

LÚCIO COSTA PROENÇA

**UTILIZACIÓN DE DIGESTORES ANAERÓBICOS PARA EL TRATAMIENTO DE
RESIDUOS ORGÁNICOS URBANOS CON APROVECHAMIENTO ENERGÉTICO
DEL BIOGÁS EN FLORIANÓPOLIS, SC**

Monografía presentada al Eco_Lógicas: Concurso Mercosur de Monografías sobre Energías Renovables y Eficiencia Energética, auspiciado por el Instituto IDEAL.

Orientación: Prof. Dr. Armando Borges de Castilhos Júnior

Curso de Graduación en Ingeniería Sanitaria y Ambiental
Universidad Federal de Santa Catarina
Florianópolis, Brasil

2010

Contatos: autor: luciocostap@gmail.com
orientador: borges@ens.usc.br

Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental
Universidade Federal de Santa Catarina
Campus Universitário - Trindade - Cx. Postal: 476
Florianópolis - SC - Brasil - CEP: 88040-970

RESUMEN

La administración adecuada de los residuos sólidos es uno de los mayores desafíos ambientales actuales. En un contexto de crecientes restricciones ambientales con respecto a los métodos de eliminación de residuos, el uso de digestores anaeróbicos para el tratamiento de los residuos orgánicos aparece como una alternativa prometedora. Este método promueve la estabilización de los residuos orgánicos, que corresponden a la mitad de los residuos urbanos en Brasil, sin necesidad de depositarlos en rellenos sanitarios y generando un combustible renovable durante el proceso: el biogás. Este trabajo presenta un estudio preliminar sobre la viabilidad de la utilización de digestores anaeróbicos para tratar la parte orgánica de los residuos sólidos urbanos en el municipio de Florianópolis, SC. El estudio consistió en una investigación bibliográfica sobre el tema, seguida de una proyección para Florianópolis compuesta de evaluación de tamaño simplificada del sistema, estimativa de costos e ingresos del proyecto, y comparación entre el método propuesto y los rellenos sanitarios practicados actualmente. La evaluación de tamaño señaló la necesidad de instalar un digestor de 7.748m³, a un costo de instalación calculado en 15 millones de reales, con la posibilidad de generar 2,3 MW de energía eléctrica a partir de biogás. Se calculó un costo de tratamiento de residuos de R\$121,00 por tonelada, aproximadamente, que junto con las ventajas ambientales de la digestión anaeróbica, señala la viabilidad para adoptar este método de tratamiento en el municipio analizado.

Palabras clave: tratamiento de residuos orgánicos, digestores anaeróbicos, producción de biogás.

ABSTRACT

Waste management is one of the greatest challenges of our times. In the context of increasing environmental restrictions regarding waste disposal, the use of anaerobic digestors to treat organic waste arises as a promising alternative. This method allows the stabilization of organic waste, which represents half of the urban waste produced in Brazil, avoiding its disposal in sanitary landfills and producing a renewable energy source, i.e., biogas. This work presents a preliminary study about the feasibility of using a biogas plant to treat organic waste in the city of Florianópolis, SC. Methodology consists in bibliographic review about anaerobic digestion, a preliminary dimensioning, costs estimation and comparison between anaerobic digestion and the current disposal methods (sanitary landfilling). Results of the dimensioning indicated the need of a digester with 7,748 m³, with an estimated cost of R\$15 million and with a potential to generate 2.3 MW of electricity from biogas. A treatment cost of R\$121 per ton of organic waste was estimated, which indicates that, considering its environmental advantages, the Project is feasible for the city of Florianópolis.

Keywords: organic waste treatment, anaerobic digestors, biogas plant, biogas production.

ÍNDICE

INTRODUCCIÓN	4
REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA	4
Digestión anaeróbica.....	5
Tecnologías de digestores disponibles	6
Experiencias de digestores anaeróbicos de residuos orgánicos.	6
Aspectos económicos	7
Aspectos ambientales	8
METODOLOGÍA	8
Producción de residuos orgánicos en Florianópolis.....	8
Evaluación del tamaño de los digestores.....	9
Estimativa de producción de biogás	10
Estimativa de costos e ingresos	11
Comparación de costos entre digestores anaeróbicos y rellenos sanitarios.....	13
DESARROLLO	13
Producción de residuos orgánicos en Florianópolis.....	13
Evaluación del tamaño de los digestores y potencial energético.....	14
Estimativa de costos e ingresos	15
Comparación de costos entre digestores anaeróbicos y rellenos sanitarios.....	18
CONCLUSIÓN.....	19
REFERENCIASBIBLIOGRÁFICAS	20

INTRODUCCIÓN

La administración adecuada de los residuos sólidos es uno de los mayores desafíos ambientales actuales. En el ámbito de la administración de los residuos sólidos, es necesario adoptar métodos de tratamiento que busquen recuperar los materiales descartados, reduciendo continuamente el volumen de residuos que se deben incinerar o depositar en rellenos sanitarios. Los estudios han calculado que la mitad de los residuos sólidos urbanos (RSU) generados en Brasil consiste en residuos orgánicos (IPT/CEMPRE, 2000).

La parte orgánica de los RSU básicamente se compone de restos de alimentos, que pueden ser degradados naturalmente por microorganismos. Cuando ese proceso de degradación ocurre en la ausencia de oxígeno, se denomina digestión anaeróbica. La digestión anaeróbica ya fue adoptada en Brasil para tratar algunos tipos de efluentes agropecuarios, pero su aplicación en el tratamiento de residuos urbanos todavía es incipiente. La principal ventaja de ese método está en permitir la recuperación de todos los residuos orgánicos descartados, que se transforman en un compuesto para la agricultura, generando, durante el proceso, un combustible renovable, el biogás. Esta forma de tratamiento se acerca a la idea de un ciclo cerrado en la administración de los residuos, aprovechando todos los subproductos generados durante el proceso. El tratamiento de residuos orgánicos por digestión anaeróbica ya se aplica en gran escala en países como Dinamarca, Suecia y Alemania (AL SEADI et al., 2008).

El objetivo general de este trabajo es realizar un estudio preliminar sobre la viabilidad del uso de digestores anaeróbicos para tratar la parte orgánica de los residuos sólidos urbanos en el municipio de Florianópolis, SC.

REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

Residuo sólido es todo material sólido o semisólido descartado por actividades antrópicas (WEINER; MATTHEWS, 2003). Los métodos más difundidos de destino final de RSU consisten en los rellenos sanitarios y los incineradores. Además de estos métodos de disposición final, también se usan métodos de recuperación de residuos para evitar su disposición final, destacándose el reciclaje de materiales y la estabilización de residuos orgánicos (transformación en abono orgánico y digestión anaeróbica).

Los residuos sólidos cuya parte orgánica es superior al 30% se denominan residuos sólidos orgánicos (CASSINI, 2003). En Brasil, los residuos orgánicos representan alrededor del 50% de los residuos urbanos recogidos (PHILIPPI JÚNIOR apud IPT/CEMPRE, 2000). Según Al Seadi et al. (2008), los principales tipos de residuos orgánicos son deyecciones de

creación de animales, lodos resultantes del tratamiento de efluentes, residuos de procesos industriales y residuos orgánicos domésticos.

Según el IBGE (2002), del total de los residuos recogidos en el país (230.000 t/día), 47,1% se depositan en rellenos sanitarios, 22,3% en rellenos controlados, y 30,5% en basurales. Actualmente, en Brasil, entre las alternativas disponibles, el relleno sanitario se acepta como la destinación final de residuos más adecuada. Sin embargo, esta forma de disposición no es la solución final para el problema de destinación de los residuos. Según Weiner y Matthews (2003), los costos operativos de los rellenos sanitarios aumentan continuamente, y la disponibilidad de áreas para esas instalaciones es cada vez más escasa, provocando el transporte de los residuos a distancias cada vez mayores, para su destinación. Al Seadiet al. (2008) agregan que la evolución de los estándares ambientales para la disposición final de residuos, así como la necesidad de la recuperación y del reciclaje de materiales han contribuido a la búsqueda de alternativas de la disposición de residuos en rellenos sanitarios.

Digestión anaeróbica

La digestión anaeróbica de la materia orgánica consiste en un proceso desarrollado por un conjunto de microorganismos en condiciones de ausencia de oxígeno. Según Wiesmann et al. (2007), tres grupos de bacterias son los principales agentes de ese proceso: acidogénicas; acetogénicas; y metanogénicas. Las bacterias acidogénicas promueven la hidrólisis de las partículas sólidas orgánicas por la liberación de enzimas. De esta manera, los carbohidratos se transforman en monosacáridos y disacáridos, las proteínas se quiebran en los aminoácidos, y los lípidos, en ácidos grasos. Estos procesos también provocan la liberación de gas carbónico (CO_2) y gas hidrógeno (H_2). En la etapa acetogénica, los ácidos grasos más livianos se transforman en acetatos, CO_2 y H_2 . En la etapa metanogénica, el H_2 , el CO_2 y los acetatos generados en las etapas anteriores se usan en el metabolismo bacteriano, generando como principal subproducto el gas metano (CH_4). Las bacterias metanogénicas generalmente son el factor limitante del proceso, ya que su tasa de crecimiento es menor, comparada con los otros grupos de bacterias actuantes (JØRGENSEN, 2009).

Según Al Seadiet al. (2008), los principales parámetros que intervienen en el proceso de digestión anaeróbica son: temperatura; pH; concentración de ácidos grasos volátiles; concentración de amoníaco; y disponibilidad de nutriente. Los principales parámetros operativos de los digestores son la carga orgánica y el tiempo de detención hidráulica (TDH).

Tecnologías de digestores disponibles

Según Vandevivere et al. (2003), los digestores de residuos orgánicos se pueden clasificar en tres tipos: digestores de fase única, de fases múltiples o en lote. En los digestores de fase única, todas las etapas de la digestión ocurren en un mismo reactor, con alimentación continua de sustrato. Son los tipos más comunes de digestores. Entre los sistemas de fases múltiples, la configuración más común consiste en adoptar dos fases, una para acidogénesis, seguida de otra para acetogénesis y metanogénesis. La ventaja de este sistema es la posibilidad de mantener óptimas condiciones operativas, diferentes para cada fase. Finalmente, en los digestores en lote, el sustrato se incluye de una sola vez y pasa por todas las etapas de degradación en el mismo digestor. Este método se usa generalmente en condiciones con gran cantidad de sólidos, entre 30% y 40% (VANDEVIVERE et al., 2003).

Otra forma de clasificación es la cantidad de sólidos del sustrato: baja cantidad de sólidos (cantidad de sólidos menor que 15%) o gran cantidad de sólidos (cantidad de sólidos entre 20% y 40%). Finalmente, los digestores existentes se pueden dividir, con respecto a la temperatura de operación, en mesofílicos (de 20°C a 40°C) o termofílicos (más de 40°C).

Experiencias de digestores anaeróbicos de residuos orgánicos.

En las últimas décadas, varios grupos de investigación se han dedicado a optimizar el proceso de digestión anaeróbica de residuos orgánicos. Así, los diferentes parámetros relacionados con el proceso han sido investigados (KIM et al., 2006; CHARLES et al., 2009). Otros autores han destacado las ventajas de la codigestión de residuos orgánicos con lodos de estaciones de tratamiento de efluentes (ZUPANČIČ et al., 2008; SHARMA et al., 2000) y con deyecciones de animales (HARTMANN; AHRING, 2005). La codigestión permite añadir una inoculación del proceso anaeróbico (microorganismos activos) a los residuos orgánicos, permitiendo, también, mejor equilibrio nutricional añadiendo compuestos ricos en nutrientes (KAYHANIAN; RICH, 1995).

En términos comerciales, Europa es la región más desarrollada en la aplicación de digestores anaeróbicos para el tratamiento de residuos sólidos. Ese liderazgo resulta de las crecientes restricciones ambientales de disposición de residuos orgánicos en rellenos, así como de los estímulos para la producción de energías renovables. Según De Baere y Mattheeuws (2010), la capacidad instalada en Europa a fines de 2010 estaba calculada en 6.000.000 t/año, divididas en aproximadamente 200 plantas de biogás distribuidas en 17 países europeos. Se constata que se ha observado un aumento en la adopción de este tipo de tecnología desde el comienzo de la década del 90, mostrando en los últimos cinco años un

promedio de 15 plantas nuevas instaladas por año, con capacidad promedio de tratamiento de 30.000 t/año por planta. Considerando las características de las plantas instaladas en los últimos cinco años, los autores destacan que las plantas termofílicas representan alrededor del 40%; los digestores de fase única predominan en el 95% de las plantas; y los digestores con gran cantidad de sólidos equipan el 60% de las plantas de biogás.

En Brasil, la experiencia acumulada en lo que se refiere al tratamiento de RSU en digestores anaeróbicos todavía es limitada, compuesta, sobre todo, de trabajos académicos sobre el tema (LEITE et al., 2003, 2009) y estudios de viabilidad (REICHERT; SILVEIRA, 2005).

Aspectos económicos

El tratamiento de residuos orgánicos por medio de digestores anaeróbicos genera dos subproductos valorizados económicamente: el compuesto estabilizado y el biogás. La viabilidad del uso de la digestión anaeróbica para tratar residuos orgánicos todavía depende bastante de los incentivos gubernamentales que apoyan esta opción. Por ese motivo, la viabilidad económica de la adopción de digestores anaeróbicos varía significativamente entre países y regiones.

Experiencias relatadas en la literatura (AND INTERNATIONAL, 2004; MORIN et al., 2010; COELHO, 2001) señalan que, desde el punto de vista puramente económico, el uso de digestores anaeróbicos en el tratamiento de los residuos orgánicos no suele ser una opción atractiva, al compararla con otras alternativas de tratamiento y disposición, tales como el relleno sanitario, la transformación en abono orgánico y la incineración. Pero cuando el análisis de viabilidad se realiza bajo condiciones más amplias, incluyendo, por ejemplo, variables energéticas, sociales y ambientales, el uso de digestores anaeróbicos llega a tener grandes ventajas.

En Brasil, para un proyecto denominado Ecoparque, Reichert et al. (2004) realizaron un análisis multicriterio para comparar cuatro alternativas de disposición de los residuos orgánicos del municipio de Porto Alegre, RS: relleno sanitario; incinerador; reactor de plasma; y digestor anaeróbico. Para eso, se creó una matriz de decisión, atribuyendo puntuaciones de importancia a los diferentes criterios considerados. La matriz final señaló la opción de digestión anaeróbica como solución más favorable, con gran diferencia de puntuación con respecto a las otras tecnologías consideradas. En este análisis, las ventajas que más destacaron la opción de los digestores anaeróbicos sobre las otras alternativas son la posibilidad de recuperación de masa, la creación de empleos, la baja generación de pasivo

ambiental y el bajo riesgo operativo. Se puede observar que sus mayores ventajas no están en las variables económicas (costos de instalación y operación), pero, conjugadas con otras variables, convierten a la opción de digestión anaeróbica en la más indicada para el caso expuesto.

El comienzo de la vigencia del Protocolo de Kyoto, en 2005, también abrió la posibilidad de venta de proyectos brasileños de Reducción de Emisiones Certificadas de gases del efecto invernadero (GEE) para países con metas de reducción (CGEE, 2008). La quema de metano es una de las formas previstas de reducción de emisiones. En el caso de digestores anaeróbicos para tratamiento de residuos, hay una doble posibilidad de ganancia, tanto por la recuperación y quema de prácticamente 100% del gas metano generado, como por la sustitución de combustible fósil por combustible renovable, o sea, biogás, ya que el aprovechamiento energético del biogás evitaría emisiones de GEE.

Aspectos ambientales

En las últimas dos décadas, se realizaron varios estudios con el objetivo de destacar los aspectos ambientales de las plantas de biogás. Más recientemente, los estudios de análisis de ciclo de vida de este tipo de instalación han contribuido a la cuantificación de esos aspectos. Esos estudios han indicado que la sustitución de sistemas convencionales de generación de energía y manejo de residuos por sistemas de biogás tiende a amenizar directamente varios problemas ambientales actuales, tales como cambios climáticos, eutrofización, acidificación y contaminación atmosférica. También se verifica que el uso de residuos tales como los provenientes de estaciones de tratamiento de efluentes, mataderos, criaderos de animales y residuos alimenticios, para la producción de biogás presenta una demanda energética generalmente inferior al 30% de la energía contenida en el biogás, demostrando la sostenibilidad energética de ese proceso (BERGLUND; BÖRJESSON, 2006).

METODOLOGÍA

La metodología adoptada se basa principalmente en las recomendaciones contenidas en el manual de Deublein y Steinhauser (2008).

Producción de residuos orgánicos en Florianópolis

A partir de Comcap (2002), se obtuvieron los valores de la producción anual de residuos sólidos *per capita* y la parte orgánica de los residuos urbanos del municipio de

Florianópolis. Esos datos se usaron en la evaluación del tamaño de los digestores del proyecto, que, en este estudio, se denomina Proyecto Florianópolis.

Adoptando un horizonte de proyecto de 10 años, se calculó la cantidad anual de residuos con base en dos parámetros: producción diaria *per capita* de residuos (COMCAP, 2002); y proyección demográfica para la ciudad de Florianópolis para el periodo considerado (CAMPANÁRIO, 2007). La multiplicación de la producción *per capita* de residuos por 365 días/año y por la población del año correspondiente dio como resultado la cantidad relativa a la masa de residuos producida cada año.

Evaluación del tamaño de los digestores

La evaluación del tamaño del digestor se realizó con base en el valor de la producción anual de residuos sólidos en el municipio de Florianópolis. De ese valor, se calculó la parte orgánica, obteniéndose un valor de la producción anual de residuos orgánicos de Florianópolis (PRO). Ese valor corresponde a la cantidad de sustrato que abastecerá al digestor.

Según Deublein y Steinhauser (2008), los residuos orgánicos domésticos suelen tener una cantidad de sólidos del 20% aproximadamente. Ese parámetro corresponde a los sólidos totales presentes en el sustrato. Su valor anual se calcula según la Ecuación 1.

$$ST = PRO * 0,20, \quad (\text{Ec. 1})$$

donde:

ST – sólidos totales (t/año); y

PRO – producción anual de residuos sólidos (t/año).

De los sólidos presentes en el sustrato, sólo la parte orgánica está sujeta al proceso de degradación anaeróbica en el digestor. Esa parte normalmente corresponde al 85% (DEUBLEIN; STEINHAUSER, 2008), como ilustra la Ecuación 2.

$$FO = ST * 0,85, \quad (\text{Ec. 2})$$

donde:

PO – parte orgánica de los sólidos (t/año); y

ST – sólidos totales (t/año).

La eficiencia de sistemas anaeróbicos se suele calcular con base en datos de DQO. Para residuos orgánicos, la DQO se puede calcular según la relación $DQO/PO=1,15$ kg/kg. La DQO anual entonces se calculó según la Ecuación 3.

$$DQO = FO * 1,15, \quad (\text{Ec. 3})$$

donde:

DQO – demanda química de oxígeno (t/año); y

PO – parte orgánica de los sólidos (t/año).

El cálculo del volumen necesario para el digestor depende del volumen de substrato a introducir. Por el hecho de que los residuos orgánicos presentan una cantidad de sólidos del 20% aproximadamente, es necesaria una dilución inicial, para que el substrato adquiriera una cantidad de sólidos del 17% aproximadamente (cantidad de sólidos requerida por la tecnología considerada). Esa dilución se puede hacer con recirculación de un efluente del propio sistema. La cantidad de líquido a añadir al substrato (considerando la cantidad de sólidos como cercana a cero) se puede calcular según la Ecuación 4.

$$L_{dilución} = \frac{ST}{0,17} - PRO, \quad (\text{Ec. 4})$$

donde:

$L_{dilución}$ – cantidad de líquido de dilución (t/año);

ST – sólidos totales (t/año); y

PRO – volumen anual de residuos sólidos producidos ($m^3/año$).

La cantidad total de substrato alimentada anualmente al digestor corresponde, por lo tanto, a la suma de los residuos orgánicos producidos con el líquido de dilución ($PRO + L_{dilución}$). Considerando que el peso específico del substrato es igual al peso específico del agua ($1 t/m^3$), el valor de la masa de substrato calculada (en t/año) corresponde al volumen de substrato ($m^3/año$), denominado V_s . El volumen del digestor, entonces, se calcula según la Ecuación 5.

$$V_{digestor} = V_s * TDH, \quad (\text{Ec. 5})$$

donde:

$V_{digestor}$ – volumen del digestor (m^3);

V_s – volumen diario de substrato ($m^3/día$); y

TDH – tiempo de detención hidráulica (días).

Estimativa de producción de biogás

Conociendo la cantidad de DQO del substrato, se puede calcular la producción anual de biogás. Para eso, se considera una eficiencia de conversión de DQO en metano del 85% y la relación $Nm^3CH_4/kg DQO=0,35$ (Ecuación 6).

$$V_{metano} = DQO * 0,35 * 0,85, \quad (\text{Ec. 6})$$

donde:

V_{metano} – volumen anual de metano producido ($\text{Nm}^3/\text{año}$); y

DQO – demanda química de oxígeno (kg/año).

Cada metro cúbico de metano corresponde a 9,94 kWh de energía. Considerando el volumen horario de metano producido por el sistema, se puede calcular el potencial energético del biogás producido, de acuerdo con la Ecuación 7.

$$PE = V_{\text{metano}} * 9,94, \quad (\text{Ec. 7})$$

donde:

PE – potencial energético (kW); y

V_{metano} – volumen horario de metano producido (Nm^3/h).

Del potencial energético calculado, sólo una parte se puede aprovechar efectivamente como energía térmica o eléctrica. Ese valor depende de la tecnología de conversión adoptada. Para la tecnología de turbinas a gas, por ejemplo, la eficiencia de conversión puede llegar al 40%, o sea, el 40% de la energía primaria se convierte en electricidad. En el caso de adoptar tecnologías de cogeneración (aprovechamiento eléctrico y térmico), hasta el 50% de la energía se puede aprovechar en forma de calor (producción de vapor). Para esta configuración, considerando turbinas a gas, se puede aprovechar hasta el 90% de la energía, de los cuales el 50% en forma térmica y el 40% en forma eléctrica, mientras el 10% se perderían en los procesos del sistema.

Según Deublein y Steinhauser (2008), la energía consumida por una planta de biogás, en las etapas de calentamiento del substrato, agitadores, bombeo, entre otras, corresponde del 20% al 30% de la energía producida por la planta al quemar el biogás.

Estimativa de costos e ingresos

Los costos de instalación del Proyecto Florianópolis fueron calculados de manera simplificada, con base en el método presentado por Deublein y Steinhauser (2008). Los autores presentan valores de referencia para la estimativa de costos de plantas de biogás, referentes a las inversiones en el digestor (obras civiles y equipos electromecánicos) y en el conjunto motor/generador, para el aprovechamiento energético del biogás. Esos valores corresponden a la realidad alemana de ese tipo de tecnología. Para considerar los costos de importación y adaptaciones necesarias para la realidad brasileña, se añadió un factor de seguridad del 30% al valor total calculado.

Los costos de operación del Proyecto Florianópolis se calcularon con base en los costos de operación del Proyecto Ecoparque (REICHERT et al., 2004). Reichert et al. (2004) presentan los costos de operación del Proyecto Ecoparque, adaptado para recibir todos los residuos urbanos del municipio de Porto Alegre, realizar su clasificación y tratar la parte orgánica utilizando digestores anaeróbicos, con aprovechamiento energético del biogás para la producción de energía eléctrica. Por las dificultades para calcular los costos de operación de este tipo de proyecto, que probablemente no tiene ninguna aplicación a escala comercial en Brasil, y con el objetivo de establecer el tamaño de esos costos, se consideró que los costos de operación serían directamente proporcionales a la capacidad de tratamiento del proyecto. De esta manera, siendo el Proyecto Florianópolis adaptado a una capacidad de tratamiento correspondiente al 44,3% de la capacidad del Proyecto Ecoparque, sus costos de operación representarían el 44,3% de los costos del Proyecto Ecoparque.

Se destaca que el costo estimado a partir de los valores presentados por Reichert et al. (2004) corresponde a la adopción de todos los equipos y procesos previstos para el tratamiento de RSU del Proyecto Ecoparque, tales como procesos de clasificación y separación (separación manual, filtro rotativo, separador electromagnético), pretratamiento (trituration, separador balístico) y post tratamiento (prensa, centrífuga, transformación en abono orgánico, maduración).

Para calcular los ingresos de operación del Proyecto Florianópolis, se han encontrado en la literatura posibles destinos para los subproductos generados en la digestión anaeróbica, considerando el compuesto, el efluente y el biogás. Se ha llegado a la conclusión de que las opciones de destino más factibles para el municipio de Florianópolis serían:

- a) compuesto: estabilización de la parte sólida resultante del proceso mediante la transformación en abono orgánico y venta de ese compuesto como fertilizante agrícola. El precio adoptado corresponde al precio practicado por el Departamento Municipal de Limpieza Urbana (DMLU), que vende el compuesto proveniente de la estabilización de residuos orgánicos de la región de Porto Alegre;
- b) efluente: tratamiento del efluente en ETE (estación de tratamiento de efluentes) y posterior lanzamiento en un cuerpo receptor. Se destaca que sería posible dirigir los efluentes para usos agrícolas, aprovechando sus nutrientes, a pesar de que esta opción no fue considerada en el Proyecto Florianópolis, porque exige mayor control de la calidad de los efluentes, además de mayor organización logística para el transporte de esos efluentes para las zonas rurales. Los efluentes, por lo tanto, no producirán ingresos en este proyecto; y

- c) biogás: producción de energía eléctrica mediante un conjunto motor/generador, permitiendo una conversión del 40% de la energía presente en el biogás en energía eléctrica. La energía producida sería vendida por el Programa Proinfra (Programa de Incentivo a las Fuentes Alternativas de Energía Eléctrica, del Gobierno Federal), como energía producida a partir de biomasa, adoptando los valores pagos por energía producida presentados por Reichert et al. (2004).

Comparación de costos entre digestores anaeróbicos y rellenos sanitarios

Con el objetivo de comparar los costos asociados a la adopción de digestores con la alternativa de disposición de residuos practicada actualmente en Florianópolis, o sea los rellenos sanitarios, se realizó un balance entre los costos y los ingresos de operación del Proyecto Florianópolis. La diferencia entre los costos y los ingresos anuales del proyecto corresponde al déficit para que el proceso de tratamiento tenga sostenibilidad financiera. Dividiendo ese déficit por la capacidad de tratamiento anual del Proyecto, se obtiene el valor mínimo a cobrar como arancel de tratamiento de residuos orgánicos en Florianópolis. El valor de ese arancel se puede comparar directamente con el valor actualmente pago por el municipio de Florianópolis para disponer sus residuos en el relleno de Biguaçu, obtenido en la Secretaría de Habitación y Saneamiento Ambiental del municipio de Florianópolis.

DESARROLLO

El desarrollo de las etapas descritas en la metodología se presenta en los ítems subsecuentes.

Producción de residuos orgánicos en Florianópolis

Para la estimativa de la producción anual de residuos sólidos orgánicos se consideró que tanto la producción *per capita* de RSU como el valor de su parte orgánica se iban a mantener constantes durante el horizonte del proyecto, establecido en 10 años. El aumento en el volumen de residuos, por lo tanto, ocurre solamente por el aumento demográfico en el periodo. La Tabla 1 ilustra los datos de entrada y el resultado de la estimativa de producción anual de residuos sólidos orgánicos. Como se puede observar, se calcula una producción anual de residuos orgánicos de aproximadamente 86.000 t/año en 2021.

Evaluación del tamaño de los digestores y potencial energético

Los parámetros adoptados para la evaluación del tamaño del digestor y para el cálculo del potencial energético están presentados en la Tabla 2. Los parámetros adoptados se basan tanto en valores retirados de la literatura técnica como en valores empíricos practicados por ingenieros proyectistas de plantas de biogás.

Tabla 1 – Estimativa de producción anual de residuos sólidos orgánicos (2011 a 2021)

año	Producción per capita de RSU	Parte orgánica de los RSU	Proyección demográfica	Producción de residuos orgánicos	Producción de residuos orgánicos
-	kg/d	%	habitantes	t/día	t/año
2011	0,77	46,35	538.519	192	70.151
2012	0,77	46,35	551.319	197	71.819
2013	0,77	46,35	564.120	201	73.486
2014	0,77	46,35	576.920	206	75.153
2015	0,77	46,35	589.720	210	76.821
2016	0,77	46,35	601.768	215	78.390
2017	0,77	46,35	613.815	219	79.960
2018	0,77	46,35	625.863	223	81.529
2019	0,77	46,35	637.910	228	83.098
2020	0,77	46,35	649.958	232	84.668
2021	0,77	46,35	661.012	236	86.108

Los parámetros calculados se presentan en la Tabla 3. Con un volumen de digestor necesario de 7.748 m³, se verifica que se puede tratar todo el volumen orgánico producido en un solo reactor, construido en acero o en concreto, con forma cilíndrica y con tamaño aproximado de 12 m (altura) x 29 m (diámetro).

Tabla 2 – Parámetros adoptados en la evaluación del tamaño del digestor

Parámetros adoptados	Unidad	Valor	Observaciones
Producción de residuos orgánicos (PRO)	t/año	86.000	Comcap (2002)
Sólidos totales (ST)	%	20	Deublein y Steinhauser (2008)
Parte orgánica (PO/ST)	%	85	Deublein y Steinhauser (2008)
DQO/PO	kg/kg	1,15	
Producción de metano por DQO degradada	Nm ³ CH ₄ /Kg DQO	0,35	
Eficiencia de conversión de DQO (Ef)	%	85	
Cantidad de CH ₄ en el biogás	%	55	Deublein y Steinhauser (2008)
Potencial energético del CH ₄	kWh/Nm ³ CH ₄	9,94	
Eficiencia de conversión de metano en energía eléctrica	%	40	considerando turbinas a gas
Sólidos totales del substrato en el reactor	%	17	
Tiempo de detención hidráulica (TDH)	días	28	Deublein y Steinhauser (2008)

El volumen de metano producido y el potencial energético se calcularon según la metodología adoptada, y los resultados están resumidos en la Tabla 3. Según Deublein y Steinhauser (2008), los actuales métodos de recuperación de energía del biogás permiten

aprovechar hasta el 90% de la energía contenida en ese combustible, con la posibilidad de convertir el 40% en energía eléctrica y el 50% en energía térmica. Como el clima en Florianópolis no exige sistemas de calefacción en edificios, se podría aprovechar la energía térmica en procesos industriales, aunque esa opción no fue considerada en el Proyecto Florianópolis debido a las dificultades de calcular los costos e ingresos inherentes a esa opción.

Tabla 3 – Parámetros calculados en el Proyecto Florianópolis

Parámetros calculados	Unidad	Valor
ST	t/año	17.200
PO	t/año	14.620
DQO	t/año	16.813
$L_{\text{dilución}}$	t/año	15.000
V_{digestor}	m^3	7.748
V_{metano}	$Nm^3/año$	5.001.868
Potencial energético	kW	5.676
Potencial eléctrico (40%)	kW	2.270
Potencial térmico (50%)	kW	2.838

Mientras el potencial de energía eléctrica sería suficiente para abastecer aproximadamente 5.100 residencias en Florianópolis, considerando el consumo promedio de 325,7 kWh/mes, según Fedrigo et al. (2008). Sin embargo, se debe descontar el consumo de energía eléctrica de la propia planta, aproximadamente el 20% de la energía producida. En ese caso, la potencia eléctrica disponible para venta sería de 1.816kW, lo suficiente para abastecer aproximadamente 4.070 residencias.

Estimativa de costos e ingresos

Con el objetivo de comparar los costos entre la disposición final de residuos en un relleno y el uso de digestores en el municipio de Florianópolis, se realizó un análisis de los costos simplificado tomando como base los estudios de Reichert et al. (2004) y de Deublein y Steinhauer (2008). Se evaluaron los costos de instalación y de operación.

Se calcularon los costos de instalación referentes a la adopción del proceso de digestión anaeróbica de los residuos orgánicos, utilizando los datos presentados por Deublein y Steinhauer (2008). Los autores presentan valores de referencia para la estimativa de costos de plantas de biogás. La Tabla 4 presenta los valores de referencia para las inversiones en el digestor (obras civiles y equipos electromecánicos) y en el conjunto motor/generador, para el aprovechamiento energético del biogás.

Tabla 4 – Valores de referencia para estimativa de costos según Deublein y Steinhauser (2008)

Parámetro	Unidad	Valor
Inversión en el digester (40% equipos)	US\$/m ³	300 - 500
Inversión en el conjunto motor/generador	US\$/kWel	650 – 1.300

Para calcular los costos del Proyecto Florianópolis, se adoptaron los valores más conservadores presentados en la Tabla 4 (500 US\$/m³ y 1.300 US\$/kWel). Al valor total de inversión calculado para el proyecto se añadió un factor de seguridad de 30%, referente a incertidumbres y a los posibles costos de importación de equipos. La Tabla 5 presenta los resultados completos. La estimativa de los costos de instalación de una planta de biogás en el municipio de Florianópolis señaló inversiones de aproximadamente 15 millones de reales, referentes a las inversiones en obras civiles y equipos electromecánicos para el digester y para la unidad de producción de energía eléctrica.

Tabla 5 – Costos de instalación del Proyecto Florianópolis

Parámetro	Unidad	Valor
Inversión en obras civiles	R\$	3.904.964,38
Inversión en equipos	R\$	2.603.309,59
Inversión en el conjunto motor/generador	R\$	4.958.234,77
Subtotal	R\$	11.466.508,74
Total (añadido el 30%)	R\$	14.906.461,37

Cotización del 11/01/2011: US\$ 1,00 = R\$ 1,68

Por la dificultad de calcular los costos de operación de un proyecto de digestión anaeróbica de residuos sólidos en Florianópolis, se optó por tomar como base los valores calculados por Reichert et al. (2004), que lo hicieron de manera conservadora. La Tabla 6 muestra el detalle de los costos de operación del Proyecto Ecoparque. No obstante, estos costos abarcan varios otros procesos que no forman parte del ámbito del Proyecto Florianópolis, ya que el Proyecto Ecoparque fue adaptado para recibir todos los residuos urbanos del municipio de Porto Alegre, incluyendo equipos y mano de obra para realizar la separación y clasificación de los diferentes tipos de residuos en el lugar.

A partir del costo total presentado en la Tabla 6, se admitió que los costos de operación de un proyecto análogo al Ecoparque en el municipio de Florianópolis serían directamente proporcionales a la capacidad de tratamiento de los proyectos. De esta manera, con el Proyecto Ecoparque adaptado a una capacidad de tratamiento de 420.000 tRSU/a y la producción de residuos en Florianópolis equivalente a 186.000 tRSU/a, el costo de operación de esa alternativa en Florianópolis representaría el 44,3% del costo de instalación del Proyecto Ecoparque.

Tabla 6 – Costos de operación del Proyecto Ecoparque

Ítem	Costo total (R\$/mes)
Mano de obra	1.061.828,00
Costos administrativos	106.182,80
Despojos p/ relleno (transporte y disposición)	985.000,00
Energía eléctrica	82.014,00
Tratamiento lixiviado	34.920,00
Mantenimiento estructura	28.400,63
Mantenimiento equipos	183.867,63
Total	2.482.213,06

La Tabla 7 muestra los costos de operación calculados para el Proyecto Florianópolis. Se destaca que los costos de operación están sobrevalorados. Esto resulta del hecho de que el Proyecto Ecoparque ha sido adaptado para recibir todos los RSU del municipio de Porto Alegre, implicando costos sobrevalorados si comparados con un proyecto solamente de digestión anaeróbica, con la consecuente reducción de costos de mano de obra, disposición en relleno y mantenimiento de equipos. Aun con estas limitaciones, se optó por este método de estimativa de costos de operación por el hecho de ser conservador y por considerar la legislación laboral brasileña.

Tabla 7 – Estimativa de costos de operación del Proyecto Florianópolis a partir de los costos del Proyecto Ecoparque

Proyecto	Capacidad (t/a)	Proporción	Costos de operación (R\$/año)
Ecoparque	420.000	100,0%	29.786.556,71
Florianópolis	186.000	44,3%	13.191.189,40

Los métodos de estimativa de costos aquí descritos presentan limitaciones, pues, atendiendo a los objetivos del estudio, sólo tienen el objetivo de establecer el volumen de las inversiones necesarias para la adopción de la tecnología de digestión anaeróbica en el municipio de Florianópolis.

Los proyectos de digestión anaeróbica suelen generar ingresos provenientes del aprovechamiento económico de los subproductos producidos. En este estudio, se consideraron como subproductos con posibilidad de aprovechamiento económico el compuesto resultante de la parte sólida del proceso de digestión y el biogás.

El ingreso proveniente de la venta del compuesto para su uso como fertilizante agrícola tomó como base el precio practicado por la empresa DMLU (Porto Alegre, RS), que vende los subproductos generados por la transformación de residuos domésticos en abono orgánico a R\$30,00 por tonelada de compuesto.

La producción de energía eléctrica por la quema del biogás fue la forma de aprovechamiento energético considerada para el Proyecto Florianópolis. Se admitió que la

energía producida sería vendida como energía de fuente de biomasa dentro del programa Proinfa, del Gobierno Federal. Segundo Reichert et al. (2004) el precio practicado por energía de biomasa en el Programa Proinfa es de R\$169,08 por MWh producido. La Tabla 8 muestra el detalle de la estimativa de ingresos anuales del Proyecto Florianópolis.

A partir del conocimiento de los costos e ingresos del Proyecto, se puede establecer el precio mínimo a cobrar por el tratamiento de los residuos orgánicos, de manera que el proyecto sea económicamente sostenible. La Tabla 9 resume esos resultados.

Tabla 8 – Ingresos operativos del Proyecto Florianópolis

Ítem	Cantidad (t/a)	Costo unitario (R\$/t)	Ingreso total (R\$/año)
Compuesto estabilizado (precio DMLU)	3.088	30,00	92.652,35
Ítem	Cantidad (MWh/a)	Costo unitario (R\$/MWh)	Ingreso total (R\$/año)
Energía eléctrica (biogás) excl. 20% de consumo de la planta (PROINFA)	15.910	169,08	2.690.052,68

Comparación de costos entre digestores anaeróbicos y rellenos sanitarios

Se verifica que, para que el tratamiento de los residuos orgánicos tenga sostenibilidad financiera, se debe cobrar un arancel mínimo de R\$121,03 por tonelada de residuos tratados. Ese valor se puede comparar con el valor actualmente practicado por el municipio de Florianópolis para disponer sus residuos en el relleno sanitario de Biguaçu, equivalente a R\$107,79 por tonelada (valor vigente en octubre de 2010, según lo informado por la Secretaría de Habitación y Saneamiento Ambiental de Florianópolis).

Tabla 9 – Cálculo del arancel mínimo a cobrar por el tratamiento de residuos del Proyecto Florianópolis

Parámetro	Valor
Costos de operación (R\$/año)	-13.191.189,40
Venta de energía eléctrica a la red (R\$/año)	2.690.052,68
Venta de compuesto orgánico (R\$/año)	92.652,35
Total	-10.408.484,37
Residuos orgánicos tratados (t/año)	86.000
Precio mínimo de tratamiento (R\$/t)	121,03

En un primer análisis, se verifica que los costos de la digestión anaeróbica superan aproximadamente un 13% los costos de la disposición en rellenos sanitarios, con la posibilidad de considerar la opción como inviable económicamente si se analiza solamente desde el punto de vista contable. No obstante, se discute que hay, como mínimo, dos razones para considerar que el uso de digestores anaeróbicos puede tener un precio competitivo comparado con el relleno sanitario, tal vez no actualmente, pero sí en un futuro muy cercano.

La primera razón consiste en el hecho de que la mayor parte de los equipos y tecnologías para la implantación de proyectos de digestores anaeróbicos de residuos es importada. Esto ocurre porque esa tecnología todavía no es ampliamente difundida en Brasil. Sin embargo, se puede prever un aumento en la cantidad de proyectos y el consecuente desarrollo de una industria nacional dedicada a la digestión anaeróbica de residuos, porque la Política Nacional de Residuos Sólidos del país, aprobada en 2010, establece que los residuos sólidos orgánicos deben pasar por el proceso de transformación en abono orgánico con posterior uso de su compuesto (evitando su disposición final), además de prever el aprovechamiento energético de residuos, cuando sea comprobada su viabilidad técnica y ambiental (BRASIL, 2010). A eso se suma el creciente incentivo a la producción de energías renovables, que condice con el papel de liderazgo que Brasil ha ejercido en lo que se refiere al combate contra los cambios climáticos, especialmente con la sanción de la Política Nacional sobre Cambio del Clima (BRASIL, 2009).

La segunda razón consiste en la tendencia al aumento de los costos de la disposición de residuos en rellenos sanitarios, motivada principalmente por la dificultad de encontrar terrenos propicios para esa actividad y por las crecientes exigencias técnicas impuestas por los órganos ambientales para minimizar los impactos de esa actividad (WEINER; MATTHEWS, 2003). En Florianópolis, este argumento queda todavía más fuerte cuando se compara el arancel actual (R\$107,79 por tonelada) con el arancel establecido en 2004, equivalente a R\$68,50 por tonelada (SMHSA, 2009), lo que representa un aumento del 57% en seis años.

Finalmente, los beneficios ambientales inherentes a la digestión anaeróbica de residuos superan mucho a los beneficios de la disposición en rellenos sanitarios, convirtiendo a aquella alternativa en un método atractivo de tratamiento de residuos desde el punto de vista económico y ambiental.

CONCLUSIÓN

Este trabajo tuvo el objetivo de realizar un estudio preliminar sobre la viabilidad del uso de digestores anaeróbicos para tratar los residuos orgánicos urbanos en el municipio de Florianópolis, SC.

Se realizó una evaluación simplificada del tamaño de un sistema de digestión anaeróbica para el tratamiento de residuos orgánicos del municipio de Florianópolis. Para tratar 86.000 t/a (cantidad de residuos orgánicos calculada para 2021), sería necesario un digestor de 7.748 m³. Las estimativas de costo de instalación de esa tecnología señalaron una

inversión de aproximadamente 15 millones de reales. Mientras los costos de operación calculados son de aproximadamente 13 millones de reales por año.

La producción de metano calculada corresponde a 5.000.000 Nm³CH₄/año, equivalente a un potencial de producción de energía eléctrica de 2,3 MW. En caso de que la energía eléctrica producida sea vendida dentro del programa Proinfa, se calculó un ingreso anual de 2,7 millones de reales. La venta del compuesto estabilizado produciría un ingreso anual de 90 mil reales. Los costos de tratamiento de residuos por la nueva planta se calcularon en R\$121 por tonelada de residuo, valor 13% mayor que el arancel pago actualmente por el municipio de Florianópolis para enterrar sus residuos en el relleno sanitario de Biguaçu (R\$107,79 por tonelada).

La evaluación de tamaño simplificada propuesta y las estimativas de producción de biogás y de los costos asociados a esa opción pretenden servir como primera reflexión sobre la aplicación de esa tecnología en el municipio de Florianópolis. Los valores calculados señalan la viabilidad de la adopción de digestores anaeróbicos en Florianópolis, con el objetivo de disminuir la cantidad de residuos destinados al relleno sanitario y promover la recuperación de residuos y la producción de energía renovable.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AL SEADI, T. et al. **Biogas handbook**. Biogas for Eastern Europe project, University of Southern Denmark, Esbjerg, 2008. Disponible en: <http://www.big-east.eu/downloads/IR-reports/ANNEX%202-39_WP4_D4.1_Master-Handbook.pdf>. Acceso en: 5 feb. 2010.

AND INTERNATIONAL. **Le marché de la méthanisation en France: hypothèses d'évolution à 5 et 10 ans**. Presentación de Power Point, Gaz de France y Ademe, 2004.

BERGLUND, M.; BÖRJESSON, P. Assessment of energy performance in the life cycle of biogas production. **Biomass & Bioenergy**, v. 30, n. 3, p. 254-266, 2006.

BRASIL. **Ley Nº 12.187**, de 29/12/2009. Instituye la Política Nacional sobre Cambios del Clima - PNMC y da otras disposiciones. Disponible en: <http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_Ato2007-2010/2009/Lei/L12187.htm>. Acceso en: 18 de enero 2011.

BRASIL. **Ley Nº 12.305**, de 02/08/2010. Instituye la Política Nacional de Residuos Sólidos; modifica la Ley N 9.605, de 12 de febrero de 1998; y da otras disposiciones. Disponible en: <http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2007-2010/2010/lei/l12305.htm>. Acceso en: 18 de enero 2011.

CASSINI, S. T. (Coord.). **Digestão anaeróbia de resíduos sólidos orgânicos e aproveitamento de biogás**. Projeto PROSAB, Rio de Janeiro, 2003.

CAMPANÁRIO, P. **Florianópolis: dinâmica demográfica e projeção da população por sexo, grupos etários, distritos e bairros (1950-2050)**. Instituto de Planejamento Urbano de Florianópolis (IPUF), Prefeitura de Florianópolis, 2007.

CHARLES, W.; WALKER, L.; CORD-RUWISCH, R. Effect of pre-aeration and inoculums on the start-up of batch thermophilic anaerobic digestion of municipal solid waste. **Bioresource Technology**, v. 100, n. 16, p. 2329-2335, 2009.

CGEE. **Manual de capacitação sobre mudança do clima e projetos de mecanismo de desenvolvimento limpo**. Brasília: Centro de Gestão e Estudos Estratégicos, 2008.

- COELHO, S. T. **Geração de energia a partir do biogás gerado por resíduos urbanos e rurais**. Centro Nacional de Referência em Biomassa, Nota Técnica VII, Florianópolis, 2001.
- COMCAP. **Caracterização física dos resíduos sólidos urbanos de Florianópolis**. Companhia de Melhoramentos da Capital, Informe Final, Florianópolis, 2002.
- DE BAERE, L.; MATTHEEUWS, B. Anaerobic digestion of MSW in Europe. **BioCycle**, v. 51, n. 2, p. 24-26, 2010. Disponível em: <<http://www.ows.be/pub/Biocycle.scan.pdf>>. Acesso em: 18 de junho 2010.
- DEUBLEIN, D.; STEINHAUSER, A. **Biogas from waste and renewable resources**. Weinheim: Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, 2008.
- FEDRIGO, N.S.; GONÇAVES, G.; FIGUEREDO, P.L. **Avaliação do consumo energético no setor residencial brasileiro– Florianópolis**. Relatório de iniciação científica (Engenharia Civil), Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2008.
- IBGE. **Pesquisa nacional de saneamento básico 2000**. Publicación del Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística, Rio de Janeiro, 2002.
- IPT/CEMPRE. **Lixo municipal**: manual de gerenciamento integrado. 2. ed. Coordenação: Maria Luiza Otero D’Almeida, André Vilhena. São Paulo, 2000.
- JØRGENSEN, P. J. **Biogas**: green energy. 2.ed. PlanEnergy and Researcher for a Day- Faculty of Agricultural Sciences, Aarhus University, 2009.
- HARTMANN, H.; AHRING, B. K. Anaerobic digestion of the organic fraction of municipal solid waste: influence of co-digestion with manure. **Water Research**, v. 39, n. 8, p. 1543-1552, 2005.
- KAYHANIAN, M.; RICH, D. Pilot-scale high solids thermophilic anaerobic digestion of municipal solid waste with an emphasis on nutrient requirements. **Biomass and Bioenergy**, v. 8, n. 6, p. 433-444, 1995.
- KIM, J. K. et al. Effects of temperature and hydraulic retention time on anaerobic digestion of food waste. **Journal of Bioscience and Bioengineering**, v. 102, n. 4, p. 328-332, 2006.
- LEITE, V. D. et al. Tratamento anaeróbico de resíduos sólidos orgânicos com alta e baixa concentração de sólidos. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 13, n. 2, p. 190-196, 2009.
- LEITE, V. D. et al. Tratamento de resíduos sólidos de centrais de abastecimento e feiras livres em reator anaeróbico de batelada. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 7, n. 2, p. 318-322, 2003.
- MORIN, P. et al. Economic and environmental assessment on the energetic valorization of organic material for a municipality in Quebec, Canadá. **Applied Energy**, v. 87, n. 1, p. 275-283, 2010.
- REICHERT, G.A. et al. (Coord.). **Estudo de viabilidade e sustentabilidade Projeto Ecoparque**: relatório final. Porto Alegre: Convênio DMLU, CGTEE e Eletrobras, 2004.
- REICHERT, G.A.; SILVEIRA, D. A. Estudo de viabilidade da digestão anaeróbica de resíduos sólidos urbanos com geração de energia. 23º Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental, **Anais...** Campo Grande, 2005.
- SHARMA, V. K. et al. Inclined-plug-flow type reactor for anaerobic digestion of semi-solid waste. **Applied Energy**, v. 65, n. 1-4, p. 173-185, 2000.
- SMHSA. **Plano Municipal Integrado de Saneamento Básico – Produto 7: Diagnóstico do setor de resíduos sólidos**. Prefeitura Municipal de Florianópolis, Secretaria de Habitação e Saneamento Ambiental. Florianópolis, 2009. Disponível em: <http://portal.pmf.sc.gov.br/arquivos/arquivos/pdf/19_07_2010_18.20.18.20e5a287c0cef6669f612d8d622c0397.pdf>. Acesso em: 18 de enero 2011.
- VANDEVIVERE, P.; DE BAERE, L.; VERSTRAETE, W. Types of anaerobic digesters for solid waste. In MATA-ALVAREZ, J. (Editor). **Biomethanization of organic fraction of municipal solid waste**. IWA Publishing, 2003.
- WEINER, R. F.; MATTHEWS, R. A. **Environmental engineering** 4. ed. Elsevier Science, 2003.
- WIESMANN, U.; CHOI, I. S.; DOMBROWSKI, E.-M. **Fundamentals of biological wastewater treatment**. Weinheim: WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, 2007.
- ZUPANČIČ, G. D.; URANJEK-ŽEVART, N.; ROŠ, M. Full-scale anaerobic co-digestion of organic waste and municipal sludge. **Biomass and Bioenergy**, v. 32, n. 2, p. 162-167, 2008.