

**EVALUACION DEL POTENCIAL ENERGETICO DE LOS RESIDUOS SÓLIDOS
ORGANICOS URBANOS PROVENIENTES DE LAS PLAZAS DE MERCADO Y
DISEÑO CONCEPTUAL DE UNA PLANTA DE DIGESTION ANAEROBIA PARA
SU APROVECHAMIENTO INDUSTRIAL EN COLOMBIA**



**OTONIEL SABALZA RAMOS
OSCAR ALONSO VILLAMIZAR NAVAS**



**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD FISICOQUIMICAS
BUCARAMANGA
2009**

**EVALUACION DEL POTENCIAL ENERGETICO DE LOS RESIDUOS SÓLIDOS
ORGANICOS URBANOS PROVENIENTES DE LAS PLAZAS DE MERCADO Y
DISEÑO CONCEPTUAL DE UNA PLANTA DE DIGESTION ANAEROBIA PARA
SU APROVECHAMIENTO INDUSTRIAL EN COLOMBIA**

**OTONIEL SABALZA RAMOS
OSCAR ALONSO VILLAMIZAR NAVAS**

**Proyecto de grado para optar el titulo de
Ingeniero Químico**

**Director
Ph. D. Humberto Escalante Hernández**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD FISICOQUIMICAS
BUCARAMANGA
2009**

AGRADECIMIENTOS

Los autores de este trabajo se permiten a gradecer a:

Dr. Humberto Escalante Hernández por su gran apoyo en este trabajo.

Ing. Qco., Wilmar Uribe Soto, Ing. Qca., Yaneth Orduz, por su apoyo y colaboración.

Centro de Estudios e Investigaciones Ambientales, CEIAM – UIS, y su personal por su apoyo institucional.

Todas las personas que de alguna forma estuvieron vinculadas con este proyecto.

*A mis padres Otoniel Sabalza y gloria ramos que con amor y sacrificio han
hecho de mi un profesional.*

*A mi hermano Javier por estar conmigo y darme su apoyo incondicional.
a Eliane Lizeth por estar a mi lado en los momentos difíciles de esta
etapa.*

*A mis padres Oscar Villamizar y Sra Belen Navas, quienes con amor,
trabajo y dedicación me han
dado las posibilidades de alcanzar tan grande logro.*

*a mis hermanos David y Anas con quienes he compartido grandes cosas,
y brindaron siempre su apoyo incondicional, los quiero mucho....*

gracias

CONTENIDO

	Pág.
INTRODUCCIÓN	17
1. POTENCIAL ENERGÉTICO DE LOS RSOU	19
1.1 MODELO MATEMÁTICO PARA CALCULAR EL PE DE RSOU	21
2. DIGESTIÓN ANAEROBIA	25
3. METODOLOGÍA	26
3.1 CARACTERIZACIÓN FÍSICOQUÍMICA DE LOS RSOU	28
3.2 DISEÑO CONCEPTUAL DE LA PLANTA DE DIGESTIÓN ANAEROBIA	29
4. RESULTADOS	33
4.1 ESTIMACIÓN DE PE DE LOS RSOU	39
4.2 DISEÑO BÁSICO DE INGENIERÍA PARA PROCESO DE BIODIGESTIÓN ANAEROBIA DE RSOU EN COLOMBIA.	42
4.2.1 Parámetros calculados, mediante la simulación del proceso de digestión anaerobia de los RSOU en HYSYS 3.2.	45
4.3 COSTOS DE INVERSIÓN TOTAL	48
4.3.1 Cálculo de la Inversión fija de la planta..	49
5. CONCLUSIONES	51
6. RECOMENDACIONES	52
BIBLIOGRAFÍA	53
ANEXOS	60

LISTA DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1. Población de las principales ciudades colombianas.	26
Tabla 2. Entidades que suministraron información de la cantidad de RSOU.	27
Tabla 3. Marco de muestreo para el sector RSOU en Colombia.	27
Tabla 4. Caracterización promedio de los RSOU.	34
Tabla 5. Parámetros adimensionales para cálculo de pe de los RSOU en Colombia.	40
Tabla 6. Equivalencias del potencial energético frente a otras fuentes de energía.	41
Tabla 7. Condiciones de operación de Hysys para la planta de digestión anaerobia.	46
Tabla 8. Resultados obtenidos en las corrientes de salida del digestor y la turbina de vapor.	47
Tabla 9. Costo de los equipos respecto al valor base[45].	49
Tabla 10. Porcentajes típicos para calcular la inversión total de la planta.	49

LISTA DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1. Diagrama de flujo del proceso de digestión anaerobia de sólidos en baja concentración para la fracción orgánica de los RSU [19].	31
Figura 2. Participación porcentual de las ciudades en el PE total Nal.	42
Figura 3. Simulación de Proceso de Biodigestión Anaeróbica de Sólidos de Baja Densidad. HYSYS 3.2.	45

LISTA DE GRAFICOS

	Pág.
Grafico 1. Generación promedio mensual de RCA y RPM para las cinco principales ciudades de Colombia	33
Grafico 2. Potencial energético de los RCA y RPM de las cinco ciudades colombianas.	40

LISTA DE ANEXOS

	Pág.
ANEXO A. PROTOCOLO DE MUESTREO	60
ANEXO B. CANTIDAD PROMEDIO DE RESIDUOS GENERADOS POR LOS CA Y LAS PM SUMINISTRADOS POR LAS CORRESPONDIENTES ENTIDADES DE ASEO EN CADA CIUDAD	64
ANEXO C. CONSIDERACIONES DE DISEÑO PARA LA DIGESTIÓN ANAEROBIA DE SÓLIDOS EN BAJA CONCENTRACIÓN PARA RSOU	66
ANEXO D. COMPARACIÓN DEL ANÁLISIS FISICOQUÍMICO DE LOS RSOU Y CARBÓN DEL CERREJON.	67
ANEXO E. COMPARACIÓN DEL ANÁLISIS FISICOQUÍMICO DE LOS BR DE PLAZAS CON DATOS TEÓRICOS	68
ANEXO F. NÚMERO DE MUESTRAS DEL SECTOR RSOU	70
ANEXO G. MODELO MATEMÁTICO Y BALANCES DE MATERIA PARA EL DIGESTOR CSTR	71
ANEXO H. MODELO CINÉTICO PARA LA DIGESTIÓN ANAEROBIA	76
ANEXO I INTERFACE DE LA EXTENSIÓN PARA HYSYS 3.2	78

RESUMEN

TITULO: EVALUACION DEL POTENCIAL ENERGETICIO DE LOS RESIDUOS SÓLIDOS ORGANICOS URBANOS PROVENIENTES DE LAS PLAZAS DE MERCADO Y DISEÑO CONCEPTUAL DE UNA PLANTA DE DIGESTION ANAEROBIA PARA SU APROVECHAMIENTO INDUSTRIAL EN COLOMBIA*

AUTORES: SABALZA RAMOS, Otoniel., VILLAMIZAR NAVAS, Oscar Alonso**

PALABARAS CLAVES: RSOU, Potencial Energético, Caracterización Físicoquímica, Digestión Anaerobia.

La biomasa de los residuos sólidos orgánicos urbanos (RSOU) provenientes de las plazas de mercado (PM) y centros de acopio (CA) contienen un alto potencial energético, lo que convierte su fracción orgánica en excelente materia prima para la generación de energía. En Colombia se producen 120.205 Ton/año de residuos con una producción per cápita de aproximadamente de 0.5 Kg/hab/día, variando de 1.5 Kg/hab/día en las grandes ciudades hasta 0.2 Kg/hab/día en las poblaciones rurales.

Debido a la caracterización físicoquímica de los RSOU se evaluó el modelo del potencial energético y se implementó la digestión anaerobia en sólidos de baja concentración como la tecnología más adecuada para el aprovechamiento energético mediante la generación de un biogás rico en metano y su posterior conversión a energía eléctrica. Para realizar el diseño conceptual se consideró el biodigestor como un reactor CSTR de flujo continuo y una turbina de vapor con el fin de producir energía eléctrica.

El potencial energético producido por los RSOU de Bogotá D.C., Medellín, Cali, Barranquilla y Bucaramanga, es 36 TJ/año, 11,7 TJ/año, 17,8 TJ/año, 5,6 TJ/año y 11,4 TJ/año respectivamente para un total de 72.48 TJ/año. La producción de biogás y de energía a partir de los RSOU, mediante un proceso de digestión anaerobia simulado en el software Hysys 3.2 reporta una potencia de 1.092 KW, flujo de biogás de 34.33 Kg/h con fracción másica de 0.47 CH₄, 0.37 CO₂ y trazas de otros componentes como H₂O Y H₂S.

* Proyecto de Grado

** Facultad de Ingenierías Físicoquímicas, Escuela de Ingeniería Química,
Director Ph. D. Humberto Escalante Hernández

ABSTRACT

TITLE: EVALUATION OF URBAN ORGANIC SOLID WASTE ENERGETIC POTENTIAL FROM MARKET PLACES CONCEPT AND DESIGN OF A ANAEROBIC DIGESTION PLANT FOR INDUSTRIAL DEVELOPMENT IN COLOMBIA*

AUTHORS: SABALZA RAMOS, Otoniel., NAVAS VILLAMIZAR, Oscar Alonso**

KEY WORDS: RSOU, Energetic Potential, Physicochemical, Anaerobic Digestion.

The biomass of urban organic solid waste (UOSW) from the market places (MP) and gathering centers (GC) contain a high energetic potential, which converts his organic part in an excellent raw material for power generation. Colombia produces 120,205 tons/year of waste with a production per capita of approximately 0.5 kg/person/day, ranging from 1.5 kg/day in major cities up to 0.2 kg/day in rural populations.

Due to the physicochemical characterization of UOSW it evaluated the energetic potential model and implements the anaerobic digestion on low concentration solids such as more appropriate technology for energetic exploit by generating a biogas rich in methane and its subsequent conversion to electric energy. To make the conceptual design was considered the biogas as a continuous flow reactor CSTR and a steam turbine to produce electricity.

The energetic potential produced by UOSW of Bogotá, Medellín, Cali, Barranquilla and Bucaramanga, is 36 TJ/year, 11.7 TJ/year, 17.8 TJ/year, 5.6 TJ/year and 11.4 TJ/year respectively for a total of 72.48 TJ/year. The production of biogas and energy from UOSW, through a process of anaerobic digestion in simulated Hysys 3.2 software brings a power of 1092 KW, biogas flow of 34.33 kg/h with CH₄ mass fraction of 0.47, 0.37 and CO₂ traces of other components such as H₂S and H₂O.

* Project of Degree

** Physical Chemistry Faculty of Engineering, School of Chemical Engineering,
Director Ph. D. Humberto Hernandez Escalante

INTRODUCCIÓN

Debido al creciente aumento del consumo energético tanto en Colombia, como en el resto del mundo, es necesario hallar fuentes de energía renovables más limpias, que hacia un futuro cercano representen menor riesgo para el medio ambiente y el deterioro del clima global. Por tal motivo surge el interés por obtener energía, a partir de fuentes alternativas como puede ser la Biomasa Residual contenida en los RESIDUOS SOLIDOS ORGANICOS URBANOS (RSOU). El POTENCIAL ENERGÉTICO (PE) presente en este tipo de biomasa le brinda expectativas de uso industrial, como fuente complementaria de energía.

Desde los años 70 se comenzaron a evidenciar los impactos adversos sobre la salud y el medio ambiente que producen los RSU, al no realizar un control estricto y adecuado sobre este tipo de desechos.

En Colombia la problemática de los RSOU es grande porque la disposición final se realiza con poco control en la mayoría de los municipios, ocasionando contaminación ambiental. La producción per cápita es aproximadamente de 0.5 Kg/hab/día, variando de 1.5 Kg/hab/día en las grandes ciudades hasta 0.2 Kg/hab/día en las poblaciones rurales [2]. En las ciudades los RSOU son recolectados por las empresas de aseo municipales. En Colombia la disposición final de los RSOU, procedente de los 1086 municipios, es 52% disposición en botaderos y quemas a cielo abierto, 30% en relleno sanitario y 18% como relleno, compostaje, y/o incineración [2].

Colombia no posee información sobre el PE de la biomasa residual de los RSOU; por consiguiente contar con los valores estimativos de la energía generada por

este tipo de residuo brindará al país información necesaria para la toma de decisiones sobre la planeación nacional de fuentes energéticas renovables.

Según proyecciones planteadas por el Ministerio del Medio Ambiente y Desarrollo territorial la generación de RSU en el país seguirá en aumento, en 15 años se estarían generando cerca de 91000 Ton/mes [20]. El 45% de los RSOU serán depositados en los rellenos sanitarios; demandando la búsqueda de nuevos sitios de disposición final, aspecto que se complica por la escasez de espacio en las ciudades y por las distancias que cada vez son mayores de los centros de generación.

La elevada fracción orgánica de los RSOU y su concentración en CENTROS DE ACOPIO (CA) y PLAZAS DE MERCADO (PM) los convierte en excelente materia prima para la generación de energía, a la vez que se estaría logrando un tratamiento ambiental amigable a residuos que de otra forma entrarían a contaminar el medio ambiente debido a las prácticas de disposición final que se practican en la actualidad. Por otra parte, se generarían beneficios adicionales, como la reducción de los costos de transporte, manejo y disposición, reducción en el uso de rellenos sanitarios y emisión de gases de efecto invernadero. Por tal motivo, el principal objetivo de este trabajo, es evaluar el PE de la fracción orgánica de los residuos sólidos provenientes de los CA y PM, para las principales ciudades del país, con el fin de buscar alternativas para su aprovechamiento energético e industrial.

1. POTENCIAL ENERGÉTICO DE LOS RSOU

El cálculo del PE de los residuos sólidos urbanos ha sido estudiado ampliamente por diversos autores. Tchobanoglous et al [19], utiliza un modelo para calcular el PE por medio de digestión anaeróbica, que incluye la eficiencia del sistema digestor en la conversión de sólidos volátiles, a partir del poder calorífico del biogás obtenido. Para el caso en que la tecnología usada sea la combustión directa el modelo considera que hay combustión completa, es decir no hay generación de monóxido de carbono y todo el hidrogeno presente se oxida para formar agua. Adicionalmente el modelo incluye un término referente a la eficacia de combustión y la eficacia del sistema de incineración.

El Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) [16], hace una descripción de los factores que afectan la generación de metano en un relleno sanitario, y las diferentes metodologías para estimar dicha generación. Muestra 2 modelos diferentes para estimar el metano generado. En el primer modelo la estimación del potencial es llevada a cabo por medio de la producción del metano bajo condiciones de digestión anaeróbica. El segundo es un modelo cinético de primer orden basado en: series históricas de disposición de residuos para su calibración, generación potencial de metano y el tiempo desde el cual el relleno sanitario fue cerrado.

Bhattacharya et al. [3] evaluó el PE generado por las actividades agrícolas, pecuarias y de RSOU. En el caso de los RSU consideró la cantidad promedio de residuos recolectados en los principales centros urbanos, y expresó el PE como una función del metano generado mediante digestión anaerobia y de su Poder Calorífico Inferior (PCI_{CH_4}). El PE de los RSU se evaluó para China, India,

Filipinas, Sri-Lanka y Tailandia; y permite hacer predicciones de la evolución del PE hasta el año 2010.

Chaya et al. [5], Jiang et al. [6], Junfeng et al. [17] y Perera [18], realizaron estudios sobre cálculos de PE, haciendo uso del modelo matemático reportado por el IPCC [16], y en los cuales se estima que el metano generado por los RSU es debido a la digestión anaeróbica de los residuos de un relleno sanitario.

Para el aprovechamiento energético de la fracción orgánica de los RSU, se han considerado varias alternativas tecnológicas, entre ellas se encuentra la digestión anaerobia para la generación de biogás rico en metano [6, 7, 8, 9, 10], la generación del biogás y su correspondiente transformación en Hidrógeno [11, 12], y la fermentación encaminada a la obtención de bioetanol [13, 14].

Cabe destacar que tecnologías ampliamente utilizadas con otros tipos de biomasa como la combustión directa, la gasificación, la pirolisis, no son muy eficientes para el caso de los RSOU debido al elevado nivel de humedad que presenta este tipo de residuo [6, 9].

Uno de los aspectos que más preocupa sobre los procesos que se realizan para el aprovechamiento energético de los RSOU, es el control de emisiones atmosféricas causadas por estas tecnologías; sin embargo y gracias al mejoramiento permanente de la tecnología como a la aplicación de legislaciones cada vez más restrictivas, el aprovechamiento energético de residuos es hoy una manera limpia de tratamiento de los RSU.

Así por ejemplo, la composición promedio del biogás producido por un relleno sanitario, bajo condiciones anaerobias, posee una mezcla de 60-50% de Metano (CH_4), 40-30% de CO_2 , y 2-1% de SH_2 , NH_3 , y compuestos orgánicos volátiles (VOC's) [21]. La disposición de 1 tonelada de RSU en un relleno sanitario genera

emisiones de CO₂ de 1,3 toneladas por año durante toda su vida útil y posteriormente durante su abandono. Sin embargo el gas metano CH₄, producto de la descomposición de la materia orgánica presente en los RSU, produce 21 veces más efecto invernadero que el CO₂. Por tal motivo se hace necesario buscar alternativas que liberen al medio ambiente de las emisiones de estos gases que producen el efecto invernadero.

La digestión anaeróbica es una tecnología madura y es propuesta como la alternativa tecnológica para lograr el aprovechamiento energético de los RSOU mediante la generación de un biogás rico en metano [3, 9, 16, 19]. Razón por la cual el cálculo del potencial está basado en la energía que se obtendría por la combustión del metano generado y su posterior conversión a energía eléctrica.

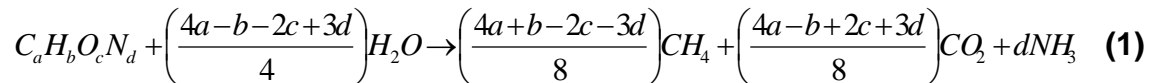
Siendo el principal objetivo de este trabajo el determinar el PE de los RSOU se planteó un modelo matemático, con base en el análisis de situaciones similares a nivel internacional. El análisis de los anteriores estudios permite deducir que, debido a la elevada producción de metano que se obtiene durante la descomposición de los RSOU, los modelos matemáticos para evaluar el Potencial Energético se han desarrollado con base en la aplicación específica para la producción de biogás.

1.1 MODELO MATEMÁTICO PARA CALCULAR EL PE DE RSOU

Uribe et al. [41], desarrollaron un modelo para estimar el PE de los RSOU en Colombia, con base en los planteamientos de los modelos de IPCC [16] y de Bhattacharya [3]. Este modelo se fundamenta en un balance de masa y la estequiometría de la conversión, tomando en cuenta la composición elemental de la mezcla de RSOU, obteniendo la fórmula empírica típica. De esta forma se

estima la cantidad de metano generado, a partir de la masa de carbono orgánico presente en los RSOU, que es accesible a la descomposición anaeróbica.

La descomposición del carbono orgánico se representa mediante la siguiente reacción teórica [19, 39].



Este modelo presume que el metano generado es colectado sin pérdidas, y que el amoníaco generado es muy poco, por lo tanto su PE es muy bajo, y se considera despreciable. Por consiguiente, el cálculo del PE se realiza tomando únicamente el poder energético del metano.

La estructura del modelo se define como:

$$PE = (M_{RSOU}) \left(\frac{CH_4 \text{ Generado}}{M_{RSOU} \text{ Biodegradada}} \right) (PCI_{CH_4}) \quad (2)$$

Siendo:

M_{RSOU} = La masa de RSOU generado. (Toneladas/Tiempo)

$\frac{CH_4 \text{ Generado}}{M_{RSOU} \text{ Biodegradada}}$ = [FO]*[FCB]*[FCM]

FO = Fracción Orgánica de los RSOU de rápida Biodegradación.

FCB = Fracción de Carbono Biodegradable de los RSOU de rápida biodegradación.

FCM = Fracción de Carbono biodegradado como Metano (Adimensional)

PCI_{CH_4} = Poder Calorífico Inferior del Metano. (TJ/Toneladas)

Por consiguiente la expresión (2) para calcular el PE se expresa como:

$$PE = M_{RSOU} * \left[FO * FCB * FCM * \left(\frac{16}{12} \right) \right] * PCI_{CH_4} \quad (3)$$

El factor 16/12 corresponde a la relación de la masa molar del metano (16g/mol) sobre la masa molar del carbono (12g/mol), lo que permite convertir la cantidad de carbono biodegradado en metano.

El PCI_{CH_4} , permite conocer la energía liberada cuando el metano generado es quemado o sometido al proceso de combustión.

La variable FO depende de las propiedades físicas de la masa de residuos. Las variables FCB y FCM dependen de las propiedades fisicoquímicas de los RSOU, y se calculan de la siguiente forma:

Para hallar la FCB es necesario estimar la masa de carbono biodegradable, la cual se determina por medio de la siguiente formula [22, 23, 24]:

$$FCB = \left[0.83 - 0.28 \left(\frac{\% LIGNINA}{\% SV} \right) \right] * \left[\frac{\% COT * \% ST}{10000} \right] \quad (4)$$

Donde:

%SV= Sólidos Volátiles (Kg SV/Kg RSOU)

%COT= Carbono orgánico total (Kg COT/Kg RSOU)

%ST= Sólidos totales (Kg ST/Kg RSOU)

% Lignina (Kg Lignina/Kg RSOU)

Para calcular la FCM es necesario determinar el metano generado a partir del principio de la digestión anaerobia por medio de la ecuación (1) [19]. A continuación se describen los pasos para hallar los coeficientes estequiométricos y poder estimar la fracción de metano.

- Se toma como base el análisis elemental en porcentaje peso de cada tipo de residuo, en ausencia de azufre.
- Los subíndices estequimétricos se pasan a porcentaje molar, cada uno por sus respectivos pesos moleculares.
- Los subíndices se dividen todos entre el porcentaje de nitrógeno para que la relación mol de nitrógeno sea igual a 1.
- Teniendo estos coeficientes se determinan los términos de la ecuación (1);

$$A = \left(\frac{4a - b - 2c + 3d}{8a} \right); B = \left(\frac{4a + b - 2c - 3d}{8a} \right); C = \left(\frac{4a - b + 2c + 3d}{8a} \right)$$

Donde A son las moles de H₂O, B son los moles de CH₄ y C los moles de CO₂, y de esta forma calcular la fracción de metano.

El PE de los RSOU varía de acuerdo a la composición fisicoquímica de los mismos, como puede observarse al desarrollar el modelo; característica muy importante, ya que los desechos que componen los RSOU puede cambiar de una zona del país a otra de acuerdo a las costumbres alimenticias que se presenten en cada una de ellas.

Por otra parte, investigaciones realizadas en América Latina para tratar los RSU, utilizando métodos físicos, químicos y biológicos han demostrado que la digestión anaerobia es la tecnología más adecuada. La aplicación de esta tecnología es considerada una de las más eficientes para el tratamiento de los RSU, debido a que en la mayoría de los países latinoamericanos el contenido de Fracción Orgánica (FO) representa entre un 50 - 85%. [25, 26]. En Colombia, el contenido de la FO de los RSOU se encuentra alrededor del 80 - 90% con un porcentaje de humedad entre el 82 - 92%.

2. DIGESTIÓN ANAEROBIA

El proceso de digestión anaerobia consiste en la transformación de la materia orgánica a través de una serie de reacciones bioquímicas, desarrolladas por microorganismos microbianos, en un biogás con un alto contenido de CH_4 , y un efluente sólido, con excelentes características para ser utilizado como fertilizante para el suelo. Durante la primera etapa, participan las bacterias hidrolíticas, encargadas de romper los polímeros orgánicos (polisacáridos, proteínas, y lípidos) para convertirlos a monómeros como; los ácidos grasos volátiles de cadena larga, los alcoholes, el H_2 y CO_2 . Posteriormente intervienen las bacterias fermentativas o acidogénicas que transforman los productos, formados durante la hidrólisis, en ácido acético y compuestos intermedios como el etanol, el ácido láctico, el ácido propiónico, el ácido fórmico y el ácido butírico, además de H_2 y CO_2 . Estos productos son convertidos en acetato, H_2 y CO_2 por las bacterias acetogénicas. Finalmente, el CH_4 es producido por las bacterias metanogénicas a partir del acetato, el H_2 y el CO_2 [28, 29, 30].

Varios tipos de procesos anaerobios han sido desarrollados para el tratamiento de efluentes con altas cargas orgánicas como es el caso de los RSOU, incluyendo los sistemas en batch y los sistemas continuos en una fase y dos fases. La digestión anaerobia en dos fases ofrece ventajas significativas sobre los procesos convencionales de una sola fase, especialmente la forma en que los microorganismos son retenidos en el reactor, generando la posibilidad de establecer condiciones operacionales que disminuyan los tiempos de arranque del sistema y la especialización de la microbiota en cada reactor, permitiendo la obtención de una mayor cantidad de productos deseados en cada etapa del proceso [27, 31, 32, 33].

3. METODOLOGÍA

El cálculo del potencial energético de los RSOU, se realizó para las cinco ciudades colombianas con población superior a 1 millón de habitantes. El criterio usado para definir dichas ciudades fue la densidad de población o número de habitantes, ya que se considero que a mayor población mayor es la cantidad de residuos generados. En la Tabla 1, se reporta la población para las principales ciudades colombianas, según el DANE [37].

Tabla 1. Población de las principales ciudades colombianas.

Posición	Municipio	Población Total
1	Bogotá, D.C.	7.952.375
2	Medellín	3.306.490
3	Cali	2.593.563
4	Barranquilla	1.737.327
5	Bucaramanga	1.024.350

Fuente: Departamento Administrativo Nacional de Estadísticas, DANE, Censo General 2005, Nivel Nacional.

El modelo propuesto por Uribe et al. [41] para determinar el PE de los RSOU, y la metodología de cálculo, es fácilmente aplicable a todas las ciudades, siempre que se cuente con la información referente a las cantidades de residuos generados y su caracterización fisicoquímica.

La información sobre cantidad de residuos generados se solicitó, en cada ciudad, a las entidades que se listan en la tabla 2.

Tabla 2. Entidades que suministraron información de la cantidad de RSOU.

Municipio	Entidades que Suministraron Información sobre la Cantidad de RSOU
Bogotá, D.C.	Unidad Especial de Servicios Públicos
Medellín	Empresas Varias de Medellín
Cali	Empresa de Servicios Públicos de Aseo de Cali
Barranquilla	Empresa de Acueducto, Alcantarillado y Aseo de Barranquilla
Bucaramanga	Empresa de Aseo de Bucaramanga

Por la naturaleza heterogénea de los RSU, para su caracterización fisicoquímica, se estableció para el muestreo el método “por conveniencia”. El muestreo fue realizado en los CA y las PM con mayor reporte de generación de residuos (unidades de muestreo), para las diferentes ciudades.

Considerando que las propiedades de los residuos varían según el sitio donde se realice el muestreo, se propuso realizar una muestra compuesta. Se tomó una muestra de la PM y otra en el CA o central mayorista, se mezclaron en proporciones definidas según la ponderación de sus pesos con respecto al total de los residuos generados [1]. En la Tabla 3 se presenta el marco de muestreo definido.

Tabla 3. Marco de muestreo para el sector RSOU en Colombia.

CENTROS DE ACOPIO		
Ciudad	Centro de Acopio Mayorista (CAM)	Plaza de Mercado (PM)
Bogotá	Corabastos	Restrepo
Medellín	Asoabastos La Mayorista	La Minorista
Cali	Cavasa	Santa Helena
Barranquilla	Granabastos	Barranquillita
Bucaramanga	Centroabastos	Central

En cada una de los CA y las PM escogidas, se tomó una muestra representativa por duplicado de 2 Kg de RSOU. La metodología de muestreo utilizada fue el cuarteo, siguiendo la Norma ASTM 5231 – 92 “Standard Test of the Composition of Unprocessed Municipal Solid Wastes” [38], la cual hace la recolección de los RSU en camiones. La norma es adaptada al caso de estudio, para que la toma se haga directamente en el centro de acopio. (Ver anexo 1).

El número de muestras recolectadas para cada una de las ciudades fue de 2 (original y respectivo duplicado) y 10 para las cinco ciudades, que fueron objeto de estudio.

3.1 CARACTERIZACIÓN FISICOQUÍMICA DE LOS RSOU

La caracterización de una biomasa residual atiende generalmente a un fin específico y puede ser detallada, ó simplemente se determinan aquellos parámetros necesarios para proyectar la producción de biogás ó determinar el potencial energético. En este estudio se definieron como parámetros para la caracterización de los RSOU: %Sólidos Volátiles, %Carbono Orgánico Total, %Sólidos Totales, y % Lignina, entre otras; indispensables para el cálculo de las variables FCM y FCB del potencial energético. Las muestras obtenidas fueron enviadas al Laboratorio del Centro de Estudios e Investigaciones Ambientales – CEIAM y Laboratorios Calderón en Bogotá para realizar su respectiva caracterización fisicoquímica.

Dado que el modelo planteado para evaluar el PE se basa en la capacidad de producción del metano por parte de la biomasa, el valor del PCI_{CH_4} , se tomó como 0.05014TJ/Ton CH_4 , referenciado en el Perry's Chemical Engineers' Handbook [40].

Se analizó la participación energética anual y mensual de las cinco ciudades escogidas. Se realizó un análisis de las principales equivalencias del CH₄ en remplazo de combustibles fósiles y la equivalencia energética del PE de los RSOU en energía eléctrica.

3.2 DISEÑO CONCEPTUAL DE LA PLANTA DE DIGESTIÓN ANAEROBIA

Los procesos anaerobios ofrecen el beneficio de la recuperación de energía en forma de gas metano y por lo tanto son productores netos de energía y ayudan a la reducción del volumen. La cantidad de lodos producidos por estos tratamientos es muy baja y además pueden manejar grandes cantidades de carga, por estas razones y por el alto contenido de humedad que reportan los RSOU en Colombia (más del 70%) se escogió la digestión anaerobia.

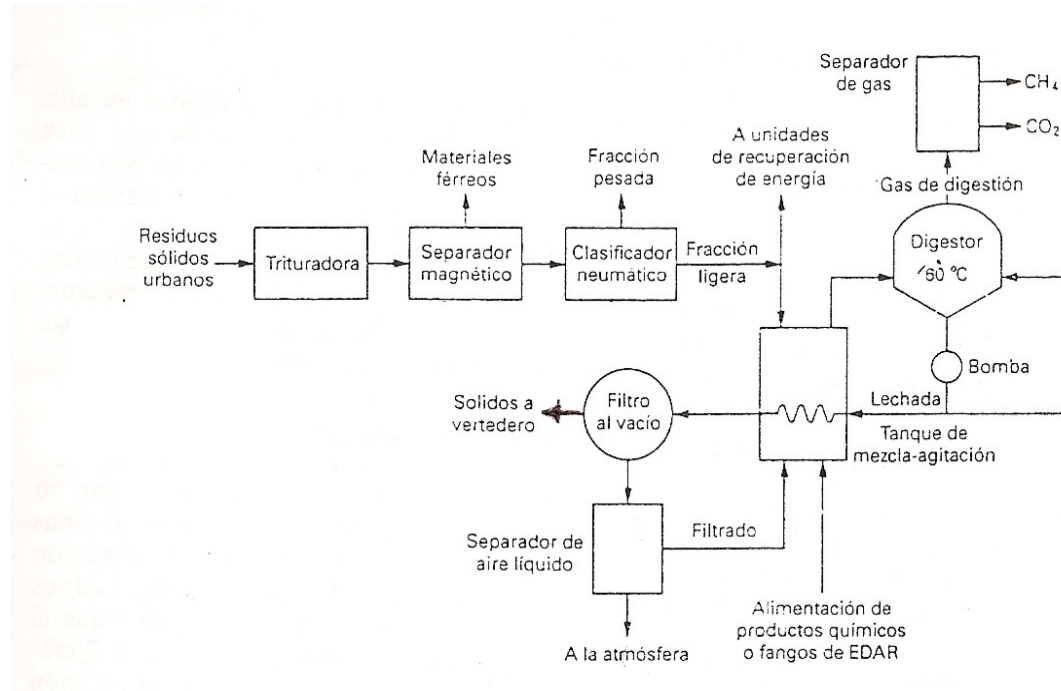
Por otra parte, para el diseño conceptual de la planta de digestión Anaeróbica, se tuvo en cuenta: la cantidad de RSU generados, la masa de RSOU presente en ellos, la caracterización fisicoquímica, y las variables que forman parte del diseño de digestores; bajo condiciones anaerobias de sólidos en bajas concentraciones [19].

Dentro de estas variables, las que más se destacan son: la reducción del tamaño del material que se va a digerir, ya que este interfiere con el funcionamiento eficaz de las operaciones de bombeo y mezcla. El porcentaje de residuos sólidos mezclados con fangos, que pueden variar entre el 50 y el 90%. El tiempo medio de retención hidráulico que se encuentra en el rango de 3 a 4 días como tiempo mínimo, y de 10 a 20 días para el diseño. La tasa de carga recomendada está entre 0,6 y 1,6 Kg/m³*día, actualmente no está bien definido y se han reportado tasas significativamente más altas. Concentración de sólidos, igual o menor del 8 al 10% y valores típicos del 4 al 8 % para el diseño. La temperatura oscila entre 30

y 38 °C para un reactor mesofílico y entre 55 y 60 °C para un reactor termofílico. La destrucción de residuos sólidos volátiles, que depende de la naturaleza de las características de los residuos, y varía aproximadamente desde el 60 al 80 %, utilizando el 70% para propósitos de estimación. Sólidos totales destruidos, que varían entre el 40 y el 60%, según la cantidad del material inerte originalmente presente y la producción de biogás de 0,5 a 0,75 m³/Kg de sólidos volátiles destruidos (CH₄=55% y CO₂=45%) [19].

La digestión anaeróbica de sólidos en baja concentración, es un proceso en el cual se fermentan los residuos orgánicos en concentraciones bajas de sólidos totales. Es un proceso utilizado ampliamente en muchas partes del mundo para generar gas metano a partir de desechos humanos, animales y agrícolas, y a partir de la fracción orgánica de los RSU. Una de las desventajas del proceso de digestión anaerobia de sólidos en bajas concentraciones, tal como se aplica a los residuos sólidos, es que deberían añadirse considerables cantidades de agua a los residuos para que el contenido de sólidos llegue al rango requerido. La adición de agua produce un fango digerido muy diluido, que hay que deshidratar antes de su evacuación [19]. La evacuación del efluente líquido producido por la deshidratación es una consideración importante en la selección del proceso de digestión de sólidos en baja concentración. En el figura 1, se observa el diagrama de flujo del proceso de digestión anaerobia de sólidos en baja concentración para la fracción orgánica de los RSU.

Figura 1. Diagrama de flujo del proceso de digestión anaerobia de sólidos en baja concentración para la fracción orgánica de los RSU [19].



La selección de los procesos anaerobios se da, normalmente, entre las tecnologías de sólidos en baja y en alta concentración. La digestión anaeróbica en sólidos de alta concentración posee un % Sólidos Totales igual o mayor al 22% p/p. Sin embargo teniendo en cuenta el criterio de madurez para la escogencia de la tecnología, la digestión anaeróbica de sólidos de alta concentración es una tecnología relativamente nueva, y su aplicación para la recuperación de energía a partir de la fracción orgánica de los RSU no se ha desarrollado completamente [19]. Dos ventajas importantes que tiene el proceso de digestión anaerobia de sólidos en alta concentración son: más bajos requisitos de agua y una tasa más alta de producción de biogás por volumen de reactor. Pero su mayor desventaja radica en la limitada experiencia disponible en el funcionamiento a escala real. [19]

Para el aprovechamiento del biogás generado se recomienda introducir la corriente a un combustor y posteriormente a una turbina para generar energía eléctrica; la que de igual manera podrá ser utilizada para autoconsumo y posterior venta a la red eléctrica nacional, lo que se representaría como un aspecto positivo dentro del balance económico de la planta.

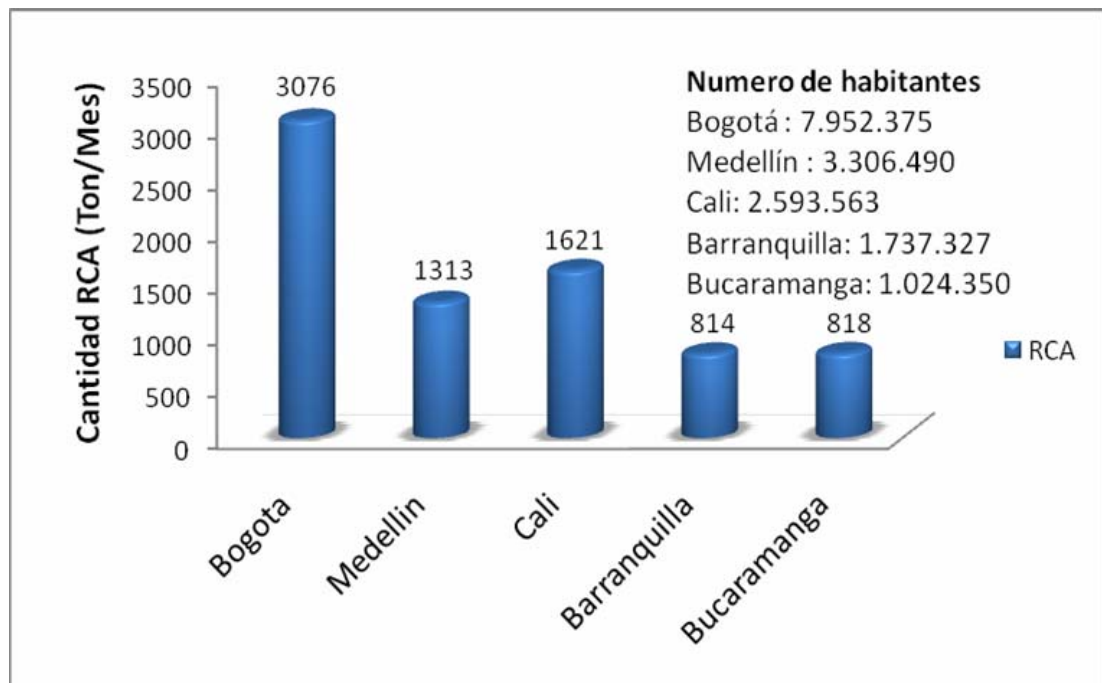
Teniendo en cuenta que el material de alimento a la planta es un elemento de desecho como es el caso de los RSOU, y el cual no representa un valor agregado significativo dentro del balance económico, si es importante conocer la capacidad de la planta a instalar, así, como la producción neta de energía eléctrica producida; datos muy importantes dentro del diseño de una planta y que a su vez servirían de estimativo para conocer la viabilidad económica del montaje de una planta de este tipo. Para realizar el diseño conceptual se consideró el biodigestor como un reactor CSTR, ya que este no ofrece problemas de diseño, y es el más utilizado para residuos de consistencia líquida, en comparación a otros reactores [40].

Teniendo en cuenta la tasa de producción de RSOU, se propone ubicar la planta en la ciudad de Bogotá, más exactamente en cercanías de Corabastos, ya que esta entidad es la principal CA del país, y la que reporta la mayor cantidad de RSOU en todo el territorio nacional. Además, Corabastos cuenta con los terrenos idóneos para el montaje de la planta, y una buena distribución de redes de energía eléctrica, agua y alcantarillado, necesarios para el buen funcionamiento de la planta de Digestión Anaerobia.

4. RESULTADOS

En la Grafica 1 se presenta la información sobre la cantidad promedio de RESIDUO CENTRO DE ACOPIO (RCA) y RESIDUO PLAZA DE MERCADO (RPM), para las 5 ciudades de estudio.

Grafico 1. Generación promedio mensual de RCA y RPM para las cinco principales ciudades de Colombia



Al comparar los datos de cantidad de residuos, con el número de habitantes de cada ciudad, se puede ver que las ciudades con mayor población son las generadoras de más residuos. Lo anterior también se debe a que la cuantificación se hizo incluyendo los datos de áreas metropolitanas y los pueblos aledaños a las ciudades.

En los RCA, la diferencia entre Bogotá, que produce 3076 Ton/mes de residuos, y las demás ciudades es muy significativa debido a que esta ciudad tiene mayor población, número de plazas y concentración de alimentos. La cantidad producida por Cali (1621 Ton/mes) es mayor que la de Medellín (1313 Ton/año) a pesar que el número de habitantes es mucho mayor, debido a que Cali reportó un número mayor de plazas de mercado. El mismo caso se presenta entre Bucaramanga y Barranquilla (818 y 814 Ton/mes respectivamente) hecho que se puede explicar considerando que buena parte de los habitantes de los municipios aledaños, realizan la compra de sus alimentos en los centros de acopio de Bucaramanga. En la tabla N° 4 se presentan los resultados obtenidos de la caracterización fisicoquímica realizada a los RSOU.

Tabla 4. Caracterización promedio de los RSOU.

RESUMEN CARACTERIZACION RESIDUOS DE PLAZAS						
PARAMETRO	UNIDAD	CIUDAD				
		Bogotá	Medellín	Cali	B/quilla	B/manga
ANÁLISIS BÁSICO						
DENSIDAD APARENTE	g/ml	0,36	0,31	0,37	0,35	0,18
DENSIDAD REAL	g/ml	1,25	1,25	1,25	1,28	1
HUMEDAD	% p/p	86,06	88,63	87,75	92,85	84,14
SÓLIDOS TOTALES	% p/p	13,94	11,37	12,25	7,15	15,86
ANALISIS PROXIMO EN BASE SECA						
MATERIAL VOLATIL	% p/p	68,14	70,8	69,47	79,5	48,75
CARBONO FIJO	% p/p	22,83	16,83	22,07	9,07	13,6
CENIZAS	% p/p	9,04	12,4	8,5	11,42	37,65
ANALISIS ELEMENTAL EN BASE SECA						
CARBONO ORGANICO TOTAL	% p/p	34,79	30,69	36,33	42,35	27,74
HIDRÓGENO	% p/p	5,81	5,1	6,04	4,87	4,72
OXIGENO	% p/p	46,34	40,99	48,41	39,36	36,95
NITRÓGENO	% p/p	1,58	1,5	1,39	1,97	1,51
AZUFRE	% p/p	0,029	0,0026	0,0734	0,015	0,1

ANALISIS BROMATOLOGICO						
GRASA	% p/p	3,5	3,31	3,14	11,97	1,19
PROTEINA	% p/p	9,69	9,19	8,75	12,31	9,5
HOMOCELULOSA	% p/p	18,64	18,47	18,92	-	15
CELULOSA	% p/p	5,66	13,87	8,69	-	13,02
HEMICELULOSA	% p/p	12,8	9,81	9,96	-	15
LIGNINA	% p/p	3,85	5,21	5,37	-	15,03
OTROS PARAMETROS						
SÓLIDOS VOLÁTILES	% p/p	90,96	87,6	91,51	88,58	62,35
MATERIA ORGANICA	% p/p	59,97	52,94	62,61	73,02	47,79
C/N	% p/p	22,43	20,89	25,93	22,09	18,24

Se observa que la caracterización fisicoquímica de los RSOU se encuentra dentro de los rangos registrados en otros estudios [19]; para la mayoría de los parámetros. Sin embargo estos valores no se deben cumplir estrictamente ya que son tomados como una referencia y fueron realizados en otros países.

En cuanto al análisis próximo, se aprecia que el contenido de ceniza es bajo (en promedio 14.87 %p/p), en el caso de la biomasa este parámetro corresponde a los inertes e influye reduciendo el poder calorífico; ya que un cambio del 1% en el contenido de cenizas corresponde a un cambio de 2% en el poder calórico. Además el contenido de cenizas afecta los costos de procesamiento y transformación energética de la biomasa, viéndose reflejado en un aumento por el costo de los equipos para su posterior eliminación.

Los RSOU de las ciudades en estudio, presentan altos contenidos de material volátil (72 % p/p en promedio), lo cual es un indicador importante en la eficiencia de la producción de Biogás. Este parámetro es significativo para evaluar la descomposición del elemento orgánico constituyente de los residuos sólidos, dado que valores altos influyen aumentando la acción de los microorganismos y resultan

muy convenientes para su aprovechamiento por medio de procesos biológicos como la digestión anaerobia.

Cabe destacar que para Bucaramanga se reporta un contenido de material volátil de 48.75 %p/p, y se encuentra por fuera del promedio que presentan las demás ciudades. Las diferencias que se observan están influenciadas por la variedad de las especies vegetales y frutales incluidas en el estudio, las condiciones de degradación al momento de tomar la muestra, las condiciones climáticas y del terreno del sitio de disposición final y por las costumbres alimenticias que esta ciudad posee, hace que los desechos presenten una caracterización diferente a las demás ciudades del país.

Los contenidos de carbón fijo y el material volátil, resultan ser parámetros influyentes dentro de la transformación energética contenida en la biomasa; ya que el poder calorífico es la cantidad de calor generado por una combustión completa de una masa específica de carbón en presencia de oxígeno. El poder calorífico representa la energía de combustión del carbono e hidrógeno de la materia orgánica y del azufre pirítico y en parte del orgánico. Según la ecuación de Fórmula de Gouthal, se observa que el poder calorífico es directamente proporcional a la cantidad de CF y MV:

$$\text{Poder Calorífico} = 82 \times \text{Carbono Fijo} + \alpha \times \text{Materias Volátiles}$$

Es posible ver, que el porcentaje de carbón fijo que se reporta para las ciudades que son objeto de estudio, no cabe dentro de un rango específico de valores. Los resultados son muy diferentes entre sí, esto debido a que el carbón fijo depende a su vez del contenido de cenizas y material volátil, según la relación:

$$\text{Carbón Fijo} = 100 - \text{Materias Volátiles} - \text{Cenizas}$$

Por lo tanto, la variación del porcentaje de carbón fijo depende directamente de los cambios en los valores que presentan los parámetros de MV y ceniza. Como se observa para la mayoría de las ciudades, aunque el % de MV se encuentra dentro de un rango de valores aceptable, el % de cenizas cambia abruptamente.

En los resultados reportados para el análisis último o elemental se observan contenidos medio-bajos de carbono orgánico total y altos contenidos de oxígeno e hidrógeno, en comparación a los combustibles fósiles como el carbón [42]. Estos resultados muestran que los RSOU, poseen mayores enlaces Carbono-Oxígeno y Carbono-Hidrógeno, lo cual se ve reflejado en la disminución del contenido energético del combustible renovable, debido a que la energía de los enlaces C-O y C-H es menor que la del enlace Carbono-Carbono; mientras que los combustibles fósiles por su alto contenido de C y bajo de O, está constituido por una cantidad mayor de enlaces C-C, por tal razón poseen un mayor contenido energético [42].

El contenido de azufre que poseen los residuos de las plazas son bajos en comparación con otras fuentes de biomasa residual, siendo una ventaja en los procesos de conversión energética (García; 2000). Un material con bajo contenido de azufre produce una mínima cantidad de H_2S durante su procesamiento, reduciendo la contaminación ambiental y el deterioro de los equipos, ya que es altamente corrosivo. De otra forma aumentaría los costos de operación para su posterior eliminación.

La diferencia que presentan los valores tanto en el análisis elemental como en el % de grasa y proteína, se debe a las diferentes condiciones climáticas, a las características de los suelos, la variedad de cultivos que se manejen y a las costumbres alimenticias en las diferentes zonas del país. Esto hace que haya una diferencia en los elementos que constituyen los RSOU y se presente una variación entre los valores reportados para los mismos parámetros, en las diferentes

ciudades de Colombia. Los valores de contenido de grasa presentes en las muestras resultan favorables, ya que se transforman para dar origen a los Ácidos Grasos Volátiles (AGV's), y su concentración es un parámetro importante para determinar la estabilidad y eficiencia de los reactores anaerobios [34, 35]. En la digestión anaerobia, las proteínas sirven como fuentes de carbono y energía para el crecimiento bacterial y adicionalmente, el amoníaco que se desprende en la hidrólisis de las proteínas, sirve como fuente principal de nitrógeno para el crecimiento de la biomasa [44].

Una relación adecuada entre el carbono y el nitrógeno, favorece los procesos de fermentación y producción de biogás. La relación carbono-nitrógeno (C/N) adecuada para un proceso biológico está comprendido entre 25 y 30, el mínimo puede establecerse en 16 (Werner, U.; et. al.; 1989) y es un índice significativo en lo que se refiere a la digestibilidad de un determinado material orgánico. El valor promedio de C/N, reportado para los RSOU de las diferentes ciudades del país es del 20 % y se puede concluir que está dentro del rango adecuado para que a los RSOU de Colombia se les aplique un proceso biológico para su utilización energética.

Los elevados valores de materia orgánica y de sólidos volátiles que presentan los RSOU de Colombia, hacen favorable la aplicación de los procesos biológicos a este tipo de residuo; ya que el contenido de SV se utiliza como una medida de la biodegradabilidad de la fracción orgánica de los RSU. Sin embargo algunos de los constituyentes orgánicos de los RSU son altamente volátiles pero bajos en biodegradabilidad [19]. Alternativamente, se puede usar el contenido de lignina de un residuo para estimar la fracción biodegradable, por medio de correlaciones empíricas [24].

La variación de los valores que se observa en el análisis bromatológico, se debe a la diversidad vegetales, verduras y frutas que componen los RSOU, en las

diferentes ciudades del país. Por ejemplo la hemicelulosa es un producto de la condensación de azúcares con 5 y 6 carbonos presente en una gran cantidad de frutas y hortalizas, la celulosa es un polisacárido que hace parte de las paredes de las células vegetales, y la lignina es un material polimérico que contiene anillos aromáticos, y está presente en los tejidos leñosos, cortezas y cáscaras [19, 39]. Es además, un material altamente refractario a la degradación anaerobia, afectando también la biodegradabilidad de la celulosa, la hemicelulosa y de otros polímeros, convirtiéndose su degradación en el proceso límite de la velocidad de la hidrólisis y por tanto de la degradación anaerobia de ciertos sustratos [44]. Esto explica la diferencia entre los valores reportados para estos parámetros, y analizados en la caracterización fisicoquímica de los RSOU para Colombia.

Como el porcentaje de lignina es relevante a la hora del cálculo del potencial se tomo un promedio de la lignina reportada por Calderón Labs en las ciudades de Bogotá, Medellín, Cali y Bucaramanga.

4.1 ESTIMACIÓN DE PE DE LOS RSOU

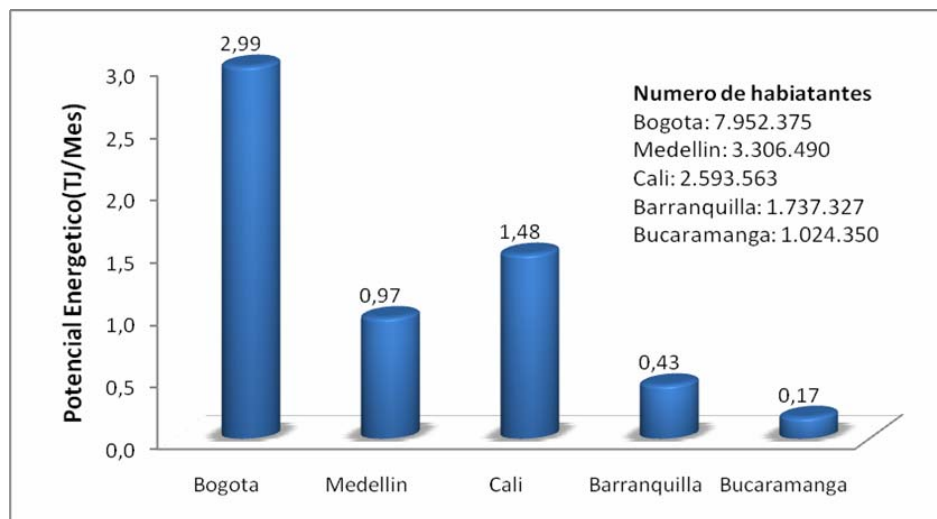
En la siguiente tabla aparecen reportados los valores de FO, FCB Y FCM necesarios para el cálculo del PE de los RSOU.

Tabla 5. Parámetros adimensionales para cálculo de pe de los RSOU en Colombia.

CIUDAD	FO	FCB	FCM
BOGOTA D.C.	0.8789	0.0345	0.48
MEDELLIN	1	0.0232	0.48
CALI	0.9593	0.0296	0.48
BARRANQUILLA	0.9861	0.0201	0.48
BUCARAMANGA	0.9312	0.0406	0.48

El resultado del PE para las cinco ciudades de estudio, se representa en la gráfica N°2.

Grafico 2. Potencial energético de los RCA y RPM de las cinco ciudades colombianas.



Las cinco ciudades reportan un potencial total de 6.82 TJ/mes, lo que da un estimativo favorable para el resto del país, ya que se cuenta con un PE alto que es

de gran ayuda para su aprovechamiento en la canasta energética, disminuyendo la dependencia que se presenta con respecto a fuentes de energía convencionales como el carbón, petróleo y gas natural. Otro efecto positivo del aprovechamiento energético de los RSOU.

En cuanto al PE evaluado por ciudad, se puede ver que la diferencia es representativa entre Bogotá y las otras ciudades, debido a que en la capital se encuentra el mayor número de plazas de mercado y la mayor central de abastos del país; siendo el PE directamente proporcional a la cantidad de residuos generados.

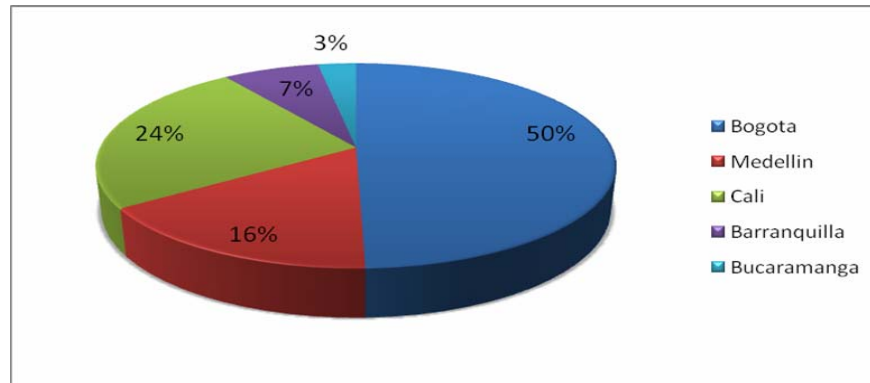
Para el caso de aprovechar la energía contenida en los RSOU en las ciudades en mención, habría que tener en cuenta que el total de PE evaluado sería equivalente a la energía necesaria para producir una potencia de 2256,3 Kwh, suficiente para el abastecimiento de una planta y corresponde a la cantidad de energía suministrada por otras fuentes energéticas, las cuales se observan en la tabla 6.

Tabla 6. Equivalencias del potencial energético frente a otras fuentes de energía.

Potencial Energético Total (Tj/año)	Energía eléctrica GW	Ton equivalentes de carbón (Tec)	Ton equivalentes de Petróleo (Tep)	Barriles de Petróleo día-año
72,480	19,765	2473,079	1731,155	35,916

Teniendo en cuenta el PE de la cantidad de RSOU de cada ciudad, es muy importante el diseño y la construcción de plantas de aprovechamiento energético y producción de biocombustibles.

Figura 2. Participación porcentual de las ciudades en el PE total Nal.



Se puede resaltar claramente que Bogotá, Medellín y Cali son las ciudades que aportan más del 60% del PE nacional, a partir de los RSOU. El aprovechamiento en los CA y PM (compostaje) es una actividad de gran importancia para el desarrollo del sector en estas ciudades, los cuales están enfocados en el buen manejo tecnológico, para su autoconsumo y distribución local; utilizando los RSOU como abono orgánico para mejorar la calidad de las tierras.

Las cinco ciudades escogidas son las que más aportan al PE producible, lo cual indica que es donde se encuentra la mayor concentración de energía proveniente de los residuos de esta clase en MW/año, energía que puede ser aprovechada para la generación eléctrica mediante una planta de digestión anaeróbica utilizando cogeneración.

4.2 DISEÑO BÁSICO DE INGENIERÍA PARA PROCESO DE BIODIGESTIÓN ANAEROBIA DE RSOU EN COLOMBIA.

El proceso de digestión anaerobia de los RSOU, a baja concentración, para la producción de metano conllevaría 3 pasos:

a) *Preparación de la fracción orgánica de los RSU*, mediante las operaciones de recepción, selección, separación y reducción de tamaño. Se tomó como base de cálculo 1 Ton/día de RSU producido en la CA Corabastos, de la ciudad de Bogotá. Los RSU se depositan en una trituradora rotatoria, para reducir su tamaño hasta un diámetro de partícula de 4 a 6 mm aproximadamente. Estos a su vez son depositados en una banda transportadora, que asegure el flujo de material, y que pase a través de un separador magnético y un clasificador neumático, para realizar la separación de la fracción inorgánica que poseen los RSU. Dando como resultado una corriente que contiene solo la fracción orgánica de los RSU. Tomando en consideración la Fracción Orgánica (90 % del peso total de RSU) reportada en el muestreo y la caracterización, la corriente resultante posee 0.9 Ton/día de RSOU.

b) *Dilución y calentamiento de los RSOU*: Se propone la adición de agua y calentamiento de la masa húmeda a 55 °C. Por lo tanto, la corriente resultante del primer paso, se lleva a un mezclador, donde se adiciona con una corriente de agua fresca (5,1 Ton/día según el balance de materia), para disminuir el porcentaje de sólidos totales en una proporción del 15%, y así cumplir la consideración de digestión anaerobia de sólidos en bajas concentraciones [19]. La corriente que resulta del mezclador, se introduce al biodigestor, en donde se va a realizar la degradación de la fracción orgánica a CH₄.

Se escogió HYSYS 3.2 para desarrollar el proceso porque este posee un ambiente de simulación que permite su interacción con Visual Basic para la creación de extensiones que trabajen con digestores anaerobios. Además, HYSYS 3.2 ofrece la opción de integrar el digestor anaerobio con las demás operaciones unitarias, para poder manejar los efluentes del digestor y así complementar la simulación del bioproceso. Además, cuenta con la posibilidad de incrementar la funcionalidad a través del uso de extensiones de otras operaciones unitarias, reacciones cinéticas y paquetes de propiedades. El modulo desarrollado y usado en la simulación,

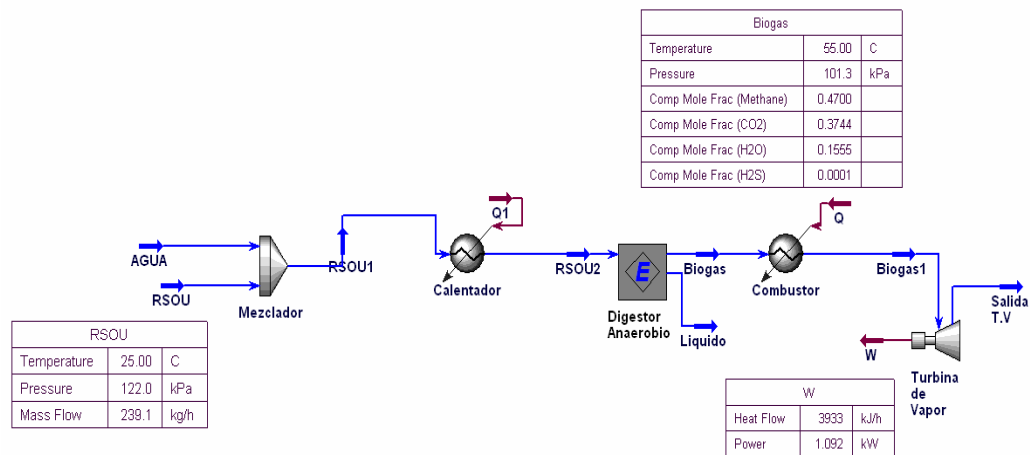
consta de un digestor anaerobio CSTR que se acoplo al simulador HYSYS 3.2. Esto se llevo a cabo a través de programación en Visual Basic y uso del paquete Extensión View Editor de Hysys. Todo esto se hace con el fin de trabajar efluentes sólidos en el digestor. La extensión fue desarrollada por los ingenieros Mario A. Hernández y Héctor J. Luna adscritos al Centro De Investigaciones y Estudios Ambientales CEIAM (2004).

Mediante la simulación del proceso en HYSYS 3.2, y considerando las condiciones de operación del reactor CSTR y flujo continuo, se determinó el volumen del biodigestor (60 m^3), la cantidad de biogás producido (34.3 Kg/h), así como el porcentaje de CH_4 (0.47) y CO_2 (0.37) dentro del biogás. La manera de representar la velocidad específica de crecimiento de los compuestos que participan en la digestión anaerobia a través de modelos cinéticos. Para la simulación del caso de estudio se utilizo el modelo de Monod. Jaques Monod (1942), estudio el efecto de la composición de un medio de cultivo libre de sustancias inhibitorias sobre la velocidad específica de crecimiento (anexo G).

C) *Captura, almacenamiento y la separación de los componentes gaseosos.* Sin embargo, para el caso de estudio no es necesaria dicha separación, ya que la cantidad de H_2S producido es despreciable (fracción molar 0.0001). La corriente de gas generada en el biodigestor es llevada a un combustor, y posteriormente el flujo resultante se introduce a una turbina de vapor con el fin de producir energía eléctrica. La turbina utilizada fue una aeroderivativa GE LM2500 [43], ésta fue escogida por que tiene altas eficiencias. Este tipo de turbina ha sido modificada para ser usada con biomasa, y consiste en colocar un expansor de baja presión para poder transformar la energía del gas caliente que sale de la cámara de combustión en energía mecánica y luego en energía eléctrica [43].

En la Figura 3 se presenta el esquema de HYSYS 3.2, correspondiente al proceso de biodigestión anaeróbica de sólidos de baja densidad, para el tratamiento de los RSOU.

Figura 3. Simulación de Proceso de Biodigestión Anaeróbica de Sólidos de Baja Densidad. HYSYS 3.2.



4.2.1 Parámetros calculados, mediante la simulación del proceso de digestión anaeróbica de los RSOU en HYSYS 3.2. La generación de energía eléctrica a partir de los RSOU, apunta al empleo de tecnologías con un alto índice de conversión energética, entre las que se encuentran el empleo de la digestión anaeróbica con una turbina aeroderivativa GE LM2500 de vapor, proceso que se caracteriza por un bajo índice de consumo de vapor por tonelada de residuo alimentado [43].

Las condiciones de operación usadas como referencia para la simulación del proceso de sólidos en baja concentración y requerimientos energéticos y de

eficiencia, para los diferentes equipos se tomaron de Tchobanoglous et al. (1994) y Elías et al. (2005), respectivamente. Estos se muestran en la tabla 7.

Tabla 7. Condiciones de operación de Hysys para la planta de digestión anaerobia.

EQUIPO	CONDICIONES OPERACIÓN	
MEZCLADOR	Temperatura (°C)	25
	Presion (Kpa)	122
	Flujo Agua (kg/h)	17,96
	Flujo Residuo (Kg/h)	239,1
CALENTADOR	ΔT (°C)	29,99
	Caida Presion (Kpa)	20,68
	Duty (KJ/h)	29050
	Flujo Entrada (Kg/h)	257
DIGESTOR ANAEROBIO CSTR	Temperatura (°C)	55
	Presion (Kpa)	101,3
	Volumen (m3)	60
	Tiempo retencion (dia)	10
	Flujo Entrada (Kg/h)	257
COMBUSTOR	ΔT (°C)	429,5
	Caida Presion (Kpa)	2
	Duty (KJ/h)	25000
	Flujo Entrada (Kg/h)	34,3
TURBINA DE VAPOR	ΔT (°C)	-58,62
	Caida Presion (Kpa)	-49,32
	Eficiencia	75
	Flujo Entrada (Kg/h)	34,33

Como el objetivo de la simulación es calcular el porcentaje de biogás (metano y dióxido de carbono) y la energía producida, en los resultados se muestran las corrientes de salida del digestor y el trabajo producido por la turbina. En la Tabla 8 se observan los valores calculados mediante la simulación del proceso de digestión anaerobia en HYSYS 3.2.

Tabla 8. Resultados obtenidos en las corrientes de salida del digestor y la turbina de vapor.

EQUIPO	CONDICIONES DE CORRIENTE SALIDA	
DIGESTOR ANAEROBIO CSTR	Fraccion masica CH ₄	0,47
	Fraccion masica CO ₂	0,374
	Fraccion masica H ₂ O	0,15
	Fraccion masica H ₂ S	0,0001
	Flujo masico (Kg/h)	34,33
TURBINA DE VAPOR	Flujo energia (KJ/h)	3933
	Potencia (KW)	1.092

Las fracciones de metano y dióxido de carbono se aproximan a las referencias. Ya que su composición debe ser aproximadamente de 50-60% de CH₄ y 40-50 % de CO₂. Los valores reportados por la simulación muestran un biogás rico en metano 47% y con una cantidad baja de H₂S, lo que es bueno porque no es necesaria la separación de este gas y los equipos no sufrirían daño por lo corrosivo de este compuesto. Es indispensable la eliminación de las pequeñas cantidades de las otras sustancias, para que el biogás sea de alta calidad. Generalmente la producción de metano por masa de residuo es inversamente proporcional al tiempo de retención hidráulico, es decir que a medida que el TRH disminuye la cantidad de biogás aumenta, por lo tanto es recomendable utilizar TRH menores a 10 días.

La cantidad de metano es competitiva en eficiencia y costos con otras formas de bioenergía incluyendo la generación de calor vía combustión, gases de síntesis y etanol. El valor de biogás está estimado en 1.25 \$US por millón de calorías tiene un valor combustible de 22000 KJ/m³.

Se observa que a partir de 1 tonelada de RSOU se producen 1.092 KW de energía y se alimentan a un generador eléctrico. De los cuales aproximadamente un cuarto

es utilizado para autoconsumo de la planta [45], y el resto representa beneficios al balance económico de la planta por su venta a la red eléctrica nacional, 79170 \$/h.

4.3 COSTOS DE INVERSIÓN TOTAL

Relación entre costos y capacidad.

En un estudio realizado (Miranda et al. 2001), tomaron datos de los costos de biodigestión por equipos, de una planta de un sistema de 50 MWe [45].

La relación general entre los costos y la capacidad viene dada por la ecuación siguiente:

$$\text{COST}_{\text{Size2}} / \text{COST}_{\text{Size1}} = [\text{SIZE}_2 / \text{SIZE}_1]^R$$

Donde:

El $\text{COST}_{\text{Size1}}$ es el costo base, para este costo se conocen los valores (Tabla 9), $\text{COST}_{\text{Size2}}$ es el que va hacer calculado, SIZE_2 es el flujo másico de alimentación de biomasa al sistema, SIZE_1 es el flujo másico base (es decir, 684 Ton/día de RSU) [45]. Los costos para cada equipo de la planta de biodigestión anaerobia con generación eléctrica y los factores de escalamiento R se presentan en la Tabla 9 [45].

Los costos de los equipos fundamentales de la biodigestión con base al flujo de 1 Ton/ día RSOU de determino por economías de escala, en comparación a una planta que tiene un flujo de 684 Ton/día de RSU y un sistema de 50 MWe.

Tabla 9. Costo de los equipos respecto al valor base[45].

EQUIPOS	COSTO BASE (Millones US\$)	FACTOR ESCALA [R]	COSTO (Millones US\$)
Mezclador	8,60E-03	0,8	1,6
Calentador (2)	2,90E-02	0,7	2,8
Digestor anaerobio CSTR	4,60E-02	0,7	4,5
Turbina de vapor	1,10E-02	0,85	3
Total Equipos	9,50E-02		11,9

4.3.1 Cálculo de la Inversión fija de la planta.. Para calcular la inversión total es necesario de terminar la inversión fija y la inversión de trabajo. La inversión fija se determina mediante la siguiente ecuación:

$$\text{Inversión fija (IF)} = \text{Inversión Directa (ID)} + \text{Inversión Indirecta (IIndirecta)}$$

Los porcentajes típicos de inversión directa e inversión indirecta se relacionan en la tabla 10 [46].

Tabla 10. Porcentajes típicos para calcular la inversión total de la planta.

% If	I. Directa	Precio USD \$
45	Equipo fundamental	45.493.260
4	Instalacion equipo fundamental	5.400.350
6	Instalacion cañerías	525.004
4	Instrumentacion equipos	4.688.500
4	Instalacion electrica	1.111.690
8	Edificacion	664.000
1	Terreno	700.000
6	Indumentaria de trabajo	510.000
% If	I. Indirecta	Precio USD \$
6	Ingenieria y supervision	1.500.000
10	Gastos construccion	2.950.000
6	Imprevistos	1.000.000

La inversión de trabajo se calcula mediante la siguiente expresión [46]:

$$\text{Inversión de Trabajo (Iw)} = [\text{Inversión Fija (I}_F\text{)} * 15] / 85$$

Determino entonces la inversión total:

$$\text{Inversión Total (IT)} = \text{Inversión Fija (IF)} + \text{Inversión de Trabajo (IW)}$$

Costo de inversión en dólares para el año 2001 de una planta de biodigestión anaeróbica con generación energética es:

Inversión Fija	21.487.208
Inversión de Trabajo	29.500.000
<i>Inversión Total</i>	<i>50.987.208</i>

De acuerdo al Plant Cost Index

El costo total de una planta de biodigestión anaeróbica con generación energética para el año es de USD\$ 50.987.208, este valor es llevado al costo presente (CP) en el 2007 por los índices que para el año 2001 es 347 y para el año 2007 es 525.

$$\text{CP} = \text{Costo Original} * (\text{Valor índice de tiempo presente} / \text{Valor índice original})$$

La inversión total de la planta llevada al valor presente para el año 2007 será de USD\$ 77.142.029.

Fuente: Max S. Peters, Klaus D. Timmerhaus., *Plant desing and economics for chemical engineers*, 4 Ed [46]

5. CONCLUSIONES

- Los RSOU de las ciudades colombianas presentan diferencias significativas en sus características físicoquímicas, las cuales se deben a la variedad de las especies vegetales y frutales de cada región, a las condiciones climáticas y del terreno del sitio de disposición final, y por las costumbres alimenticias de cada región.
- De acuerdo al modelo matemático utilizado para calcular el PE, se concluye que las 120.205 Ton/año de RSOU procedentes de CA y PM de las principales ciudades en Colombia, ofrecen 72.48 TJ/año de energía, que equivalen a reemplazar 19,8 GW/año, 2474Tec y 36 barriles de petróleo/día.
- El PE producido por los RSOU de Bogotá D.C., Medellín, Cali, Barranquilla y Bucaramanga, es 36 TJ/año, 11,7 TJ/año, 17,8 TJ/año, 5,6 TJ/año y 11,4 TJ/año respectivamente. Los 19765 MW/año totales producidos por estas cinco ciudades, es viable aprovecharlos para la generación eléctrica mediante una planta de digestión anaeróbica.
- La producción de biogás y de energía a partir de los RSOU, mediante un proceso de digestión anaerobia, se simuló en el software Hysys 3.2 reportando una potencia de 1.092 KW, flujo de biogás de 34.33 Kg/h con fracción másica de 0.47 CH₄, 0.37 CO₂ y trazas de otros componentes como H₂O Y H₂S; estos valores se aproxima a los reportados en estudios anteriores.

6. RECOMENDACIONES

- Se debe tomar una muestra y su respectivo duplicado para asegurar que su posterior caracterización sea de carácter representativo para la ciudad a la que pertenezcan. Teniendo en cuenta que las propiedades de los residuos generados pueden variar de una ciudad a otra; esto debido a que las costumbres alimenticias son diferentes según la región del país donde se encuentre ubicada.
- Para optimizar el proceso de digestión anaeróbica, se propone que los líquidos y lodos que salen del efluente del biodigestor, sean separados y tratados, para obtener agua depurada que pueda ser recirculada al mezclador y un lodo o material orgánico estabilizado que sea utilizado en compostaje y tratamiento de aguas residuales.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] Ministerio del Medio Ambiente, Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales. Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo Humano Sostenible. Primera Comunicación Nacional de Colombia ante la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático. Bogotá, 2001. p. 148.
- [2] Superintendencia de Servicios Públicos Domiciliarios. Estudio de la Recolección y Sitios de Disposición Final de los Residuos Sólidos en Colombia. Bogotá. 2002. Informe anual.
- [3] Bhattacharya, S.C.; Abdul Salam, P.; Hu Runqing, H.I. Somashekar, D.A. Racelis, P.G. Rathnasiri, Rungrawee Yingyuad. 2005. An assessment of the potencial for non-plantation biomasa resources in selected asian countries for 2010. *Journal of Energy conservation & Management*, vol 29: pag 153-166.
- [4] Islas, J.; Manzini, F.; Maserá, O. 2006. A prospective study of bioenergy use in Mexico. *Journal of Energy conservation & Management*, vol 32: pag 2306-2320.
- [5] Chaya, W.; Gheewala, S.H. 2006. Life cycle assessment of MSW to energy schemes in Thailand. *Journal of Cleaner Production*, vol 15: pag 1463-1468
- [6] Jiang, J; Sui, J; Wu, S; Yang, Y; Wan, LI. 2007. Prospects of anaerobic digestion technology in China. *Journal of Science & Technology*, vol 12, pag 435-440.

[7] Zupancica, G.D.; Uranjek, N.; Ros, M. 2007. Full-Scale anaerobic co-digestion of organic waste and municipal sludge. *Journal of Science & Technology*, vol 32: pag 162-167.

[8] Gajdos, R. 1998. Bioconversion of organic waste by the year 2010: to recycle elements and save energy. *Journal of Conservation and Recycling*, vol 23: pag 67-86.

[9] Kiely, G; Tayfur, G; Dolan, C; Tanji, K. 1996. Physical and mathematical modeling of anaerobic digestion of organic wastes. *Journal of Water Research*, vol 31: pag 534-540.

[10] Krzystek, L; Ledakowicz, S; Hans-Joachim, K; Kaczorek, K. 2001. Degradation of household biowaste in reactors. *Journal of Biotechnology*, vol 92: pag 103-112.

[11] Leung, M.K.H.; Leung, D.Y.C. 2007. Energy and exergy analysis of hydrogen production by solid oxide steam electrolyzer Plant. *Journal of Hydrogen Energy*, vol 32: pag 4648-4660.

[12] Duerr, M.; Gair, S.; Cruden, A.; McDonald, J. 2006. Hydrogen and electrical energy from organic waste treatment. *Journal of Biotechnology*, vol 32: pag 705-709.

[13] Champagne, P. 2006. Feasibility of producing bio-ethanol from waste residues: A canadian perspective. *Journal of Conservation and Recycling*, vol 50: pag 211-230.

[14] Cardona, C; Sánchez, O; Ramírez, J. 2004. Biodegradación de residuos orgánicos de plazas de mercado. *Revista colombiana de biotecnología*, vol No. 2: pag 78-89.

- [15] Formulación del plan de gestión integral de residuos sólidos regional del Valle de Aburrá. Gobernación de Antioquia. Medellín. 2006.
- [16] IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories, 2006. Volume 5, Cap 3.
- [17] Junfeng, L; Runqing, H; Yanqin, S; Jingli, S; Bhattacharya, S; Salam, A. 2005. Assessment of sustainable energy potential of non-plantation biomass resources in China. *Journal of Biomass and Bioenergy*, vol 29: pag 167-177.
- [18] Perera, K; Rathnasiri, P; Senarath, S; Sugathapala, A; Bhattacharya, S; Salam, A. 2005. Assessment of sustainable energy potential of non-plantation biomass resources in Sri Lanka. *Journal of Biomass and Bioenergy* vol 29: pag 199–213.
- [19] Tchobanoglous, G.; Theisen, H.; Vigil, S. 1994. Gestión integral de residuos sólidos. Madrid, Ed McGraw-Hill. Cap 2, 4, 6.
- [20] Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial (MAVDT). República de Colombia. Proyección de la generación de residuos sólidos en Colombia. Revista Virtual. 2005.
- [21] Serrano, C. 2007. Alternativas de utilización del biogás de rellenos sanitarios en Colombia. UPME.
- [22] Chandler, J.A.; Jewell, W.J.; Gossett, J.M. 1980. Predicting methane fermentation biodegradability. *Journal of Biotechnology and Bioengineering Symposium* vol 10: pag 93-107.

- [23] Kayhanian, M. 1995. Biodegradability of the organic fraction of municipal solid waste in a high-solids anaerobic digester. *Journal of Waste Management and Research* vol 13: pag 123-136.
- [24] Richard, T. 1996. The effect of lignin on biodegradability. *Journal of Science & Engineering*, vol 28: pag 1411-1416.
- [25] Ağdağ, O. N. and Sponza, D. T. 2005. Co-digestion of industrial sludge with municipal solid wastes in anaerobic simulated landfilling reactors. *Journal of Process Biochemistry*, vol 40: pag 1871–1879.
- [26] Bezama, A., Aguay, P., Konrad, O., Navia, R. and Lorder, K. 2007. Investigations on mechanical biological treatment of waste in South America: Towards more sustainable MSM management strategies. *Journal of Waste Management*, vol 27: pag 228-237.
- [27] Borzacconi, L., López, I. and Viñas, M. 1995. Application of anaerobic digestion to the treatment of agroindustrial effluents in Latin America. *Journal of Sci. and Tech* vol 32: pag 105-111.
- [28] Bouallagui, H., Touhami, Y., Cheikh, R. B. and Hamdi, M. 2005. Bioreactor performance in anaerobic digestion of fruit and vegetable wastes. *Journal of Process Biochemistry* vol 40: pag 989–995.
- [29] Diaz, M., Espitia, V. y Molina, P. 2002. Digestión Anaerobia. Una aproximación a la Tecnología. *Universidad Nacional de Colombia. Instituto de Biotecnología*. Primera edición, pag 546–556.

- [30] Griffin, M. E., McMahon, K. D., Mackie, R. I. and Raskin, L. 1998. Methanogenic population dynamics during start-up anaerobic digesters treating municipal solid waste and biosolids. *Journal of Biotechnology and Bioengineering* vol57: pag 342-355.
- [31] Castillo, E., Cristancho, D. and Arellano, V. 2006. Study of the operational conditions for anaerobic digestion of urban solid wastes. *Journal of Waste Management*. vol 26: pag 546–556.
- [32] Demirer, G. N. and Chen, S. 2005. Two-phase anaerobic digestion of unscreened dairy manure. *Journal of Process Biochemistry* vol 40: pag 3542–3549.
- [33] Sosnowski, P., Wiczorek, A. and Ledakowicz, S. 2003. Anaerobic co-digestion of sewage sludge and organic fraction of municipal solid wastes. *Journal of Advances in Environmental Research* vol 7: pag 609-616.
- [34] Fricke, K., Santen, H. and Wallmann, R. 2005. Comparison of selected aerobic and anaerobic procedures for MSW treatment. *Journal of Waste Management* vol 25: pag 799–810.
- [35] Hartmann, H. and Ahring, B. 2005. Anaerobic digestion of the organic fraction of municipal solid waste: Influence of co-digestion with manure. *Journal of Water Research* vol 39: pag 1543–1552.
- [36] Qian, X. and Morton, A. B. 1996. Enumerations of anaerobic refuse-decomposing microorganisms on refuse constituents. *Journal of Waste Management & Research* vol 14: pag 151–161.

[37] Departamento Administrativo Nacional de Estadísticas, DANE. Censo General 2005. Republica de Colombia Colombia.

[38] www.astm.org - Norma ASTM 5231-92 - “Standard Test of the Composition of Unprocessed Municipal Solid Wastes “.

[39] Elias, X. 2005. Tratamiento y valorización energética de los residuos. Fundación Universitaria Iberoamericana. Ed. Diaz de Santos. España. Cap 9, 11, 12.

[40] Perry, R; Green, D. 1999. Perry’s Chemical Engineers’ Handbook. 7 Ed. Editorial McGraw-Hill. Pag 678.

[41] Uribe, W; Villamizar, O; Sabalza, O. 2008. Potencial energético de la biomasa de los residuos sólidos urbanos orgánicos (RSOU) en Colombia. Centro de Investigaciones Ambientales – CEIAM. Cuba.

[42] ROJAS G, A.; BARRAZA B, J. Caracterización morfológica del carbonizado de carbones pulverizados: determinación experimental. Universidad de Antioquia. Medellín 2008, no.43: pag 42-58.

[43] RODRIGUEZ M., ANDRE FAAIJ P. 2003. Technoeconomic analysis of co.fried biomass integrated gasification/combined cycle systems with inclusión of economies of scale. *Journal of Energy* vol. 28: pag. 1229-1258.

[44] Castillo, E., Cristancho, D., Vergara, M. 2007. Digestión anaerobia una alternativa para el tratamiento de los residuos sólidos urbanos. Centro de Investigaciones Ambientales – CEIAM. Cap 1, 4, 5.

[45] Miranda, G., Poirrier, P., Chamy, R. 2001. Evaluación técnico-económica de la implementación de un sistema de tratamiento anaerobio con generación energética, de la fracción orgánica de los residuos sólidos urbanos. XIV Congreso de Ingeniería Sanitaria y Ambiental. AIDIS. Chile.

[46] MAX PETERS S., KLAUS TIMMERHAUS D. Plant desing and economics for chemical engineers. 4 Ed., pág. 150-180.

ANEXOS

ANEXO A. PROTOCOLO DE MUESTREO

Para diseñar un procedimiento de toma de muestra en los centros de acopio se debe tener en cuenta que en cada centro de acopio se tiene una forma distinta para la recolección de los residuos sólidos, por ende es responsabilidad del profesional de campo (persona que toma la muestra) asegurar que la muestra sea representativa teniendo en cuenta la gran variedad de residuos que se producen en una plaza o centro de acopio.

La metodología del muestreo utilizada es la determinada por la Norma ASTM 5231-92 - “Standard Test of the Composition of Unprocessed Municipal Solid Wastes“ la cual hace muestreo en camiones recolectores, por tanto se plantea adaptar la norma al caso en el cual el muestreo se hace directamente en el centro de acopio. Constituyéndose este en la unidad muestral primaria.

1. Suponiendo que toda la basura se encuentra en una única pila o montón, se debe cuartear esta pila según su tamaño, a mayor tamaño, mayor número de divisiones en el cuarteo (estas pueden ir de 4 a 10 según el tamaño de la pila). De cada sección se toma una muestra de la parte superior externa de la pila, en el caso que sean tres divisiones sería un total de tres muestras superficiales y de la parte del interior otras tres muestras a la mitad de profundidad de la pila. La cantidad de muestra tomada en cada sección depende del número de secciones, esta cantidad debe ser tal, que al sumar todas las muestras provenientes de cada sección de un total de 300 Kg. Aproximadamente (muestra primaria).

2. Si la basura se encuentra en varias pilas, se debe tomar una muestra de cada pila bajo las mismas condiciones del punto 1. Asegurándose que al final se obtengan 300 Kg. de muestra aproximadamente (muestra primaria).
3. Se debe asegurar un área plana y nivelada para la descarga de la muestra primaria obtenida. La superficie debería ser barrida o cubierta con una lona limpia durable, antes de la descarga de los desechos.
4. Esta muestra debe garantizar su homogeneidad, se debe mezclar muy bien para evitar que existan sectores donde haya predominio de algún componente, esta faena se realiza con palas o rastrillos. La utilización de una pala amplia o un recogedor con al menos un ancho de (0.765-m3), hasta que la muestra quede completamente mezclada. Luego se debe conformar la *unidad muestral secundaria* (150 kg.).
5. En seguida de los cuarteos y la homogenización de la unidad muestral secundaria, se separarán alrededor de 80 kg., que constituyen la *unidad muestral terciaria*, Esta muestra es sometida a una separación según los parámetros del grafico 2 y la tabla 2.
6. Si un artículo de sobre-tamaño compone un por ciento de peso grande de la muestra de clasificación, añada una notación sobre la hoja de datos y péselo, de ser posible.
7. Pese y etiquete todos los contenedores de almacenaje dependiendo del tipo de residuo.
8. Posicionar los contenedores de almacenaje alrededor de la muestra de clasificación. Vacíe todos los contenedores de la muestra de clasificación.

Segregue cada artículo de desecho y colóquelo en el contenedor de almacenaje apropiado.

9. En el caso de artículos compuestos encontrados en la basura, separe los materiales individuales donde sea práctico, y coloque los materiales individuales en los contenedores de almacenaje apropiados. Donde sea poco práctico segregar los artículos compuestos.

10. La clasificación sigue hasta que el tamaño de partícula máximo de las partículas de los desechos restantes sea aproximadamente 0.5 in. (12.7 mm). En este punto, reparta las partículas restantes en los contenedores de almacenaje correspondiente a los componentes de desecho representados en la mezcla restante. La Repartición será lograda haciendo una estimación visual de la fracción de masas de componentes de desecho representados en la mezcla restante.

11. Registrar el peso bruto de los contenedores de almacenaje y vacíe los contenedores de almacenaje y péselos otra vez, de ser apropiado. La repesada es importante y necesario si los contenedores se absorben la humedad cargada, por ejemplo, de la basura mojada.

12. Posteriormente los residuos deben ser mezclados (solo la fracción orgánica de rápida degradación), si el tamaño de partícula de la muestra es muy grande, disminuirlo con machete de tal forma que se pueda sacar una muestra final de 4 kg para enviar al laboratorio, es conveniente aclarar que cada muestra debe tener su duplicado.

13. La muestra será almacenada en una bolsa ziploc, que debe estar debidamente etiquetada con los datos de la persona que toma la muestrea, tipo de muestra, fecha de toma de la muestra. Su posterior mantenimiento y traslado

hacia el Laboratorio se debe realizar bajo refrigeración y en el menor tiempo posible, para evitar variaciones en las características de la muestra.

14. Limpiar el sitio de clasificación, de todos los materiales de desecho.

15. Reunir la muestra de centró abastos con la muestra proveniente de la plaza, la cual debe ser tomada de igual forma.(2,4 kg de la plaza y 1,6 de Centró abastos).

16. Mezclar y homogenizar la muestra de plaza con la del centro de acopio, se debe tomar la muestra y su duplicado cada una de 2 kilogramos.

17. Para la toma de la muestra de poda se realiza el mismo procedimiento descrito para las muestras de residuos de plaza.

**ANEXO B. CANTIDAD PROMEDIO DE RESIDUOS GENERADOS POR LOS CA
 Y LAS PM SUMINISTRADOS POR LAS CORRESPONDIENTES ENTIDADES
 DE ASEO EN CADA CIUDAD**

CIUDAD	ENTIDAD	PLAZAS	PROMEDIO MENSUAL
BOGOTA D.C	UNIDAD ESPECIAL DE SERVICIOS PUBLICOS (UESP)	Corabastos	2379.60
		Trinidad Galán	46.50
		7 de Agosto	108.80
		Concordia	2.00
		El Carmen	13.30
		Perseverancia	21.90
		San Benito	8.30
		San Francisco	6.70
		12 de Octubre	25.00
		La Macarena	49.50
		Tunjuelitos	1.30
		Las Cruces	8.80
		Rumichaca	6.60
		San Carlos	2.70
		Ismael Perdomo	3.10
		Paloquemao	160.80
		Lucero	3.30
		Samper Mendoza	37.30
		20 de Julio	29.82
		Kennedy	14.03
Fontibón	21.85		
Quirigua	13.33		
Las Ferias	29.47		
Restrepo	70.52		
Santander	11.48		
MEDELLIN	EMPRESAS VARIAS DE MEDELLIN (EEVVM)	Central Mayorista	750.00
		De la América	12.00
		De las Flores	15.00

**EVALUACION DEL POTENCIAL ENERGETICO DE LOS RESIDUOS SÓLIDOS ORGANICOS
PROVENIENTES DE LAS PLAZAS DE MERCADO Y DISEÑO CONCEPTUAL DE UNA PLANTA DE
DIGESTION ANAEROBIA PARA SU APROVECHAMIENTO INDUSTRIAL EN COLOMBIA**

		Central Minorista	318.00
		Itagüí	106.46
		Bello	109.46
		Copacabana	1.973
CALI	EMPRESA DE SERVICIOS PUBLICOS Y ASEO DE CALI (EMSIRVA)	Cavasa	150.00
		La Nave	110.67
		Santa Helena	1060.32
		La Floresta	121.71
		El Porvenir	49.93
		Alfonso López	29.36
		Alameda	98.94
BARRANQUILLA	EMPRESA DE ACUEDUCTO, ALCANTARILLADO Y ASEO DE BARRANQUILLA (TRIPLE A)	Granabastos	138.51
		Mercados Públicos de Barranquilla	400.50
		Mercados Públicos Fedecafe	42.11
		Mercados Públicos el Playón	187.75
		Mercados Antigua Sede E.P.M	45.34
BUCARAMANGA	EMPRESA DE ASEO DE BUCARAMANGA (EMAB)	CentroAbastos S.A	303.62
		Guarín	31.46
		Concordia	69.55
		Central	221.10
		Girón	55.00
		Satélite	35.73
		Floridablanca	101.26

ANEXO C. CONSIDERACIONES DE DISEÑO PARA LA DIGESTIÓN ANAEROBIA DE SÓLIDOS EN BAJA CONCENTRACIÓN PARA RSOU

TABLA 14.11

Consideraciones importantes de diseño para la digestión anaerobia de sólidos
 en bajas concentraciones de la fracción orgánica de los RSU

Componente de residuos	Observaciones
Tamaño del material	Los residuos que se van a digerir deberían triturarse hasta un tamaño que no interfiera el funcionamiento eficaz de las operaciones de bombeo y mezcla.
Equipamiento de mezclado	Para lograr resultados óptimos y para evitar la acumulación de capas de impurezas, se recomienda un mezclado mecánico.
Porcentaje de residuos sólidos mezclados con fangos	Aunque se han utilizado unas cantidades de residuos que varían desde el 50 al 90+ por 100, el 60 por 100 parece ser una proporción razonable.
Tiempo medio de retención hidráulica	El tiempo mínimo está en el rango de tres a cuatro días. Utilizar de 10 a 20 días para el diseño, o basar el diseño en resultados de estudios piloto.
Tasa de carga	De 0,6 a 1,6 kg/m ³ · d. Actualmente no está bien definido. Se ha informado de tasas significativamente más altas.
Concentración de sólidos	Igual o menor que del 8 al 10 por 100 (del 4 al 8 por 100, típico).
Temperatura	De 30 a 38 °C para un reactor mesofílico y entre 55 y 60 °C para un reactor termofílico.
Destrucción de residuos sólidos volátiles	Depende de la naturaleza de las características de los residuos. Varía aproximadamente desde el 60 al 80 por 100; el 70 por 100 puede utilizarse para propósitos de estimación.
Sólidos totales destruidos	Varía desde el 40 al 60 por 100, según la cantidad del material inerte originalmente presente.
Producción de gas	De 0,5 a 0,75 m ³ /kg de sólidos volátiles destruidos (CH ₄ = 55 por 100; CO ₂ = 45 por 100).

Fuente: Tchobanoglous et al. (1994)

ANEXO D. COMPARACIÓN DEL ANÁLISIS FÍSICOQUÍMICO DE LOS RSOU Y CARBÓN DEL CERREJON.

En comparación a otras fuentes de energía no renovables y combustibles fósiles como el carbón, se observa que el contenido de cenizas de la biomasa como fuente de energía es muy bajo, y a su vez, el contenido de material volátil es muy elevado. Lo que representa una ventaja frente a este tipo de combustibles, para su aprovechamiento energético.

Análisis Próximo en Base Seca RSOU-Plazas			
	Ceniza	CF	MV
Promedio Plazas	10,32	17,00	68,13
Análisis Próximo en Base Seca Carbón Cerrejón			
	Ceniza	CF	MV
Cerrejón Colombia	11,68	52,77	35,55

En los resultados reportados para el análisis último o elemental, se observan contenidos medio-bajos de carbono orgánico total y altos de oxígeno para todas las muestras, en comparación a las presentes en el carbón fósil. Razón por la cual la biomasa posee menor contenido energético que los combustibles de origen fósil, ya que en ellos es mayor la cantidad de enlaces C-C.

Análisis último en Base Seca RSOU-Plazas						
	%COT	%H	%O	%N	%S	Cenizas
Promedio	34,21	5,36	42,75	1,67	0,05	8,64
Análisis último en Base Carbón Cerrejón						
	%COT	%H	%O	%N	%S	Cenizas
Carbón Cerrejón	73,74	5,3	8,53	1,18	0,79	10,32

ANEXO E. COMPARACIÓN DEL ANÁLISIS FISIQUÍMICO DE LOS BR DE PLAZAS CON DATOS TEÓRICOS

En este anexo se presenta la comparación de la caracterización fisicoquímica realizada para los RSOU en Colombia, con las reportadas en la literatura por autores como Tchobanoglous y Elías, las cuales presentan caracterizaciones similares, también con fines energéticos.

Ambos autores presentan la caracterización fisicoquímica para los residuos sólidos urbanos en general, sin embargo, esta se puede aproximar a la caracterización del objeto de estudio que son los RSOU, ya que en estos estudios hacen una clasificación entre los principales componentes de los RSU, como son los residuos de comida, y residuos de frutas y hortalizas mezclados. Estos pueden ser comparados y aproximados con los residuos orgánicos que se obtuvieron en las plazas de mercado y centros de acopio.

Parámetro	Unidad	Tchobanoglous; 1994		Elías; 2005		Atlas Biomasa; 2007	
		Rango	Valor Típico	Rango	Valor Típico	Rango	Promedio
ANÁLISIS BÁSICO							
HUMEDAD	% p/p	60 - 90	75	50 - 80	74	84,14 - 92,85	88,69
SOLIDOS TOTALES	% p/p	7,0 - 15	11	NR	13	7,15 - 15,86	11,31
ANÁLISIS PRÓXIMO EN BASE SECA							
MATERIAL VOLATIL	% p/p	40 - 60	52,0	NR	65,8	48,75 - 79,50	68,13
CARBONO FIJO	% p/p	4,0 - 15	4,0	NR	18,2	9,07 - 22,83	17,00

**EVALUACION DEL POTENCIAL ENERGETICO DE LOS RESIDUOS SÓLIDOS ORGANICOS
PROVENIENTES DE LAS PLAZAS DE MERCADO Y DISEÑO CONCEPTUAL DE UNA PLANTA DE
DIGESTION ANAEROBIA PARA SU APROVECHAMIENTO INDUSTRIAL EN COLOMBIA**

CENIZAS	% p/p	2,0 - 8,0	5,0	NR	15,9	8,05 - 37,65	14,88
ANALISIS ELEMENTAL EN BASE SECA							
CARBONO	% p/p	47 - 49	48,0	NR	44,0	27,74 - 42,35	34,21
HIDROGENO	% p/p	6,0 - 7,0	6,3	NR	5,2	4,72 - 6,04	5,36
OXIGENO	% p/p	37 - 40	38,6	NR	34,3	36,95 - 48,41	42,75
NITROGENO	% p/p	1,0 - 3,0	2,0	NR	0,5	1,39 - 2,05	1,67
AZUFRE	% p/p	0,1 - 0,4	0,2	NR	0,1	0,0026 - 0,1	0,05
OTROS PARAMETROS							
SOLIDOS VOLATILES	% p/p	NR	NR	60 - 80	70	62,35 - 91,51	85,12
MATERIA ORGANICA	% p/p	NR	NR	40 - 90	84	47,79 - 73,02	58,97
C/N	% p/p	NR	NR	12,0 - 25	13	18,24 - 25,93	21,00

ANEXO F. NÚMERO DE MUESTRAS DEL SECTOR RSOU

NUMERO DE MUESTRAS DEL SECTOR RSOU				
RESIDUO	REGIÓN	UBICACIÓN		N° de Muestras
		DEPARTAMENTO	CIUDAD	
PLAZAS	Norte	Atlántico	Barranquilla	2
	Oriental	Santander	Bucaramanga	2
	Occidental	Antioquia	Medellín	2
	Central	Cundinamarca	Bogotá	2
	Sur	Valle del Cauca	Cali	2
TOTAL MUESTRAS				10

ANEXO G. MODELO MATEMÁTICO Y BALANCES DE MATERIA PARA EL DIGESTOR CSTR

5.4 MODELO MATEMÁTICO

Las ecuaciones que constituyen el modelo son los balances de masa para cada componente (sustratos primarios e intermedios) en estado estacionario; estas ecuaciones se expresan como se describe en la ecuación (43) para cualquier reactante haciendo cero el término de velocidad de acumulación.

5.4.1 BALANCES DE MATERIA. La conexión entre la biomasa y los sustratos son el factor fundamental para comprender los sistemas microbianos para el control de la contaminación. Debido a que estas conexiones deben hacerse sistemática y cuantitativamente para la ingeniería de diseño y la operación de los sistemas, los balances de materia resultan un procedimiento esencial. El balance de materia referido a cualquier reactante (o producto) para un elemento de volumen de reacción es:

$$\left[\begin{array}{c} \text{Velocidad de acumulación} \\ \text{del reactante en el} \\ \text{elemento de volumen} \end{array} \right] = \left[\begin{array}{c} \text{Velocidad de entrada} \\ \text{del reactante al} \\ \text{elemento de volumen} \end{array} \right] - \left[\begin{array}{c} \text{Velocidad de salida} \\ \text{del reactante del} \\ \text{elemento de volumen} \end{array} \right] - \left[\begin{array}{c} \text{Velocidad neta de consumo} \\ \text{del reactante en el} \\ \text{elemento de volumen} \end{array} \right] \quad (43)$$

5.4.2 BALANCES DE MATERIA PARA EL DIGESTOR CSTR. En un reactor CSTR la composición del medio reaccionante es la misma en todos los puntos a cada instante, y la

composición de la corriente de salida es la misma a la del interior del reactor. Así, el balance escrito para el elemento de volumen es aplicable al reactor "completo".

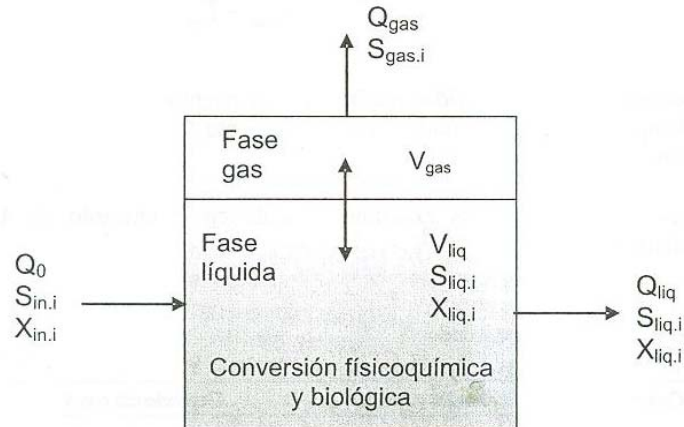


Figura 4. Esquema de un reactor CSTR

5.4.2.1 Fase líquida. En la fase líquida se encuentra el material orgánico soluble e insoluble del efluente a tratar así como los compuestos inorgánicos y la biomasa.

Balance para el material orgánico insoluble. El material orgánico insoluble está constituido por carbohidratos y proteínas.

Carbohidratos:

$$Q_o * C_{CINS}^o - Q_s * C_{CINS} + V * Y_e * k_{CHID} * C_{CINS} = 0 \quad (44)$$

donde:

Y_e = Eficiencia enzimática.

Q_o = Flujo Volumétrico de entrada (L^3/T).

Q_s = Flujo Volumétrico de salida (L^3/T).

C_{CINS}^o = Concentración de carbohidratos insoluble de entrada (M/L^3).

C_{CINS} = Concentración de carbohidratos insoluble a la salida (M/L^3).

V = Volumen de reacción (L^3).

K_{CHID} = Constante de hidrólisis de carbohidratos (T^{-1}).

Proteínas:

$$Q_o * C_{pINS}^o - Q_s * C_{pINS} + V * Y_p * k_{pHID} * C_{pINS} = 0 \quad (45)$$

Y_p = Eficiencia enzimática.

C_{pINS}^o = Concentración de proteínas insoluble (M/L^3).

K_{pHID} = Constante de hidrólisis de proteínas (T^{-1}).

Balance para el material orgánico soluble. El material orgánico soluble está definido por carbohidratos, proteínas y lípidos.

Carbohidratos:

$$Q_o * C_{cs}^o - Q_s * C_{cs} + V * Y_{cs}^{acidc} * \mu_{acidc} * X_{acidc} + V * Y_e * k_{CHID} * C_{CINS} = 0 \quad (46)$$

donde:

Y_{cs}^{acidc} = Coeficiente de rendimiento de la etapa acidogénica de carbohidratos soluble (M_s/M_x).

μ_{acidc} = Velocidad específica de crecimiento de las bacterias acidogénicas de carbohidratos soluble (T^{-1}).

X_{acidc} = Concentración de las bacterias acidogénicas de carbohidratos (T^{-1}).

C_{cs} = Concentración de carbohidratos solubles (M_s/L^3).

Proteínas:

$$Q_o * C_{ps}^o - Q_s * C_{ps} + V * Y_{ps}^{acidp} * \mu_{acidp} * X_{acidp} + V * Y_p * k_{pHID} * C_{pINS} = 0 \quad (47)$$

donde:

Y_{ps}^{acidp} = Coeficiente de rendimiento de la etapa acidogénica de proteínas soluble (M_s/M_x).

μ_{acidp} = Velocidad específica de crecimiento de las bacterias acidogénicas de proteínas soluble (T^{-1}).

X_{acidp} = Concentración de las bacterias acidogénicas de proteínas (T^{-1}).

C_{ps} = Concentración de proteínas soluble (M_s/L^3).

Lípidos:

$$Q_o * C_{GTO}^o - Q_s * C_{GTO} + V * Y_{GTO}^{lip} * \mu_{lip} * X_{lip} = 0 \quad (48)$$

donde:

Y_{GTO}^{lip} = Coeficiente de rendimiento de la etapa lipídica (M_s/M_x).

μ_{lip} = Velocidad específica de crecimiento de las bacterias lipídicas (T^{-1}).

X_{lip} = Concentración de las bacterias lipídicas (T^{-1}).

C_{GTO} = Concentración de lípidos (M_s/L^3).

Balance para sustratos intermedios (AGV). Se puede considerar una ecuación de balance general para los AGV (acético, propiónico, butírico y valérico):

$$Q_o * C_j^o - Q_s * C_j + \sum_{k=1}^{k=6} V * Y_j^k * \mu_k * X_k = 0 \quad (49)$$

donde los subíndice y superíndices son:

j = Hace referencia a una especie química.

K= Especie biológica o etapa de degradación en la que interviene.

_o = Entrada.

_s = Salida.

El coeficiente de rendimiento Y_j puede ser positivo (+), negativo (-) o cero (0) si la especie química j se produce, consume o no toma parte en la etapa de degradación k en cuestión. La sumatoria desde k=1 hasta 6 representa la utilización o producción total del sustrato intermedio j en el proceso de degradación. El hecho de que en una de las etapas k actúe como "reactivo" o "producto" lo reflejará el signo algebraico de Y_j^k .

Balance de materia general para la especie biológica k:

$$Q_o * X_k^o - Q_s X_k + V * (\mu_k - u_k) * X_k = 0 \quad (50)$$

donde:

U_k = Coeficiente de decaimiento para la biomasa suspendida (T^{-1}).

5.4.2.2 Fase gaseosa. Los productos finales del proceso de la digestión anaerobia son biogás (metano, dióxido de carbono y ácido sulfhídrico), agua y biomasa. Así las ecuaciones que describen la fase gaseosa son solamente los balances de materia de metano, dióxido de carbono y ácido sulfhídrico por lo que quedan determinados por la siguiente ecuación general:

$$Q_o * C_j^o - Q_s * C_j + \sum_{k=1}^{k=6} V * Y_j^k * \mu_k * X_k - V * K_{lg} (C_j^d - \frac{1}{H_j} * P_t * y_j) = 0 \quad (51)$$

donde:

H_j = Constante de Henry para cualquier componente ($atm * l/mol$).

K_{lg} = Coeficiente de transferencia de masa (T^{-1}).

P_t^g = Presión total (atm).

y_j = Fracción molar (M_x/M_x).

El superíndice _d significa disuelto.

*Esta ecuación muestra que el último término representa la transferencia líquido – gas del componente en cuestión. Para los componentes que no tienen transferencia, este término se anula de la ecuación. Aprovechando la integración del módulo al simulador HYSYS se realiza la transferencia de líquido – gas de los compuestos que van a estar presentes en el biogás a través de un flash.

5.4.2.3 Cálculo del pH. El valor del pH fue determinado por el equilibrio iónico de los componentes presentes en el líquido. Para esto se planteó un balance de cargas global de la siguiente forma:

$$[H^+] - [OH^-] = Ch(pH) \quad (52)$$

donde :

Es el pH dependiente de la carga iónica.

$$Ch(pH) = [HCO_3^-] + 2[CO_3^{2-}] + \sum [AGV^-] + [proteinas^-] - [NH_4^+] - [proteina^+] \quad (53)$$

Para mantener la exactitud numérica y evitar un desbordamiento la ecuación anterior se resolvió como sigue:

Para $Ch(pH) > 0$

$$[H^+] = \frac{Ch(pH) + \sqrt{Ch(pH)^2 + 4 * k_w}}{2} \quad (54)$$

Para $Ch(pH) < 0$

$$[H^+] = \frac{2k_w}{-Ch(pH) + \sqrt{Ch(pH)^2 + 4 * k_w}} \quad (55)$$

con este valor se procedió a calcular el pH:

$$pH = -\log[H^+] \quad (56)$$

5.4.3 BALANCE DE MATERIA PARA EL DIGESTOR UASB.

Este sistema consiste de dos digestores CSTR idénticos (Seghezzo, L. y Cardón, L. ,2001). En el primer digestor tiene lugar la hidrólisis del material particulado, mientras en el segundo se produce la acidogénesis, la acetogénesis y la metanogénesis de los compuestos solubles producidos durante la hidrólisis, en esta etapa se asumió el modelo cinético de primer orden y para las otras etapas del proceso los modelos cinéticos mencionados en el sistema del reactor CSTR.

Los balances de masas se desarrollaron siguiendo la misma metodología que para el modelo del digestor anaerobio CSTR. El esquema conceptual de este sistema se presenta en la figura 5.

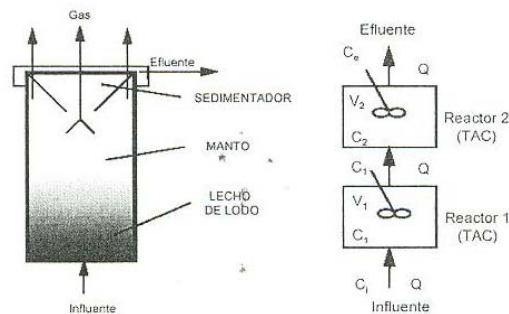


Figura 5. Esquema conceptual del reactor UASB

ANEXO H. MODELO CINÉTICO PARA LA DIGESTIÓN ANAEROBIA

La manera de representar la velocidad específica de crecimiento de los compuestos que participan en la digestión anaerobias a través de modelos cinéticos, los cuales se han estudiado ampliamente, presentándose una gran variedad que describen este fenómeno.

Para la simulación del caso de estudio se utilizó el modelo de Monod, descrito a continuación.

Jacques Monod (1942), estudio el efecto de la composición de un medio de cultivo libre de sustancias inhibitorias sobre la velocidad específica de crecimiento expresada así;

$$\mu = \mu_{\max} * \frac{S}{K_s + S}$$

Donde;

μ_{\max} = velocidad máxima de crecimiento específico. (T^{-1})

K_s = constante de saturación de Monod. (MsL-3)

S = concentración de sustrato

Esta ecuación es una representación matemática adecuada para una transición suave desde una relación de primer orden (en S) a baja concentración, a una relación de orden cero (en S) a alta concentración.

Esta ecuación puede ser considerada como la combinación de las expresiones que describen el comportamiento a bajas y altas concentraciones (Rittmann, M., 2001);

$$\mu = \mu_{\max} \quad \text{para } S \gg K_s$$

$$\mu = \frac{\mu_{\max}}{K_s} * S \quad \text{para } S \gg K_s$$

Con el propósito de lograr la representación de los datos experimentales con mayor grado de ajuste. La cinética de Monod es una relación empírica que encuentra amplia aplicación en sistemas microbianas.

ANEXO I INTERFACE DE LA EXTENSIÓN PARA HYSYS 3.2

Interfaz de la extensión (EDF). La interfaz de la extensión vista en HYSYS es creada a través del Extension View Editor, este es el punto para declarar y almacenar variables, es decir, el archivo EDF es la conexión entre el código elaborado en Visual Basic para la operación (DLL) y el entorno de trabajo en HYSYS.

La construcción de la interfaz involucra dos aspectos importantes, los cuales son; el desarrollo de las vistas de los equipos y la conexión al archivo de código, así como la definición de las variables que están asociadas a la extensión. Esto se realiza a través del Objects Manager y el Views Manager explicados a continuación.

Objects Manager (Director de objetos). En esta vista se ingresa información para el correcto funcionamiento de la extensión. Esta información es usada para registrar la extensión apropiadamente y para declarar variables y objetos utilizados por la extensión.

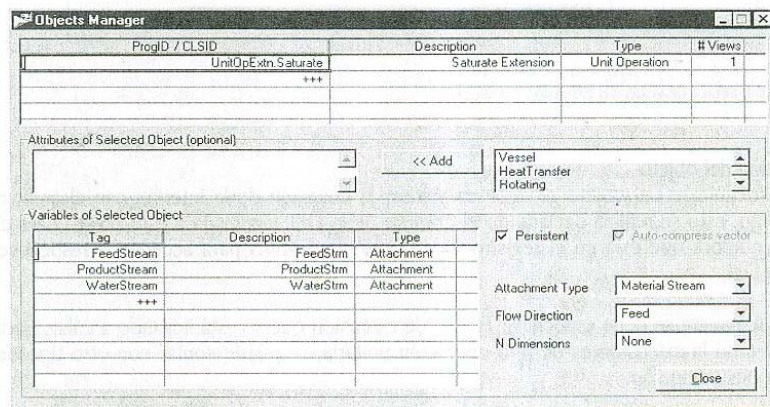


Figura 29. Director de objetos del Extension View Editor.

El Objects Manager consta de dos secciones importantes para el desarrollo de las extensiones:

- La definición del objeto.
- Las variables del objeto.

La descripción de estas secciones se muestra en el Anexo B.

Views Manager (Director de vistas). En esta parte se realiza la creación de las vistas asociadas con la extensión, el entorno de trabajo es similar al entorno de Visual Basic y en esta parte

se vinculan las variables con los elementos de cada vista para establecer la conexión entre HYSYS y el código de la extensión.

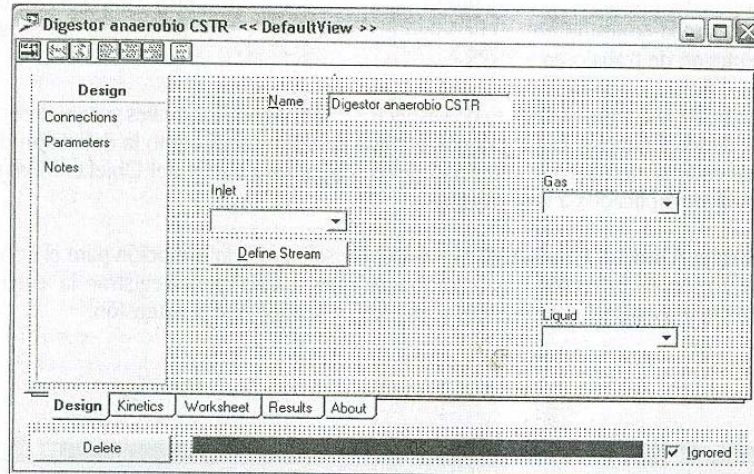


Figura 30. Director de vistas del Extension View Editor.

Definición del objeto

Para la definición del objeto se debe establecer la conexión de la interfaz con el archivo de código, esto se realiza declarando el nombre de la DLL vinculada a este objeto bajo el mismo nombre que está en el registro y es usada por HYSYS para acceder al respectivo archivo DLL.

De igual manera se debe especificar el tipo de extensión que se está llevando a cabo, para nuestro caso la extensión es de tipo operación unitaria, se puede contar con otro tipo de extensiones como son:

- Reacciones cinéticas
- Paquetes de propiedades

Variables del objeto

En esta zona se pueden crear variables que se relacionan con el archivo DLL especificado en la definición del objeto, esto es, variables que van a suministrar información entre el archivo de código y el simulador HYSYS 3.1. Además estas variables se pueden vincular a los objetos sobre las vistas del equipo.

Declaración de variables

La declaración de las variables se asemeja a cualquier otro software de programación, estableciendo un nombre para la variable y seleccionando el tipo de variable que se está definiendo, para esto el Extension View Editor las clasifica en cinco tipos:

- Real number
- Enumeration
- Text
- Message
- Attachment

Las variables de tipo Attachment se declaran para representar las corrientes que se vinculan al equipo.

Propiedades de las variables

Las variables declaradas poseen además las siguientes propiedades esenciales para el desarrollo de la herramienta ya que le brindan a la interfaz características que asemejan su funcionamiento al de cualquier operación existente en el simulador.

Entre las más importantes y que caracterizan el software por darle atributos especiales a las variables están:

La propiedad **Persistent** si es habilitada permite que la variable conserve su valor una vez se ha salvado el caso de simulación, está disponible para todas las variables excepto Message.

La propiedad **Trigger** solve está disponible para las variables de tipo Real number o Enumeration. Cuando está habilitada se usa para recalculiar el valor de la variable cuando éste ha cambiado, realizando nuevamente todo el proceso de cálculo definido para la extensión.

La propiedad **Numeric Type** se usa para especificar un tipo de unidad para las variables Real Number. Esta opción garantiza que el valor apropiado aparece en la vista de acuerdo a las unidades especificadas por el usuario, esta propiedad permite asemejar el entorno del equipo a los existentes en HYSYS.

ANEXO C. INTRODUCCIÓN A LAS EXTENSIONES

Las extensiones realizadas se comportan en el ambiente de HYSYS como cualquier otra operación presente, pero antes de poder usar los equipos en el simulador se deben registrar los archivos sobre los cuales se crearon las extensiones.

Registro del módulo

La construcción del código creado en Visual Basic para el módulo a la par con su archivo de integración al ambiente del simulador deben ser registrados a través del menú herramientas (Tools) y luego en las preferencias de la sesión.

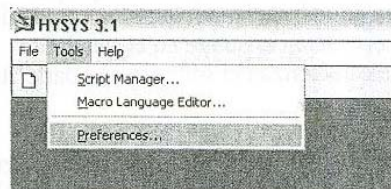


Figura 31. Menu Tools del simulador HYSYS 3.1

una vez ubicados en este cuadro de diálogo, se busca la pestaña extensiones donde se realiza el registro del archivo DLL el cual debe estar ubicado en la misma carpeta con el archivo EDF

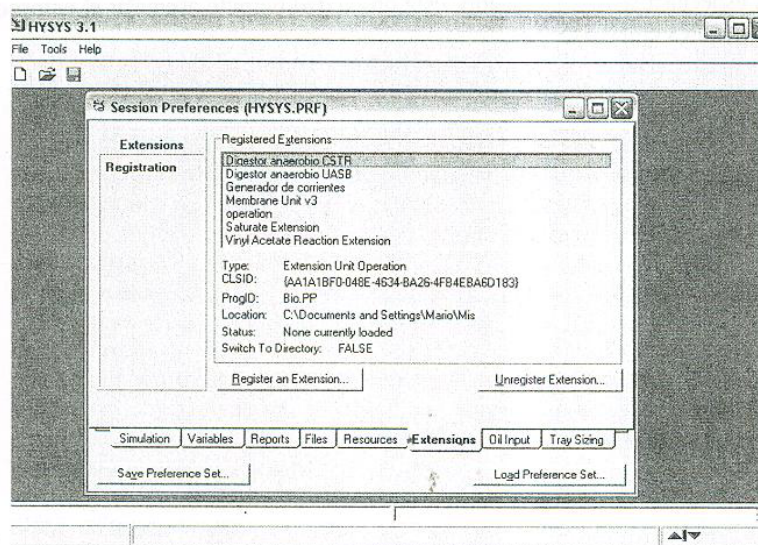


Figura 32. Preferencias de la sesión del simulador HYSYS 3.1

Llamado de los equipos al entorno de HYSYS

Los equipos al ser creados como una extensión no se encuentran en la paleta normal de HYSYS a diferencia de los equipos que el simulador trae, por esta razón su inclusión al PFD, debe realizarse a través del flowsheet y el comando "add operation" o a través de la tecla de ingreso rápido F12, al ingresar en este campo aparece una ventana que muestra todas las operaciones unitarias que se pueden usar en el caso, para integrar nuestros equipos nos ubicamos en la opción extensiones y seleccionamos el nombre de la extensión para continuar con su carga al caso de simulación. Una vez realizada la carga de la extensión se puede iniciar el trabajo con esta como con cualquier otra operación existente en HYSYS.

Los equipos que se vincularán al simulador HYSYS 3.1 a través del módulo desarrollado tendrán la siguiente estructura, la cual es similar para las dos extensiones.

En la vista general aparece un botón de Delete el cual borra la operación del caso de simulación activo de HYSYS, se encuentra también una barra de estado donde aparece la información requerida para el funcionamiento de la operación, además de un CheckBox para la opción de ignorar la operación en el caso de simulación.

Las extensiones cuentan con cinco paletas de selección:

- Design.
- Kinetics.
- Worksheet.
- Performance.
- About.

En estas paletas se define información para la operación o se muestran los resultados de la operación como se especifica a continuación.

DISEÑO (DESIGN)

La paleta Design es utilizada para la entrada de datos necesarios para la operación y posee un submenú especificado por las etiquetas:

- Connections
- Parameters
- Sizing
- Notes

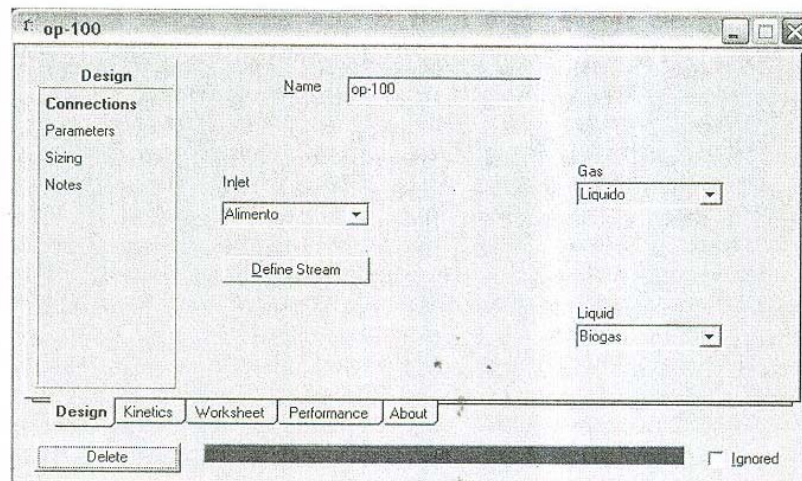


Figura 33. Vista Diseño del equipo

Connections: En esta etiqueta se especifican las corrientes que se conectan al equipo; una corriente de entrada la cual a través del botón "DefineStream" se puede establecer su composición y dos corrientes de salida, una de gas y otra de líquido, además se presenta el nombre del equipo.

Parameters: Esta etiqueta se refiere a parámetros del digestor y condiciones de operación, entre los cuales se encuentran, el volumen del digestor, la caída de presión y el tiempo de retención hidráulico.

Sizing: Esta etiqueta presenta una ayuda para el dimensionamiento del digestor partiendo del volumen establecido en la etiqueta Parameters.

Notes: Este es un espacio para escribir anotaciones referentes al equipo y es característico de todos los equipos de HYSYS.

Para el digestor anaerobio UASB en la etiqueta parámetros se tiene la opción de fijar el porcentaje de volumen del digestor donde se va a llevar a cabo la hidrólisis del proceso.

CINETICAS (KINETICS)

En la paleta Kinetics se dispone de varias cinéticas para llevar a cabo la operación, también se encuentra información acerca del proceso de digestión anaerobia la cual se puede variar si el usuario posee la información, el submenú está compuesto por:

- Models
- Parameters
- Yield Coefficients
- Results

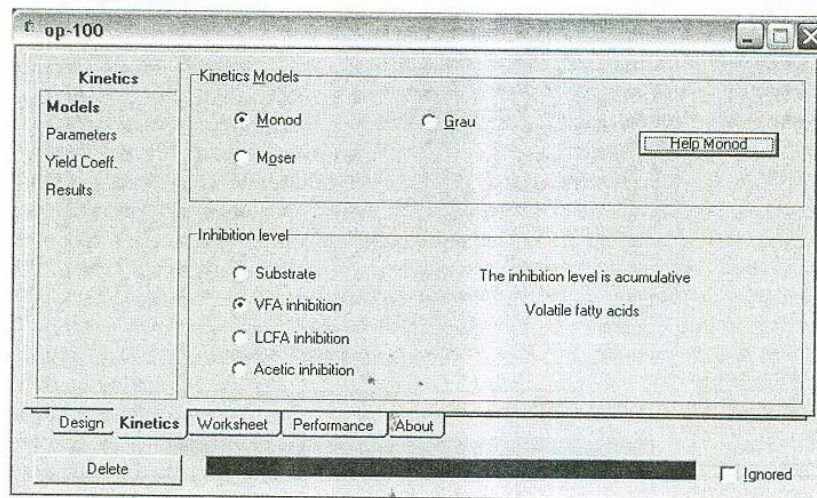


Figura 34. Vista Cinéticas del equipo

Models: En esta etiqueta se presentan los diferentes modelos cinéticos establecidos en la extensión:

- Modelo de Monod.
- Modelo de Grau.
- Modelo de Moser.

Para el modelo de Monod se activa una opción donde se especifica los niveles de inhibición para este modelo.

Se dispone de un botón que despliega una ventana de ayuda acerca de cada cinética.

Parameters: Esta etiqueta dispone de información sobre los parámetros cinéticos para cada tipo de biomasa o grupo trófico, en esta opción se encuentra un botón que reestablece los valores por defecto de los parámetros.

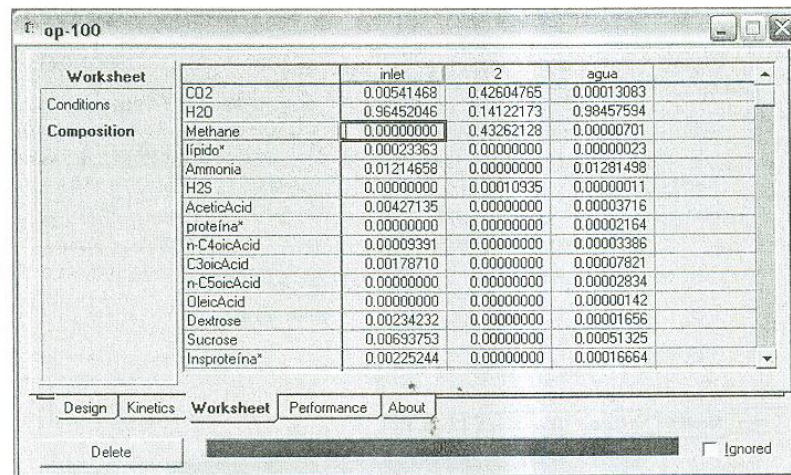
Yield Coefficients: En esta etiqueta se presentan los coeficientes de rendimiento establecidos para la operación de digestión anaerobia.

Results: Esta etiqueta registra las velocidades de utilización de los compuestos involucrados en el proceso.

CORRIENTE DE TRABAJO (WORKSHEET)

En esta paleta se registra información sobre las corrientes de entrada y salida de los equipos, el submenú está compuesto por:

- Conditions
- Composition



	inlet	2	agua
Conditions			
CO2	0.00541468	0.42604765	0.00013083
H2O	0.96452046	0.14122173	0.98457594
Composition			
Methane	0.00000000	0.43262128	0.00000701
lípidos*	0.00023363	0.00000000	0.00000023
Ammonia	0.01214658	0.00000000	0.01281498
H2S	0.00000000	0.00010935	0.00000011
AceticAcid	0.00427135	0.00000000	0.00003716
proteína*	0.00000000	0.00000000	0.00002164
n-C4oicAcid	0.00009391	0.00000000	0.00003386
C3oicAcid	0.00178710	0.00000000	0.00007821
n-C5oicAcid	0.00000000	0.00000000	0.00002834
OleicAcid	0.00000000	0.00000000	0.00000142
Dextrose	0.00234232	0.00000000	0.00001656
Sucrose	0.00693753	0.00000000	0.00051325
Insproteína*	0.00225244	0.00000000	0.00016664

Figura 35. Vista Corriente de trabajo del equipo

Conditions: Esta etiqueta despliega las condiciones de las corrientes conectadas al equipo.

Compositions: La etiqueta compositions muestra las composiciones tanto de la corriente de entrada como de las dos corrientes de salida, las composiciones se dan en fracción molar.

FUNCIONAMIENTO (PERFORMANCE)

En esta paleta se registra información específica resultado de la operación realizada por el equipo, así como estimativos teóricos, el submenú está compuesto por:

- Hydrolysis
- Oxygen Demand
- Biomass Characterization
- Results

	Concentration (g/L)
Glucose enzymatic	0.00000000
Protein enzymatic	0.00000000
Glucose degraders	0.47348283
Amino acid degraders	0.10623188
GTO degraders	0.03783435
LCFA degraders	0.70127389
Propionate degraders	0.59993424
Butyrate degraders	0.35798752
Valerate degraders	0.01460261
Acetate degraders	1.36729700

Figura 36. Vista Funcionamiento del equipo

Hydrolysis: Esta etiqueta se encuentra disponible únicamente para el digester anaerobio UASB y en ella se reporta el estado de la etapa hidrolítica, mostrando los valores a la entrada y salida del digester de los compuestos insolubles.

Oxygen Demand: En esta etiqueta se publican los valores teóricos calculados para la demanda biológica y química de oxígeno en las condiciones de entrada y salida y el porcentaje teórico de remoción.

Biomass Characterization: Se muestran valores detallados de la biomasa especificando la concentración de cada grupo de bacterias que actúan en el proceso de la digestión anaerobia descrito, estas son:

- Degradadoras de glucosa
- Degradadoras de aminoácidos

EVALUACION DEL POTENCIAL ENERGETICO DE LOS RESIDUOS SÓLIDOS ORGANICOS PROVENIENTES DE LAS PLAZAS DE MERCADO Y DISEÑO CONCEPTUAL DE UNA PLANTA DE DIGESTION ANAEROBIA PARA SU APROVECHAMIENTO INDUSTRIAL EN COLOMBIA

- Degradadoras de lípidos (GTO)
- Degradadoras de oleato (AGCL)
- Degradadoras de propionato
- Degradadoras de butirato
- Degradadoras de valerato
- Degradadoras de acetato

Results: En este apartado se muestran otros resultados del proceso como son el valor de pH, los sólidos suspendidos y los sólidos totales.

ABOUT

En este apartado se brinda información acerca de los creadores de la extensión, las personas que colaboraron a su desarrollo y la versión de la extensión.

Además de la interfaz principal de las extensiones, cada equipo cuenta con las vistas del "DefineStream" que se utilizan para definir la corriente de entrada al digestor.

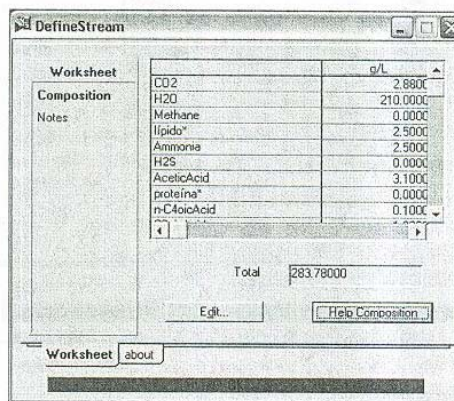


Figura 37. Vista Definición de corriente del equipo

También se estableció en las vistas de las extensiones botones de ayuda los cuales abren ventanas con información acerca del tema en la región donde se está explorando el equipo.

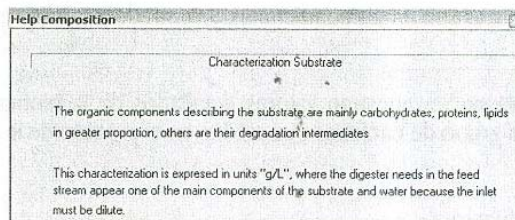


Figura 38. Vista de ayuda

El funcionamiento de los equipos CSTR y UASB es similar por esto se hará una sola descripción para entender el manejo de los dos, especificándose cualquier característica especial de cada equipo.

Condiciones para la operación del equipo

Los equipos requieren para brindar una solución, cuatro condiciones esenciales de entrada, las cuales son tres corrientes vinculadas al equipo (alimento, salida gas y líquido) y además el valor de un parámetro ya sea el tiempo de retención hidráulico o el volumen del digestor, los demás datos necesarios para realizar los cálculos de la operación están establecidos al realizar la carga de la extensión, aunque estos se pueden ingresar también por el usuario, estos son: el modelo cinético, los parámetros utilizados en el modelo y los coeficientes de rendimiento y para el digestor anaerobio UASB el porcentaje de volumen del equipo para la etapa de la hidrólisis.

Definición de la corriente de entrada

La corriente de entrada debe estar completamente definida y en su caracterización se debe ingresar alguna composición del material orgánico representado a través de sus componentes principales:

- Carbohidratos Insolubles
- Lípidos
- Proteína Insoluble

Puesto que el equipo va a trabajar sobre digestión anaerobia de material orgánico lo cual hace necesario que se presenten estos tres grupos o al menos uno de ellos.

Sin embargo el digestor anaerobio CSTR cuenta con la posibilidad de trabajar sin la entrada de los componentes principales, saltando la etapa de la hidrólisis y trabajar directamente a partir de la etapa de la acidogénesis a través de la entrada de carbohidratos o proteínas solubles definidas en la corriente de entrada al digestor.

En la definición de la corriente también será necesaria la presencia de agua puesto que la corriente de alimento a trabajar en los digestores anaerobios consta de material orgánico diluido.

Definición de la corriente de entrada a través de "DefineStream"

La convención normal en la que se reportan datos de la caracterización del sustrato para un digestor anaerobio es en concentraciones de gramos por litro, por esta razón el equipo posee un botón llamado "DefineStream" el cual abre una vista que recibe los valores de concentración en estas unidades para cada componente y define la corriente de alimento a través de los datos ingresados.

Modelos y parámetros de trabajo

Las condiciones establecidas que se pueden variar por el usuario se encuentran en la etiqueta Kinetics del equipo, estas son las cinéticas utilizadas para describir el comportamiento del consumo de sustrato, los parámetros cinéticos para cada grupo trófico y los coeficientes de rendimiento.

**EVALUACION DEL POTENCIAL ENERGETICO DE LOS RESIDUOS SÓLIDOS ORGANICOS
PROVENIENTES DE LAS PLAZAS DE MERCADO Y DISEÑO CONCEPTUAL DE UNA PLANTA DE
DIGESTION ANAEROBIA PARA SU APROVECHAMIENTO INDUSTRIAL EN COLOMBIA**

Modelos

Las cinéticas presentes para describir el comportamiento del consumo de sustrato son:

- Monod.
- Grau.
- Moser.

La cinética de Monod es la única donde se puede especificar el nivel de inhibición e inicialmente está seleccionada para presentar valores sin inhibición, las otras opciones presentes son:

- Inhibición por AGV. (Ácidos Grasos Volátiles)
- Inhibición por AGCL. (Ácidos Grasos de Cadena Larga)
- Inhibición por Ácido Acético

La extensión cuenta con ayudas que brindan información acerca de cada una de las cinéticas, mostrando la definición de cada uno de sus parámetros, así como las unidades en que se deben ingresar sus valores.

Parámetros de los grupos tróficos

Las extensiones tienen la capacidad de recibir a través del usuario nuevos valores de los parámetros cinéticos, se ingresan en la etiqueta Kinetics-parameters de la operación.

COEFICIENTES DE RENDIMIENTO

Metabolismo	Carbo- hidrato _s	Carbo- hidrato _n	Carbo- hidrato	Lípido	LCEFA	Prote _s	Prote _n	Amino- ácido
Enzimático glucosa	-1	0.5	0.5					
Enzimático proteína						-1	0.2	0.8
Degradación glucosa			-12.86					
Degradación aminoácido								-14.493
Degradación GTO				-192.16	183.9			
Degradación oleato					-9.837			
Degradación propianato								
Degradación butirato								
Degradación valerato								
Degradación acetato								
Metabolismo	NH4-N	Acetato	Propia.	Butirato	Valerato	Ch4	Co2	H2S
Enzimático glucosa								
Enzimático proteína								
Degradación glucosa	-0.124	3.543	2.937	3.079			2.413	
Degradación aminoácido	2.061	9.282	1.178	1.045	0.705		1.723	0.018
Degradación GTO	-0.124		15.151				-0.278	
Degradación oleato	-0.124	18.208				1.905	-6.267	
Degradación propianato	-0.124	8.006	-10.57			1.509	1.01	
Degradación butirato	-0.124	15.366		-11.92		0.965	-3.303	
Degradación valerato	-0.124	7.247	10.029		-13.82	0.966	-3.305	
Degradación acetato	-0.124	-24.135				6.082	16.726	