

UNIVERSIDAD DE CASTILLA - LA MANCHA, UCLM

CIUDAD REAL, ESPAÑA

UNIVERSIDAD EAN

BOGOTÁ, COLOMBIA

**“Análisis de la Viabilidad de Obtención de Bioetanol a partir de
la Fracción Orgánica de los Residuos Sólidos Urbanos
(FORSU)”**

NANCY JOHANA MONTOYA GÓMEZ

**Título de Especialista en Gestión de Residuos y Recuperación de Suelos
Contaminados**

**Ciudad Real, España
Junio de 2012**

HOJA DE APROBACIÓN

AGRADECIMIENTOS

A Dios por permitirme tener la oportunidad de vivir esta experiencia de desarrollo académico y profesional.

A la Universidad EAN por sus importantes relaciones Interinstitucionales e Internacionales, a través de las cuales pude culminar con éxito este programa académico con doble titulación, incluyendo todas sus actividades, tan valiosas para mi desarrollo profesional.

A la UCLM – Universidad de Castilla La Mancha, en Ciudad Real, España, por sus valiosos aportes, sus excelentes ponencias y buenos laboratorios y todo su equipo humano que en conjunto han conformado una gran experiencia académica y bases sólidas para culminar con éxito esta nueva etapa profesional.

Y siempre a mi bella familia por su apoyo y comprensión incondicional.

TABLA DE CONTENIDO

1. RESUMEN.....	9
2. INTRODUCCIÓN	11
2.1. Residuos Sólidos Urbanos (RSU) en España	12
2.2. Problemas provocados por los RSU	15
3. VALORIZACIÓN DE LOS RESIDUOS	18
3.1. Biometanización	19
3.2. Otros Métodos de Tratamiento	20
3.2.1. Compostaje	20
3.2.2. Gasificación	21
3.2.3. Hidrogenación.....	22
3.2.4. Pirolisis	22
3.2.5. Oxidación.....	22
3.3. Producción de Bioetanol.....	23
3.3.1. Antecedentes	26
3.3.2. Mercado del Etanol	28
3.3.2.1. Producción de Bioetanol en Europa	28
3.3.3. Análisis precio de producción y venta de Bioetanol.....	29
3.4. Comparación procesos de Biometanización y de producción de Bioetanol.....	32

4. OBJETIVOS.....	34
4.1. Objetivo General.....	34
4.2. Objetivos Específicos	34
5. JUSTIFICACIÓN.....	35
6. INSTALACIÓN EXPERIMENTAL	38
6.1. Bioreactor preparado para la fermentación	38
6.2. Fermentación Alcohólica.....	39
6.3. Control de la Temperatura.....	40
6.4. Control y Monitoreo de Datos	40
7. MATERIALES Y MÉTODOS	41
7.1. FASE 1. Hidrólisis / Solubilización de la FORSU	41
7.1.1. Técnicas Analíticas	43
7.2. FASE 2. Fermentación de Glucosa sin Control de pH	45
7.2.1. Técnicas analíticas	46
7.3. FASE 3. Fermentación de Glucosa con Control de pH.....	49
7.3.1. Técnicas analíticas	49
7.3.2. Controlador del caudal másico de N2 gas a la entrada del Bioreactor	51
7.3.3. Control, monitoreo y almacenamiento de datos	51
7.4. FASE 4. Fermentación de la FORSU	53
7.4.1. Técnicas analíticas	53

8.	RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	56
8.1.	FASE 1. Hidrólisis / Solubilización de la FORSU	56
8.2.	FASE 2. Fermentación de Glucosa sin Control de pH	58
8.3.	FASE 3. Fermentación de Glucosa con Control de pH.....	60
8.4.	FASE 4. Fermentación de la FORSU	63
9.	CONCLUSIONES	67
10.	BIBLIOGRAFÍA	69

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Composición en España de los Residuos Sólidos Urbanos (RSU)	12
Tabla 2. Gestión de RSU en España.....	13
Tabla 3. Producción de Bioetanol en EU-15	28
Tabla 4. Valores Futuros sobre el Etanol	29
Tabla 5. Precios del Bioetanol y de la Gasolina en España.....	30
Tabla 6. Costos de Producción de Bioetanol en EU-25 + Bulgaria, Rumania	30
Tabla 7. Comparación Biometanización y Producción de Bioetanol	33
Tabla 8. Características de la composición de la FORSU.....	41
Tabla 9. Preparación del Sustrato	45
Tabla 10. Composición de las Sales	45
Tabla 11. Preparación del Sustrato	49
Tabla 12. Preparación del Sustrato	53
Tabla 13. Medición de DQO	56
Tabla 14. Medición de Gases	57
Tabla 15. Análisis de Resultados Fase 2	58
Tabla 16. Análisis de Resultados Fase 3	60
Tabla 17. Análisis de Gases generados en la Fase 3	62
Tabla 18. Resultados DQO	63
Tabla 19. Análisis de Resultados Fase 4	63
Tabla 20. Análisis de Gases generados en la Fase 4	64

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Principales Productores de Bioetanol a Nivel Mundial	25
Figura 2. Evolución de la Producción de Bioetanol en EU-15.....	29
Figura 3. Producción Bioetanol en España – Consumo Industrial	32
Figura 4. Esquema de Estandarización Desarrollo de Procedimientos Fase 1.	44
Figura 5. Esquema de Estandarización Desarrollo de Procedimientos Fase 2.	48
Figura 6. Esquema de Estandarización Desarrollo de Procedimientos Fase 3.	52
Figura 7. Esquema de Estandarización Desarrollo de Procedimientos Fase 4.	55
Figura 8. Variación DQO vs Tiempo	56
Figura 9. Producción de Gases vs Tiempo	57
Figura 10. Comportamiento del Etanol producido y la Glucosa vs Tiempo	59
Figura 11. Comportamiento de los SST y SSV vs Tiempo	59
Figura 12. Comportamiento del Etanol producido y la Glucosa vs Tiempo	61
Figura 13. Comportamiento de los SST y SSV vs Tiempo	61
Figura 14. Comportamiento de los Gases producidos vs Tiempo	62
Figura 15. Comportamiento de los SST y SSV vs Tiempo	64
Figura 16. Comportamiento de la producción de Etanol vs Tiempo.....	65
Figura 17. Comportamiento de los Gases producidos vs Tiempo.....	65

“Análisis de la Viabilidad de Obtención de Bioetanol a partir de la Fracción Orgánica de los Residuos Sólidos Urbanos (FORSU)”

1. RESUMEN

El desarrollo del presente estudio de Investigación realizado en los Laboratorios de la UCLM, consiste en analizar a partir de la Fracción Orgánica de los Residuos Sólidos Urbanos (FORSU), las probabilidades de obtención de “Etanol” o Bioalcohol usado en la actualidad como Alcohol Carburante o Biocombustible, ya que supone un combustible alternativo de origen renovable y limpio, ajustado a las normas nacionales actuales.

El objetivo es investigar durante el proceso las características de producción de sus componentes durante la transformación de la materia orgánica estudiada, así como analizar sus gases generados o el “Biogás” que puede ser fuente potencial de aprovechamiento como energía eléctrica y térmica dentro del mismo proceso; adicionalmente el proceso genera como subproducto residuos sólidos con características degradadas a Compost, lo que lo hace adecuado para un posible uso en la industria agrícola y ecológica.

Actualmente las características de uso de biocombustibles y sus normas, implican la necesidad de contener el 10 % como mínimo de etanol en la gasolina motor, con proyecciones de aumento a través del tiempo. El mercado objetivo principal corresponde al sector de la industria de los biocombustibles y los centros mayoristas de mezcla, que actualmente requieren mezclar diferentes concentraciones de Etanol con el combustible fósil para motores.

La materia prima para la producción de Etanol actual, compite fuertemente con el sector de alimentos a nivel mundial, lo que genera controversias de carácter técnico, social y ético.

La propuesta de innovación es generar Bioetanol, como energías limpias alternativas y subproductos, a partir de residuos que actualmente se desperdician y generan impactos negativos a nivel ambiental y social, además que no compite con Alimentos como materias primas para la generación de Biocombustibles.

El tema de las energías alternativas ha generado una gran expectativa, en cuanto a las oportunidades que se tienen de aprovechar los residuos sólidos orgánicos, generar alto impacto ambiental, económico y social e impulsar el uso y desarrollo de los Biocombustibles.

La Biotecnología ofrece diversas opciones para la generación de energías renovables. La producción de Bioetanol, se obtiene mediante fermentación, a través de procesos biológicos. En este estudio investigativo se presenta el desarrollo de diferentes fases a escala de Laboratorio con el fin de evaluar las probabilidades de obtención de este producto, mediante una unidad de fermentación anaerobia experimental, cuyas características son presentadas en este informe. Los resultados se presentan de acuerdo al desarrollo de cada fase experimental, usando sistemas de medición analíticos convencionales.

2. INTRODUCCIÓN

Dentro del más reciente Plan Nacional Integrado de Residuos (PNIR) 2008 – 2015, aprobado por el Consejo de Ministros de España, se retoman los objetivos planteados desde el inicio y en el primer PNIR siendo relevantes y principales los propósitos a ser cumplidos en el año 2006:

- **Prevención:** Reducción del 6% en la generación total de residuos urbanos totales y del 10% en peso de los residuos de envases antes del 30 de junio de 2001.
- **Recogida selectiva:** En todos los núcleos poblacionales con un número de habitantes superior a los 1.000, antes del mes de enero de 2006.
- **Aumento en la reutilización, recuperación y reciclaje.**
- **Valorización de la materia orgánica:** Reciclaje mediante técnicas de compostaje (previsión de tratar al menos un 50% de la materia orgánica en el año 2006) y fomento de técnicas como la *Biometanización*.
- **Eliminación:** Clausura y eliminación de todos los vertederos incontrolados antes del año 2006, con el objetivo intermedio de que a finales del año 2001 únicamente un 5% de todos los residuos urbanos fuesen depositados de forma incontrolada.

Complementariamente, el nuevo PNIR 2008 – 2015, hace especial hincapié en lo que popularmente se conoce como las “Tres Erres”: Reducir, Reutilizar y Reciclar, aunque también manifiesta la intención de cumplir con, entre otros, los siguientes objetivos:

- Detener el crecimiento en la generación de residuos que se produce en la actualidad.
- Eliminar por completo el vertido ilegal.

- Reducir el vertido y fomentar la prevención, la reutilización, el reciclado de la fracción que pueda ser susceptible de ello y otros mecanismos de valorización de la fracción de residuos que no se pueda reciclar.
- Dotar al país de nuevas infraestructuras y mejorar las instalaciones ya existentes.
- Consolidación de los programas de I+D+i aplicados a los diferentes aspectos de la gestión de los residuos, incluyendo análisis de la eficiencia de los sistemas de recogida, optimización de los tratamientos y evaluación integrada de los procesos completos de gestión, desde la generación hasta la eliminación.
- Evitar que los residuos contribuyan al cambio climático fomentando la aplicación de las medidas de mayor potencial de reducción.

La finalidad del PNIR 2008 – 2015 es la de promover una política apropiada en la gestión de los residuos, disminuyendo su generación e impulsando un correcto tratamiento de los mismos. También pretende que las Administraciones públicas, los consumidores y usuarios se involucren de tal manera que cada una de las partes asuman sus respectivos compromisos de responsabilidad.

2.1. Residuos Sólidos Urbanos (RSU) en España

El valor generado en España de Residuos Sólidos urbanos por Habitante para el año 2009 es 529 kg/hab año, correspondientes a 1,45 kg/hab día.

Tabla 1. Composición en España de los Residuos Sólidos Urbanos (RSU)

Tipo de Residuo	Porcentaje
Materia Orgánica	44.06 %
Papel y Cartón	21.18 %
Plástico	10.59 %
Vidrio	6.93 %

Tipo de Residuo	Porcentaje
Hierro y Aluminio	4.11 %
Maderas	0.96 %
Otros	12.17 %

Fuente: Plan Nacional Integrado de Residuos 2008 – 2015.

El valor citado del porcentaje de la Materia Orgánica incluye Restos de Alimentos, Jardinerías, Podas, Hojas y Césped, etc.

El valor porcentual de Residuos clasificados como “Otros” son los Correspondientes a Residuos Peligrosos.

Tabla 2. Gestión de RSU en España

Tratamiento	Porcentaje
Compostaje	32 %
Vertederos	47 %
Incineración	7 %
Recogida Selectiva	12 %
Biometanización	2 %

Fuente: Datos 2007, Problemática Ambiental de Residuos. Gestión de RSU.

Variación de la Gestión de los Residuos Urbanos en España:

- Existen actualmente 38 plantas de compostaje en España.
- En 2009 se recogieron 24,8 millones de toneladas de residuos urbanos, un 5,9% menos que en 2008.

- Las empresas de tratamiento de residuos, tanto de origen urbano como no urbano, gestionaron 49,4 millones de toneladas de residuos no peligrosos y 2,7 millones de toneladas de residuos peligrosos en el año 2009.
- Del total de residuos no peligrosos, el 47,4% se destinó al reciclado, el 47,7% al vertido y el 4,9% a la incineración.
- En cuanto a los residuos peligrosos gestionados en 2009, el 61,4% se destinó al reciclado, el 26,9% al vertido y el 11,7% a la incineración.

A continuación se presentan algunos de los Principales Factores que hacen que actualmente se encuentre en incremento el interés por el aprovechamiento y valorización energética de los residuos.

a. Marco Legal:

- Jerarquía Europea en Gestión de Residuos: Prioridad de la valorización frente a la Eliminación.
- Reducir las Cantidades de Residuos enviadas a vertederos, específicamente materia orgánica.

b. Producción de Residuos:

- Incremento en la producción de RU per cápita.
- Incremento de la población y de la actividad económica.
- Incremento de las cantidades totales de residuos.

c. Factores Sociales:

- Demanda creciente de mayor Calidad Ambiental a las Administraciones.
- Rechazo a las instalaciones de eliminación de residuos (Vertederos).
- Participación limitada de los ciudadanos en las iniciativas de gestión de residuos.

d. Factores Económicos:

- Disminución de la Inversión del Gobierno y Administraciones Publicas
- Aumento de los costos de Gestión de los Residuos Urbanos

e. Tecnología:

- Dificultades crecientes para la ampliación de vertederos existentes y creación de nuevos vertederos.
- Incremento de nuevas tecnologías para soluciones de todo tipo de residuos.

f. Factores Externos:

- Aumento de precio de los combustibles, de las materias primas y de la energía.
- Limitación de emisiones de CO₂ (Protocolo de Kioto).
- Sustitución de energías fósiles por energías renovables.

2.2. Problemas provocados por los RSU

Los Residuos Sólidos Urbanos (RSU) tienen características particulares que representan problemas de salubridad y deterioro al medio ambiente, causando problemas provocados por el inadecuado manejo de los RSU, los cuales pueden llegar a ser leves o graves, dependiendo de la situación específica. En algunos casos, pueden llegar a causar daños irreversibles. Los efectos más frecuentes provocados por los RSU son:

- ✓ **Contaminación Atmosférica:** La fermentación de la materia orgánica en ausencia de oxígeno genera Metano, el cual es un gas de efecto invernadero que es veinte veces más potente que el dióxido de carbono, siendo este gas Metano (CH₄) el que constituye el 50 % de las emisiones gaseosas producidas en los

Vertederos y por ende el principal responsable de los incendios y explosiones que se producen en estos lugares. Adicionalmente cuando se generan incendios no controlados en los sitios de deposición de residuos o vertederos, se hace la combustión de compuestos clorados, los cuales emiten a la atmósfera compuestos químicos altamente contaminantes como las dioxinas y furanos. Otros gases que también son perjudiciales para la atmósfera y son derivados de los Residuos Sólidos Urbanos son los compuestos orgánicos volátiles, como el Benceno, que es además potencialmente cancerígeno, el cloruro de vinilo y el cloruro de metilo.

- ✓ **Contaminación Edáfica:** Las propiedades físicas, químicas y biológicas del suelo se ven profundamente alteradas cuando sobre éste se depositan residuos no biodegradables. Como consecuencia directa de una contaminación edáfica moderada se presenta la desaparición de la flora y la fauna de la región afectada, la alteración de los ciclos biogeoquímicos y la pérdida de nutrientes esenciales para la existencia de vida animal o vegetal. También se puede generar acidificación ó salinización de los suelos, por cuenta de la acción de los lixiviados en el suelo. Se presenta también deterioro de la calidad microbiológica del suelo, por decrecimiento de los parámetros del mismo.

- ✓ **Contaminación de las Aguas Superficiales o Subterráneas:** Los líquidos liberados por la Fracción Orgánica de los Residuos, sumados a la percolación de la lluvia por un mal cubrimiento, genera que sean arrastrados compuestos orgánicos y tóxicos del material dispuesto, fenómeno que da origen a los “Lixiviados”, los cuales arrastran todas las sustancias tóxicas que se generan en los Vertederos. Los compuestos más representativos caracterizados como nocivos son el cloruro de vinilo, cloruro de metilo, tetracloruro de carbono y los clorobencenos, siendo estos compuestos sustancias persistentes y bioacumulativas en el medio ambiente y la cadena trófica.

Adicionalmente los ya mencionados Lixiviados, pueden contener también metales pesados que cuentan con alto índice de toxicidad, siendo perjudiciales para la salud. Los componentes más frecuentes que se encuentran en la caracterización de los lixiviados son el Plomo (Pb), Mercurio (Hg), Cadmio (Cd), los cuales están presentes en materiales que se disponen de forma adecuada en los hogares, como pilas alcalinas, residuos de aparatos eléctricos y electrónicos, etc.

Otros efectos nocivos provocados por los RSU y sus derivados son:

- **Afectación por olores:** Formadas por la descomposición de la materia orgánica presente en gran parte de los residuos sólidos urbanos, principalmente el H₂S y el Metano, entre otros gases, que provocan una serie de malos olores, que se sienten con mayor facilidad dependiendo de la acción del viento.
- **Proliferación de plagas y aparición de focos infecciosos:** Cuando se acumulan de forma incontrolada los Residuos Sólidos Urbanos se favorece la proliferación de plagas como roedores e insectos y también la proliferación de aves carroñeras, entre otros vectores que pueden ser origen de focos de infecciones de infecciones.
- **Degradación del paisaje:** El impacto negativo paisajístico suele ser muy común en los lugares de acumulación de residuos, cuando no son apropiados y manejados adecuadamente, siendo potencial foco de accidentes y otros incidentes, como el deterioro visual, daños irreversibles al ecosistema, incendios no controlados, entre otros.

3. VALORIZACIÓN DE LOS RESIDUOS

La Gestión Integral de los Residuos Sólidos Urbanos (RSU), según la normatividad vigente referente comprende todas sus actividades, desde la recogida, transporte, almacenamiento, separación, valorización, transformación, eliminación y disposición final de los RSU.

Entre estos se encuentra la Valorización Energética, de los cuales se realizara una breve descripción:

En la fase final de la cadena de la Gestión de los Residuos Sólidos se presenta la Transformación, la Valorización Energética o la Eliminación de estos, lo cual depende de las características de los residuos, las posibilidades de tratamiento, el lugar o zona de influencia y los actores involucrados.

En general, en la actualidad los componentes de la Fracción Orgánica de los Residuos Sólidos Urbanos (FORSU) pueden ser transformados con el fin de obtener a partir de ellos nuevos productos con otras aplicaciones competitivas como por ejemplo, los procesos de Biometanización y Compostaje, técnicas mediante las cuales se pueden obtener fuentes generadoras de energía que pueden usarse como combustible alternativo (para el primer caso) ó productos de valor agregado con bajo impacto ambiental (en el segundo). Otros procesos que pueden encargarse de aprovechar energéticamente los RSU (incluyendo otras fracciones diferentes a la orgánica) son la Gasificación, la Hidrogenación, la Pirolisis y la Oxidación, entre otros.

3.1. Biometanización

La Biometanización se produce mediante un proceso de Fermentación Anaerobia de la Fracción Orgánica de los Residuos Sólidos, mediante el cual se obtiene Biogás y posteriormente se obtiene un producto adicional con un pH básico (7.5) y no estabilizado que contiene una serie de propiedades aptas como fertilizantes, mejorando parte de las características físicas del suelo, aumentando la retención de la humedad y la capacidad de infiltración de agua.

“La digestión anaerobia o Biometanización, se produce por la fermentación en ausencia de O_2 = ($M.O.+H_2O=CH_4+CO_2$) de la materia orgánica biodegradable para conseguir por un lado un producto relativamente estabilizado y por lo tanto susceptible de recibir un tratamiento de compostaje (no se alcanza la pasterización) y por otro lado un gas combustible con alto contenido en CH_4 denominado biogás.

Tradicionalmente en España, además de los fangos procedentes de EDAR, se han metanizado el estiércol y los restos vegetales agrícolas (granjas autosuficientes con producción de electricidad, de una enmienda orgánica utilizable como corrector de suelos y de líquido para riego)

Para el caso de los RU es necesario un tratamiento previo al igual que en compostaje para dejar la materia orgánica lo más limpia posible. Este tratamiento busca retirar inertes, una granulometría baja (< 60 mm e incluso <40 mm según la tecnología) y un alto contenido de humedad.

Las características de operación para este sistema consisten en el control del contenido de O_2 en el reactor por motivos de explosividad y por mantener reacciones anaeróbicas; concentración de sustancias inhibitoras como metales pesados y sulfuros; control del pH del medio (6,5 a 7,5); control de la cantidad de nutrientes para los microorganismos (N y P); control del contenido de materia seca; control de la temperatura

dependiendo de la tecnología usada (rango mesófilo o termófilo); control de la presión en el reactor.”¹

Sin embargo, las características de este subproducto pueden variar dependiendo de la composición inicial y el tipo de Materia Orgánica que está siendo degradada mediante el proceso de Fermentación. De acuerdo a datos promedios este subproducto puede contener 85% de materia orgánica, 2,6% de Nitrógeno y menos del 2% de Fósforo y Potasio.

Para lograr los objetivos descritos del proceso de Biometanización, es necesario contar con fuertes estructuras selladas que permitan mantener bajo control los parámetros necesarios como el control del pH, la Temperatura, la Presión del sistema, durante el proceso de la Fermentación y además garantizar que el proceso se realice en ausencia de oxígeno para el normal desarrollo de las bacterias anaeróbicas. Estas estructuras son conocidas como Biodigestores.

3.2. Otros Métodos de Tratamiento

A continuación se presentan en términos generales las características principales de otros diversos tipos de tratamiento y/o valorización de residuos existentes en la actualidad.

3.2.1. Compostaje

El Proceso de Compostaje se constituye actualmente en uno de los Métodos de Tratamiento de los residuos sólidos orgánicos más usados como generación de subproductos, valorización o inertización de residuos contaminantes. Es un proceso aerobio, es decir en presencia de oxígeno, que permite la degradación bioquímica de la

¹ SUFI, S.A. (Grupo Sacyr-Vallehermoso). Máster en Ingeniería y Gestión Medioambiental - Universidad de Castilla La Mancha. Ciudad Real 2012.

Materia Orgánica presente en los residuos. Esta degradación aerobia se realiza gracias a la acción de las bacterias y microorganismos presentes en el material sólido que transforma el residuo en un compuesto bioquímicamente estable llamado Compost.

El proceso de compostaje se produce mediante el desarrollo de tres etapas, mientras se consume la materia orgánica y a su vez se genera dióxido de carbono, favoreciendo la rápida generación del material húmico llamado Compost. Estas Etapas son Crecimiento (Crecimiento de los microorganismos presentes en los residuos), Etapa Termófila (Producción de la actividad bacteriana a 50 - 70 °C) y Etapa de Maduración (Proceso de descomposición de la Materia Orgánica).

En algunos casos los lodos de las depuradoras de agua (EDAR) son mezclados con la Fracción Orgánica de los Residuos Sólidos Urbanos, ya que estos lodos tienen un alto contenido de microorganismos que degradan rápidamente la materia orgánica acelerando el proceso de compostaje.

En España actualmente hay aproximadamente 38 plantas de compostaje, localizadas la mayor parte de ellas en el Este y Sur del país.

3.2.2. Gasificación

La Gasificación consiste en un proceso termoquímico que permite transformar la materia orgánica presente en los residuos sólidos urbanos en un gas con un bajo poder calorífico. Este proceso consta de tres etapas o fases, las cuales son el Secado, el Craqueo y la Gasificación como su etapa final.

Para que la gasificación se pueda llevar a cabo se requiere de que se genere una oxidación parcial, además que exista un agente gasificante, el cual puede ser agua, oxígeno, hidrógeno, vapor de agua y que se presenten altas temperaturas comprendidas entre los 600 y 1.000 Grados Centígrados.

Este método de tratamiento presenta varias ventajas, entre las cuales están la facilidad de valorización del residuo dependiendo poco de su composición, buen rendimiento eléctrico y bajo impacto ambiental colateral.

3.2.3. Hidrogenación

La Hidrogenación es un proceso que se lleva a cabo en la Celulosa presente en los residuos sólidos urbanos y permite la transformación de esta en productos combustibles. Este proceso requiere durante su operación la presencia de monóxido de carbono y agua a Temperaturas de 400 Grados Centígrados, así como una presión mínima de 300 atmósferas y la adición de diversos tipos de catalizadores que permitan acelerar el proceso y generen condiciones aptas para que se logre la transformación deseada.

3.2.4. Pirolisis

La Pirolisis es un proceso de combustión que se produce en ausencia de oxígeno a altas temperaturas comprendidas entre los 550 y 1.100 °C. Este Tratamiento permite transformar la materia orgánica presente en los residuos sólidos urbanos y convertirlos en gases, líquidos o materiales de naturaleza inerte, convirtiéndose en una técnica frecuentemente usada en relación con la Incineración.

3.2.5. Oxidación

La oxidación consiste en un proceso donde se logra oxidar la materia orgánica en suspensión o disolución acuosa presente en los residuos, con la consecuente obtención de agua, dióxido de carbono y otros compuestos orgánicos simples, las condiciones de operación son el empleo de agentes oxidantes, oxígeno atmosférico a presión y temperaturas de 300 °C aproximadamente.

3.3. Producción de Bioetanol

Comúnmente el Bioetanol puede ser producido a partir de cualquier materia prima rica en azúcares, como la caña y la remolacha (ricas en sacarosa), o como los amiláceos (maíz, trigo y otros cereales), ricos en amilosa (polímeros de glucosa con ligaduras alfa 1.4 de cadenas lineares). El proceso de producción de Etanol más común proveniente de insumos ricos en sacarosa como en el caso de caña, normalmente son procesos más simples ya que se puede iniciar la fermentación después de la molienda. El proceso proveniente de insumos ricos en amilosa es más complejo, porque después del molido, el almidón debe ser convertido en azúcares fermentables, por un proceso enzimático (alfa amilosa y glucoamilosa) en altas temperaturas. Sólo entonces los azúcares sufrirán fermentación por la acción de las levaduras, una vez que los azúcares ya están disponibles para la fermentación, o que es catalizado por enzimas de las levaduras. De igual forma, estudios demuestran que los componentes presentes en la Fracción Orgánica de los Residuos Sólidos pueden ser transformados a Etanol, mediante hidrólisis enzimática ácida con ayuda de microorganismos, dependiendo de las características de la materia orgánica presente.

El ETANOL usado en la actualidad como combustible lo encontramos determinado como “Alcohol Carburante de Primera Generación”: Que se refiere a cosechas de Azúcar y Cereales, con alto contenido de Almidón, y “Alcohol Carburante de Segunda Generación”: A partir de la Lignocelulosa (Biomasa), sustrato abundante en todo el mundo, consiste en convertir la Lignocelulosa en Azúcar, entre los que se encuentran los componentes de la Fracción Orgánica de los Residuos Sólidos Urbanos (FORSU).

Entre los productos agrícolas que se utilizan como materia prima para la producción de combustibles de automoción, el Etanol es en estos momentos, el producto dominante.

Hoy en día el Etanol se obtiene de plantas ricas en azúcar (principalmente la caña de azúcar de la que se obtiene la melaza que es la principal materia prima azucarada para la producción de etanol) y granos ricos en almidón. Entre los cereales, el maíz, arroz, trigo y cebada son las materias primas más comunes para la producción de Etanol. Existe una sobreproducción mundial de grano por lo que la disponibilidad de materia prima no es problema en la actualidad. Sin embargo, la producción de etanol a partir de azúcares está controlada por los precios del azúcar para consumo humano.

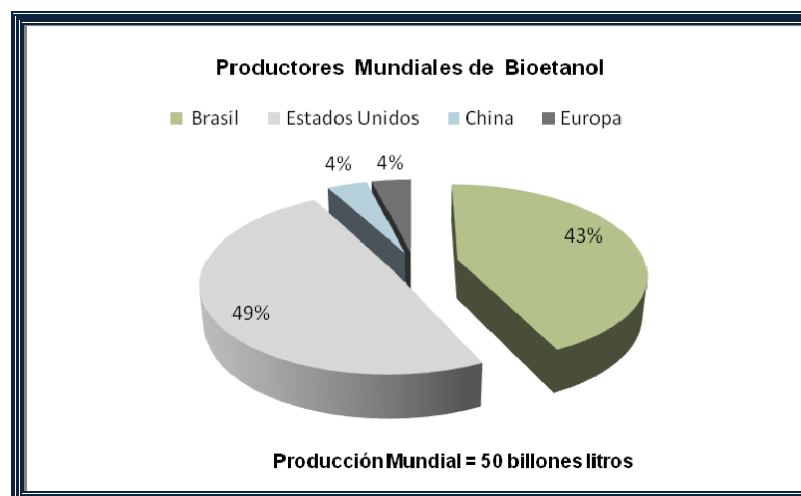
Otros cultivos que se están investigando para la producción de etanol combustible son la patata y el sorgo azucarero. Estos productos aparte de su menor costo de producción, serían rentables para la producción de etanol ya que se podrían emplear los tallos secos (patata) o el bagazo (sorgo) para la producción del vapor y la electricidad necesaria en el proceso de obtención de etanol.

El Bioetanol se obtiene por fermentación de medios azucarados hasta lograr un grado alcohólico, después de fermentación, en torno al 10-15%, concentrándose por destilación para la obtención del "alcohol hidratado" o llegar hasta el alcohol absoluto tras un proceso específico de deshidratación. Esta última calidad es la necesaria si se quiere utilizar el alcohol en mezclas con gasolina en vehículos convencionales.

Otros residuos de materia orgánica potenciales con alto contenido de Azúcares son: Maíz, caña, soya, aguacate, coco, cacahuete, girasol, colza, zumos, frutas, hortalizas, restos de podas, material vegetal, madera, etc.

Los mayores productores de Bioetanol en el Mundo, con una producción de aproximada de 50 billones de litros en el año 2007, se presentan en la grafica a Continuación. Sin embargo, cabe anotar que la producción de los Estados Unidos está basada en maíz y la de Brasil en caña de azúcar, lo cual constituye procesos y evaluaciones económicas representativas diferentes.

Figura 1. Principales Productores de Bioetanol a Nivel Mundial



Fuente: Ministerio Federal de Cooperación Económica y Desarrollo. México 2010.

“En Europa, el mayor interés para el uso de Bioetanol se presentó a finales del 2001, debido a los incentivos gubernamentales. En 2006 las inversiones en Bioetanol en la UE superaron, por primera vez las inversiones en biodiesel, buscando cumplir las metas para el 2010. La Comisión Europea propone sustituir 10% de sus combustibles fósiles por renovables hasta 2020, lo que demandará 17.7 billones de litros de etanol (Horta Nogueira, op. cit., p.237), pretendiendo alcanzar esta meta con trigo, remolacha y celulosa como materias primas. En 2007, fueron producidos 1.8 billones de litros de Etanol, siendo Francia el mayor productor, seguido de Alemania y España, respectivamente.

Como Europa no dispone de grandes extensiones territoriales para cultivo, pretende invertir fuertemente en la producción de etanol celulósico. La UE tiene también una gran preocupación por la competencia entre los alimentos y los biocombustibles, especialmente por ser un área del planeta con gran densidad poblacional, lo cual lo posiciona como un gran importador de Etanol. En 2007 Europa importó un billón de litros de alcohol etílico combustible.”²

² Research and Markets- Europe's Ethanol Market Potential. www.researchandmarkets.com/reportinfo= Acceso en: 20 Ago.2009.

Entre los principales usos del Etanol está la preparación de carburantes para vehículos automotores. El etanol permite un aumento del índice de octano, y por lo tanto, la reducción del consumo y reducción de la contaminación (10 a 15 % menos de monóxido de carbono e hidrocarburos). El etanol se puede mezclar con la gasolina sin plomo de un 10 % a un 25 % sin dificultad. En ciertos motores, se ha logrado incorporar hasta en un 100 % (Verdesio, 2003), (Almeida, 2006). El etanol podría así, sustituir al metil terbutil éter (MTBE), producto oxigenante con el que se mezcla el combustible fósil (gasolina), y que ha permitido reducir las emisiones de CO₂. Esta acción es muy importante pues el MTBE, por ser un compuesto muy estable, de baja degradación y muy soluble en agua, ha resultado ser un contaminante de aguas subterráneas (Nava, 2006).

Una de las opciones para producir etanol es por fermentación a partir de materias primas ricas en carbohidratos, tales como la caña de azúcar, almidón, celulosa, entre otras. Por tal razón, es común designar al etanol obtenido por esta vía "Bioetanol". Entre estas materias primas se encuentran las frutas y vegetales como la caña de azúcar y la remolacha, los cereales (trigo, maíz, sorgo), los tubérculos (papas, yuca) y en general, materias provenientes de ligno–celulosas o de residuos orgánicos.

3.3.1. Antecedentes

El primer programa masivo de energías renovables a nivel mundial de producción de Bioetanol a partir de caña de azúcar, se inició en Brasil en 1975 (Verdesio, 2003). Hasta 1989, el programa se apoyó en políticas públicas de beneficios económicos e incentivos fiscales para ayudar al desarrollo industrial de esta tecnología. La producción se estabilizó desde entonces en 11 a 16 mil millones de litros por año. Sin embargo cada vez más se hacen más estudios y se utiliza más la producción de estos alimentos para la producción de etanol, con el fin de satisfacer la demanda actual y las futuras necesidades del combustible biológico renovable.

“Programas similares se han iniciado en Austria, Canadá, Francia, Alemania, España, Suecia y Estados Unidos. En este último el Bioetanol se obtiene a partir del maíz (Coalición Americana por el Etanol, 2006) y en Francia a partir de la remolacha y del trigo (Instituto Francés del Petróleo, 2006). Ahí se estima un costo de producción de Bioetanol de 0.38 euro/litro y de 18 euros por Gigajoule. La productividad se estima entre 70 y 75 hectolitros de etanol por hectárea cultivada con remolacha y alrededor de 35 hectolitros de etanol por hectárea cultivada con trigo. El etanol aporta aproximadamente 28 mega-joules por kilo (una tonelada de Bioetanol equivale aproximadamente a un volumen de 1.25 metros cúbicos, es decir, 12.5 hectolitros). En Francia, el consumo llega apenas al 1%, pero se tenía estimado que llegaría al 5.75 % para el año 2010.

Según la Agencia Internacional de Energía (AIE, 2006), el potencial de esta fuente de energía es considerable, pues se calcula que el Bioetanol podría sustituir un 25% de la gasolina utilizada como combustible en el año 2025.”³

En general, las fuentes de energía, se clasifican como renovables y no renovables. Entre las primeras se encuentra la energía eólica, hidráulica, geotérmica, maremotriz, solar y las energías de la biomasa (Bioetanol, combustión directa de biomasa leñosa, combustión con gasificación, la pirolisis y la producción de gas por biodigestión anaeróbica.). Dentro de las energías no renovables se encuentra el petróleo, el gas natural (Metano) y la energía nuclear; siendo el petróleo la principal fuente de energía en la actualidad tanto en los países desarrollados como en los países en vía de desarrollo.

Una de las fuentes de energía que poco se menciona en los proyectos nacionales y que ha demostrado su factibilidad en otras regiones del mundo, es la producción de Etanol. Desde el punto de vista industrial, trabajar en la producción de dicho producto es fundamental, pues el Etanol no sólo es una fuente de energía sino una materia prima importante en la industria (química, farmacéutica, agroalimentaria, etc.)

³ Alcoholic fermentation: An option for renewable energy production from agricultural residues. H.J. Vázquez y O. Dacosta

3.3.2. Mercado del Etanol

El Etanol se puede utilizar como único combustible, realizando modificaciones a los motores, o en mezclas con la gasolina desde un 10% (E-10), hasta mezclas mucho más altas como el E-85 que es un combustible que contiene hasta el 85% de Etanol y sólo un 15% de gasolina.

Para mejorar la competitividad del Bioetanol frente a los productos derivados del petróleo se deben reducir los costos de las materias primas, ya que éstas suponen el 60-70% del costo final del Etanol, introducir mejoras en los cultivos y determinar los cultivos más rentables y adecuados para la producción de Bioetanol.

3.3.2.1. Producción de Bioetanol en Europa

La producción de Bioetanol Europea ascendió a 309.500 toneladas en el año 2003., España en el 2003 se convirtió en el primer productor en Europa con 180.000 toneladas. El éxito del sector en España puede explicarse por el hecho de que España no cobra el impuesto sobre el etanol. Suecia fue el tercer productor europeo en 2003 con 52.300 toneladas. España y Francia transforman parte de su producción de Bioetanol en ETBE.

Tabla 3. Producción de Bioetanol en EU-15

	2002		2003	
	Bioetanol	ETBE	Bioetanol	ETBE
Spain	176,700	376,000	180,000	383,400
France	90,500	192,500	77,200	164,250
Sweden	50,000	0	52,300	0
Total EU-15	317,200	568,500	309,500	547,650

Fuente: Euroserver, 2004

Figura 2. Evolución de la Producción de Bioetanol en EU-15



Fuente: Euroobserver, 2004

3.3.3. Análisis precio de producción y venta de Bioetanol

A continuación se presentan los valores de Etanol en el Mercado actual y los Costos aproximados de Producción, como bases que permitirían en caso dado, calcular el margen entre uno y otro: ganancia del negocio y costos de distribución y transporte.

Tabla 4. Valores Futuros sobre el Etanol

Mes	Último	Var.	Apertura	Máximo	Mínimo	Hora
Cash	2.020s	unch	0.000	2.020	2.020	06/04/12
Jul 12	2.030	-0.004	2.034	2.044	2.018	13:57
Aug 12	2.022	-0.006	2.028	2.034	2.010	13:57
Sep 12	1.975	-0.015	1.996	1.999	1.968	13:13
Oct 12	1.917	-0.028	1.940	1.940	1.917	13:57
Nov 12	1.891	-0.030	1.917	1.925	1.890	13:57
Dec 12	1.895	-0.025	1.915	1.923	1.895	13:36
Jan 13	1.902	-0.026	1.924	1.931	1.899	13:14
Feb 13	1.906	-0.025	1.934	1.938	1.900	13:15
Mar 13	1.910	-0.031	1.940	1.946	1.906	13:13
Apr 13	1.924	-0.037	1.960	1.964	1.924	13:16
May 13	1.941	-0.035	1.974	1.974	1.938	13:15
Jun 13	1.958	-0.033	1.989	1.990	1.958	13:13
Jul 13	1.969	-0.032	1.996	1.999	1.969	13:40
Aug 13	2.001s	+0.037	0.000	2.001	2.001	06/04/12

Fuente: <http://www.forexpros.es/commodities/ethanol-futures>. Revisado el 05/06/2012.

Otra fuente: http://www.cmegroup.com/trading/energy/ethanol/ethanol_quotes_globex.html. (Bolsa de New York).

Tabla 5. Precios del Bioetanol y de la Gasolina en España

Precio medio del Bioetanol E5:	1,432 €
Precio medio del Bioetanol E10:	1,433 €
Precio medio del Bioetanol E85:	1,080 €
Precio fijado por la UE para España de la gasolina de 95 Octanos (19/03/12):	1,477 €

Fuente: <http://www.motorpasionfuturo.com/industria/los-precios-del-bioetanol-compensa-abandonar-la-gasolina>. Revisado el 05/06/2012.

Tabla 6. Costos de Producción de Bioetanol en EU-25 + Bulgaria, Romania

	Wheat Based (Trigo)			Beet Based (Remolacha)		
	€/L	€/GJ	€/toe	€/L	€/GJ	€/toe
Net feedstock cost						
- Feedstock	0.40	18.9	790	0.26	12.3	513
- Co-product credit	0.15	7.1	296	0.03	1.4	59
Subtotal feedstock cost	0.25	11.8	493	0.23	10.9	454
Conversion costs	0.28	13.3	553	0.22	10.4	434
Blending costs (incl. adaptation of gasoline)	0.05	2.4	99	0.05	2.4	99
Distribution costs	0.01	0.5	20	0.1	4.7	197
Total costs at petrol station	0.59	27,9	1165	0.6	28.4	1184

Fuente: BTG, 2004

“Según el informe de 2010 que estudia la Comisión Nacional de Energía (CNE) sobre uso de Biocombustibles en España, estos redujeron las emisiones de gases de efecto invernadero en un 43%, con un 68% en Bioetanol y 37% en biodiesel. El resto de cifras confirman la caída industrial del sector en España: el biodiesel baja del 70% de producción en 2009, a poco más del 50% en 2010 y el Bioetanol fabricado en España también cae del 67% de 2009 al 49% de 2010.

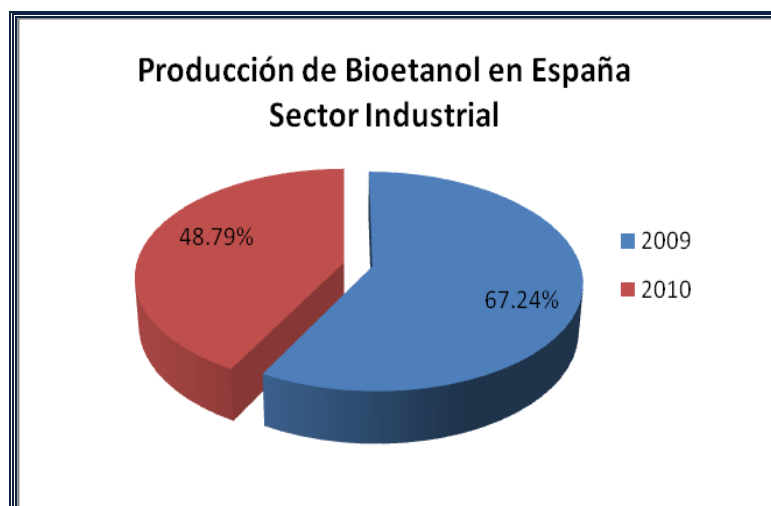
Las ventas anuales de Bioetanol en 2010 ascendieron a 468 mil m³, lo que corresponde a un aumento del 56.60%. Lo anterior representa en volumen un 5.56% del total del combustible diesel y un 6.22% de las gasolinas de automoción comercializadas.

Los estudios demuestran según la fuente, que se está usando menos materia prima Española y por ende hay menos producción propia de biocombustibles. Los datos representan una clara dependencia de la industria española de la materia prima exterior y un preocupante descenso de la producción de biocombustibles. El biodiesel sigue con su base principal en la soja y la palma, hasta el punto de reducir al 8.29% la participación de las materias primas españolas empleadas para su fabricación, cuando en 2009 alcanzaron el 12.5%.

Sigue compitiendo la industria de alimentos en la Producción de Bioetanol, el cual se produjo principalmente a partir de caña de azúcar (36 %), maíz (31 %) y trigo (20 %). Con respecto al año 2009 suben el primero y el tercero, y baja el maíz. Aquí también pierde protagonismo España, ya que Brasil la desplaza del primer puesto entre los países de cultivo de la materia prima. Y lo pierde también en el apartado industrial, porque en 2009 el Bioetanol consumido se fabricó principalmente en España (67.24%) y en 2010, ha disminuido el porcentaje hasta el 48.79%.⁴

⁴ <http://www.fedebiocombustibles.com/v2/nota-web-id-1007.htm>. Revisado el 05/06/2012.

Figura 3. Producción Bioetanol en España – Consumo Industrial



Fuente: Elaboración propia, según datos web Fedebiocombustibles, 2012.

3.4. Comparación procesos de Biometanización y de producción de Bioetanol

De acuerdo a las descripciones previamente realizadas sobre cada uno de estos procesos (Biometanización y Producción de Bioetanol), y al hacer una comparación entre ellos, se puede deducir que cuentan con procesos de producción muy similares, así como sus características de operación y requerimientos y ambos con eficientes resultados energéticos, con algunas variaciones dependiendo del producto final. A continuación se presenta una tabla comparativa con las principales características de cada uno de ellos, lo que refleja su similitud, y los resultados finales correspondientes.

Tabla 7. Comparación Biometanización y Producción de Bioetanol

Tratamiento	Proceso	Tiempo de residencia	Adición Microorganismos	Producto Final	Uso	Subproducto
Biometanización	Fermentación Anaerobia	Aprox. 21 días	No	Metano	Energía Eléctrica	Materia Orgánica FORSU digestada
Producción de Bioetanol	Fermentación Anaerobia	Aprox. 21 días	Levadura	Etanol	Biocombustible	Materia Orgánica FORSU digestada

Fuente: *Elaboración propia, 2012.*

De igual forma, son similares o muy equivalentes los costos de producción referente a cada proceso.

El análisis respecto a los procesos de la tecnologías para la Biometanización o para la producción de Bioetanol, bajo el concepto de un sistema flexible de tratamiento de la Fracción Orgánica de los RSU, dependería únicamente del contexto económico, es decir, la fluctuación de los precios de mercado de Etanol ó de Metano; de esta forma, se podría derivar una fracción más grande a la producción del gas o del biocombustible en la medida en que uno o el otro presente precios más altos.

4. OBJETIVOS

4.1. Objetivo General

Realizar el análisis al comportamiento de la Fracción Orgánica de los Residuos Sólidos Urbanos (FORSU) mediante procedimientos Biológicos, con el fin de comprobar la viabilidad de la obtención de Bioetanol a partir de los mismos, como materia prima principal.

4.2. Objetivos Específicos

- Analizar de forma preliminar la viabilidad técnica de obtención de Bioetanol por vía fermentativa de la fracción orgánica de residuos sólidos urbanos.
- Implementar las pruebas preliminares de fermentación e hidrolisis de la fracción orgánica de los RSU (FORSU).
- Determinar de forma preliminar la eficiencia y la cinética de la producción de Bioetanol.
- Analizar los resultados obtenidos, con miras a generar conocimiento sobre obtención de Bioetanol por vía fermentativa de la fracción de residuos orgánicos de RSU.

5. JUSTIFICACIÓN

Actualmente está creciendo aceleradamente el interés y motivación de todos los sectores involucrados con el medio ambiente y el manejo de los recursos naturales, entre ellos los sectores gubernamental, empresarial e institucional sobre el aprovechamiento eficiente de los recursos, así mismo el manejo eficiente de los residuos sólidos, la protección y prevención de los recursos naturales y la disminución de los impactos ambientales causados, y a pesar de ello aún no se ha implementado un sistema eficiente en su totalidad debido a la falta de estudios positivos que demuestren la viabilidad técnica y económica de los proyectos ambientales.

Aunque de esta manera se incentiva poco a poco el aporte de la sociedad al manejo medurado y consiente de los residuos sólidos urbanos, aun no existe en realidad la cultura marcada en el cuidado y protección del medio ambiente y conservación de los recursos naturales, se lleva un manejo deliberado de los recursos, inconscientes del grave daño ambiental que causa específicamente a las generaciones futuras.

Sin embargo cada vez hay nuevos actores que se han dado cuenta del beneficio que se puede obtener a partir del aprovechamiento eficiente y la valorización o aprovechamiento de los residuos sólidos o de cualquier material que hasta ahora no se le ha dado suficiente provecho, y que al contrario está trayendo como consecuencias el grave deterioro ambiental, la contaminación de nuestros recursos naturales y la afectación de la calidad de vida de nuestros habitantes.

Dichos actores tanto públicos y privados, se encuentran interesados en el mejoramiento de la calidad de vida y el cuidado del medio ambiente y la salud. Uno de los mayores inconvenientes es la falta de criterios tecnológicos que demuestren por medio del desarrollo de las llamadas tecnologías limpias, sistemas y estudios de investigación y

desarrollo que promuevan el aprovechamiento de los residuos de una manera eficiente y económicamente rentable. Pudiendo seguir el ejemplo de los países desarrollados que han dejado de ver los residuos como “Residuo” y para llamarlo “Producto o Subproducto”, haciéndole el tratamiento correspondiente para su posible aprovechamiento o valorización.

Por medio del presente trabajo de investigación experimental y de acuerdo al grupo estratégico de investigación de Ciencia, Innovación y Tecnología, este proyecto preliminar se desarrolla con el fin de investigar sobre los procedimientos efectivos para el aprovechamiento eficiente de los recursos naturales, así como la búsqueda de valor agregado y aprovechamiento de los residuos sólidos que permitan dar aportes significativos al desarrollo social y ambiental, mediante instrumentos y tecnología para la gestión ambiental.

Actualmente existen muchas formas de aprovechamiento de residuos sólidos orgánicos, comúnmente son empleados en pequeña escala para alimentación animal, producción de abono orgánico, reciclaje y coprocesamiento, que son retornados al proceso productivo industrial, empresarial e institucional. Los residuos sólidos representan un problema ambiental y social, los Rellenos Sanitarios y/o Vertederos reciben diariamente miles de toneladas de residuos de todo tipo, agotando aceleradamente su capacidad y vida útil, con graves inconvenientes a nivel ambiental y social. El presente proyecto investigativo contribuye a la investigación para aportar un tipo de solución de un problema ambiental actual, generando alto impacto ambiental positivo, disminuyendo la cantidad de residuos llevados a Rellenos Sanitarios y/o Vertederos, reducción de emisiones de CO₂ y de lixiviados.

La opción de investigar alternativas de Producción de Etanol a partir de Residuos Sólidos Orgánicos, es un tema interesante que está siendo abarcado por muchos estudios e investigaciones en la actualidad alrededor del mundo, con el fin de aprovechar eficientemente la Fracción Orgánica de los Residuos Sólidos para usarlos en nuevas tecnologías, en este caso en particular, en la producción de Bioetanol como Biocombustible del futuro y fuente de Energías Limpias renovables y auto sostenibles,

generación de energía eléctrica y térmica, amigables con el medio ambiente; así como la posibilidad de algunos subproductos como la producción de Abono Orgánico, mejorando su calidad, reduciendo en gran porcentaje el uso de fertilizantes químicos.

Para el presente estudio de investigación se ha identificado que los componentes de los Residuos Sólidos Orgánicos, pueden ser transformados a ETANOL, mediante un proceso llamado Hidrólisis de la celulosa, enzimática y ácida. Con el uso de tecnología especializada se puede llevar a cabo un proceso básico en el que la biomasa realiza un proceso de hidrólisis enzimática, seguido de la fermentación de los azúcares y ayudado con microorganismos que contribuyan a la sacarificación y fermentación se obtendrá el alcohol, el cual con su posterior destilación logrará obtenerse la pureza deseada.

6. INSTALACIÓN EXPERIMENTAL

La investigación experimental se llevó a cabo en los Laboratorios de la Universidad de Castilla - La Mancha (UCLM) de España, con el fin de evaluar el proceso experimental de la obtención de Etanol a partir de la Fracción Orgánica de los Residuos Sólidos Urbanos (FORSU).

Se implementó el diseño metodológico de acuerdo a las diferentes fases experimentales requeridas para la evaluación del proceso, con el fin Realizar el análisis al comportamiento de la FORSU mediante procedimientos Biológicos y comprobar las probabilidades de la obtención de Bioetanol y evaluar los resultados finales.

6.1. Bioreactor preparado para la fermentación

Llamamos **Bioreactor** a un recipiente o sistema que mantiene un ambiente biológicamente activo. Para este caso, en el Bioreactor comúnmente cilíndrico, se lleva a cabo un proceso biológico que involucra a los microorganismos propios contenidos en el sustrato inicial, la fracción orgánica de los residuos sólidos, activas derivadas de dichos organismos. Este proceso es anaeróbico.

En términos generales, mediante este sistema de Bioreactor se busca mantener ciertas condiciones ambientales propicias (pH, temperatura, concentración de oxígeno, etcétera) al organismo o materia biológica que se cultiva.

De igual forma, en función de los flujos de entrada y salida, la operación de un Bioreactor puede ser de tres modos distintos: Continuo, semicontinuo o discontinuo.

Para este caso se uso el método discontinuo, con el fin de analizar en un periodo determinado el proceso de evolución de la muestra específica previamente preparada.



Foto 1. Bioreactor para el Proceso de Transformación de la FORSU.

6.2. Fermentación Alcohólica

La fermentación alcohólica es una bioreacción que permite degradar azúcares en alcohol y dióxido de carbono.

Las principales responsables de esta transformación son las levaduras. La *Saccharomyces cerevisiae*, es la especie de levadura usada con más frecuencia. Existen estudios para producir alcohol con otros hongos y bacterias, como la *Zymomonas mobilis*, pero la explotación a nivel industrial es mínima. Para este caso se utilizó la *Saccharomyces cerevisiae* de uso industrial.

A pesar de parecer a nivel estequiométrico, una transformación simple, la secuencia de transformaciones para degradar la glucosa hasta dos moléculas de alcohol y dos moléculas de bióxido de carbono es un proceso muy complejo, pues al mismo tiempo la levadura utiliza la glucosa y nutrientes adicionales para reproducirse.

6.3. Control de la Temperatura

Para este caso la temperatura ha sido controlada mediante un sistema de baño de agua con temperatura regulada con una precisión de $\pm 0,1$ °C y que es impulsada a través de la camisa de calefacción del Bioreactor. La cual mantiene el sustrato a la temperatura deseada.

6.4. Control y Monitoreo de Datos

El sistema de la instalación experimental permite registrar los datos de tiempo, pH y adición de sosa e introducir algunos parámetros de control que sean necesarios. Esto se realiza mediante un programa computarizado conectado previamente al Bioreactor y al sistema de controlador del programa. Que permite registrar y obtener los datos de la concentración de los gases presentes en el Bioreactor en tiempo real.

De acuerdo a lo anterior, durante el proceso global se llevaron a cabo 4 Fases experimentales, desarrolladas mediante la instalación descrita a escala de laboratorio de un sistema biológico para cada proceso:

FASE 1. Hidrólisis / Solubilización de la FORSU

FASE 2. Fermentación de Glucosa sin Control de pH

FASE 3. Fermentación de Glucosa con Control de pH

FASE 4. Fermentación de la FORSU

Para cada una de las Fases, las cuales se detallaran en el siguiente capítulo, se realizaron muestreos continuos del líquido, así como el análisis periódico de los gases.

7. MATERIALES Y MÉTODOS

En este capítulo se describen los materiales y métodos utilizados para el desarrollo de cada una de las Fases llevadas a cabo en el Laboratorio, así como los procedimientos realizados para la toma de muestras y el análisis de los datos.

7.1. FASE 1. Hidrólisis / Solubilización de la FORSU

En esta Primera Fase se realizó la Preparación de la Muestra mediante la cual se desarrollan el resto de procedimientos experimentales. La preparación de la muestra se ha realizado con base en una simulación de la Composición de la Fracción Orgánica de los Residuos Sólidos Urbanos, Según “D.J. Martin – *Small Scale Simulation of Waste Degradation in Landfills*”.

Inicialmente se procedió con la compilación de todos los componentes necesarios y posteriormente se realizó la trituración de los residuos orgánicos. Se efectuó la composición mezclada de los diferentes tipos de componentes orgánicos con un contenido de carga según se especifica a continuación:

Tabla 8. Características de la composición de la FORSU.

Componente	Cantidad (gr)	Componente	Cantidad (gr)
Papa	62	Naranja	49
Zanahoria	28	Tomate	20
Guisantes	13	Carne	22
Manzana	49	Pasta Hervida	23
Banana	35	Arroz Hervido	23
Repollo	51	Pan	35
Cebolla	30	Papel	50
Coliflor	10	TOTAL	500 gr

Adicionalmente se diluyó agua a la composición mezclada de materia orgánica, con una adición de 1,5 lt de agua destilada.

Para realizar el respectivo análisis de los gases se realizó adición de Nitrógeno con el fin de evacuar el oxígeno y evaluar los gases generados producto de la fermentación.

La anterior mezcla de FORSU con Agua Destilada se llevó a cabo en un Bioreactor por un periodo de 14 días, con el objetivo de realizar la Extracción de la Materia Orgánica por medio de Hidrólisis y Solubilización de la misma; con agitación continua de la mezcla por medio de un sistema de agitador mecánico introducido dentro del Bioreactor.

Adicionalmente se implementó un sistema de recirculación del líquido con el fin de garantizar la homogeneidad de la masa orgánica, del proceso y de las muestras analizadas.



Foto 2. Bioreactor Fase 1. Hidrólisis y Solubilización de la FORSU

7.1.1. Técnicas Analíticas

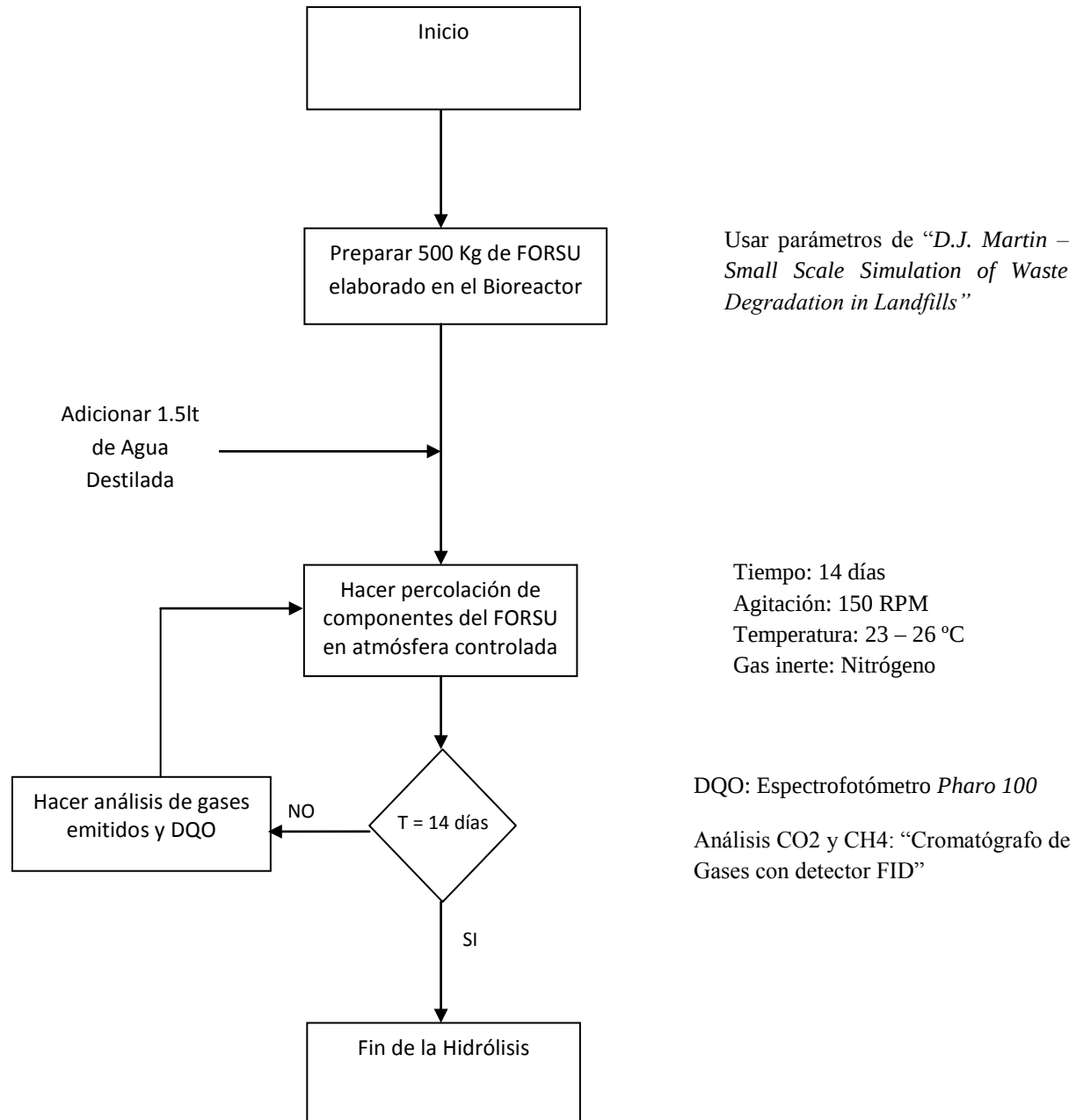
Durante esta fase se evaluó la presencia de DQO mediante muestras periódicas y la generación de gases presentados. No se realizó control de pH y Temperatura en esta Fase.

Para la medición de DQO se utilizó la técnica más convencional mediante un Espectrofotómetro *Pharo 100*, que mide la concentración de DQO presente en la muestra comparándolo con un Blanco.

Para la medición y análisis de la Composición de los Gases generados en esta Primera Fase, se utilizó el equipo “*Cromatógrafo de Gases con detector FID*”, el cual opera con las siguientes características:

- ✓ Temperatura inicial del horno de 140 °C, durante 1,5 minutos y posteriormente hasta 190 °C con una rampa de 25 °C / min.
- ✓ Temperatura inicial del inyector de 200 °C, y la del detector de 230 °C.
- ✓ Gas portador N₂ con un flujo de 10 ml /min.
- ✓ Mediante este método se analizaron los gases y se detectaron CO₂ y CH₄.

Figura 4. Esquema de Estandarización Desarrollo de Procedimientos Fase 1.



7.2. FASE 2. Fermentación de Glucosa sin Control de pH

En esta Fase se realizó la Instalación experimental para la Fermentación de la Glucosa, SIN control de pH, en una preparación del sustrato diluido en 5 lt de Agua Destilada, con una temperatura controlada de 23 °C.

La agitación del Bioreactor se realizó mediante un agitador magnético colocado debajo del reactor debido a su diseño exterior con fondo plano, según se puede apreciar en la Foto 1.

Tabla 9. Preparación del Sustrato

Componente	Cantidad
Glucosa	45 gr
Sales	340 ml
Levadura	4 gr

Tabla 10. Composición de las Sales

Componente	Concentración	Componente	Concentración
Glucosa (g/dm ³)	9.00	ZnSO ₄ 7H ₂ O (g/dm ³)	7.20·10 ⁻³
(NH ₄)Cl (g/dm ³)	3.02	FeSO ₄ 7H ₂ O (g/dm ³)	6.98·10 ⁻³
KH ₂ PO ₄ (g/dm ³)	1.76	MnCl ₂ 4H ₂ O (g/dm ³)	5.63·10 ⁻³
NaCl (g/dm ³)	0.66	CuCl ₂ 2H ₂ O (g/dm ³)	4.95·10 ⁻³
Na ₂ SO ₄ (g/dm ³)	0.13	CoCl ₂ 6H ₂ O (g/dm ³)	2.17·10 ⁻³
MgCl ₂ 6H ₂ O (g/dm ³)	0.27	CaCl ₂ (g/dm ³)	1.35·10 ⁻³
EDTA (g/dm ³)	0.11	NiCl ₂ 6H ₂ O (g/dm ³)	1.13·10 ⁻³

7.2.1. Técnicas analíticas

En esta Fase se realizó medición de SST y SSV, las medidas de estos parámetros convencionales se realizaron de acuerdo a los métodos normalizados de análisis (APHA, 1998). Mediante técnicas comúnmente utilizadas en el análisis de aguas. Para el caso de la determinación de los sólidos suspendidos totales (SST) y de los sólidos suspendidos volátiles (SSV), se usó el método que se rige por las Normas 2540 D y 2540 E, respectivamente.

Para la medición del sustrato (Glucosa), se utilizó el método del equipo “*Cromatógrafo de Fase Líquida HPLC*”, usando un Índice de Refracción (*RID*) como detector. Las características para el análisis mediante este sistema son las siguientes:

- ✓ Temperatura de 35 °C para la columna y la celda del detector.
- ✓ Fase móvil conformada en 84% de Acetonitrilo (ACN) y en 16 % de agua (v/v).
Con un flujo de 1,4 ml/min.
- ✓ Columna utilizada “*HP Column Zurbax Carbohydrate*” 4,6 x 150 mm.
5 Microm (Agilent).

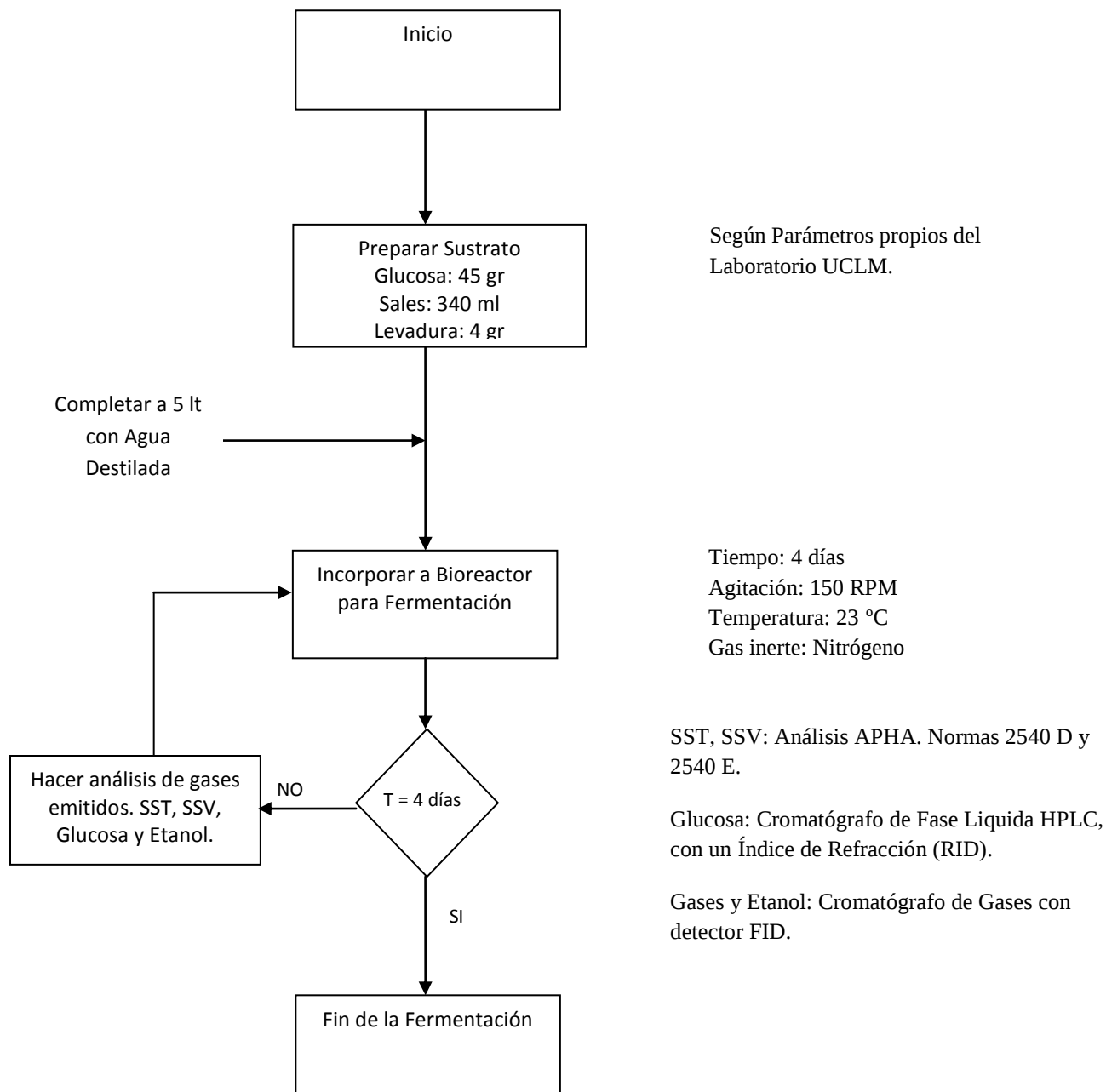
Aunque se tuvo instalado el método de medición de gases, en esta fase no se presentó producción de gases.

Método de medición de Etanol:

Para la medición de Etanol se hicieron diferentes pruebas de análisis el método más confiable y preciso, fue utilizado por medio del sistema de medición de los ácidos grasos volátiles, mediante un *Cromatógrafo de gases con detector FID*. Con las siguientes características de operación:

- ✓ Temperatura inicial del horno de 140 °C, por 1,5 minutos y luego de 190 °C con una rampa de 25 °C/ min.
- ✓ Temperatura inicial del inyector de 200 °C, y la del detector de 230 °C.
- ✓ Gas portador N₂ con un flujo de 10 ml /min.
- ✓ Columna de separación fue CROSSBOND CARBOWAX 15 m, 0,32 mmID, 0,25 µm df (Perkin Elmer). Para el buen funcionamiento de la columna se necesita que todos los iones a analizar estén en su forma ácida. Para que ello ocurra se hace una dilución de la muestra con ácido fosfórico al 34 % (1,4 ml de muestra y 0,2 de dicho ácido).
- ✓ Mediante este método se analizó el Etanol y acetona presentes en las muestras.

Figura 5. Esquema de Estandarización Desarrollo de Procedimientos Fase 2.



7.3. FASE 3. Fermentación de Glucosa con Control de pH

En esta Fase se realizó la Instalación experimental de la Glucosa, y en vista de los resultados obtenidos en la Fase anterior sin control de pH, se realizó nuevamente el mismo procedimiento experimental CON control de pH, en una preparación del sustrato diluido en 3 lt de Agua Destilada, con una temperatura controlada de 26 °C y se mantuvo el pH en 5 debido a las necesidades para la estabilidad de los microorganismos.

Tabla 11. Preparación del Sustrato

Componente	Cantidad
Glucosa	27 gr
Sales	200 ml
Levadura	2.4 gr

La composición de las Sales fue la misma utilizada en la anterior fase, ilustrada mediante la Tabla 5.

7.3.1. Técnicas analíticas

Para la medición de los Parámetros SST, SSV, Glucosa y Etanol, se utilizaron los mismos métodos descritos en la Fase anterior.

Mientras que para la medición de los gases generados en esta Fase, se utilizó un programa de analizador de gases sistematizado conectado al ordenador y al Bioreactor, con el cual es posible medir los gases generados en los reactores biológicos, el equipo “MLT-4 Multi-Component Gas Analyzer” (Emerson, Alemania), mide con precisión en un rango determinado, para lo cual es necesario introducir un caudal de nitrógeno en el reactor con el

fin de diluir los gases producidos hasta una concentración adecuada, arrastrarlos y disminuir la presión parcial de los mismos.

Dicho analizador no detecta el nitrógeno adicionado por lo que será necesario conocer el caudal aportado para obtener las cantidades de CO₂ e H₂ que realmente se generan en los reactores. Por otra parte, los gases producidos durante el proceso de fermentación deben ser evacuados a la salida del analizador de gases. Para lo cual se utilizó un sistema de trampa de agua mediante un recipiente de vidrio que permite burbujear el nitrógeno.

Los gases producidos durante la fermentación de la Glucosa, fueron medidos continuamente con el fin de conocer las cantidades producidas de dióxido de carbono CO₂ e hidrógeno H₂. Mediante un analizador de gases “NGA 2000 MLT $\frac{3}{4}$ ” que registra el caudal de los gases y los valores de concentraciones de hidrógeno y dióxido de carbono en continuo, en unidades de partes por millón (ppm).

El analizador de gases opera con las siguientes características:

- ✓ Cuenta con cuatro canales, donde se mide en cada uno un compuesto gaseoso: H₂, CO₂, CO y O₂.
- ✓ El rango de medida de los gases es de 2 a 20 % para ambos, hidrógeno y dióxido de carbono, y se adiciona el caudal de nitrógeno necesario introducido en el reactor para que el caudal de salida se mantenga en este rango.
- ✓ Cuenta con un medidor fotométrico y múltiples módulos de análisis, módulo de análisis infrarrojo (NDIR), ultravioleta (NDUV), espectroscopia visible (VIS), sensor de conductividad térmica (TC), y tecnologías de sensores electroquímicos y paramagnéticos (PMD) de oxígeno.
- ✓ El equipo mantiene una temperatura de trabajo de 50-65 °C con un límite de la misma de 120 °C.
- ✓ Al inicio de cada Fase Experimental de realiza el calibrado del equipo utilizando un patrón que contiene 18,37 % en volumen hidrógeno y 17,79 % en volumen

dióxido de carbono y 63,84 % en volumen de nitrógeno, de igual forma se usó un patrón de nitrógeno puro para el punto cero.

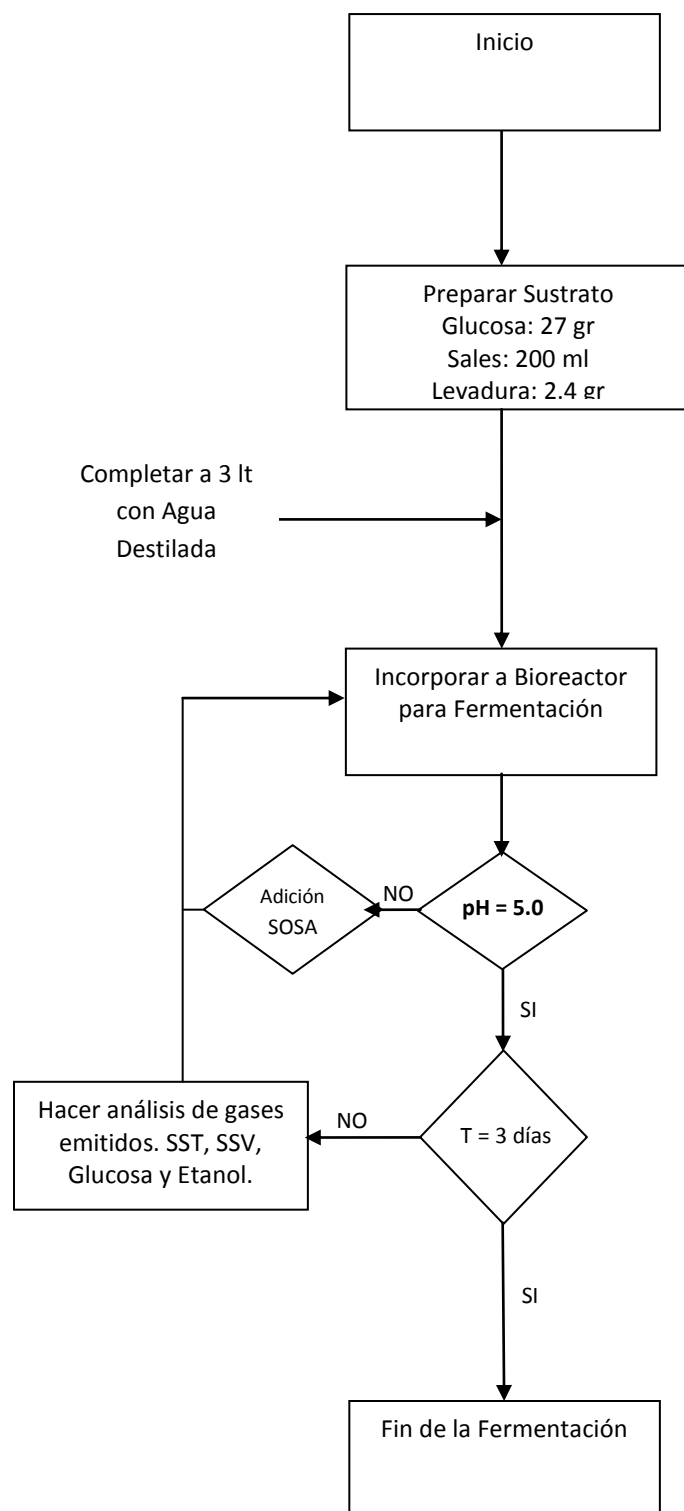
7.3.2. Controlador del caudal másico de N₂ gas a la entrada del Bioreactor

Mediante este controlador “Caudalímetro másico GFC 17” (Alboorg, EEUU), es posible conocer el caudal de entrada de nitrógeno al reactor. Lo cual es necesario con el fin de determinar el volumen real de gases que se genera en el reactor, ya que salen del mismo sistema junto con el nitrógeno introducido.

7.3.3. Control, monitoreo y almacenamiento de datos

El sistema conectado previamente a la instalación experimental cuenta con dos equipos ordenadores. Uno de ellos está conectado al controlador de ciclos y pH del Bioreactor, donde se encuentra instalado el programa Bioexpert, que permite registrar los datos de tiempo, pH y adición de sosa e introducir algunos parámetros de control. El otro equipo ordenador de la instalación se encuentra conectado al analizador de gases, este equipo muestra y almacena la concentración de los gases de la salida del Bioreactor: H₂, CO₂, CO y O₂.

Figura 6. Esquema de Estandarización Desarrollo de Procedimientos Fase 3.



Según Parámetros propios del Laboratorio UCLM.

Tiempo: 3 días
 Agitación: 150 RPM
 Temperatura: 26 °C
 Control de pH: 5.0
 Gas inerte: Nitrógeno
 Controlador del caudal de N2:
"Caudalímetro másico GFC 17"

SST, SSV: Análisis APHA. Normas 2540 D y 2540 E.

Glucosa: Cromatógrafo de Fase Liquida HPLC, con un Índice de Refracción (RID).

Etanol: Cromatógrafo de Gases con detector FID.

Análisis CO2 y CH4: *"MLT-4 Multi-Component Gas Analyzer"*

7.4. FASE 4. Fermentación de la FORSU

Para el desarrollo de esta Fase se realizó la Instalación experimental con la mezcla inicialmente preparada de la FORSU, utilizada y descrita anteriormente en la Fase 1. Se realizó con una preparación diluida en 3 lt de Agua Destilada, con control de pH (5.0) y una temperatura de 26 °C.

De acuerdo a la concentración de DQO presente en la muestra a utilizar se efectuó la relación correspondiente para la composición deseada, utilizando entonces la siguiente composición para esta Fase Experimental:

Tabla 12. Preparación del Sustrato

Componente	Cantidad
Mezcla FORSU	186.5 ml
Levadura	2.4 gr

7.4.1. Técnicas analíticas

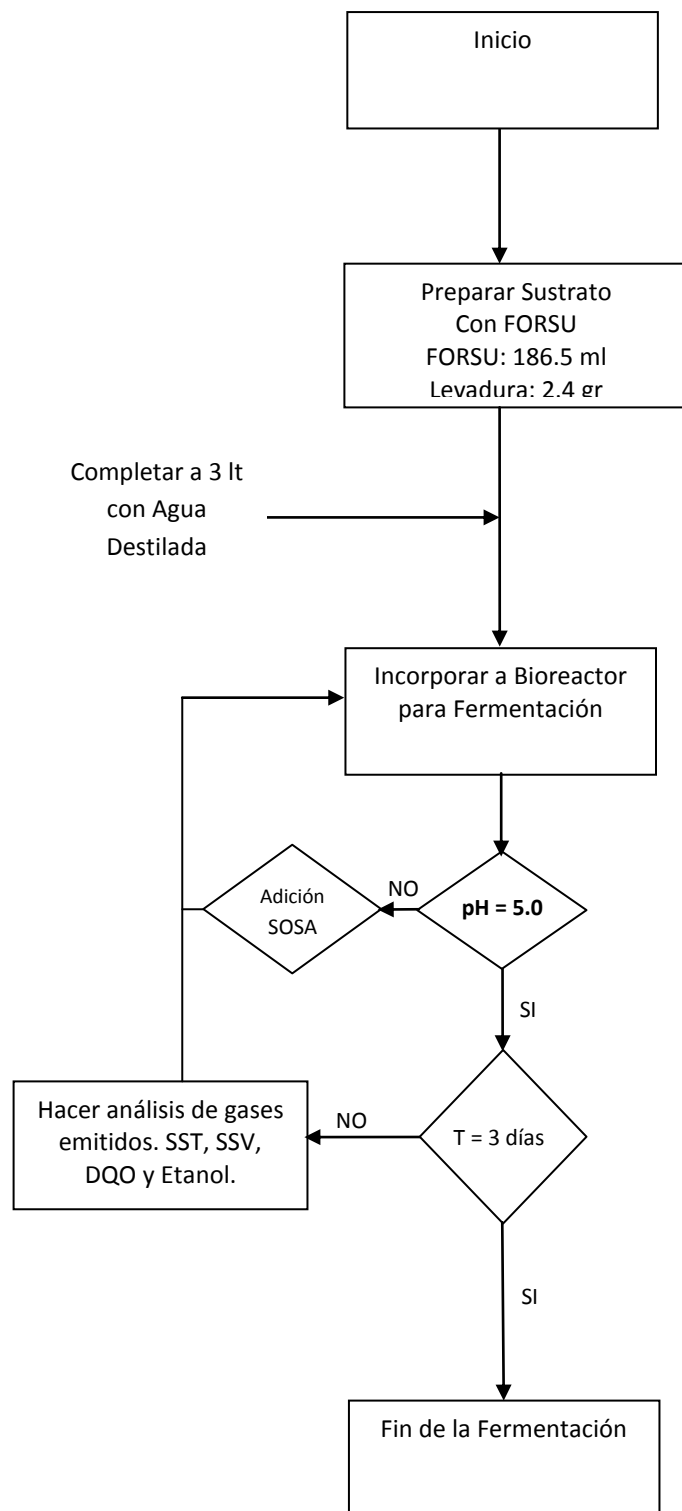
En esta última Fase llevada a cabo como último proceso de la instalación experimental en el laboratorio de la Universidad UCLM, como parte preliminar de esta investigación, se utilizaron las técnicas analíticas descritas en las anteriores fases.

En esta Fase se realizó medición de los Parámetros SST y SSV, con los métodos normalizados de análisis (APHA, 1998) descritos previamente.

Para la medición del Etanol, se utilizó el mismo método ya mencionado y descrito anteriormente “*Cromatógrafo de gases*” con detector *FID*.

Por la parte referente a la medición de los gases generados en esta Fase, se utilizó el mismo programa analizado utilizado en la Fase 3, llamado “*MLT-4 Multi-Component Gas Analyzer*” con el cual se registró la concentración de los gases H₂, CO₂, CO y O₂ presentes, utilizando el sistema de Controlador del caudal másico de N₂ y el seguimiento mediante el Control, monitoreo y almacenamiento de los datos.

Figura 7. Esquema de Estandarización Desarrollo de Procedimientos Fase 4.



Usar parámetros de “D.J. Martin – *Small Scale Simulation of Waste Degradation in Landfills*”

Cantidad FORSU: Calculada con base en el último reporte de DQO.

Tiempo: 3 días
 Agitación: 150 RPM
 Temperatura: 26 °C
 Control de pH: 5.0
 Gas inerte: Nitrógeno
 Controlador del caudal de N2:
 “Caudalímetro másico GFC 17”

DQO: Espectrofotómetro *Pharo 100*

SST, SSV: Análisis APHA. Normas 2540 D y 2540 E.

Etanol: Cromatógrafo de Gases con detector FID.

Análisis CO2 y CH4: “*MLT-4 Multi-Component Gas Analyzer*”

8. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

A continuación se presentan los resultados obtenidos en cada una de las Fases Experimentales y sus respectivos Análisis.

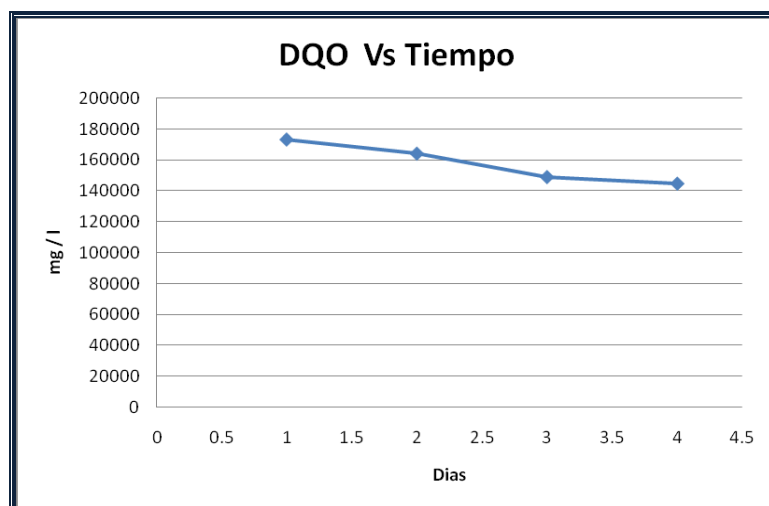
8.1. FASE 1. Hidrólisis / Solubilización de la FORSU

Para los resultados obtenidos de DQO a partir de cada toma de muestra, fue diluida 20 veces en agua destilada, es decir, por cada muestra 0.10 mg y 1.90 mg de Agua.

Tabla 13. Medición de DQO

Muestra	Toma Muestra	DQO (mg/l)	Etanol (ppm)	Acetona (ppm)
RSU 1	Día 0	173000	16.736	0
RSU 2	Día 3	164000	139.307	0
RSU 3	Día 5	149000	214.202	0
RSU 4	Día 14	144800	286.626	0

Figura 8. Variación DQO vs Tiempo

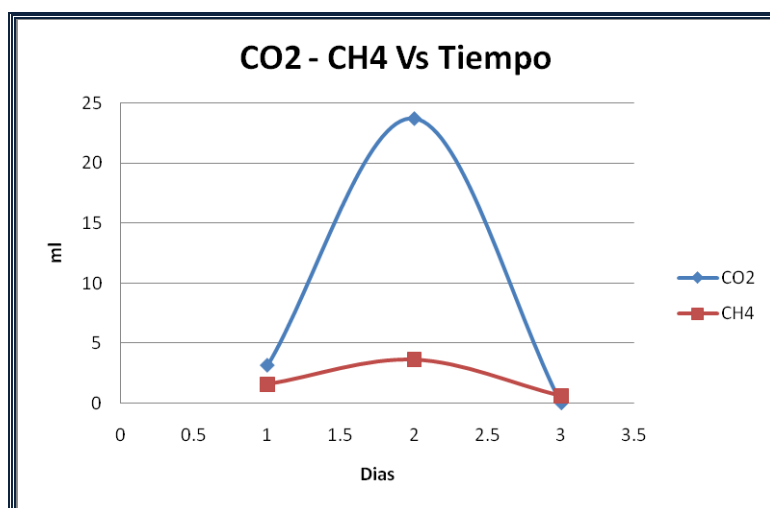


Mediante Cromatografía de gases se tomaron los datos para las mediciones de los compuestos evaluados presentes en los gases de las muestras. Después de analizar los datos arrojados por el sistema y de realizar las respectivas restas de calibrados se presentaron los siguientes resultados, detectando únicamente concentración de CO₂ y CH₄.

Tabla 14. Medición de Gases

Bolsa	Toma muestra	Resultados			
		% CO ₂	CO ₂ (ml)	% CH ₄	CH ₄ (ml)
B1	Día 0	4.3683	3.1452	2.2117	1.5924
B2	Día 1	16.0236	23.7149	2.4576	3.6373
B3	Día 14		0	0.5115	0.6035

Figura 9. Producción de Gases vs Tiempo



Para la realización de esta Fase se empleó una FORSU sintetizada previamente en el laboratorio, fue triturada y mezclada con agua en una relación 1/1.5.

Según los resultados obtenidos de la DQO, como lo muestra la Tabla 8, son valores muy altos, ya que se encuentran por encima del promedio de lo que sería un Relleno Sanitario Joven (< 2 años), en el cual la DQO oscila entre 3000 y 60000 (mg/l).

Sin embargo, la Solubilización de los Compuestos orgánicos en el agua fue muy rápida, como lo muestra la Grafica de la DQO.

Como se puede apreciar se destaca el descenso de la DQO en el tiempo, lo que podría ser debido a transformaciones anaerobias ocurridas durante este proceso.

Lo anterior se verifica con la Producción de Metano (CH₄) y de CO₂ del sistema, como se aprecia en la figura.

8.2. FASE 2. Fermentación de Glucosa sin Control de pH

Las medidas de los parámetros convencionales se realizaron de acuerdo a los métodos normalizados de análisis (APHA, 1998). Mediante técnicas comúnmente utilizadas en el análisis de aguas. Para el caso de la determinación de los sólidos suspendidos totales (SST) y de los sólidos suspendidos volátiles se uso el método que se rige por las Normas 2540 D y 2540 E, respectivamente.

A continuación se presenta la tabla con la compilación de los resultados obtenidos en esta Fase, para los datos medidos según las descripciones realizadas en la instalación experimental y los materiales y métodos de los capítulos anteriores.

Tabla 15. Análisis de Resultados Fase 2

Muestra	SST (gr/lt)	SSV (gr/lt)	Glucosa (gr/lt)	Glucosa (ppm)	Acetona (ppm)	Etanol (ppm)
G1.01	0.6473	0.6250	8.965	8965.492	0	0
G1.02	0.8556	0.8556	6.520	6520.240	0	2303.168
G1.03	0.2103	0.3005	4.112	4112.303	0	5221.027
G1.04	1.1649	1.1708	1.622	1621.630	0	3341.716
G1.05	1.0794	1.0414	0.151	150.501	0	4706.179
G1.06	1.1301	1.1203	0	0	0	5153.683
G1.07	0.1089	0.1754	0	0	0	3864.414
G1.08	0.2249	0.2556	0	0	0	5383.566

Para una mayor ilustración de los resultados obtenidos se presentan a continuación de manera grafica los más relevantes.

Figura 10. Comportamiento del Etanol producido y la Glucosa vs Tiempo

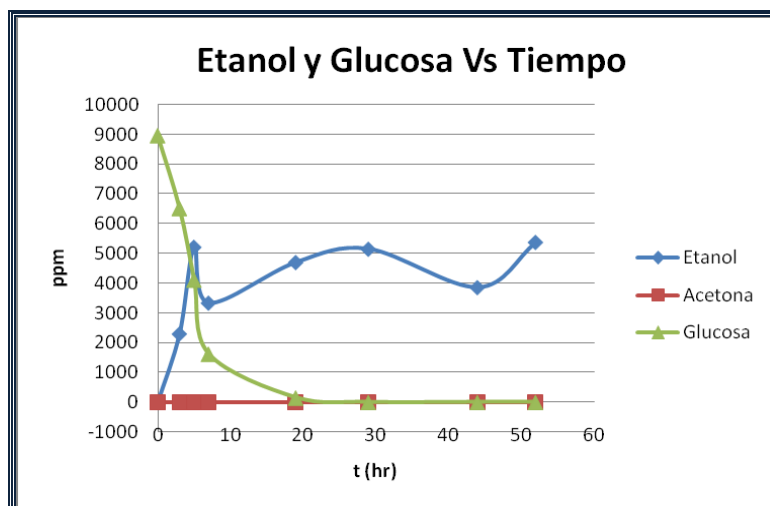
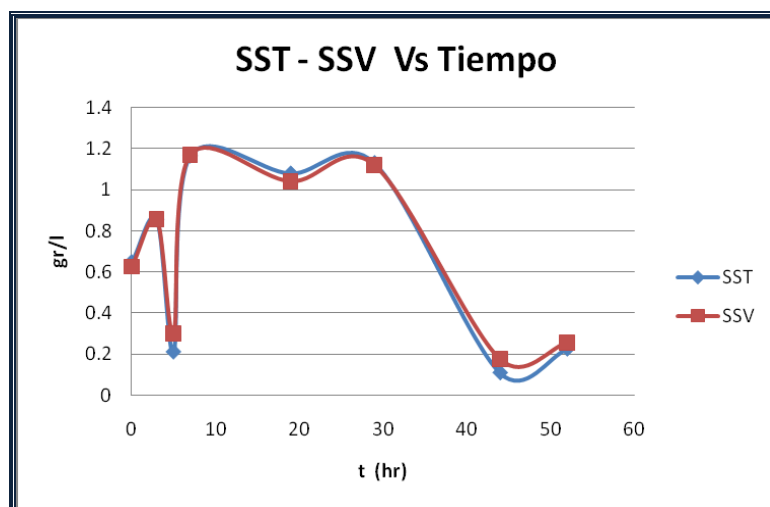


Figura 11. Comportamiento de los SST y SSV vs Tiempo



En esta Fase realizados los experimentos sin control de pH se observó producción de Etanol.

Esto puede ser debido a la acidificación que sufrió el medio, ya que alcanzó un valor de pH 2.5.

Este descenso de pH provocó al mismo tiempo un descenso de la concentración de la Biomasa, como se puede ver en la gráfica con respecto al tiempo. La concentración de Biomasa aumentó hasta un valor máximo a partir del cual disminuyó considerablemente su concentración.

8.3. FASE 3. Fermentación de Glucosa con Control de pH

A continuación se presenta la tabla con los resultados obtenidos de SST, SSV, Glucosa, Etanol y los gases producidos en esta Fase los cuales fueron CO₂ y H₂, medidos previamente en el laboratorio según las descripciones de la instalación experimental, los materiales y métodos presentados en los capítulos anteriores.

Tabla 16. Análisis de Resultados Fase 3

Muestra	SST (gr/lit)	SSV (gr/lit)	Glucosa (g/l) (gr/lit)	Glucosa (ppm)	V CO ₂ ml	V H ₂ ml	Etanol (ppm)	Acetona (ppm)
G2.01	0.4707	0.4856	9.5216	9521.6114	0.0000	0.0000	0	0
G2.02	0.9389	0.9256	4.3892	4389.2290	297.7908	13.5323	2303.168	0
G2.03	1.1180	1.0961	0.1221	122.0675	2513.6371	23.0951	5221.027	0
G2.04	1.1227	1.1318	0.0000	0.0000	4516.8570	127.8565	3341.7164	0
G2.05	1.1101	1.0958	0.0000	0.0000	4590.9893	163.1361	4706.1793	0
G2.06	1.0323	1.0501	0.0000	0.0000	4615.7305	183.2693	5153.6832	0

Figura 12. Comportamiento del Etanol producido y la Glucosa vs Tiempo

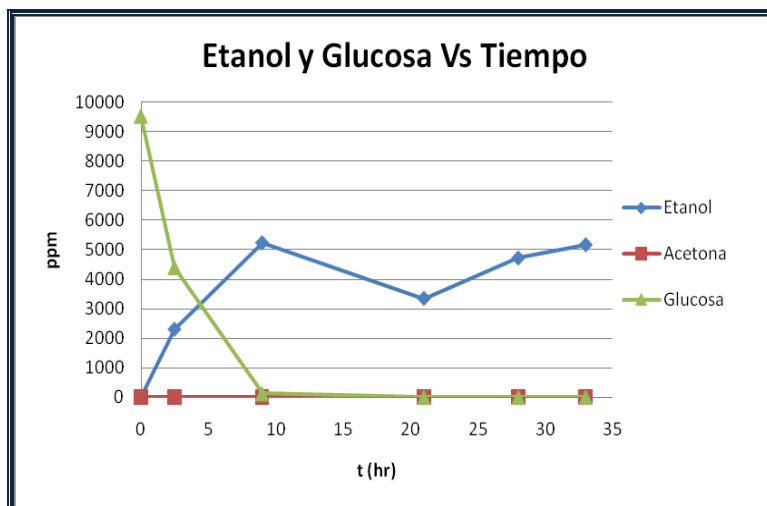
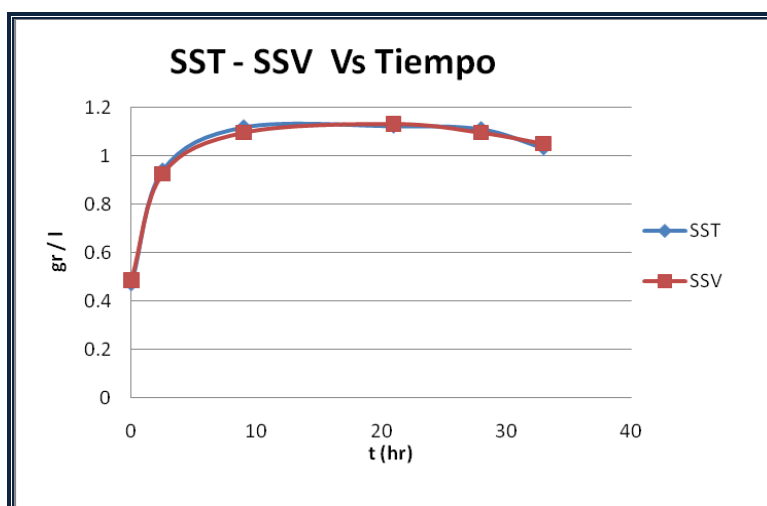


Figura 13. Comportamiento de los SST y SSV vs Tiempo

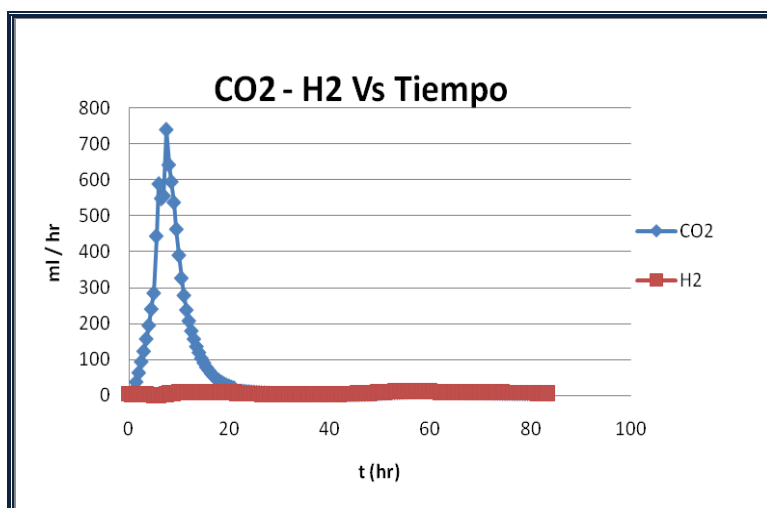


Los gases producidos durante la Fermentación de la Glucosa, fueron medidos continuamente mediante el analizador de gases, contactado al sistema del Bioreactor, donde se almacenaron y se analizaron posteriormente la concentración de los gases generados en la salida del Bioreactor. La concentración medida de acuerdo al caudal de Nitrógeno presente en cada toma de muestra se presenta a continuación.

Tabla 17. Análisis de Gases generados en la Fase 3

Muestra	Caudal Nitrogeno (ml/min)	% CO ₂	% CO	% H ₂	% O ₂
G2.01	30	0	0	0	0
G2.02	30	14.061		-1.282	0.377
G2.03	70	11.493	1.457	-1.172	0.161
G2.04	70	1.47	1.458	-1.106	0.172
G2.05	40	1.234	1.454	-1.157	0.308
G2.06	40	1.145	1.453	-1.176	0.333

Figura 14. Comportamiento de los Gases producidos vs Tiempo



Cuando se realizó el experimento Con Control de pH, el valor de este parámetro se mantuvo 5.0.

Esto favoreció al crecimiento de los organismos productores de Etanol y por lo tanto aumento la producción de este producto.

El rendimiento de Etanol alcanzado fue de 0.5 gr Etanol / gr de Glucosa.

Como Gases principales generados se presentaron en esta Fase CO₂ e Hidrogeno (H₂).

8.4. FASE 4. Fermentación de la FORSU

Debido a que en esta fase se experimento con la FORSU, previamente preparada, se realizó el análisis de la medición de la DQO a partir de cada toma de muestra, de manera directa la cual no fue necesario utilizar dilución con agua destilada, a continuación se presentan los resultados arrojados de la presencia de DQO.

Tabla 18. Resultados DQO

Muestra	Toma Muestra	DQO (mg/lit)
R1.01	Día 1	5480
R1.02	Día 1	3970
R1.03	Día 1	5820
R1.04	Día 1	3760
R1.05	Día 2	5470
R1.06	Día 3	7700

De igual forma se analizaron los resultados obtenidos de SST, SSV, Glucosa, Etanol y los gases producidos en esta Fase los cuales fueron CO₂ y H₂, medidos previamente en el laboratorio según las mismas características de la instalación experimental, materiales y métodos descritos previamente.

Tabla 19. Análisis de Resultados Fase 4

Muestra	SST (gr/lit)	SSV (gr/lit)	V CO ₂ ml	V H ₂ ml	Etanol (ppm)	Acetona (ppm)
R1.01	0.5440	0.5840	0.0000	0.0000	37.8095	0
R1.02	0.5545	0.5729	3.9082	6.2094	84.1024	0
R1.03	0.5108	0.5372	21.2417	25.7820	36.5408	0
R1.04	0.4963	0.5358	28.7766	45.3135	45.7366	0
R1.05	0.4875	0.5157	72.3913	111.8880	65.6242	0

Por otro lado, se tuvieron en cuenta los gases producidos durante la Fermentación de la FORSU, los cuales fueron medidos continuamente mediante el analizador de gases contactado al Bioreactor. La concentración medida detectada de cada uno de los gases presentes y su respectivo caudal Nitrógeno en el momento de la muestra es la que se relaciona a continuación.

Tabla 20. Análisis de Gases generados en la Fase 4

Muestra	Caudal Nitrogeno (ml/min)	% CO ₂	% CO	% H ₂	% O ₂
R1.01	60	0	0	0	0
R1.02	60	1.118		-1.148	0.206
R1.03	30	1.094	1.452	-1.199	0.429
R1.04	30	1.084	1.452	-1.173	0.44
R1.05	30	1.181	1.452	-1.068	0.349
R1.06	30	1.271	1.452	-0.932	0.415

A continuación se presentan el análisis de los anteriores datos de forma grafica para evaluar el comportamiento de los resultados presentes en esta última fase de la Fermentación de la FORSU.

Figura 15. Comportamiento de los SST y SSV vs Tiempo

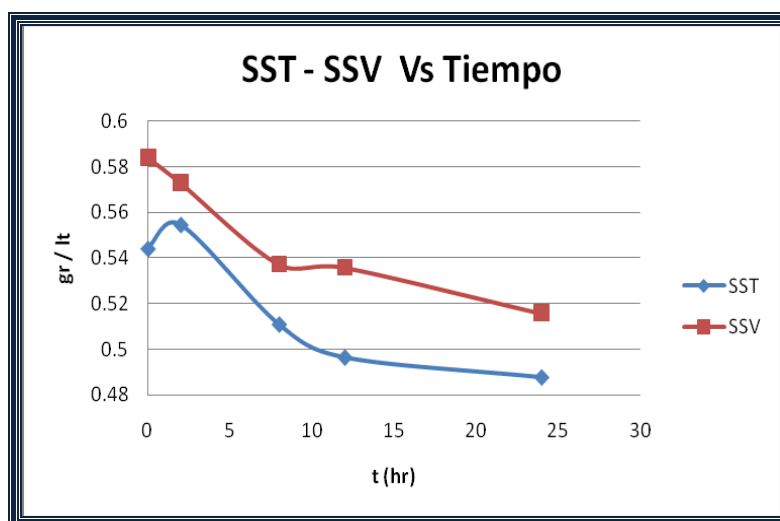


Figura 16. Comportamiento de la producción de Etanol vs Tiempo

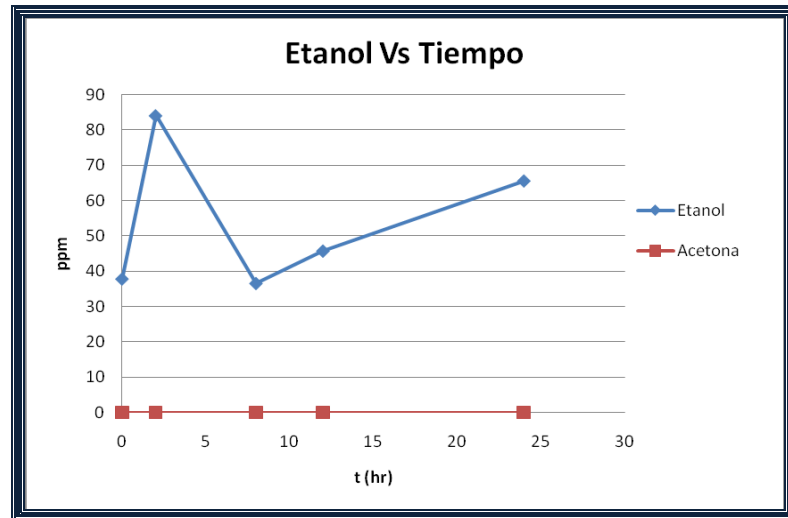
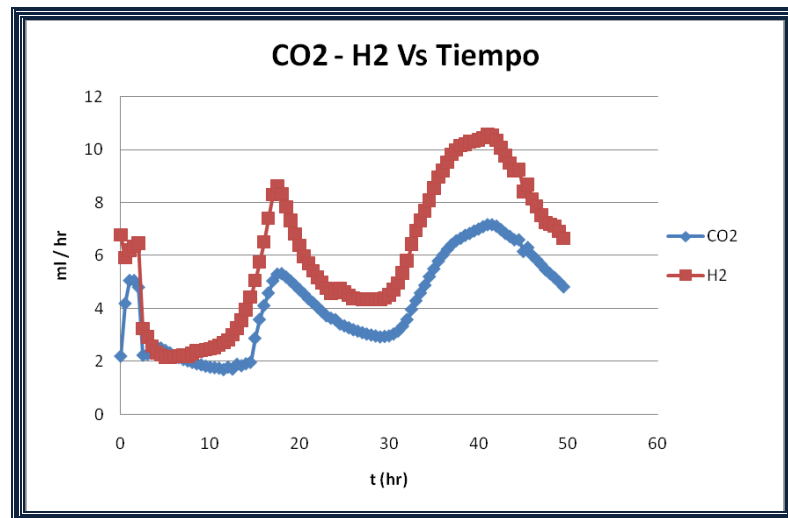


Figura 17. Comportamiento de los Gases producidos vs Tiempo



El comportamiento de la Producción de Etanol a través del tiempo, en esta Fase puede deberse a dos factores:

El Primero, es que posiblemente existió una reacción metabólica colateral desarrollada entre las 0 y las 7 horas que permitió que se generara como metabolismo intermedio el Etanol (o moléculas que podrían dar positivo a los análisis de etanol realizados), el cual fue degradado posteriormente y usado como material para producir el etanol de forma continua y persistente a partir de la hora 7.

Ó Segundo, hubo un problema de medición en el experimento, por lo que lo recomendable es que se elimine el resultado No. 2 de la concentración de Etanol en la gráfica.

Analizando la Evolución de los Gases se puede observar que aparecen picos altos y seguidamente valles en la generación de los gases detectados, lo que podría ser debido a la necesidad de etapas previas de transformación para la fermentación a Etanol.

Estos resultados indican que sería necesario aplicar y realizar tratamientos previos como por ejemplo digestión acidica u otros métodos que permitan modificar la composición del efluente y facilitar su posterior transformación a Etanol.

9. CONCLUSIONES

El Aprovechamiento de los Residuos Sólidos Orgánicos, genera un alto impacto ambiental positivo, en consecuencia de la contribución del manejo de estos residuos con el fin de generar productos para el Biodesarrollo del país.

Los residuos sólidos orgánicos son muy abundantes, ya que según lo analizado representa la fracción de mayor porcentaje de RSU, y tan solo una mínima parte de ellos es empleada y valorizada mediante actividades como alimentación animal y producción de Compost (Biofertilizantes), como retorno al mejoramiento del suelo agrícola para las posteriores cosechas.

El Bioetanol comercializado en España reduce emisiones a la atmosfera en un 68 %. Actualmente el Mercado de Bioetanol está siendo producido por la caña de azúcar como materia principal que ha sobrepasado al maíz desde el año 2009.

De cada una de las fases estudiadas en el Laboratorio de la UCLM, producto de esta primera etapa investigativa, se tomaron muestras líquidas y de gases de forma periódica, con el fin de estudiar la evolución de cada uno de los procesos internos en el experimento y las características de los componentes presentes y generados en el desarrollo del sistema. En conclusión, se llevó a cabo un proceso en el cual fue posible obtener por vía fermentativa Etanol, y por lo tanto es necesario realizar más pruebas para estandarizar un protocolo, y verificar tanto las cinéticas como el rendimiento de la reacción.

Sin embargo la Fracción Orgánica de los Residuos Sólidos Urbanos FORSU, está constituida por moléculas muy complejas que hacen necesario la inversión en tiempo y dinero para el análisis que permitan transformaciones previas para una fermentación acida,

como hidrólisis ácida, oxidaciones parciales, entre otros que permitan estabilizar el componente principal y obtener mejores resultados y rendimientos.

Es importante realizar un análisis posterior, que representen otros estudios más detallados, que continúen el proceso investigativo iniciado en esta primera etapa para comparar tanto técnicamente como a nivel de costos los procesos de Biometanización y la producción de Bioetanol a partir de la FORSU.

Hace falta mayor innovación en la Producción de Bioetanol en España, ya que según las cifras estudiadas, la demanda del biocombustible es alta y ha bajado la producción propia, dándole cabida a otros países como principales productores de Etanol, encareciendo los costos de producción a partir de las materias primas actuales y compitiendo fuertemente con los precios del Etanol en el mercado.

10.BIBLIOGRAFÍA

H.J. Vázquez y O. Dacosta. Departamento de Sistemas, Universidad Autónoma Metropolitana, Unidad Azcapotzalco, México. Oficina de Consejo, Desarrollo y Transferencia Tecnológica, Dijon, Francia. Alcoholic fermentation: An option for renewable energy production from agricultural residues. Diciembre 2007.

D.J. Martin, L.G.A. Potts and A. Reeves. Small-scale simulation of waste degradation in landfills. Chapman & Hall 1997.

E.-J. Jeon, S.-J. Bae, D.-H. Lee, D.-C. Seo, S.-K. Chun, N. H. Lee And J. Y. Kim. Methane Generation Potential And Biodegradability Of MSW Components. Korea 2007.

Betancourt C., Ruth, Martínez S. José A. Analysis of use of leachate from a landfill in an intermediate city in Colombia. Memorias del XXVII Congreso Centroamericano de Ingeniería Sanitaria y Ambiental. AIDIS El Salvador. Marzo de 2012.

Plan Nacional Integrado de Residuos para el Periodo 2008 – 2015. Resolución de 20 de enero de 2009, de la Secretaría de Estado de Cambio Climático de España, por la que se publica el Acuerdo del Consejo de Ministros por el que se aprueba el documento.

Ministerio Federal de Cooperación Económica y Desarrollo. Recomendaciones de especificaciones técnicas para el Etanol y sus mezclas (E6) y la infraestructura para su manejo en México. Marzo 2010.

Cinzia Buratti, Francesco Fantozzi. Anaerobic digestion of mechanically treated of MSW: Experimental data on biogas/methane production and residues characterization. University of Perugia, Biomass Research Centre (CRB). Italy, June 2011.

Havva Balata, Cahide O' z. Progress in Bioethanol processing. Turkey, January 2008.

Universidad de Castilla - La Mancha UCLM. Memorias y Ponencias, Máster en Ingeniería y Gestión Medio Ambiental. Ciudad Real, España. 2012.

Federación Nacional de Biocombustibles. Pagina Web.

Red de Centros de Información de Residuos de la Comunidad de Madrid. 2011.

Artículos páginas web: www.sciencedirect.com, www.elseiver.com,
www.scopus.com, www.scielo.org, www.sciverse.com.

LICENCIA DE USO – AUTORIZACIÓN DE LOS AUTORES

Actuando en nombre propio identificado (s) de la siguiente forma:

Nombre Completo NANCY JOHANA MONTAÑA GÓMEZ

Tipo de documento de identidad: C.C. ☒ T.I. ☐ C.E. ☐ Número: 24341699

Nombre Completo _____

Tipo de documento de identidad: C.C. ☐ T.I. ☐ C.E. ☐ Número: _____

Nombre Completo _____

Tipo de documento de identidad: C.C. ☐ T.I. ☐ C.E. ☐ Número: _____

Nombre Completo _____

Tipo de documento de identidad: C.C. ☐ T.I. ☐ C.E. ☐ Número: _____

El (Los) suscrito(s) en calidad de autor (es) del trabajo de tesis, monografía o trabajo de grado, documento de investigación, denominado:

"ANÁLISIS DE LA VIABILIDAD DE OBTENCIÓN DE BIOETANOL A PARTIR DE LA FRACCIÓN ORGÁNICA DE LOS RESIDUOS SÓLIDOS URBANOS (FORSU)"

Dejo (dejamos) constancia que la obra contiene información confidencial, secreta o similar: SI ☐ NO ☒
(Si marqué (marcamos) SI, en un documento adjunto explicaremos tal condición, para que la Universidad EAN mantenga restricción de acceso sobre la obra).

Por medio del presente escrito autorizo (autorizamos) a la Universidad EAN, a los usuarios de la Biblioteca de la Universidad EAN y a los usuarios de bases de datos y sitios webs con los cuales la Institución tenga convenio, a ejercer las siguientes atribuciones sobre la obra anteriormente mencionada:

- A. Conservación de los ejemplares en la Biblioteca de la Universidad EAN.
- B. Comunicación pública de la obra por cualquier medio, incluyendo Internet
- C. Reproducción bajo cualquier formato que se conozca actualmente o que se conozca en el futuro
- D. Que los ejemplares sean consultados en medio electrónico
- E. Inclusión en bases de datos o redes o sitios web con los cuales la Universidad EAN tenga convenio con las mismas facultades y limitaciones que se expresan en este documento
- F. Distribución y consulta de la obra a las entidades con las cuales la Universidad EAN tenga convenio

Con el debido respeto de los derechos patrimoniales y morales de la obra, la presente licencia se otorga a título gratuito, de conformidad con la normatividad vigente en la materia y teniendo en cuenta que la Universidad EAN busca difundir y promover la formación académica, la enseñanza y el espíritu investigativo y emprendedor.

Manifiesto (manifestamos) que la obra objeto de la presente autorización es original, el (los) suscritos es (son) el (los) autor (es) exclusivo (s), fue producto de mi (nuestro) ingenio y esfuerzo personal y la realizó (zamos) sin violar o usurpar derechos de autor de terceros, por lo tanto la obra es de exclusiva autoría y tengo (tenemos) la titularidad sobre la misma. En vista de lo expuesto, asumo (asumimos) la total responsabilidad sobre la elaboración, presentación y contenidos de la obra, eximiendo de cualquier responsabilidad a la Universidad EAN por estos aspectos.

En constancia suscribimos el presente documento en la ciudad de Bogotá D.C.,

NOMBRE COMPLETO: <u>NANCY JOHANA MONTAÑA GÓMEZ</u>	NOMBRE COMPLETO: _____
FIRMA: <u>Nancy J. Montaña</u>	FIRMA: _____
DOCUMENTO DE IDENTIDAD: <u>24'341.699</u>	DOCUMENTO DE IDENTIDAD: _____
FACULTAD: <u>POSTGRADOS</u>	FACULTAD: _____
PROGRAMA ACADÉMICO: <u>ESP. GESTIÓN DE RESIDUOS SÓLIDOS</u>	PROGRAMA ACADÉMICO: _____

NOMBRE COMPLETO: _____	NOMBRE COMPLETO: _____
FIRMA: _____	FIRMA: _____
DOCUMENTO DE IDENTIDAD: _____	DOCUMENTO DE IDENTIDAD: _____
FACULTAD: _____	FACULTAD: _____
PROGRAMA ACADÉMICO: _____	PROGRAMA ACADÉMICO: _____

Fecha de firma: 27 JUNIO DE 2012 .