discurren. ¿Quién no ha visto en alguna ocasión salir vapor de las tapas de alcantarilla en pleno invierno?

Si se cumplen las dos condiciones fundamentales, a saber, que en la canalización haya una oferta calorífica suficiente para el funcionamiento de una bomba de calor y que exista la posibilidad de instalar un intercambiador de calor, el aprovechamiento del calor de las aguas residuales es interesante a partir de caudales de 15 l/s y para municipios de más de 10.000 habitantes con canalizaciones con un diámetro mínimo de 800 mm. Los consumidores apropiados son los edificios de cierta envergadura o barrios y urbanizaciones en las cercanías de la fuente de calor, con una demanda de calefacción y agua caliente de 150 Kw. a aprox. 2 Mw. (instalaciones bivalentes). Las bombas de calor para aguas residuales también son bombas de calor de gran capacidad. Invertiendo el ciclo de funcionamiento del intercambiador, conseguiremos el efecto contrario, es decir refrigerar y enfriar un edificio.

"Siempre me fascinó ver el vapor que sale de las canalizaciones urbanas en invierno. El calor está allí y la tecnología apta para explotarlo existe desde hace 20 años", afirma Ernst A. Müller, experto de la Oficina Federal de la Energía (OFEN) y responsable del programa SuisseEnergie.

Esta idea seduce por su dimensión ecológica, pero también porque su costo es estable, ya que no depende de las fluctuaciones del mercado petrolero. Y, por otra parte, también tiene cierta autonomía en comparación con otras fuentes energéticas extranjeras.

El principio es simple: tomar el calor de las aguas de la alcantarilla, y utilizarlo para hacer girar las bombas de calor. La técnica ya ha sido desarrollada de modo eficiente: las bombas de calor para aguas residuales permiten recuperar la energía térmica de las aguas residuales para reinyectarla en los sistemas de calefacción, refrigeración y de agua caliente de los edificios. De este modo se consigue cerrar el circuito calorífico

El agua residual de alcantarillado tiene una temperatura media de más de 25 ° C (77 F) al salir de las casas. En los desagües de la media anual es de 15 ° C (59 F), (verano 18-22 ° C / 64 a 72 F, el invierno 10-12 ° C / 50 a 54 °F). Con las modernas bombas de calor se puede llegar a la temperatura de empleo de 65 a 70 ° C / F 149 a 158, suficiente para la producción de agua caliente y calefacción de los edificios nuevos. El calor existente en las aguas residuales de viviendas, el comercio y la industria deben ser utilizados en forma descentralizada. El nivel de temperatura de esta fuente, es más alta que de la mayoría de otras fuentes naturales, además de ser energía regenerativa. El sistema se puede utilizar en invierno para la producción de agua caliente sanitaria (durante todo el año) y en verano, con pequeñas inversiones adicionales para la producción de agua fría para los sistemas de aire acondicionado (6 ° C/12 ° C 43/54°F). En el intercambiador de calor, se extrae el mismo de las aguas residuales y se suministra a través de un fluido portador térmico de calor. Este intercambio entre la bomba de calor (calor de producción) y un intercambiador de calor (de extracción de calor) se ejecuta a través de un tubo de plástico. La tubería de distribución de alimentación de cada uno de los intercambiadores de calor es de 1 a 3 m de largo Después, el agua ya fría se recoge en la tubería de retorno recogida y fluye de nuevo hacia la planta de tratamiento.

De este modo es lógico utilizar las aguas residuales como un importante proveedor de energía térmica. Para este fin, hace más de 10 años se desarrolló y patentó el sistema Rabtherm. Se trata de un sistema sencillo consistente en un intercambiador de calor en el canal de desagües, conducciones de transferencia de calor hacia las casas y una bomba de calor, casi siempre con una caldera bivalente de carga máxima que salta a temperaturas por debajo de los 0°C.



FIGURA 37: INTERCAMBIADORES DE CALOR EMPLEADOS PARA ESTE TIPO DE APROVECHAMIENTO CALÓRICO

Hubo que resolver detalles y problemas de ingeniería, como la corrosión, erosión, suciedad, control óptimo del intercambiador de calor, bomba de calor y caldera de carga máxima según la cantidad de aguas residuales y el consumo de energía. Con estos sistemas se puede calentar (toma del calor de las aguas residuales) y enfriar (retorno de la energía térmica a las aguas residuales). Los sistemas se pueden instalar en canales existentes o integrar directamente en las tuberías en las nuevas construcciones de canales en las Plantas de concreto. En la Figura 37, se puede apreciar un intercambiador comercial utilizado en este tipo de instalación.

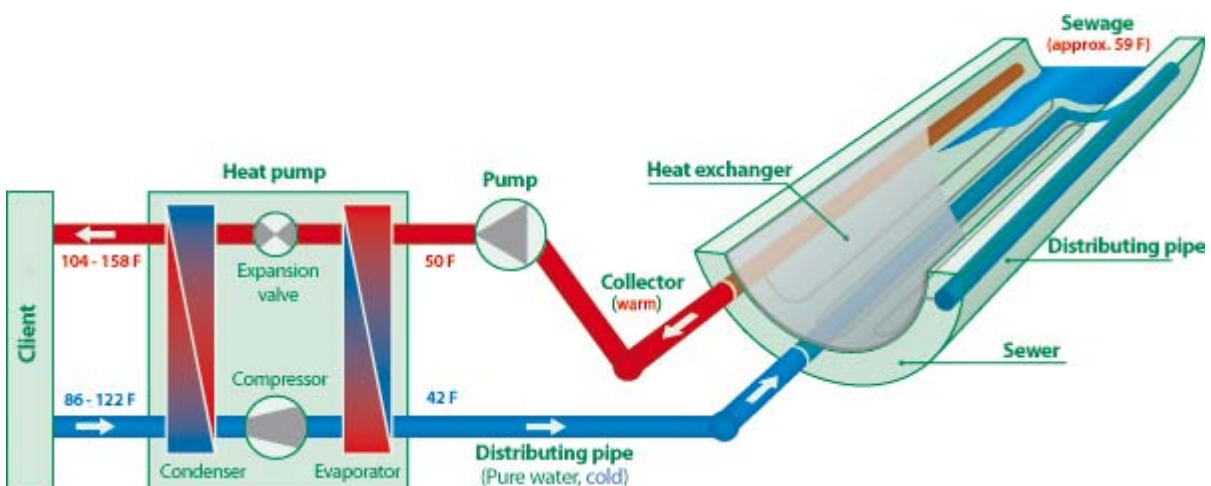


FIGURA 38: EL MÉTODO RABTHERM EMPLEADO PARA EXTRAER CALOR DE LAS AGUAS DE ALCANTARILLADO.

La idea, que parecía prometedora, en un principio fue olvidada. *"Sólo hasta en estos últimos años se ha vuelto a estudiar esta técnica"*, explica Ernst Müller, debido, en parte, al incremento continuo del precio del petróleo, y a los recientes esfuerzos para reducir las emisiones peligrosas de gases, como las del dióxido de carbono (CO₂).

POTENCIAL ENORME

Es evidente que no todas las canalizaciones se prestan para instalar los intercambiadores de calor, que permiten pasar el calor de las aguas residuales a las bombas. El sistema puede ser interesante únicamente si conecta a varias casas. Este sistema no es rentable para aquellas casas familiares o edificios que distan unos 200 o 300 metros del intercambiador de calor.

De cualquier forma el potencial del sistema es enorme. SuisseEnergie estima que si se enfriaran medio grado todas las aguas residuales de Suiza, aún se podría obtener energía suficiente para calentar 100.000 departamentos.

También se han resuelto problemas tales como los residuos de suciedad en los intercambiadores. Además, se ha comprobado que tomar el calor de las aguas residuales no repercute en el funcionamiento de las estaciones de depuración.

La experiencia también ha demostrado que los intercambiadores pueden durar tanto tiempo como las canalizaciones, es decir, unos 50 años, y que las bombas de calor resisten unos 20 años.

MERCADO PROMETEDOR

El precio del petróleo bajará, pero no regresará a los niveles del año pasado. No son las reservas del crudo las que originan el problema, sino la falta de refinerías y la dificultad del transporte", explica Studer.

Las ventajas ecológicas, considera Studer, tienen un peso mínimo, aunque reconoce que para ciertos centros urbanos como Winterthur, con el lema 'Ciudad de la energía', en verdad son muy importantes.

La ciudad del cantón de Zúrich ha examinado algunos puntos de su red de canalización dónde podrían ser instalados los intercambiadores. Incluso impulsa a los empresarios del sector de la construcción a que tomen en consideración esta opción.

Si Winterthur logra realmente instalar 41 de estos sistemas, esta ciudad suiza ahorrará 400 toneladas de combustible por año y reducirá sus emisiones de CO₂.

"Pese a que nuestro método es competitivo a largo plazo y menos costoso que la calefacción con gas o petróleo, la inversión inicial es elevada", admite Ernst Müller.

FACTORES ECONÓMICOS

La calefacción domiciliaria con aguas residuales puede ser competitiva si el precio del petróleo sobrepasa los 50 o 60 centavos por litro.

Costo por Kwh: 8 centavos, lo que es comparable al costo actual de otros sistemas de calefacción. Este sistema permite reducir las emisiones del CO₂.

La misma infraestructura puede servir para producir aire acondicionado durante la temporada calurosa.

En comparación con las energías fósiles, el aprovechamiento de la energía contenida en las aguas residuales es un aporte muy activo a la protección del clima y de la capa de ozono, ya que se evita la emisión de hasta un 70% de emisiones de CO₂ a la atmósfera y al ahorro de energía primaria, ya que reduce los costes de esta hasta en un 40%. Además, el aprovechamiento del calor de las aguas

residuales domiciliarios en la actualidad es un proceso rentable, ya que con las recientes subidas de precio del petróleo y gas natural se demuestra la importancia de invertir en la prevención y las tecnologías de ahorro de energía.

Actualmente, la cantidad de calor que contienen las aguas residuales se pierde en la atmósfera. El potencial de utilización de este calor es muy considerable: si le extraemos calor a 1m³. de agua residual, podremos obtener aproximadamente 2,5 Kwh..

Centrales Hidroeléctricas.

Introducción

Una **central hidroeléctrica** es aquella que utiliza energía hidráulica para la generación de energía eléctrica. Son el resultado actual de la evolución de los antiguos molinos que aprovechaban la corriente de los ríos para mover una rueda.

En general estas centrales aprovechan la energía potencial que posee la masa de agua de un cauce natural en virtud de un desnivel, también conocido como *salto geodésico*. El agua en su caída entre dos niveles del cauce se hace pasar por una turbina hidráulica la cual transmite la energía a un generador donde se transforma en energía eléctrica.

Para este tipo de instalaciones necesitaríamos un tipo de central denominada *central de filo de agua* o de *pasada*. Operan en forma continua porque no tienen capacidad para almacenar agua, no disponen de embalse. Turbinan el agua disponible en el momento, limitadamente a la capacidad instalada. En estos casos las turbinas deben ser de eje horizontal.

El beneficio obvio del proyecto hidroeléctrico es la energía eléctrica, la misma que puede apoyar el desarrollo económico y mejorar la calidad de la vida en el área servida, o minimizar y hasta independizar energéticamente a la planta.

Además, la generación de la energía hidroeléctrica proporciona una alternativa para la quema de los combustibles fósiles, o la energía nuclear, que permite satisfacer la demanda de energía sin producir agua caliente, emisiones atmosféricas, ceniza, desechos radioactivos ni emisiones de CO₂.

Es factible la idea de llevar a cabo esta idea en las ciudades andinas, ubicadas a 2.000 metros sobre el nivel del mar, para aprovechar así su diferencia de niveles. La electricidad lograda permitiría ingresos adicionales a las plantas de tratamiento de aguas residuales.

Generalidades.

Esta nueva perspectiva a una antigua tecnología, la generación hidroeléctrica en pequeña escala, se puede implementar directamente a la red de distribución. El principal objetivo de este capítulo es mostrar los beneficios del almacenamiento del agua residual para fines energéticos. Debido a que la construcción de reservorios en los cauces de los ríos genera problemas de carácter medioambiental, en el presente se sustituye el río (como principal fuente de aprovechamiento del agua) por una "fuente artificial" (antropogénica), el agua residual producida en las zonas urbanas como fuente de agua para aprovechamiento hidroeléctrico.

Un ejemplo de aplicación es el estudio de factibilidad implementado a la ciudad peruana de Arequipa ubicada a 2335 metros sobre el nivel del mar en plena zona andina.

El autor de este estudio pretende convertir el estudio en un caso de aplicación general en la región andina y en demás ciudades ubicadas en zonas montañosas. En la región andina la geografía es abrupta con diferentes niveles.

El agua potable es suministrada para las necesidades de los ciudadanos y luego de su uso se convierte en agua residual. El agua residual es recolectada a través del alcantarillado para su posterior tratamiento antes de descargarse nuevamente en ríos.

Se plantea producir electricidad a través de Pequeñas Centrales Hidroeléctricas (PCHs) usando agua residual urbana, la electricidad a producir sería vendida directamente en el sistema eléctrico a través

de la red de distribución como Generación Distribuida. El estudio a presentar es el resultado de dos tesis de investigación (una de maestría en Suecia y una de ingeniería en Perú) aplicadas a la generación distribuida.

Ventajas

Se identificaron las siguientes ventajas:

- Existe un flujo constante de agua en las ciudades andinas. Estas ciudades necesitan abastecerse de agua (aún en períodos de sequía) así como tratar las aguas residuales. A diferencia de las PCHs ubicadas en los ríos, no existen riesgos de períodos de estiaje que puedan generar incertidumbres en el diseño y producción hidroeléctrica, ni es necesaria la revisión de la hidrología.
- El agua residual, ya esta colectada, reduciéndose los costos de captación de una PCH y por lo tanto no es necesario efectuar un estudio de impacto ambiental para su uso.
- Las ciudades en los Andes presentan buenas condiciones geográficas para el desarrollo de PCHs, debido al nivel de altura en el que se encuentran es sencillo encontrar diferencias de niveles alrededor de la ciudad.
- En la region Andina se encuentran ciudades importantes, ubicadas a alturas superiores a los mil metros sobre el nivel del mar como: Santa Fe de Bogotá, Quito; Cuenca; Mérida, La Paz, etc.
- Existen sinergias entre la industria de abastecimiento de agua y saneamiento y las PCHs.
- La energía eléctrica puede ser distribuida en la ciudad como Generación Distribuida, además la planta de tratamiento de aguas residuales también requiere el suministro de energía eléctrica. Al integrar una planta de tratamiento con las PCHs seria técnica y económicamente factible despachar la energía producida.
- Las plantas de tratamiento pueden ser operadas de manera sostenible. Con la integración sería posible obtener un ingreso adicional por venta o producción de energía, reduciéndose el costo de operación de los servicios de agua y saneamiento.
- La energía eléctrica a producir sería renovable, sin emisiones y podría sustituir la producción térmica reduciendo la emisión de gases de efecto invernadero.
- Mejorar el planeamiento y desarrollo urbano para aprovechar las sinergias entre agua, saneamiento, las PCHs y reducir el efecto de contaminación del agua.

CONCLUSIONES

El potencial de estas tecnologías es enorme, aunque para que sean competitivas frente a los sistemas convencionales deberán hacer frente a diversos **desafíos**. Por ejemplo, en el caso de los sistemas que utilizan las bombas de calor, sus responsables recuerdan que no todas las canalizaciones permiten su uso y tampoco son rentables para determinados edificios.

Pionero en el sector, Suiza ya puso en pie una instalación de calentamiento con aguas residuales cerca de la ciudad de Basilea. Experiencias del mismo género también se han realizado en la región de Stuttgart, Alemania.

En cuanto a las pilas de combustible microbianas, tendrán que desarrollarse más para rebajar el coste de sus materiales y aumentar su eficiencia energética. La tecnología ya trabaja en laboratorio sobre una base. Pero aún se necesita avanzar para reducir sus costos, mejorar la eficiencia y la producción eléctrica, e identificar los materiales de menor costo que se pueden utilizar.

Asimismo, los expertos no creen que puedan ser la base de la futura economía basada en el hidrógeno, aunque sí podrán contribuir a hacer más ecológico el tratamiento de aguas residuales y a reducir de paso sus costes.

Sin embargo, la instalación de plantas de tratamiento de aguas casi siempre va asociada a un incremento de las emisiones de gases de efecto invernadero. Estas emisiones proceden de tres fuentes diferentes: consumo de energía en las distintas fases del tratamiento, almacenamiento de lodos en vertederos y emisión de biogás a la atmósfera procedente de la digestión anaeróbica de los lodos. La instalación de un sistema de cogeneración en una planta de tratamiento de aguas permite usar el biogás para producir calor y electricidad. Este tipo de proyectos es viable en casi cualquier lugar del mundo.

Un dispositivo de celda de combustible microbiana tipo PEM puede generar electricidad y a la vez depurar agua residual, lo que lo hace atractivo para tratamientos in situ o para la modificación de las actuales plantas de tratamiento convencionales.

De todas maneras existen aun mucho por mejorar. Por ejemplo tratar de aumentar el área del ánodo para compensar las pérdidas por muerte y espacio ocupado por otras bacterias no generadoras de electricidad en el biofilm.

Otra de gran importancia es la eficiencia coulombica en un electrodo acuoso se puede mejorar empleando para el circuito una menor resistencia.

Por último, teniendo un aceptor de electrones externo la presencia de conductividad es inminente en el anolito de la MFC.

La tecnología es una realidad en lo teórico. Es verdad que su implementación requerirá de tiempos importantes y vencer inercias convencionales, pero sin duda redundará en grandes beneficios para la población y los ecosistemas.

Por otro lado, la captación del biogás producto del tratamiento anaeróbico de efluentes, nos permite evitar emanaciones de gases de efecto invernadero de gran incidencia, tales como el Metano y el Dióxido de Carbono y promover su desarrollo como fuente de combustible alternativa.

Debemos sin embargo tener en cuenta que cualquiera de los procesos anteriores de manera individual o combinada, pueden sustentar por si mismo el tratamiento total de un efluente. Ya que por su tiempo de respuesta y dinámica de funcionamiento deben ser suplementarios de los tratamientos convencionales.

En el caso del aprovechamiento hidroeléctrico de las aguas residuales, debemos identificar a esta oportunidad como una posibilidad de administrar la demanda, sobre todo si se puede planificar la producción de energía en horas pico la cual descongestiona la producción centralizada, el despacho de carga, la congestión del sistema, la posible generación térmica en horas punta con la respectiva producción de gases de efecto invernadero y los costos que generan en el mercado eléctrico la mayor demanda de energía en hora pico.

El agua residual luego de su tratamiento se puede almacenar en pequeños reservorios para producir energía hidroeléctrica en horas pico, garantizándose la venta de energía y potencia durante la hora de mayor demanda de energía eléctrica.

Las consecuencias medioambientales de almacenar agua residual tratada (o en etapa de tratamiento) diariamente serían mínimos: producción de gases de efecto invernadero, destrucción de ecosistemas terrestres e impacto visual, y esta infraestructura es necesaria y por ende inevitable construirla. El agua residual se almacenaría en pequeños reservorios abiertos (no cerrados, como en agua potable, para evitar la contaminación), e integrados al planeamiento urbano de la ciudad donde espacios y áreas abiertas son necesarios.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. Aelterman P, Rabaey K, Pham T, Boon N, Verstraete W (2006) Continuous electricity generation at high voltages and currents using stacked microbial fuel cells. *Env. Sci. Technol.* 40: 3388-3394.
2. Alzate-Gaviria L, Sebastian P, Pérez-Hernández A (2007) Comparison of two anaerobic systems for hydrogen production from the organic fraction of municipal solid waste and synthetic wastewater. *Int. J. Hydrogen Energy.* 32: 3141-3146.
3. Angenent L, Karim K, AL-Dahhan M, Wrenn B, Domingues-Espinosa R (2004) Production of bioenergy and biochemicals from industrial and agricultural wastewater. *Trends Biotechnol.* 22: 477-485.
4. APHA (1998) *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater* (1998). 18th ed. APHA, AWWA, WEF. Washington, DC, EEUU. 1170 pp.
5. Cheng S, Liu H, Logan B (2006) Increased Power generation in a continuous flow MFC with advective flow through the porous anode and reduced electrode spacing. *Env. Sci. Technol.* 40: 2426-2432.
6. Haberman W, Pommer E (1991) Biological fuel cells with sulphide storage capacity. *Appl. Microbiol. Biotechnol.* 35: 128-133.
7. He Z, Angenent L (2006) Application of bacterial biocathodes in microbial fuel cells. *Electroanalysis* 18: 2009-2015.
8. Heilmann J, Logan B (2006) Production of electricity from proteins using a single chamber microbial fuel cell. *Water Env. Res.* 78: 531-537.
9. Jang J, Pham T, Chang I, Khan K, Moon H, Cho K, Kim B (2004) Construction and operation of a novel mediator- and membrane –less microbial fuel cell. *Proc. Biochem.* 39: 1007-1012.
10. Kim J, Min B, Logan B (2005) Evaluation of procedures to acclimate a microbial fuel cell for electricity production. *Appl. Microbiol. Biotechnol.* 68: 23-30.
11. Liu H, Logan B (2004) Electricity generation using an air-cathode single chamber microbial fuel cell in the presence and absence of a proton exchange membrane. *Env. Sci. Technol.* 38: 4040-4046.
12. Liu H, Ramnarayanan R, Logan B (2004) Production of electricity during wastewater treatment using a single chamber microbial fuel cell. *Env. Sci. Technol.* 38: 2281-2285.
13. Liu H, Cheng S, Logan B (2005) Production of electricity from acetate or butyrate in a single chamber microbial fuel cell. *Env. Sci. Technol.* 39: 658-662.
14. Logan B (2004) Extracting hydrogen and electricity from renewable resources. *Env. Sci. Technol.* 38: 160A-167A.
15. Logan B, Regan J (2006a) Electricity-producing bacterial communities in microbial fuel cells. *Trends Microbiol.* 14: 512-518.
16. Logan B, Regan J (2006b) Microbial fuel cells - challenges and applications. *Env. Sci. Technol.* 40: 5172-5180.

17. Logan B, Cheng S, Watson V, Estadt G (2007) Graphite fiber brush anodes for increased power production in air- cathode microbial fuel cells. *Env. Sci. Technol.* 41: 3341-3346.
18. Lovley D, Phillips E (1998) Novel of microbial energy metabolism: Organism carbon oxidation coupled to dissimilatory reduction of iron and manganese. *Appl. Env. Microbiol.* 54: 1472-1480.
19. Metcalf y Eddy (2003) *Wastewater Engineering Treatment and Reuse*. 4a ed. Mc Graw-Hill. Madrid, España. 1485 pp.
20. Min B, Logan B (2004) Continuous electricity generation from domestic wastewater and organic substrates in a flat plate microbial fuel cell. *Env. Sci. Technol.* 38: 5809-5814.
21. Min B, Cheng S, Logan B (2005) Electricity generation using membrane and salt bridge microbial fuel cells. *Water Res.* 39: 1675-1686.
22. Niessen J, Schröder U, Scholz F (2004) Exploiting complex carbohydrates for microbial electricity generation – a bacterial fuel cell operating on starch. *Electrochem. Comm.* 6:955-958.
23. Oh S, Logan B (2007) Voltage reversal during microbial fuel cell stack operation. *Power Sources* 167: 11-17.
24. Oh S, Min B, Logan B (2004) Cathode Performance as a factor in electricity generation in microbial fuel cells. *Env. Sci. Technol.* 38: 4900-4904.
25. Park D, Zeikus J (2003) Improved fuel cell and electrode designs for producing electricity from microbial degradation. *Biotechnol. Bioeng.* 81: 348-355.
26. Pham T, Rabaey K, Aelterman P, Clauwaert P, Schamphelaire L, Boon N, Verstraete W (2006) Microbial fuel cells in relation to conventional anaerobic digestion technology. *Eng. Life Sci.* 6: 285-292.
27. Poggi-Varaldo HM, Alzate-Gaviria LM, Nevárez-Morillón VG, Rinderknecht-Seijas N (2005) A side by side comparison of two systems of sequencing coupled reactors for anaerobic digestion of the organic fraction of municipal solid waste. *Waste Manag. Res.* 23: 270-280.
28. Rabaey K, Verstraete W (2005) Microbial fuel cells: novel biotechnology for energy generation. *Trends Biotechnol.* 23: 291-298.
29. Rabaey K, Lissens G, Siliciano S, Verstraete W (2003) A microbial fuel cell capable of converting glucose to electricity at high rate and efficiency. *Biotechnol. Lett.* 25: 1531-1535.
30. http://www.swissinfo.ch/spa/Portada/Archivo/Calefaccion_con_el_uso_de_aguas_residuales.html?cid=4811444
31. <http://es.wikipedia.org/wiki/Agua>
32. VIEIRA, S.M.M. & SOUZA, M.E. Métodos analíticos para el comportamiento de una digestión anaeróbica.
33. METCALF & EDDY, INC. Biological Unit Process. In: *Wastewater Engineering: Treatment, disposal, reuse*. New York, McGraw Hill.
34. SOUZA, M.E. Factores que influyen en una digestión anaeróbica. En: *Revista DAE*. São Paulo, SABESP.

35. LETTINGA, G. y colaboradores. Anaerobic treatment of raw domestic sewage at ambient temperatures using a granular bed UASB reactor. En: Biotechnology and bioengineering.
36. LETTINGA, G. y colaboradores. High rate anaerobic wastewater treatment using the UASB reactor under a wide range of temperature conditions. Wageningen, The Netherlands, /S.d./ 27 p.
37. GOMES, C.S. & AISSE, M.M. Research at SANEPAR and State of Parana, Brazil, with anaerobic treatment of domestic sewage in full scale and pilot plants. Trabajo presentado en el Seminario/Taller Tratamiento Anaeróbico de Desagües, universidad de Massachusetts, Amherst, MA, 27-28 junio 1985.
38. VAN DER MEER, M.M. & VLETTER, R. Anaerobic treatment of wastewater: the gas-liquid-sludge separator.
39. AISSE, M.M. & ZENY, A.S. Estado técnico dos biodigestores anaeróbicos alternativos.
40. HASKONING y coautores. Anaerobic treatment and Re-use of Domestic Wastewater, Pilot Plant Study, Progress Report No. 3. Cali, Colombia.
41. VALCKE, D. & VERSTRAETE, W. A practical method to estimate the acetoclastic methanogenic biomass in anaerobic sludge.
42. AISSE, M.M.. Protocolo de Investigación, Tratamiento de Desagües Domésticos en Reactores Anaeróbicos, de Manto de Lodo, de Flujo Ascendente. Lima, OPS/CEPIS.
43. AISSE, M.M., ROJAS, R.V. 5 BARTONE, C. Estudio Preliminar Comparativo entre Lagunas de Estabilización y Reactores tipo UASB Simplificados para el Tratamiento de Aguas Residuales Domésticas. Lima, OPS/CEPIS.
44. Páginas de Internet consultadas.
 - a. <http://www.environmental-expert.com>
 - b. http://www.rabtherm.com/images/stories/Flyer_EN.pdf
 - c. http://www.rabtherm.com/index.php?option=com_content&task=view&id=27&Itemid=28
 - d. <http://www.soliclima.es/productos/9-bomba-de-calor.html>
 - e. <http://www.lacasasostenible.com/tratamiento-aguas/tratamiento-aguas-residuales.html>
 - f. <http://www.construsur.net/app/webroot/index.php/nota/index/Actualidad/tratamiento-de-aguas-grises>
 - g. <http://www.lacasasostenible.com/calefaccion/bomba-calor.html>
 - h. http://www.elaireacondicionado.com/bomba_calor/tipos.php
 - i. http://www.elaireacondicionado.com/bomba_calor/aire-agua.php
 - j. <http://www.soliclima.es/aplicaciones/4-tratamiento-de-aguas/88-tratamiento-de-aguas-residuales.html>
 - k. http://diarioverde.info/index.php?option=com_content&view=article&id=638&Itemid=76
 - l. http://energia.caib.es/user/portalenergia/pla_eficiencia_energetica/climatitzacio_1.es.html
 - m. <http://www.ecologiaverde.com/el-poder-de-las-aguas-residuales-urbanas/>
 - n. <http://www.solociencia.com/ingenieria/10081001.htm>
 - o. <http://contaminacion.geoscopio.com/medioambiente/temas/tema9/reutilizacion.php>
 - p. <http://www.cepis.ops-oms.org/eswww/fulltext/epa/pcindtex/texcap05.html>

- q. http://www.cbs.grundfos.com/export/sites/dk.grundfos.cbs/GMX_Mexico/downloads/Download_Files/Folleto_Aguas_Residuales.pdf
- r. http://es.wikibooks.org/wiki/Ingenier%C3%ADa_de_aguas_residuales/Desinfecci%C3%B3n_de_las_aguas_residuales
- s. <http://www.slideshare.net/paovalenciam1/energia-solar-trmica>

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

Figura 1: Esquema de una planta convencional de tratamiento de aguas residuales.	5
Figura 2: Esquema funcional de una celda de combustible.	9
Figura 3: Detalle del material catalítico poroso necesario para la pila de combustible.....	10
Figura 4: detalle aumentado superficie interna del poro en el lugar del menisco.....	10
Figura 5: Pasaje de Electrones del lado del Hidrógeno.....	11
Figura 6. Pasaje de Electrones del lado del Oxígeno	11
Figura 7: Bioreactor desacoplado de la MFC	14
Figura 8: Bioreactor integrado a la MFC	15
Figura 9: MFC con transferencia directa de electrones	15
Figura 10: Proceso de obtención de energía de una MFC	16
Figura 11: Proceso de obtención de energía de una MFC	17
Figura 12: Proceso final de la obtención de Energía a través de una MFC.....	17
Figura 13: Inóculos presentes en aguas residuales.	19
Figura 14: Deltaproteobacteria Shewanella oneidensis	19
Figura 15: Variación de voltaje en función de la materia orgánica.	21
Figura 16: Producción de voltaje versus concentración y velocidad de transporte	21
Figura 17: Densidad de potencia típica de celda MFC	22
Figura 18: Corriente en función del tiempo de operación de la MFC	23
Figura 19: MFC ubicada antes del sedimentador Primario.	24
Figura 20: MFC ubicada después del sedimentador Primario.....	24
Figura 21: Procesos de fermentación acetogénica y metanogénica.....	27
Figura 22: Procesos continuos de tratamiento anaeróbico.	28
Figura 23: Digestores anaerobios de baja carga	29
Figura 24 Digestores anaerobios de alta carga	29
Figura 25 Reactores de Lecho fijo (Filtros anaerobios)	30
Figura 26: Reactores de lecho rotativo (biodiscos anaerobios)	30
Figura 27 Reactores de lecho expandido o fluidificado (RALF)	30
Figura 28 Reactores de manto de lodos (UASB-RAFA-DAFA)	31
Figura 29: Posible instalación UASB, en escala real, tratando desagüe doméstico crudo.....	34

Figura 30: Instalación típica de aprovechamiento del biogas	41
Figura 31: Producción de gas a partir de 1Kg de residuo orgánico de lodo fresco inyectado en un digestor, sometido a varias temperaturas, según IMHOFF – FAIR.....	42
Figura 32: Esquema de las instalaciones de la planta de tratamiento de aguas Portinho da Costa.....	44
Figura 33: Esquema de proceso de planta de tratamiento de aguas de Portinho da Costa.....	45
Figura 34: Diagrama de flujo de una bomba de calor.	48
Figura 35: Intercambiadores de calor empleados para este tipo de aprovechamiento calórico	51
Figura 36: El método Rabtherm empleado para extraer calor de las aguas de alcantarillado.	51