

# **ESCUELA POLITÉCNICA DEL EJÉRCITO**

## **FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA.**

**“MODELAMIENTO DE LOS PROCESOS DE BIODEGRADACIÓN ENERGÉTICA  
PARA APROVECHAMIENTO DE BASURA COMO GENERADOR DE ENERGÍA  
ELÉCTRICA: VALIDACIÓN MEDIANTE UN PROTOTIPO.”**

**PROYECTO PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE  
INGENIERO MECÁNICO.**

**CARLOS ANDRÉS TOBAR SALAS.  
Capt. WILFRIDO J. SUÁREZ V.**

**DIRECTOR: Ing. LUIS CUMBAL FLORES, PhD.**

**CODIRECTOR: Ing. OLIVA ATIAGA, MSc.**

**Sangolquí, 2005 - 09**

## **CERTIFICACIÓN DE LA ELABORACIÓN DEL PROYECTO.**

El proyecto “MODELAMIENTO DE LOS PROCESOS DE BIODEGRADACIÓN ENERGÉTICA PARA APROVECHAMIENTO DE BASURA COMO GENERADOR DE ENERGÍA ELÉCTRICA: VALIDACIÓN MEDIANTE UN PROTOTIPO.” Fue realizado en su totalidad por Capt. Wilfrido J. Suárez V. Y Carlos Andrés Tobar Salas, como requerimiento parcial para la obtención del título de Ingeniero Mecánico.

---

**Ing. LUIS CUMBAL FLORES, PhD.**

**DIRECTOR**

---

**Ing. OLIVA ATIAGA, MSc.**

**CODIRECTOR**

Sangolquí, 2005 – 09 - 12

## **LEGALIZACIÓN DEL PROYECTO**

**“MODELAMIENTO DE LOS PROCESOS DE BIODEGRADACIÓN ENERGÉTICA  
PARA APROVECHAMIENTO DE BASURA COMO GENERADOR DE ENERGÍA  
ELÉCTRICA: VALIDACIÓN MEDIANTE UN PROTOTIPO.”**

ELABORADO POR

---

Carlos Andrés Tobar Salas.

---

Capt. Wilfrido J. Suárez V.

**FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA**

---

Mayor, Ing. Edgar Pazmiño.

**DECANO**

Quito, 2005 - 09

## DEDICATORIA.

A **DIOS** que me dio la capacidad.  
A mis **PADRES** por la oportunidad.  
A mis **HERMANOS** por la solidaridad.  
A **CLAUDIA** por la inspiración.  
A mis **PROFESORES** por su ciencia.  
A mis **AMIGOS** por su alegría de vivir.

*Andrés.*

## **DEDICATORIA**

*A mi Dios, por ser el aliento de vida que me ha permitido sobreponerme en los momentos mas difíciles, guiado mi camino por el sendero que me he trazado.*

*A ti Verito, que supiste cultivar en mi el verdadero amor, impulsándome a ser cada día mejor, por tu apoyo incondicional y ternura.*

*A ti Marquito Jr. , mi espejo lleno de amor , sueño de un futuro mejor, la semilla de una nueva vida .*

*A mi madre y hermanos, por ser el pilar sobre el que se edificaron mis sueños, el apoyo constante durante todos estos años.*

*A mi familia que a pesar de la distancia siempre esta alentando cada paso que doy  
Marquito, Gladys, Johana , Marisol, Justyn .*

**Wilfrido J. Suárez V.**

## **AGRADECIMIENTO**

A DIOS por brindarnos salud a lo largo del presente proyecto.

A la Escuela Politécnica del Ejército y a su Cuerpo Docente, quienes nos brindaron y transmitieron sus conocimientos, que forjaron los profesionales que hoy somos.

Al Director Dr. Luis Cumbal, que con su valiosa ayuda supo compartir su profesionalismo para el desarrollo de la presente investigación.

Al Codirector Ing. Oliva Atiaga por la colaboración brindada para la elaboración de este estudio.

**Andrés Tobar Salas.**

**Wilfrido J. Suárez V.**

## RESUMEN

El proyecto que se presenta a continuación describe la factibilidad de generación eléctrica para la ciudad de Quito utilizando las 1297 toneladas generadas diariamente de basura que contienen un considerable porcentaje de desechos orgánicos aprovechables. El proyecto de llegar a implantarse generaría 34 MW de electricidad que podría suplir una fracción de la demanda de la capital.

Las energías renovables, presentan, buenas posibilidades de solucionar problemas de generación eléctrica, aprovechando los recursos existentes y usando tecnologías adecuadas. Este es el caso del Ecuador, actualmente deficitario en electricidad, país que puede aprovechar los desechos urbanos (basura) para producir gas combustible (metano) y generar electricidad, mediante su combustión en una turbina de gas.

En el presente estudio, en primer lugar se realizó el modelamiento biológico que permite representar el proceso de biodegradación en función del tiempo. De los datos obtenidos en la modelación se logró determinar el período óptimo de retención. La biodegradación de la basura orgánica aprovechable, mediante un proceso de fermentación, genera biogás como materia prima para la generación eléctrica. Posteriormente, el modelamiento energético (turbinas ciclo Brayton), permite determinar la potencia eléctrica de la planta en su conjunto, con lo que se confirma la posibilidad de generación eléctrica a partir de la basura orgánica.

Se construyó un prototipo, y mediante la biodegradación de la basura orgánica se obtuvo biogás, este gas fue utilizado posteriormente como materia prima para la generación de trabajo útil, en un motor de combustión de dos tiempos, al cual se adaptó a un sistema de gasificación para la inyección del gas metano, en la cámara de combustión, a fin de obtener trabajo mecánico útil. El trabajo mecánico luego fue convertido a electricidad, usando un dínamo y registrado en un multímetro.

# ÍNDICE DE CONTENIDOS

<b>CERTIFICACIÓN DE LA ELABORACIÓN DEL PROYECTO</b> .....	ii
<b>LEGALIZACIÓN DEL PROYECTO</b> .....	iii
<b>DEDICATORIA</b> .....	iv
<b>AGRADECIMIENTO</b> .....	vi
<b>INDICE DE CONTENIDOS</b> .....	vii
<b>RESUMEN</b> .....	xiv
<b>CAPÍTULO 1: GENERALIDADES</b>	
1.1 Antecedentes.....	1
1.2 Definición del problema. ....	4
1.3 Objetivos. ....	8
1.3.1 General. ....	8
1.3.2 Específicos.....	8
1.4 Alcance del Proyecto.....	9
1.5 Justificación del Proyecto.....	10
<b>CAPÍTULO 2: BREVE ESTUDIO SOBRE LA APLICACIÓN DE LAS ENERGÍAS RENOVABLES</b>	
2.1 Energías renovables.....	12
2.2 Energía solar.....	13
2.2.1 Solar térmica de baja, media y alta temperatura.....	14
2.2.2 Energía solar fotovoltaica.....	15
2.3 Energía eólica.....	16
2.4 Energía Geotérmica.....	18
2.5 Mini y micro hidrogenación.....	19
2.6 Mareomotriz.....	20
2.7 Biomasa.....	21
2.8 Residuos urbanos.....	23

### **CAPÍTULO 3: DESECHOS INDUSTRIALIZABLES – BASURA Y LODOS**

3.1 Generación de desechos-basura.....	24
3.2 Clasificación de los desechos.....	27
3.3 Proceso de separación.....	33
3.4 Estadísticas para Quito.....	34
3.4.1 Datos de Quito limpio.....	35
3.4.2 Datos de EMASEO.....	36
3.5 La basura como un recurso energético renovable.....	37
3.6 Disposición final de desechos - Rellenos sanitarios.....	38
3.7 Lodos industriales.....	40

### **CAPÍTULO 4: GENERACIÓN DE BIOGAS**

4.1 Modelamiento del proceso de biodegradación.....	41
4.2 Producción de BIOGAS.....	48
4.3 Limpieza del BIOGAS.....	51
4.3.1 Separación de metano y otros gases.....	51
4.3.2 Separador y cantidad de $CH_4$ .....	51
4.4 Modelamiento energético.....	52
4.4.1 Variables de entrada.....	52
4.4.2 Variables de salida.....	55
4.5 Diseño de planta generadora de gas.....	56
4.5.1 Estudio de localización.....	58
4.5.2 Biodigestores.....	59
4.5.2.1 Selección del biodigestor.....	59
4.5.2.2 Selección de materiales.....	61
4.5.3 Dimensionamiento de Tuberías.....	61
4.5.4 Cálculo de acumuladores de gas.....	62
4.5.5 Producción de la planta generadora de gas.....	63
4.6 Diseño planta generadora de electricidad.....	63

4.7 Construcción del modelo prototipo.....	65
4.7.1 Selección de partes y materiales.....	64
4.7.2 Registro de la carga (tiempo, fechas, carga diaria).....	71
4.7.3 Resultados obtenidos.....	72
4.7.4 Calibración mediante un prototipo.....	73

**CAPITULO 5: COMPARACIÓN CON OTROS MÉTODOS DE APROVECHAMIENTO DE ENERGÍA (COMBUSTIÓN).**

5.1 Ventajas y desventajas Incineración.....	75
5.1.1 Operativas.....	76
5.1.2 Ambientales.....	76
5.1.3 Energéticas.....	77
5.1.4 Económicas.....	77
5.2 Ventajas y desventajas Bio-generación.....	77
5.2.1 Operativas.....	78
5.2.2 Ambientales.....	78
5.2.3 Energéticas.....	79
5.2.4 Económicas.....	79
5.3 Cuadro comparativo final.....	80

**CAPÍTULO 6: ANÁLISIS ECONÓMICO**

6.1 Planta de gas.....	84
6.2 Planta de generación eléctrica.....	84
6.3 Otras inversiones.....	84
6.4 Rentabilidad. Índices económicos.....	85

**CAPÍTULO 7: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES**

Conclusiones.....	89
Recomendaciones.....	92
<b>BIBLIOGRAFIA.....</b>	<b>93</b>

## FIGURAS

Figura 1.1 Precio de centrales eléctricas.....	5
Figura 1.2 Oferta eléctrica por origen.....	6
Figura 1.3 Mapa de distribución eléctrica.....	7
Figura 3.1 Flujo de materiales y producción de desechos sólidos en una sociedad tecnológica.....	25
Figura 3.2 Selección, separación mediante bandas.....	33
Figura 3.3 Distribución de recolección de basura.....	34
Figura 4.1 Proceso de degradación anaeróbica.....	42
Figura 4.2 Discretización del modelo de biodigestor (Flujo Pistón).....	43
Figura 4.3 Aproximación por diferencias finitas.....	44
Figura 4.4 Variación de la concentración de sustrato fácilmente degradable Vs. Tiempo.....	46
Figura 4.5 Crecimiento de la biomasa Vs. Tiempo.....	46
Figura 4.6 Variación de la concentración de sustrato lentamente degradable Vs. Tiempo.....	47
Figura 4.7 Un motor de turbina de gas ciclo abierto.....	53
Figura 4.8 Diagrama T – s para el caso.....	54
Figura 4.9 Planta de producción de gas para recuperar energía de los desechos sólidos.....	56
Figura 4.10 Sitios analizados para posible localización del próximo relleno sanitario.....	59

Figura 4.11 Biodigestor de lote (Batch).....	60
Figura 4.12 Biodigestor horizontal.....	61
Figura 4.13 Planta Generadora de electricidad.....	63
Figura 4.14 PB01 Tanques de almacenamiento.....	67
Figura 4.15 PB02 Manómetro (marca 1.7 psi).....	67
Figura 4.16 EG01 Motor Gms 61/2000 dos tiempos y EG02 bujía.....	68
Figura 4.17 EG03 Bancada y EG04 Chispero.....	68
Figura 4.18 EG05 Batería, EG06 Combustible al 15% y EG07 Neopreno.....	68
Figura 4.19 EG08 Tanque almacenamiento combustible y EG09 Difusor de gas...	69
Figura 4.20 EG10 Electro válvula y EG11 Dosificador de aceite.....	69
Figura 4.21 Vista del conjunto derecha y vista conjunto izquierda.....	69
Figura 4.22 Prototipo.....	70
Figura 4.23 Gráficos de carga.....	71
Figura 4.24 Presión monitoreada.....	72
Figura 4.25 Potencia Generada.....	72
Figura 4.26 Desechos (basura) después del proceso de biodegradación (lodos)...	73

## TABLAS

Tabla 1.1 Composición de la tarifa media al consumidor final.....	5
Tabla 1.2 Demanda proyectada de generación eléctrica anual.....	7
Tabla 3.1 Instalaciones de producción.....	27
Tabla 3.2 Los componentes que típicamente.....	32
Tabla 3.3 Datos de Quito Limpio.....	35
Tabla 3.4 Datos de Quito Limpio.....	35
Tabla 3.5 Datos de Quito Limpio.....	35
Tabla 3.6 Datos de EMASEO.....	36
Tabla 3.7 Datos de EMASEO.....	36
Tabla 3.8 Datos de EMASEO.....	36
Tabla 3.9 Procesos de recuperación de energía.....	37

Tabla 4.1 Peso sin humedad de los materiales fácilmente biodegradables.....	48
Tabla 4.2 Peso sin humedad de los materiales lentamente biodegradables.....	48
Tabla 4.3 Componentes químicos de materiales fácilmente biodegradables.....	49
Tabla 4.4 Componentes químicos de materiales lentamente biodegradables.....	49
Tabla 4.5 Componentes químicos.....	49
Tabla 4.6 Fórmula estequiométrica de los desechos.....	50
Tabla 4.7 Propiedades generales del metano.....	52
Tabla 4.8 Lista de materiales del modelo prototipo.....	66
Tabla 4.9 Registros de la carga (tiempo, fecha, carga diaria).....	71
Tabla 6.1 Planta generadora de gas.....	84
Tabla 6.2 Planta generadora de electricidad.....	84
Tabla 6.3 Otras	84

inversiones.....	
Tabla 6.4 Vida útil.....	85
Tabla 6.5 Cálculo de depreciación.....	85
Tabla 6.6 Cálculo valor libros.....	86
Tabla 6.7 Cálculo del servicio de la deuda.....	86
Tabla 6.8 Ingresos y costos.....	87
Tabla 6.9 Utilidad fiscal e impuestos.....	87
Tabla 6.10 Flujo de caja.....	88

# CAPÍTULO 1

## GENERALIDADES

### 1.1 ANTECEDENTES.

Del mismo modo que el mundo vivió una transición en términos de energía al pasar del uso de la leña al consumo de carbón en el siglo XIX, y otra al pasar del carbón al petróleo en el siglo XX, todo parece indicar que ya se está generando, una tercera transición, en nuestra marcha hacia el futuro.

Tal parece que el mundo está a punto de entrar en una nueva época de tecnología avanzada y novedosos combustibles. Aún cuando no es probable que una transferencia de ese tipo se produzca de la noche a la mañana, está claro que el cambio en cuestión ya se está viviendo. Lo único que cabe preguntar es ¿cuáles serán su ritmo y magnitud?

La amenaza para el medio ambiente que ha atraído la atención del mundo y que precipitó el diluvio tecnológico actual, es el calentamiento del planeta, es decir, la elevación de la temperatura del globo a causa de la contaminación del aire, en especial por el dióxido de carbono. Si bien la mayoría de los científicos coinciden en que no es probable que se detecte un aumento inequívoco del efecto invernadero en los próximos 5 años o más, se ha advertido también con severidad poco común que si se espera hasta que el calentamiento se pueda medir con tal certeza, correremos el riesgo de haber dejado que ocurra un cambio profundo e irremediable. Para evitar ese cambio, el mundo tendrá que concentrar su atención en el aumento poblacional, aumento del consumo y aumento de la contaminación. Para completar el escenario crítico actual y futuro, debemos mencionar que el alto precio de los hidrocarburos, hace urgente la búsqueda de soluciones como la que

presentamos que preserve el medio ambiente, y al mismo tiempo permita un desarrollo sostenido en el tiempo.

### **1.1.1 AUMENTO POBLACIONAL**

En un mundo que cambia en todo lo demás, la expansión incesante de la población ha sido el único factor constante que se ha observado a través de los siglos. La población ha crecido desmedidamente a partir de 1950, pasando de 2500 millones a cerca de 6000 millones. La mayor parte de este aumento ha tenido lugar en las naciones que están en desarrollo: en 1990 el 77% de la población del mundo es decir 4100 millones, vivía en países en desarrollo. La desproporción entre la población de las naciones en vías de desarrollo y la población de los países industrializados se acentuará tal vez, porque el crecimiento demográfico en estos últimos es modesto. La población de Alemania y la de otros países ha dejado de crecer mientras en naciones menos desarrolladas son entre cinco y tres veces más altas en proyecciones en 30 años la población de países desarrollados habrá crecido en 150 millones mientras en los países menos desarrollados será de 3000 millones, esto agrava el panorama puesto que a medida que este grupo llegue a la edad adulta aumentará el consumo de energía.

### **1.1.2 AUMENTO DEL CONSUMO DE ENERGÍA.**

A medida que la población del mundo aumenta, lo mismo ocurre con el nivel de vida y, por ende, con la demanda de bienes que consumen energía que al mismo tiempo aumenta la contaminación. En los países industrializados, como los Estados Unidos, gran parte del uso de la energía se ha atribuido a la presencia de artículos más grandes o más voraces, p. ej., los coches con motores más potentes. En las naciones en desarrollo, el aumento del uso de la energía se debe a la propagación de tecnologías y productos que en países desarrollados se han inventado desde hace mucho tiempo p.ej., refrigeradoras, coches, aire acondicionado y calentadores para el agua.

De este modo, los productos que usan energía, y son fuentes directas o indirectas de la contaminación, han proliferado mucho más deprisa que la

población. En 1950 habían 70 millones de automóviles en 1990 el número era de 550 millones, a causa de esto, la producción mundial de energía ha tenido un aumento constante en los últimos 20 años, salvo por breves pausas ocasionadas por la crisis del petróleo entre 1973 y 1975, y de nuevo entre 1979 y 1982, y hoy está 65% por ciento encima de los niveles de 1970.

El petróleo, el carbón y el gas representan más del 90% de la producción. De cualquier manera, la mayor parte de la energía la consumen los países industrializados, pues en ellos el uso de la misma por persona es más o menos 8 veces mayor que en las naciones en vías de desarrollo.

Sin embargo, en virtud de que la mayoría de los países industrializados emprendieron intensas campañas para la conservación de la energía, a raíz de las crisis del petróleo antes mencionadas, gran parte del crecimiento 50% en el consumo de energía registrado en los últimos 20 años ha tenido lugar en estos países. “El consumo total de energía con fines comerciales desde 1970 hasta 1995 se ha triplicado y para el 2025 se espera que se vuelva a triplicar. Casi todo este aumento se refiere a petróleo y carbón<sup>1</sup>”.

Las energías renovables entendidas como procesos de generación no convencionales, abren a los países en desarrollo buenas posibilidades de solucionar problemas de generación eléctrica aprovechando recursos renovables mediante la aplicación de tecnologías adecuadas. Este es el caso del Ecuador actualmente deficitario en electricidad que puede aprovechar los desechos urbanos (basura orgánica) en la generación de gas que a su vez será el combustible para generar electricidad.

Alrededor del mundo, la contaminación del aire, suelo y agua debido a desperdicios municipales, agricultura y procesos industriales sigue creciendo. Gobiernos e industrias continuamente están buscando el tratamiento de la basura más eficiente, efectivo y menos costoso.

---

1.MOORE C. Energía: Una nueva Era, documento verde Estados Unidos, 2003

La descomposición anaeróbica de la basura es el tratamiento más eficiente para transformar un contaminante sólido en un gas con un estimable poder calórico que puede ser utilizado como combustible y producir trabajo.

En la ciudad de Quito se producen aproximadamente 1.300 toneladas diarias de basura<sup>2</sup> con un considerable porcentaje de contenido orgánico. Esta basura luego de clasificada puede ser empleada para la generación de energía eléctrica, no obstante la energía generada sería marginal. La factibilidad del proyecto dependerá del estudio técnico y de la voluntad política.

En el desarrollo de este proyecto se estudiará el proceso de la biodegradación de la basura orgánica aprovechable, la cual mediante un proceso de fermentación permitirá obtener biogás, como materia prima para generación eléctrica.

Este proyecto en caso de ejecutarse, tendría un efecto multiplicador de generación de mano de obra, creación de empresas complementarias, reemplazaría la compra de energía del sistema nacional interconectado desde Colombia y Perú y varias ventajas adicionales.

Además la protección ecológica prioriza a las energías alternativas que tienen como objetivo generar la energía reduciendo la contaminación.

## **1.2 DEFINICIÓN DEL PROBLEMA**

Para todos los países, el autoabastecimiento de energía eléctrica es un objetivo nacional, por razones de seguridad, y por razones económicas puesto que el componente de consumo eléctrico gravita significativamente en la producción nacional haciendo competitiva o no la industria del país.

Solo en planillas, en 2003 el negocio eléctrico movilizó casi \$750 millones. Y la cifra sin tomar en cuenta las pérdidas negras y subsidios, la tarifa se compone de la siguiente manera.

---

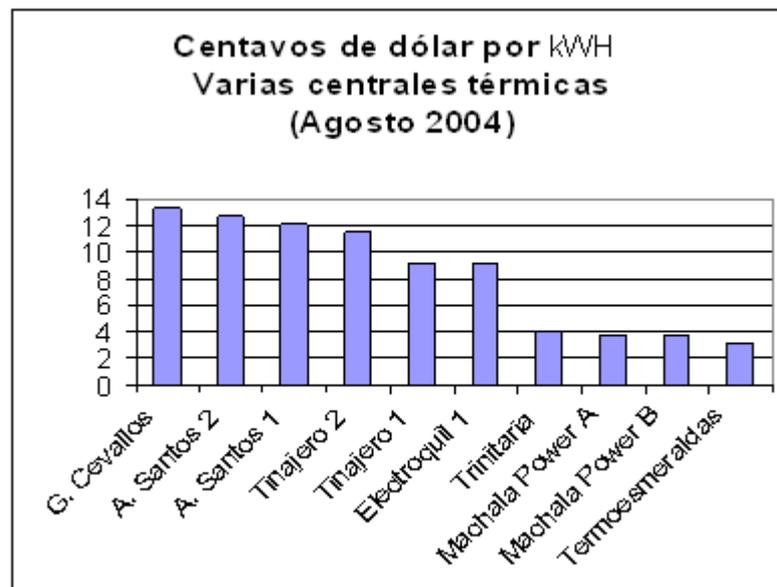
2. Empresa Municipal de Aseo y Limpieza (EMASEO) y QUITO Limpio, 2002

A junio de 2003 la tarifa real media a consumidor final fue de 8,96 cts./kW-H; a julio de 2003, fue de 9,02 cts./kW-H. La tarifa objetivo determinada por el CONELEC se indica en la Tabla 1.1 es la siguiente (se indican los valores del precio referencial de generación -PRG- tanto de energía como de potencia):

**Tabla 1.1 Composición de la tarifa media a consumidor final.**

Ítem		Tarifa [US¢/kWh]
Generación		5,81
PRG energía	4,50	
PRG potencia	1,31	
Transmisión		0,76
Distribución		3,81
<b>Total</b>		<b>10,38</b>

Según el Centro Nacional de Control de Energía (CENACE), Termoesmeraldas declara 3,1 centavos mientras la central G. Cevallos (TG4) de Electroguayas declara 13.32 (Figura. 1.1), esto se debe a que la primera es una empresa que ya pagó la inversión inicial mientras que G. Cevallos todavía no paga la inversión inicial la cual debe ser incluido, incrementándose el precio final. Al 31 de agosto de 2004, el costo promedio ponderado de las 19 generadoras térmicas de más de 20 MW (total 1135 MW) fue de 7.04 centavos por KW-H.



**Figura 1.1 Precio de centrales eléctricas**

Para Ecuador el déficit de energía eléctrica es de 240 MW de potencia y 1120 millones de kW-H al año de energía<sup>3</sup>, equivalentes al 8.8% de la oferta eléctrica total (Figura 1.2). Este déficit se soluciona comprando energía a Colombia, con la consiguiente fuga de divisas tan necesarias para mantener el esquema macroeconómico, de la dolarización.

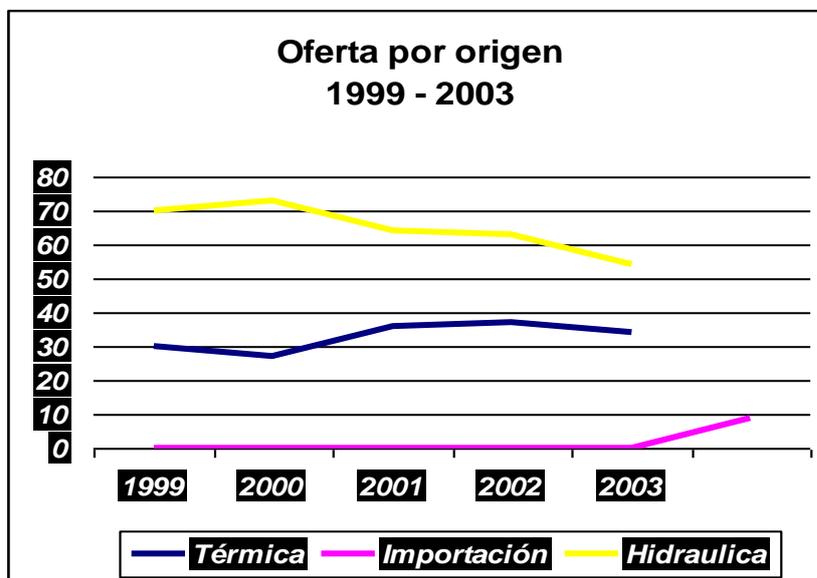


Figura 1.2 Oferta eléctrica por origen

El mapa (Fig. 4) presenta el circuito de distribución del SNI (Sistema nacional Interconectado), el cual destaca (Circuito de 138 kV) el ingreso de energía por compra desde Colombia. El viceministro de Energía y Minas de ese país, **Manuel Maignashca** asevera que desde enero de 2003 y junio de 2004 esas ventas ascendieron a \$140 millones, lo cual muestra que el kW-H se importa alrededor de 8 centavos.

3. Revista Gestión Sociedad, Electricidad del País titila, Septiembre de 2004, - 123, Ecuador

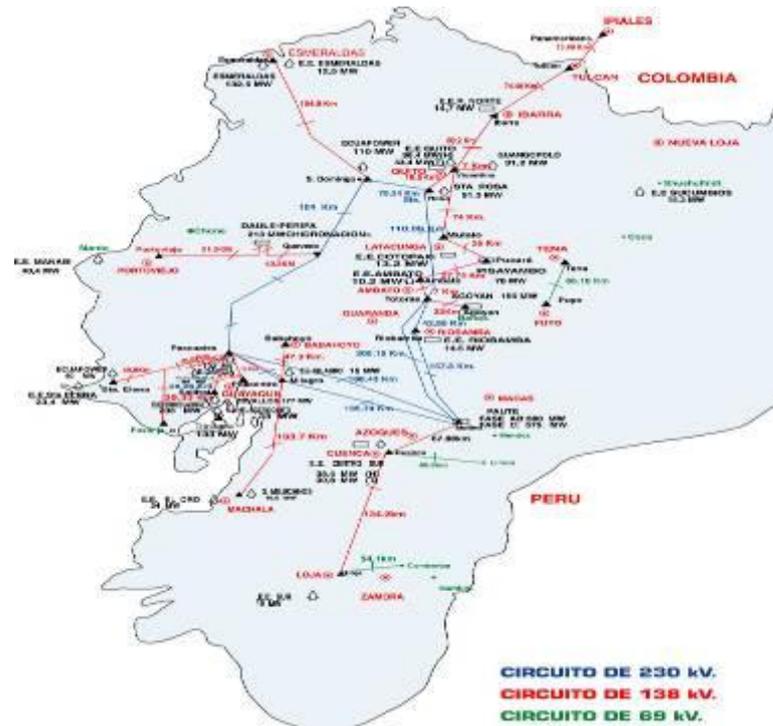


Figura 1.3 Mapa de distribución eléctrica<sup>4</sup>

Según el Plan de Electrificación del Ecuador, periodo 2002 - 2011, en la proyección de la demanda se mantienen tres escenarios de crecimiento: menor, medio y mayor, en función del crecimiento del producto interno bruto, y las metas del nivel de precios y cobertura del servicio eléctrico que se desean alcanzar. El escenario menor toma en cuenta un crecimiento económico pesimista del país, del orden de 4,1% del PIB como media anual; 5,1 % el crecimiento medio; y, 5,9% el crecimiento mayor. Se ha determinado que el crecimiento medio de la demanda para el período 2002 - 2011 es el que se indica en la Tabla 1.2

Tabla 1.2 Demanda proyectada fuente Ministerio de Energía y Minas. Generación eléctrica anual 11048.8[GW-H]

CRECIMIENTO MEDIO ANUAL DE LA DEMANDA ELÉCTRICA. PERÍODO 2002 – 2011			
DEMANDA DE ENERGÍA	3.80%	4.90%	5.90%
DEMANDA DE POTENCIA	3.50%	4.40%	5.30%
ESCENARIOS	MENOR	MEDIO	MAYOR

4. Revista Gestión Sociedad, Electricidad del País titula, Septiembre de 2004, · 123, Ecuador 23

De lo presentado, se deduce que es imprescindible al incremento de la capacidad de generación eléctrica del Ecuador, por lo tanto este proyecto que adicionaría un porcentaje marginal de energía, es necesario y prioritario; caso contrario el país se verá obligado a importar más energía desde Colombia y Perú. Para el 2006 está calculado que el déficit de energía del Ecuador será del 25% que se lo cubrirá con las importaciones de los países antes mencionados. Lo cual consecuentemente incidiría en la aspiración de ser parte del TLC.

Otro problema que pretende enfocar este proyecto es la disminución de la contaminación ambiental, el cual mejoraría con el manejo adecuado de los residuos sólidos urbanos. Se conoce que la biodegradación anaeróbica en los rellenos genera gas metano, que es **21 veces** más nocivo<sup>5</sup> que el dióxido de carbono en el efecto invernadero. Además las grandes urbes no disponen de espacios suficientes para almacenar enormes cantidades de desechos.

## **1.3 OBJETIVOS**

### **1.3.1 OBJETIVO GENERAL**

El objetivo del proyecto es estudiar la posibilidad de generar energía eléctrica para servir al Distrito Metropolitano de Quito (Provincia de Pichincha), utilizando los residuos orgánicos urbanos y lodos orgánicos.

### **1.3.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.**

1. Exponer un panorama general de la situación energética nacional.
2. Destacar la importancia de las energías renovables para la conservación ambiental.
3. Establecer los porcentajes de composición de las diferentes clases de basura.
4. Caracterizar los lodos industriales (refinación, reciclaje).

---

5. REPORTE TÉCNICO DE **ECOPARC**, Barcelona, 2003

5. Modelar los procesos biológicos inmersos en la digestión anaeróbica.
6. Aprovechar un recurso renovable (biomasa - basura), que actualmente no tiene ningún aprovechamiento energético.
7. Obtener la información necesaria sobre la utilización de la basura. para dimensionamiento de la planta generadora de Biogás.
8. Construir un prototipo que demuestre los principios de generación de energía.
9. Validar el modelo matemático con datos del prototipo.
10. Proponer mediante la ejecución de este proyecto una solución de cómo reducir la contaminación ambiental por el mal manejo de la basura, por medio de la industrialización de la misma.
11. Comparar con otros métodos de industrialización de los desechos sólidos urbanos.

## **1.4 ALCANCE DEL PROYECTO**

En el desarrollo del proyecto de este proyecto se considerarán dos aspectos fundamentales:

1. Modelamiento teórico.
2. Construcción de prototipo.

El modelamiento teórico comienza con investigación de los datos de generación de basura en la ciudad Metropolitana de Quito (1297 ton/día) y la estimación de contenido orgánico (850 ton/día).

Con esta información se procederá al:

- Modelamiento biológico, que proporcionará la tasa ideal de crecimiento bacteriano, tiempo mínimo de retención, cantidad máxima de gas y selección del tipo de digestor.

- Modelamiento energético, para establecer el flujo de gas metano a ser utilizado en los sistemas de generación. (turbinas/motores de combustión).
- La comparación con un sistema de incineración de desechos.
- Análisis económico y financiero (perfil) del proyecto.

Finalmente, con los datos de la caracterización de la basura, se procederá a la construcción de un prototipo experimental (tipo lotes) para validar el modelamiento energético.

## **1.5 JUSTIFICACION DEL PROYECTO.**

Este proyecto es innovador porque utilizará un recurso renovable de costo inicial muy bajo, (desechos-basura), además se tendrá un subproducto muy importante como es la obtención de bio-fertilizantes (compost) de características ecológicas no contaminantes, cuya comercialización incrementará la rentabilidad del proyecto.

Otras ventajas de importancia:

- Contribuir a la disminución del precio del Kilovatio/hora actualmente muy elevado.
- Reducir el consumo de combustibles fósiles.
- Cumplir con protocolos internacionales (Kyoto, Rio) de protección al medio ambiente, los cuales enfocan esencialmente los gases de efecto invernadero, haciendo énfasis en emisiones de  $CO_2$ .
- Eliminar olores en los rellenos sanitarios, producidos por el biogás.
- Proporcionar fuentes de trabajo adicionales.
- Promocionar la innovación tecnológica de las energías renovables, que podrían contribuir a la reducción del déficit energético del país.
- Ser pioneros en la utilización de este proceso
- Reducir la dependencia de energía importada de países vecinos.

- Utilizar los desechos de manera más apropiada y eficiente.
- Evitar la utilización de tecnologías contaminantes.
- Ser participes con la iniciativa de la investigación y desarrollo global en energías no convencionales.
- Mejorar la competitividad frente al TLC.

## **CAPÍTULO 2**

### **BREVE ESTUDIO SOBRE LA APLICACIÓN DE LAS ENERGÍAS RENOVABLES.**

#### **2.1 ENERGÍAS RENOVABLES.**

A diferencia de las energías convencionales que se agotan constantemente como el petróleo, gas natural, carbón, etc., las energías renovables, son las que se regeneran continuamente o resultan virtualmente inextinguibles en la escala humana del tiempo.

En el año 1973 se produjeron eventos importantes en el mercado del petróleo que causaron en el mundo escasez, lo cual se reflejó en los años posteriores en un encarecimiento notable de esta fuente no renovable, resurgieron las preocupaciones sobre el suministro y precio de la energía. Como resultado de esta situación, los países consumidores, se enfrentaron a los altos costos del petróleo, viéndose obligados a modificar costumbres de consumo y buscar opciones para reducir su dependencia de fuentes no renovables.

Entre las opciones para reducir la dependencia del petróleo como principal energético, se reconsideró el mejor aprovechamiento de la energía solar y sus diversas manifestaciones secundarias tales como la energía eólica, hidráulica y las diversas formas de biomasa, es decir, las llamadas energías renovables.

Así, a mediados de los años setenta, múltiples centros de investigación en el mundo retomaron viejos estudios, organizaron grupos de trabajo e iniciaron la construcción y operación de prototipos de equipos y sistemas operados con energéticos renovables. Asimismo se establecieron diversas empresas para aprovechar las oportunidades que se ofrecían para el desarrollo de estas tecnologías, dados los altos precios de las energías convencionales.

En la década de los ochenta, aparecen evidencias de un aumento en las concentraciones de gases que provoca el efecto invernadero en la atmósfera terrestre, estas concentraciones han sido atribuidas, en gran medida, a la quema de combustibles fósiles, como resultado se produjo una convocatoria mundial para buscar alternativas de reducción de las concentraciones actuales de estos gases, replanteándose la importancia que tienen las energías renovables para crear sistemas sustentables. Como resultado de esta convocatoria muchos países, particularmente los más desarrollados, establecieron compromisos para limitar y reducir emisiones de gases de efecto invernadero renovando así su interés en aplicar políticas de promoción de las energías renovables.

Hoy en día, más de un cuarto de siglo después de la llamada *crisis del petróleo*, muchas de las tecnologías de aprovechamiento de energías renovables han madurado y evolucionado, aumentando su confiabilidad y mejorando su rentabilidad para muchas aplicaciones. Como resultado, países como Estados Unidos, Alemania, Japón e Israel presentan un crecimiento muy acelerado en el número de instalaciones que aprovechan la energía solar de manera directa o indirectamente a través de sus manifestaciones secundarias<sup>1</sup>.

Además de la riqueza en petróleo, Ecuador cuenta con un potencial muy importante en cuestión de recursos energéticos renovables, cuyo desarrollo permitirá al país contar con una mayor diversificación de fuentes de energía, ampliar la base industrial en un área que puede tener valor estratégico en el futuro, y atenuar los impactos ambientales ocasionados por la producción, distribución y uso final de las formas de energía convencionales.

## **2.2 ENERGÍA SOLAR**

Energía solar, energía radiante producida en el Sol como resultado de reacciones nucleares de fusión, llega a la Tierra a través del espacio en

---

1. <http://www.ees.adelaide.edu.au/pharris/biogás/beginners.html>

quantum de energía llamados fotones, que interactúan con la atmósfera y la superficie terrestre. La intensidad de la radiación solar, (o constante solar) en el borde exterior de la atmósfera, considerando que la Tierra está a su distancia promedio del Sol, tiene un valor de  $1,37 \times 10^6 \frac{erg * s}{cm^2}$ , o unas  $2 \frac{cal * min}{cm^2}$ . Sin embargo, esta cantidad no es constante, ya que varía un 0,2% en un periodo de 30 años<sup>2</sup>. La intensidad de energía real disponible en la superficie terrestre es, menor que la constante solar debido a la absorción y a la dispersión de la radiación que origina la interacción de los fotones con la atmósfera.

## **2.2.1 ENERGÍA SOLAR TÉRMICA DE BAJA, MEDIA Y ALTA TEMPERATURA.**

### **2.2.1.1 Energía solar térmica de baja temperatura.**

Destinada a aquellas aplicaciones que no exigen temperaturas del agua superiores a los 90°C<sup>3</sup>. Así por ejemplo, agua caliente sanitaria (ACS) y apoyo

80°C. Aparte del colector solar se necesita disponer de un método de almacenamiento para el agua producida por el colector de manera que sea capaz de satisfacer la demanda en condiciones en que la radiación solar sea insuficiente.

### **2.2.1.2 Energía solar térmica de media temperatura**

Destinada a aquellas aplicaciones que exigen temperaturas comprendidas entre los 80°C y los 250°C<sup>4</sup>. Como, por ejemplo, la producción de fluidos térmicos para procesos industriales, la desalinización de agua de mar y la refrigeración mediante energía solar.

---

2. CARRASCO FRANKLIN, Energía solar, Quito, 2003.

3. APF – ITC, S.A. Energías renovables - Energía Solar térmica, 2004

4. Primeras Jornadas de Energía más CD, Departamento de conversión y usos de la energía, Quito, 2004

### **2.2.1.3 Energía solar térmica de alta temperatura**

Destinada a aquellas aplicaciones que requieren temperaturas del agua superiores a los 250°C<sup>5</sup>. Así, por ejemplo, la generación de vapor para la producción de electricidad a gran escala, la cual se realiza mediante helióstatos (concentradores) que captan la radiación y la dirigen hacia un foco o caldero, donde se realiza el intercambio de calor por ende la generación de vapor.

### **2.2.2 ENERGÍA SOLAR FOTOVOLTAICA.**

La energía fotovoltaica se refiere a la incidencia de fotones (quantum de energía electromagnética) sobre materiales semiconductores, Becquerel en 1839, realizó las primeras observaciones de este fenómeno, Einstein en 1905, desarrolló la teoría y fue tan sólo en 1954, en los laboratorios Bell (USA) se consiguió la primera célula fotovoltaica.

Las células fotovoltaicas, en su concepción inicial, son elementos de silicio monocristalino, con pequeñas cantidades de impurezas, si la impureza es boro (valencia 3), existe un exceso de cargas positivas y si es fósforo (valencia 5), existe un exceso de cargas negativas, pues el silicio tiene 4 electrones en su última órbita. Al silicio conteniendo cualesquiera de las dos impurezas mencionadas se lo trata con el dopante contrario, con lo que se logra un material semiconductor, que en el empalme o unión P-N forma una barrera potencial, la cual presenta características favorables para que exista una interacción con los fotones de luz, Estos fotones, con energía 1,1 eV<sup>6</sup>, se absorben en la célula, el exceso se transforma en calor.

El efecto fotoeléctrico plantea que, cuando la luz incide en una superficie metálica, bajo ciertas condiciones, los electrones son liberados.

El inconveniente principal de este tipo de energía es, elevado costo (US\$ 10,00 por kW), por lo cual solo es aplicable a baja escala y en lugares muy alejados de la red de distribución de energía eléctrica.

---

5. CARRASCO FRANKLIN, Energía solar, Quito,2003.

6. Primeras Jornadas de Energía más CD, Departamento de conversión y usos de la energía, Quito 2004

La aplicabilidad en el Ecuador se realiza en lugares muy alejados del Sistema Nacional Interconectado o sitios móviles, por ejemplo unidades de salud que su requerimiento energético sea una computadora y un refrigerador, o el caso que se encuentra en Galápagos, un faro guía en una Isla sin electricidad.

## **2.3 ENERGÍA EÓLICA.**

El aprovechamiento de la energía eólica se remonta a la época de los egipcios (2800a.C.), según relata la historia, se usó fundamentalmente para la navegación, la molienda de granos y el bombeo de agua. Luego se menciona que los persas (700a. C.) utilizaron el viento en molinos.

En años más recientes se conoce que Holanda desarrollo máquinas eólicas para la moliendo y el bombeo. En el año de 1850, aparece en los Estados Unidos la máquina “American farm windmill”, que es utilizado fundamentalmente para bombeo; es tan solo en 1930 que se inicia un desarrollo de máquinas eólicas para la generación de electricidad y entre 1950 y 1960 en Francia se desarrollan máquinas de 100 y 300 kW<sup>7</sup>.

La energía eólica se manifiesta en el viento, el que se produce por la diferencia de temperatura entre las diversas, capas de la atmósfera, en el mundo existen zonas bastante bien determinadas que se caracterizan por un alto potencial de viento, se destaca entre estas la zona tórrida comprendida entre los trópicos de Cáncer y Capricornio, donde se producen corrientes que en su parte cercana a la tierra, se dirigen hacia el ecuador terrestre, dando como resultado una zona de calma en la zona de convergencia.

La rotación de la Tierra es otro factor que influye en la presencia de viento, creando en el ecuador terrestre corrientes de superficie de este a oeste.

Los científicos calculan que hasta un 10% de la electricidad mundial se podría obtener de generadores de energía eólica a mediados del siglo XXI. Los generadores de turbina de viento tienen varios componentes. El rotor convierte

---

7. CARRASCO FRANKLIN, Energía eólica, Quito, 2003.

la fuerza del viento en energía rotatoria del eje, una caja de engranajes aumenta la velocidad y un generador transforma la energía del eje en energía eléctrica. En algunas máquinas de eje horizontal la velocidad de las aspas puede ajustarse y regularse durante su funcionamiento normal, así como cerrarse en caso de viento excesivo. Otras emplean un freno aerodinámico que con vientos fuertes reduce automáticamente la energía producida. Las máquinas modernas comienzan a funcionar cuando el viento alcanza una velocidad de unos 19 Km./h, logran su máximo rendimiento con vientos entre 40 y 48 Km./h y dejan de funcionar cuando los vientos alcanzan los 100 Km./h<sup>8</sup>. Los lugares ideales para la instalación de los generadores de turbinas son aquellos en los que el promedio anual de la velocidad del viento es de cuando menos 21 Km./h.

La energía eólica, que no contamina el medio ambiente con gases ni agrava el efecto invernadero, es una valiosa alternativa frente a los combustibles no renovables como el petróleo. Los generadores de turbinas de viento para producción de energía a gran escala y de rendimiento satisfactorio tienen un tamaño mediano (de 15 a 30 metros de diámetro, con una potencia entre 100 y 400 kW). Algunas veces se instalan en filas y se conocen entonces como granjas de viento. En California se encuentran algunas de las mayores granjas de viento del mundo y sus turbinas pueden generar unos 1.120 MW de potencia (una central nuclear puede generar unos 1.100 MW).

Se debe destacar que el recurso eólico es un recurso puntual, por lo que no se puede generalizar un potencial en forma indiscriminada.

Para el Ecuador las zonas potenciales que permitirían generación eléctrica son<sup>9</sup>:

- Angel, Carchi  $v = 6.5$  [m/s]
- Machachi, Pichincha  $v = 6.59$  [m/s]
- Olmedo, Pichincha  $v = 5.03$  [m/s]
- Cotopaxi  $v = 8.1$  [m/s]
- Galápagos  $v = 5 - 10$  [m/s]
- Bolívar  $v = 7$  [m/s]

---

8. CARRASCO FRANKLIN, Energía eólica, Quito, 2003.

9. CARRASCO FRANKLIN, Energía eólica, Quito, 2003.

## 2.4 ENERGÍA GEOTÉRMICA.

La energía geotérmica trata del calor disponible en el interior de la Tierra. La Tierra que guarda una enorme cantidad de energía en su interior. Un volcán o un geiser es una buena muestra de ello. Son varias las teorías que tratan de explicar las elevadas temperaturas del interior de la Tierra. Unas sostienen que se debe a las enormes presiones existentes bajo la corteza terrestre; otras suponen que tienen origen en determinados procesos radiactivos internos; por último, hay una teoría que lo atribuye a la materia incandescente que formó nuestro planeta. Diversos estudios científicos realizados en distintos puntos de la superficie terrestre han demostrado que, por término medio, la temperatura interior de la Tierra aumenta 3°C cada 100m de profundidad<sup>10</sup>.

Este aumento de temperatura por unidad de profundidad es denominado gradiente geotérmico.

La energía geotérmica es considerada una fuente de energía no convencional, y como un factor importante para el desarrollo energético futuro. El término geotermia se refiere a la energía térmica producida en el interior de la tierra, la cual se acaba de analizar. El calor telúrico es conducido a través del manto hacia la superficie terrestre que asciende con un flujo promedio, haciéndose difuso para las aplicaciones prácticas, dado que existen zonas anómalas en las cuales la variación de la temperatura es mayor; esto puede ser en las zonas volcánicas, o en contacto entre placas corticales. Los sistemas conectivos de agua subterránea captan dicho calor, alcanzando la superficie a través de rocas porosas o fallas geológicas.

Pero hay lugares que son importantes fuentes de calor en donde se manifiesta la energía geotérmica ya sea en forma de agua caliente, o vapor de agua a alta temperatura, las cuales pueden ser aprovechadas para la producción de energía eléctrica (200°C) o para otros usos. En el caso del agua caliente se la puede utilizar para calefaccionar viviendas (80°C) o industrias, tales usos serían destilación (140°C), cultivos de microorganismos (60°C), invernadero, etc. El vapor del agua se utiliza para mover turbinas que generan electricidad.

---

10. CARRASCO FRANKLIN, Energía geotérmica, Quito, 2003

Este recurso natural debería ser explotado, en los países en desarrollo, como una alternativa a los sistemas de energía convencionales, basado en el gas y el petróleo.

Los recursos potenciales en el Ecuador como<sup>11</sup>:

- Recurso geotérmico base 1.5x10<sup>34</sup> [J]
- Recurso geotérmico accesible 5.1x10<sup>18</sup> [J]

Alta entalpía

- Tufiño –Cerro Negro 138 [MW]
- Chalupas 2238 [MW]
- Chachimbiro 113 [MW]

Media entalpía

- San Joaquín 75 [°C]
- Papallacta –Napo 64 [°C]

## 2.5 MINI Y MICRO HIDROGENERACIÓN

La micro – minihidrogeneración está destinada a abastecer de energía eléctrica a poblaciones aisladas, distantes de la línea de interconexión eléctrica.

Tipo	Potencia	Salto		
		Bajo	Medio	Alto
<b>Micro</b>	Hasta 50 [kW]	< 15 m	15 - 30 m	>50m
<b>Mini</b>	50 - 500 [kW]	< 20 m	20 - 100 m	>100m
<b>Pequeña</b>	500 - 5000 [kW]	< 25 m	25 - 130 m	>130m

11. CARRASCO FRANKLIN, Energía geotérmica, Quito, 2003

## **Tipo sistemas.-**

### **◆ Derivación :**

- ◆ No detiene al caudal del río
- ◆ Desvía parte del caudal a un canal y una tubería
- ◆ La gran mayoría de los sistemas son de este tipo

### **◆ De Embalse :**

- ◆ Hace uso de un dique para detener el caudal del río, formándose un reservorio.
- ◆ A partir del reservorio toma el agua hacia la turbina.

## **2.6 MAREOMOTRIZ**

Con un promedio de 4 Km. de profundidad, mares y océanos cubren las tres cuartas partes de la superficie de nuestro planeta. Constituyen un enorme depósito de energía siempre en movimiento. En la superficie los vientos provocan las olas que pueden alcanzar hasta 12 metros de altura, 20 metros debajo de la superficie, las diferencias de temperatura (que pueden variar de -2 °C a 25° C) engendran corrientes; por último, tanto en la superficie como en el fondo, se da la conjugación de las atracciones solar y lunar.

Las mareas, es decir, el movimiento de las aguas del mar, producen una energía que se transforma en electricidad en las centrales mareomotrices. Se aprovecha la energía liberada por el agua de mar en sus movimientos de ascenso y descenso de las mareas (flujo y reflujo). Ésta es una de las nuevas formas de producir energía eléctrica.

El sistema consiste en aprisionar el agua en el momento de la alta marea y liberarla, obligándola a pasar por las turbinas durante la bajamar. Cuando la marea sube, el nivel del mar es superior al del agua del interior de la ría. Abriendo las compuertas, el agua pasa de un lado a otro del dique, y sus movimientos hacen que también se muevan las turbinas de unos generadores de corrientes situados junto a los conductos por los que circula el agua.

Cuando por el contrario, la marea baja, el nivel de la mar es inferior al de la ría, porque el movimiento del agua es en sentido contrario que el anterior, pero también se aprovecha para producir electricidad.

La energía gravitatoria terrestre y lunar, la energía solar y la eólica dan lugar, respectivamente, a tres manifestaciones de la energía del mar: mareas, gradientes térmicos y olas. De ella se podrá extraer energía mediante los dispositivos adecuados.

La energía de las mareas o mareomotriz se aprovecha embalsando agua del mar en ensenadas naturales y haciéndole pasar a través de turbinas hidráulicas.

La leve diferencia de temperaturas existente entre la superficie y las profundidades del mar (gradiente término), constituye una fuente de energía llamada mareomotérmica.

La energía de las olas es producida por los vientos y resulta muy irregular. Ello ha llevado a la construcción de múltiples tipos de máquinas para hacer posible su aprovechamiento.

## **2.7 BIOMASA**

La biomasa trata sobre la acumulación de energía en los desechos vegetales, animales y humanos, y el estudio de como obtener esa energía de los mismos. Dentro del proceso, la fotosíntesis es un fenómeno de vital importancia en todas las formas de vida sobre la tierra y fundamentalmente de la biomasa vegetal.

Las raíces de las plantas absorben agua del suelo, la clorofila con la participación de la energía solar fracciona el agua en oxígeno e hidrógeno.

El oxígeno es liberado a la atmósfera, mientras el hidrógeno se combina con el dióxido de carbono, que las plantas extraen de la atmósfera, produciendo carbohidratos, sustancia básica de las plantas.

Lógicamente las plantas son la fuente de alimentación, directa o indirectamente, de todos los organismos vivos.

Cuando la materia de las plantas se somete a combustión, con fines energéticos, o se metaboliza (cambio en la estructura) de alguna manera, se produce agua y dióxido de carbono, el cual es usualmente liberado a la atmósfera, con lo que se completa el ciclo natural.

La biomasa considera todas las formas de plantas y derivados, residuos de bosques y cultivos, desechos animales y municipales (aguas servidas y basura). La clasificación se refiere a:

- Árboles y arbustos.
- Cultivos agrícolas y sus residuos.
- Desechos pecuarios, municipales e industriales.
- Acuática.

### 2.7.1 ESTADÍSTICAS PARA EL ECUADOR<sup>12</sup>

- Bosques (Árboles – Arbustos)
    - Bosques naturales      100 – 110 [m<sup>3</sup>/hcta]
    - Plantaciones Forestales      15 [m<sup>3</sup>/hcta]
- 1 m<sup>3</sup> de madera = 0.215 [Tep]
- Cultivos agrícolas
    - Residuos (prioridad alimento)
    - Arroz, trigo, cebada, maíz, soya, maní, caña azúcar.  
365 000 [Tep]

---

12. CARRASCO FRANKLIN, Energía Biomasa, Quito, 2003

## 2.8 RESIDUOS URBANOS

Para el aprovechamiento de estos desechos se necesita que exista la infraestructura necesaria para poder captarlos y procesarlos, por lo indicado el potencial que se anota, se refiere al potencial de las áreas urbanas, las que se supone cuentan con un sistema de recolección de basura y alcantarillado. Los potenciales globales son<sup>13</sup>:

Basura	$406.7 * 10^3$ Tep	con Combustión directa
Aguas servidas	$28.2 * 10^3$ Tep	con Biogás

---

13. CARRASCO FRANKLIN, Energía Biomasa, Quito, 2003

## **CAPÍTULO 3**

### **DESECHOS INDUSTRIALIZABLES – BASURA Y LODOS.**

#### **3.1 GENERACIÓN DESECHOS – BASURA**

Los desechos sólidos son aquellos que identifican a cualquier tipo de productos residuales, restos, residuos o basuras no peligrosas, originados por personas naturales o jurídicas, públicas o privadas, que pueden ser sólidos o semisólidos, putrescibles o no putrescibles.

El término, basura, incluye todo, y abarca las masas heterogéneas de desperdicios de comunidades urbanas lo mismo que acumulaciones más homogéneas de desechos agrícolas, industriales y minerales. En un ambiente urbano, la acumulación de estos es una consecuencia directa de la actividad diaria.

##### **3.1.1 LOS IMPACTOS DE LA PRODUCCIÓN DE DESECHOS SÓLIDOS**

El hombre y los animales han usado los recursos de la tierra para sustentar la vida generando desechos desde tiempos ancestrales. La disposición de desechos humanos y de otra naturaleza no presentó un problema significativo, debido a que la población era pequeña y la cantidad de tierra disponible para la asimilación de desechos era grande. Hoy día se habla de reutilizar el valor energético y fertilizante remanentes de los desechos sólidos, pero el agricultor de los tiempos antiguos probablemente hizo un intento más audaz que esto. Todavía se pueden ver indicaciones de reutilizar en las prácticas agrícolas primitivas, aún sensibles, en muchas naciones en desarrollo donde los granjeros recirculan desechos sólidos por su valor combustible o fertilizante<sup>1</sup>.

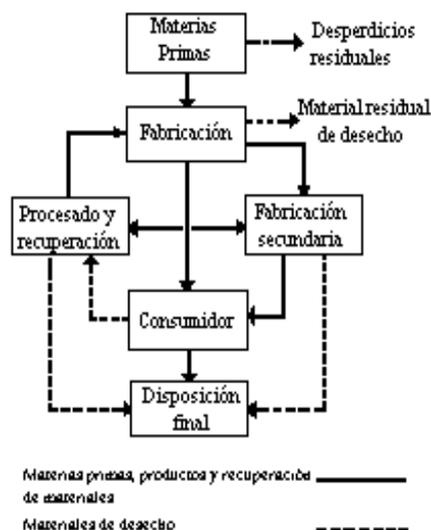
---

1. TCHOBANOGLIOUS T. y H. THIESEN. Ambiente y recursos naturales, 1ra ed. Venezuela, 2003

Los problemas con la disposición de desechos sólidos pueden ser encontrados desde el tiempo en que los seres humanos empezaron a congregarse en tribus, poblaciones y comunidades y la acumulación de desechos se convirtió en una consecuencia de la vida. La dispersión de alimentos y otros desechos sólidos en ciudades medievales - la práctica de botar desechos en calles sin pavimentar, carreteras y terrenos desocupados condujo a procreación de ratas, con su compañía de pulgas acarreando gérmenes de enfermedades, y la erupción epidémica de la peste. La falta de planes para el manejo de los desechos sólidos condujo a la epidemia de peste, la Muerte Negra, que mató a la mitad de los europeos en el siglo catorce y ocasionó muchas epidemias subsiguientes y un elevado tributo de muertes. No fue hasta el siglo XIX que las medidas de control de salud pública se convirtieron en una consideración vital de los funcionarios públicos, quienes empezaron a darse cuenta de que los desechos de alimentos se debían recolectar y disponer en forma sanitaria para controlar vectores de enfermedades.

### 3.1.2 FLUJO DE MATERIALES Y PRODUCCIÓN DE DESECHOS

Una indicación de cómo y cuándo se producen desechos sólidos en nuestra sociedad tecnológica se muestra en un flujo simplificado de materiales del diagrama presentado en la Figura 3.1. Los desechos sólidos (desperdicios) se producen al iniciar el proceso, empezando con la extracción de materias primas.



**Figura 3.1** Flujo de materiales y producción de desechos sólidos en una sociedad tecnológica.

### **3.1.3 CANTIDADES DE DESECHOS**

Cada individuo está familiarizado con los desechos sólidos, especialmente los producidos en municipalidades, tales como desechos de alimentos y desperdicios, vehículos abandonados, desechos de demolición y construcción, barrido de calles y desechos de jardines. Sin embargo, resultan cantidades mucho mayores de fuentes agrícolas, industriales y mineras.

### **3.1.4 CANTIDADES ESTIMADAS TOTALES Y PER CÁPITA**

Aunque los datos varían, estimativos recientes indican que en los Estados Unidos se producen 4.4 billones de toneladas cortas de desechos cada año. De este total, los desechos municipales representan aproximadamente 230 millones de toneladas; los desechos industriales, 140 millones de toneladas; y los desechos agrícolas, 640 millones de toneladas. La mayor cantidad de desechos sólidos proviene de minas y minerales y de desechos de animales, cada uno con un promedio de 1.7 billones de ton/año. La cantidad total a ser producida en el año se puede aproximar a 12 billones de [ton/año]<sup>2</sup>.

Observando sólo a los desechos urbanos e industriales, la tasa de producción en los Estados Unidos es de aproximadamente 1600 [Kg/cápita\*año]. En comparación, otros países industrializados tienen tasas más bajas, aunque afrontan problemas similares. En base a estimativos aproximados, Japón es el más cercano a los Estados Unidos con un promedio de 360 [Kg/cápita\*año]. La tasa en Holanda está sobre las 270 [Kg/cápita\*año]; en Alemania Occidental es de alrededor de 230 [Kg/cápita\*año].

En Latinoamérica se puede observar tasas como la de Brasil de 440 [Kg/cápita\*año], y la de Ecuador de 250 [Kg/cápita\*año], pudiéndose deducir que las diferencias pese a ser países menos industrializados son muy significativas debido que en Latinoamérica no se realizan selección, reciclaje y aprovechamiento realizados en países industrializados.

---

2. Salud Pública de los Estados Unidos (USPHS) y la Agencia para la Protección Ambiental (EPA).

## 3.2 CLASIFICACIÓN DE LOS DESECHOS.

Los desechos sólidos, como se anotó antes, incluyen todos los materiales sólidos y semisólidos que el poseedor considera no tienen suficiente valor para retenerlos. Colectivamente, forman la preocupación fundamental en todas las actividades del manejo de desechos sólidos ya sea que el nivel de planeamiento sea local sub-regional, o del estado y federal. Por esta razón, es importante conocer tanto como sea posible sobre estos materiales.

El conocimiento de las fuentes y tipos de desechos sólidos, junto con datos sobre la composición y las tasas de generación, es básico para el diseño y operación de los elementos funcionales asociados con su manejo.

### 3.2.1 FUENTES DE DESECHOS SÓLIDOS

Las fuentes de desechos sólidos están, en general, relacionados con el uso de la tierra y la zonificación. Aunque se puede clasificar las fuentes hasta un número indeterminado, se han encontrado útiles las siguientes categorías: 1) residencial, 2) comercial, 3) municipal, 4) industrial, 5) áreas libres, 6) plantas de tratamiento y 7) agrícola. En la Tabla 3.1, se describen las instalaciones de generación de desechos, actividades o localizaciones típicas asociadas con cada una de estas fuentes. También se identifican los tipos de desechos generados, que se discuten a continuación.

**Tabla 3.1. Instalaciones de producción, actividades o localizaciones típicas asociadas con varias clasificaciones de fuentes<sup>3</sup>.**

<b>F U E N T E S</b>	<b>INSTALACIONES, ACTIVIDADES O LOCALIZACIONES DONDE SE GENERAN LOS DESECHOS</b>	<b>TIPOS DE DESECHOS SOLIDOS</b>
<b>Residencial</b>	Residencias unifamiliares y multifamiliares, edificios de apartamentos, de poca, mediana y gran altura.	Desechos de alimentos desperdicios, cenizas desechos especiales.

3.TCHOBANOGLOUS G y ELIASSEN R. , Desechos sólidos Principios de ingeniería y administración, 3ra ed., México, Mc Graw-Hill, 1996.

### Continuación Tabla 3.1

<b>Comercial</b>	Tiendas, restaurantes, mercados, edificios de oficinas, hoteles, moteles, almacenes de impresos, reparación de automóviles, instalaciones médicas e instituciones, etc.	Desechos de alimentos, desperdicios, cenizas, desechos de demolición y construcción, desechos especiales, desechos ocasionalmente peligrosos.
<b>Municipal</b>	Residencias unifamiliares y multifamiliares, edificios de apartamentos, de poca, mediana y gran altura. Tiendas, restaurantes, mercados, edificios de oficinas, hoteles, moteles, almacenes de impresos, reparación de automóviles, instalaciones médicas e instituciones, etc	Desechos de alimentos, desperdicios, cenizas, desechos de demolición y construcción, desechos especiales, desechos ocasionalmente peligrosos.
<b>Industrial</b>	Construcción, fabricación, manufacturas ligeras y pesadas, refinerías, plantas químicas, madera, minería, generación de electricidad, demolición, etc.	Desechos de alimentos, desperdicios, cenizas, desechos de demolición y construcción, desechos especiales, desechos peligrosos.
<b>Areas libres</b>	Calles, avenidas, parques, terrenos vacantes, terrenos de juego, playas, autopistas, áreas recreacionales, etc.	Desechos especiales, desperdicios.
<b>Sitio de Plantas de tratamiento.</b>	Separar agua, aguas residuales y procesos industriales de tratamiento, etc.	Desechos de plantas de tratamiento, compuestos principalmente de lodos residuales
<b>Agrícolas</b>	Cultivos, huertos, viñedos, ordeñaderos, corrales de ganado y animales, granjas, etc.	Desechos de alimentos compuestos, desechos de la agricultura, desperdicios, desechos

---

### 3.2.2 TIPOS DE DESECHOS SÓLIDOS

Como una base para las discusiones subsiguientes, será útil definir los varios tipos de desechos sólidos que son producidos. Ver Tabla 3.1. Es importante

estar enterado de las definiciones de los términos de los desechos sólidos y de que las clasificaciones varían mucho en la literatura. Por consiguiente, la utilización de datos publicados requiere de considerable cuidado, criterio y sentido común. Las siguientes definiciones se proponen para que sirvan como guía y no para ser arbitrarias o precisas en un sentido científico.

**Desechos de alimentos.** Desechos de alimentos son los residuos de animales frutas o vegetales que resultan del manejo, preparación, enfriamiento e ingestión de alimentos (también llamados basura). La característica más importante de estos desechos es que son altamente putrescibles y se descomponen rápidamente, en especial en clima cálido. A menudo, la descomposición conducirá al desarrollo de olores ofensivos. En muchos lugares, la naturaleza putrescible de estos desechos influenciará apreciablemente el diseño y la operación del sistema de recolección de desecho.

Además de las cantidades de desechos de alimentos producidos en residencias se producen cantidades considerables en cafeterías, restaurantes y en instalaciones institucionales grandes como hospitales, prisiones instalaciones asociadas con el mercadeo de alimentos, incluyendo tiendas y mercados al por mayor y menor.

**Escombros.** La basura o escombros consisten en desechos sólidos combustibles y no combustibles de casas, instalaciones, actividades comerciales, etc., excluyendo desechos de alimentos u otros materiales altamente putrescibles. Típicamente, los desperdicios combustibles consisten de materiales como papel, cartón, plásticos, textiles, caucho, cuero, madera, muebles y corte de jardines. Los desperdicios no combustibles consisten en artículos como vidrio loza, envases de hojalata, aluminio, metales ferrosos y no ferrosos y tierra.

**Cenizas y residuos.** Materiales que resultan de quemar madera, carbón, coque y otros desechos combustibles en casas, tiendas, instituciones e instalaciones industriales y municipales para calefacción, cocción y disposición de desechos combustibles, se clasifican como cenizas y residuos. Los residuos de plantas

de generación de energía, no se incluyen en esta categoría. Las cenizas y residuos normalmente, se componen de materiales finos, polvorientos, escorias, clínquer y pequeñas cantidades de materiales quemados total o parcialmente. En los residuos de incineradores municipales también se encuentran vidrio, loza y varios materiales.

**Desechos de Demolición y Construcción.** Los desechos de edificios demolidos y otras estructuras se clasifican como desechos de demolición. Los desechos de la construcción, remodelación y reparación de residencias individuales, edificios comerciales y otras estructuras se clasifican como desechos de la construcción; estos desechos con frecuencia son clasificados como basura.

Las cantidades producidas son difíciles de estimar y de composición variable, pero pueden incluir tierra, piedras, concreto, ladrillos, mortero, madera, tejas y plomería, partes de calefacción y eléctricos.

**Desechos Especiales.** Desechos como los del barrido de calles, desperdicios a lo largo de carreteras, desechos de recipientes municipales de desperdicios escombros de cuencas, animales muertos y vehículos abandonados, se clasifican como desechos especiales. Debido a que es imposible predecir donde se encontrarán animales muertos o automóviles abandonados, se identifica a estos desechos como originados en lugares no específicos y dispersos. Esto contrasta con las fuentes residenciales, que también son dispersas pero específicas en cuanto a que la producción es un acontecimiento periódico.

**Desechos de Plantas de Tratamiento.** Los desechos sólidos y semisólidos de instalaciones de tratamiento de aguas, aguas residuales y desechos industriales se incluyen en esta clasificación; las características específicas de estos materiales varían dependiendo de la naturaleza del proceso de tratamiento. Actualmente; su recolección no está a cargo de la mayoría de las agencias municipales responsables del manejo de los desechos sólidos. En el futuro, sin embargo, se anticipa que su disposición llegará a ser un factor importante en cualquier plan de manejo de desechos sólidos.

Desechos Agrícolas. Los desechos y residuos que resultan de diversas actividades agrícolas, como los de la siembra y cosecha de surcos, campos, árboles y cultivos de vid, la producción de leche, la producción de animales para sacrificio y la operación de corrales se llaman colectivamente desechos agrícolas. Actualmente, la disposición de estos desechos no es responsabilidad de la mayoría de las agencias municipales y regionales de manejo de desechos sólidos. Sin embargo, en muchas áreas la disposición de estiércol animal se ha convertido en un problema crítico, especialmente de corrales y ordeñaderos.

Desechos Peligrosos. Los desechos químicos, biológicos, inflamables, explosivos o radioactivos que plantean un peligro sustancial para la vida humana, de las plantas o animal; inmediatamente en el tiempo, se clasifican como peligrosos. Corrientemente, estos desechos se presentan en forma de líquidos, pero con frecuencia se encuentran en forma de gases, sólidos o lodos; en todos los casos, estos desechos deben ser manejados y dispuestos con gran cuidado y precaución.

### **3.2.3 COMPOSICIÓN DE LOS DESECHOS SÓLIDOS MUNICIPALES.**

La información sobre la composición de los desechos sólidos es importante en la evaluación de alternativas sobre necesidades de equipo, sistemas, programas y planes de manejo. Por ejemplo, si los desechos sólidos son producidos en una instalación comercial sólo consisten de productos de papel, puede ser apropiado el uso de equipo especial de procesado como desmenuzadores y fardos. También se puede considerar la recolección separada si la ciudad o agencia de recolección está involucrada en un programa de recirculación de productos de papel. La evaluación de la factibilidad de la incineración depende de la composición química de los desechos sólidos.

La composición física y química de los desechos sólidos municipales se discuten a continuación. La discusión se limita a un análisis de los desechos municipales, debido a que la consideración de la composición de todos los tipos de desechos no sería de gran ayuda puesto que este proyecto se concentra en los desechos sólidos municipales. Sin embargo, es importante

anotar que las bases del análisis presentado son aplicables a todos los tipos de desechos sólidos.

### *Composición Física*

La información y datos sobre la composición física de desechos sólidos son importantes en la selección y operación del equipo e instalaciones, en la evaluación de la factibilidad de la recuperación de recursos y energía, y en el análisis y diseño de las instalaciones de disposición. Los componentes individuales que constituyen los desechos sólidos municipales, y el contenido de humedad y la densidad de los desechos sólidos se describen en la siguiente discusión.

Componentes individuales. Los componentes que típicamente constituyen la mayoría de los desechos sólidos municipales y su distribución relativa se reportan en la Tabla 3.2. Aunque se podría seleccionar cualquier número de componentes, se han seleccionado los que aparecen en la Tabla 3.2, debido a que son identificables fácilmente y consistentes con las categorías componentes reportadas en la literatura y debido a que se ha comprobado que son adecuadas para la caracterización de los desechos sólidos, para la mayoría de las aplicaciones.

**Tabla 3.2. Los componentes que típicamente constituyen la mayoría de los desechos sólidos municipales Dirección de planificación/ EMASEO, 2002**

<b>Componente</b>	<b>Prom. Anual [%]</b>	<b>Humedad [%]</b>
Desperdicio de alimentos	54,19	70
Vidrio	3,67	2
Papel, cartón	9,66	6
Plástico	7,9	2
Textiles	7,2	20
Madera	0,46	25
Metal	2,54	3
Inorgánicos (>2mm)	0,41	8
Inorgánicos (<2mm)	2,71	6
	11,26	
	100	

### 3.3 PROCESO DE SEPARACIÓN.

Para una exitosa conversión de desechos a energía es necesaria la recuperación de basura orgánica de empresas, almacenes, casas. En especial desechos fácilmente biodegradables y lodos, que también pueden ser utilizados, estos últimos necesitan tratamientos especiales. Estos lodos son utilizados para acelerar el proceso de biodegradación.

Los métodos a utilizarse, recursos económicos y los impactos ambientales dependen de la buena selección de los desechos, por ejemplo al usar fácilmente biodegradables el tiempo de retención sería menor, igual si en la selección no se retira los detergentes estos podrían afectar al crecimiento bacteriano. Por este motivo la elección y selección de la materia prima es vital para reducir los desechos y su uso energético.

Los desperdicios deben ser separados según la Tabla 3.2 o en:

- Fácilmente biodegradables (Desperdicios de comida, papel, cartón).
- Lentamente biodegradables (Madera, textiles).
- Vidrio, plástico.
- Metales e inorgánicos.

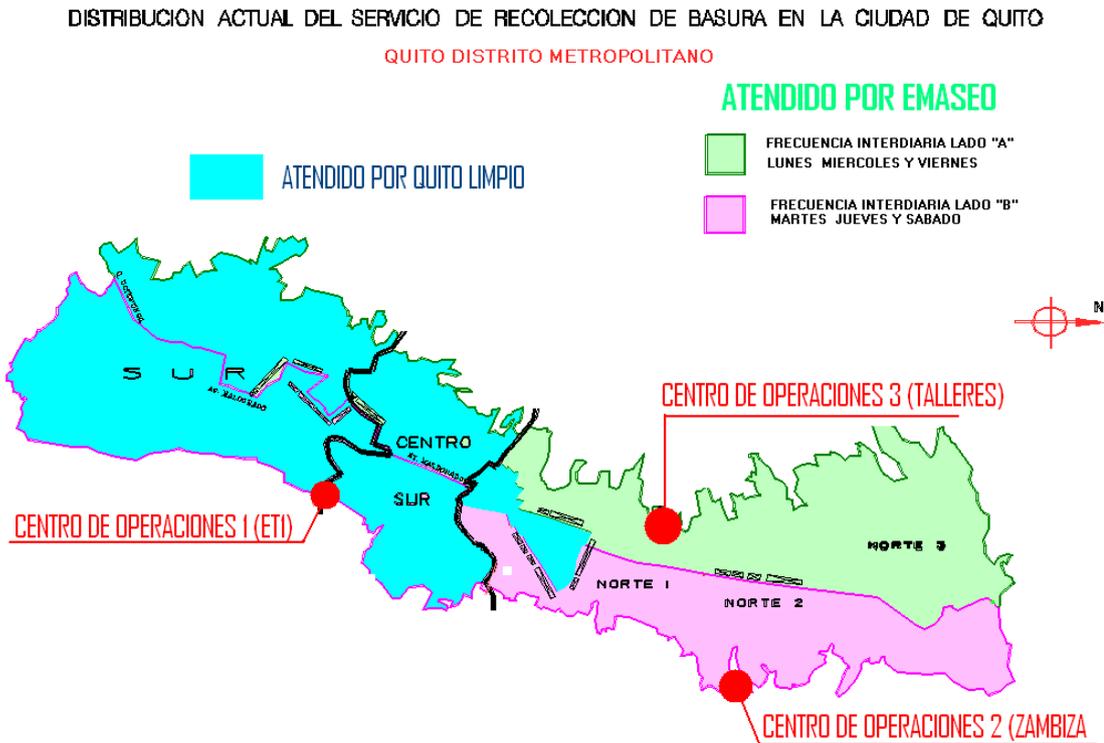
Los sistemas de tratamiento y reciclaje difieren unos de otros. La selección es muy importante para determinar el tipo de compost a obtener, el sistema de selección a utilizarse en plantas de este tipo es por bandas (Figura 3.2).



**Figura 3.2.** Selección, separación mediante bandas.

### 3.4 ESTADÍSTICAS DE RECOLECCIÓN DE BASURA PARA QUITO.

Para entender el sistema de recolección de Quito se presenta la siguiente figura



**Figura 3.3** Distribución de recolección de basura

### 3.4.1 DATOS DE QUITO LIMPIO<sup>4</sup>.

Tablas 3.3, 3.4 y 3.5

**Tabla 3.3** Recolección de consorcio “Quito Limpio” en la zona sur.

<b>DETALLE ZONA SUR</b>	<b>CANTIDAD</b>	<b>UNIDAD</b>
Población	536.549	Habitantes
Producción per cápita	0.75	Kg/día
Generación	402	Ton/día
Reciclaje	32	Ton/día
Recolección	342	Ton/día
Total toneladas recolectadas diarias	374	Toneladas
Población servida con recolección	456.067	Habitantes
Población no servida con recolección	80.482	Habitantes
Cobertura	85	%

**Tabla 3.4** Recolección de consorcio “Quito Limpio” en la zona centro.

<b>DETALLE ZONA CENTRO</b>	<b>CANTIDAD</b>	<b>UNIDAD</b>
Población	229.569	Habitantes
Producción per cápita	0.75	Kg/día
Generación	172	Ton/día
Reciclaje	41	Ton/día
Recolección	142	Ton/día
Total toneladas recolectadas diarias	184	Toneladas
Población servida con recolección	189.624	Habitantes
Población no servida con recolección	39.945	Habitantes
Cobertura	83	%

**Tabla 3.5** Total de Recolección de consorcio “Quito Limpio”.

<b>TOTAL ZONA ATENDIDA POR EL CONSORCIO "QUITO LIMPIO"</b>		
<b>DETALLE ZONA NORTE Y PARROQUIAS</b>	<b>CANTIDAD</b>	<b>UNIDAD</b>
Población	766.118	Habitantes
Producción per cápita	0.75	Kg/día
Generación	575	Ton/día
Reciclaje	74	Ton/día
Recolección	484	Ton/día
Total toneladas recolectadas diarias	558	Toneladas
Población servida con recolección	645.691	Habitantes
Población no servida con recolección	120.427	Habitantes
Cobertura	84	%

4. Información basada en la población del último censo del INEC 2002.

### 3.4.2 DATOS DE EMASEO<sup>5</sup>.

Tablas 3.6, 3.7 y 3.8

**Tabla 3.6** Recolección de empresa municipal “EMASEO” en la zona norte.

<b>DETALLE ZONA NORTE</b>	<b>CANTIDAD</b>	<b>UNIDAD</b>
Población	633.696	Habitantes
Producción per cápita	0.75	Kg/día
Generación	475	Ton/día
Reciclaje	38	Ton/día
Recolección	414	Ton/día
Total toneladas recolectadas diarias	452	Toneladas
Población servida con recolección	551.949	Habitantes
Población no servida con recolección	81.487	Habitantes
Cobertura	87	%

**Tabla 3.7** Recolección de empresa municipal “EMASEO” en la zona parroquias.

<b>DETALLE ZONA PARROQUIAS</b>	<b>CANTIDAD</b>	<b>UNIDAD</b>
Población	441.386	Habitantes
Producción per cápita	0.56	Kg/día
Generación	247	Ton/día
Reciclaje	30	Ton/día
Recolección	161	Ton/día
Total toneladas recolectadas diarias	190	Toneladas
Población servida con recolección	286.901	Habitantes
Población no servida con recolección	154.485	Habitantes
Cobertura	65	%

**Tabla 3.8** Total de recolección de empresa municipal “EMASEO”.

<b>TOTAL ZONA ATENDIDA POR "EMASEO"</b>		
<b>DETALLE ZONA NORTE Y PARROQUIAS</b>	<b>CANTIDAD</b>	<b>UNIDAD</b>
Población	1.075.082	Habitantes
Producción per cápita	0.67	Kg/día
Generación	722	Ton/día
Reciclaje	68	Ton/día
Recolección	575	Ton/día
Total toneladas recolectadas diarias	642	Toneladas
Población servida con recolección	838.850	Habitantes
Población no servida con recolección	236.232	Habitantes
Cobertura	78	%

5. Información basada en la población del último censo del INEC 2002.

### 3.5 LA BASURA COMO UN RECURSO ENERGÉTICO RENOVABLE.

Para hablar de la basura como un recurso energético renovable se debe recordar que por más de veinte años, la energía a partir de desechos ha sido reconocida como una fuente de energía renovable. Energía a partir de desechos es una “modo de obtener energía limpia, confiable y renovable,” según U.S. EPA (Environmental Project Agency). Los reportes federales de los Estados Unidos, expresan que en quince estados se están reestructurando las leyes eléctricas para usar energías renovables, principalmente la de Biomasa, EPA estima que el 75% de la basura puede ser utilizada como para generar electricidad. Transformar basura en energía es una “importante contribución para lograr que el uso de las energías renovables aumente y al mismo tiempo reduzca la contaminación”.

Otro beneficio de la generación a partir de desechos es que puede generar electricidad los 365 días al año, las 24 horas al día. En la mayoría de plantas generadoras, más del 90% de la disponibilidad o la capacidad instalada está siempre en generación. El beneficio de este proceso consiste en que la producción de desechos es constante y continua, por lo cual nunca falta combustible, reduciendo y ayudando a las ciudades con el manejo de la basura. Además se reduce sustancialmente las áreas de relleno sanitario.

En la tabla 3.9 se detalla los procesos para recuperar energía de los desechos sólidos<sup>6</sup>.

**Tabla 3.9. Procesos para recuperar energía de los desechos sólidos.**

<b>Proceso</b>	<b>Producto Recuperado</b>	<b>Preproceso</b>
Combustión (Incineración)	Energía en forma de vapor o electricidad	No, se realiza ningún post-tratamientos para no contaminar el aire
Gasificación	Gas con baja energía	Separar la parte orgánica, triturar y preparar celdas de combustible o biodigestores

6.TCHOBANOGLOUS G. PEAVY R. Environmental Engineering, 1998

Oxidación húmeda	Ácidos orgánicos	Separar la parte orgánica, triturar y preparar celdas de combustible o biodigestores
Pirólisis	Combustibles sólidos, líquidos o gaseosos	Separar la parte orgánica, triturar y preparar celdas de combustible o biodigestores
Hidrogasificación	Combustibles líquidos o gaseosos con media energía	Separar la parte orgánica, triturar y preparar celdas de combustible o biodigestores
Regeneración de vapor	Gas con energía media	Separar la parte orgánica, triturar y preparar celdas de combustible o biodigestores

### **3.6 DISPOSICIÓN FINAL DE DESECHOS - RELLENOS SANITARIOS.**

El último elemento funcional en el sistema de manejo de desechos sólidos representado en la Figura 3.1. La disposición es el último destino de todos los desechos sólidos, ya sean desechos residenciales recolectados y transportados directamente a un relleno sanitario, desechos semisólidos (lodo) de plantas de tratamientos municipales o industriales, residuo del incinerador, abono, u otras sustancias de diferentes plantas de procesado de desechos sólidos que ya no son útiles a la sociedad.

Entonces, la planificación del uso de la tierra se convierte en un determinante primordial en la selección y operación de rellenos sanitarios. En muchas ciudades esto involucra a las comisiones de planificación de la ciudad, condado, u otra autoridad de planificación regional. Se exigen declaraciones de impacto ambiental para todos los nuevos sitios de relleno con el fin de asegurar el cumplimiento de las normas de salud pública, estética, y usos futuros de la tierra. Un relleno sanitario moderno no es un botadero a campo abierto. Es un método de disposición de los desechos sólidos que no crea molestias o riesgos para la salud, tales como criaderos de ratas e insectos y la contaminación del agua subterránea, o la seguridad pública.

Se deben seguir principios de ingeniería para confinar los desechos al área más pequeña posible, reducirlos al mínimo volumen práctico mediante compactación en el sitio, y cubrirlos después de cada día de operación para reducir la exposición a las plagas. Después de que toda el área es llenada, se debe colocar una cubierta de tierra de 60 centímetros mínimo de espesor, y agregar más tierra- si se producen asentamientos diferenciales durante la descomposición de la materia orgánica subyacente. Esta descomposición es anaerobia y en consecuencia tiene una tasa de reacción muy lenta. Uno de los peligros de la biodegradación es la producción de gas metano. Aunque se forma a una velocidad lenta, se puede acumular debajo de edificaciones y en consecuencia se debe ventilar a la atmósfera. En ciudades con rellenos sanitarios grandes se están haciendo intentos para recoger el metano y producir energía.

Uno de los conceptos más importantes es planificar el uso final de la tierra reclamada. Muchos campos de golf han sido establecidos sobre rellenos sanitarios. Parques, almacenamientos al aire libre y campos de atletismo ocupan sitio de muchos rellenos sanitarios antiguos. Estos deben ser planificados de manera que no se localicen edificaciones sobre los desechos sólidos en descomposición. La planificación se debe hacer antes del llenado de manera que, las áreas para construcciones sean llenadas únicamente con tierra.

Por ejemplo para eliminar el estigma de llenar terrenos bajos con desechos sólidos, la ciudad de Nueva York ha colocado grandes carteles adyacentes a las autopistas y sitios de rellenos. Estos carteles indican que se está llenando el terreno para un futuro campo de golf, bajo la dirección del Departamento de Parques (los planificadores), el Departamento de Saneamiento (disponen los desechos sólidos), y el Departamento de Obras Públicas (suministran el lodo de sus plantas de tratamiento de aguas residuales). Así, tres agencias de la ciudad están "matando tres pájaros con una piedra" y beneficiando al público con una planificación y operación cuidadosa.

### **3.7 LODOS ORGÁNICOS.**

Los sistemas que usan lodos orgánicos para aumentar la concentración de biomasa en los biodigestores son ampliamente utilizados, a nivel mundial para el tratamiento de desechos domésticos e industriales, en situaciones que son necesarias reducir el tiempo de retención o una elevada calidad del efluente. Los lodos orgánicos son muy útiles ya que las bacterias se encuentran en gran cantidad (10000 ppm) y hambrientas de materia orgánica (desechos), al entrar en contacto con la misma desprenden sus exo-enzimas, que empiezan a descomponer a los desechos, acelerando los procesos de biodegradación.

Nota: En el presente proyecto se estudió la posibilidad de usar lodos industriales de la refinería de Esmeraldas, lo cual resultó imposible debido a la presencia de metales pesados (inhibirían a las bacterias) en la composición química. También se vio la posibilidad de utilizar lodos de Danec S.A., pero el hermetismo de la empresa con respecto a sus lodos contaminantes imposibilitó su debido estudio.

## CAPÍTULO 4

### GENERACIÓN DE BIOGÁS.

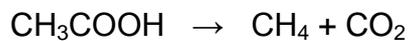
#### 4.1 MODELAMIENTO DEL PROCESO DE BIODEGRADACIÓN.

Los principios termoquímicos, estequiométricos y cinéticos que gobiernan el fenómeno de la biodigestión anaeróbica deben ser indicados antes de proceder con la descripción y aplicación del modelamiento biológico.

La biodigestión anaeróbica, en la que los microorganismos al no consumir oxígeno y ocurrir a temperaturas inferiores a los 35 grados centígrados, para biodigestores convencionales de pequeña y mediana escala, casi no produce anhídrido carbónico (CO<sub>2</sub>), pero en cambio sí gas metano.

La producción de CH<sub>4</sub> es consecuencia de las siguientes reacciones bioquímicas:

- Fermentación del ácido acético:

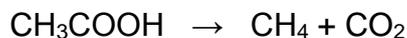


- Fermentación del ácido propiónico:

1era. etapa



2da. Etapa



Las reacciones citadas anteriormente, no consumen energía química que almacena la materia orgánica, esto se prueba mediante la generación en el proceso de biodegradación de un gas combustible, así como también las sustancias semisólidas y líquidas que se producen, con un potencial importante como fertilizante y nutriente para plantas y animales.

Con el aprovechamiento completo de los desechos orgánicos, se elimina la contaminación a un costo menor, aumentando la producción de gas, radica aquí su importancia para los sectores energético, agroindustrial y ecológico.

Resumiendo, las etapas importantes del proceso de biodigestión anaeróbica son:

**1. Hidrólisis:** las materias primas que se utilizan sus componentes complejos como celulosa, proteínas, lípidos y otros son hidrolizados en compuestos solubles como azúcares, aminoácidos y grasas por la acción de enzimas extracelular de las bacterias.

**2. Acidogénesis:** Los compuestos solubles son fermentados en ácidos grasos volátiles (ácido acético, propiónico y butírico) alcoholes, hidrógeno y CO<sub>2</sub>. Esta etapa se conoce como fermentativa.

**3. Acetanogénesis:** Ocurre cuando las bacterias acetogénicas oxidan el ácido propiónico y butírico hasta ácido acético e hidrógeno que son substratos metanogénicos.

**4. Metanogénesis:** En esta etapa las bacterias metanogénicas transforman los ácidos orgánicos en metano.

### El Proceso de digestión anaeróbica

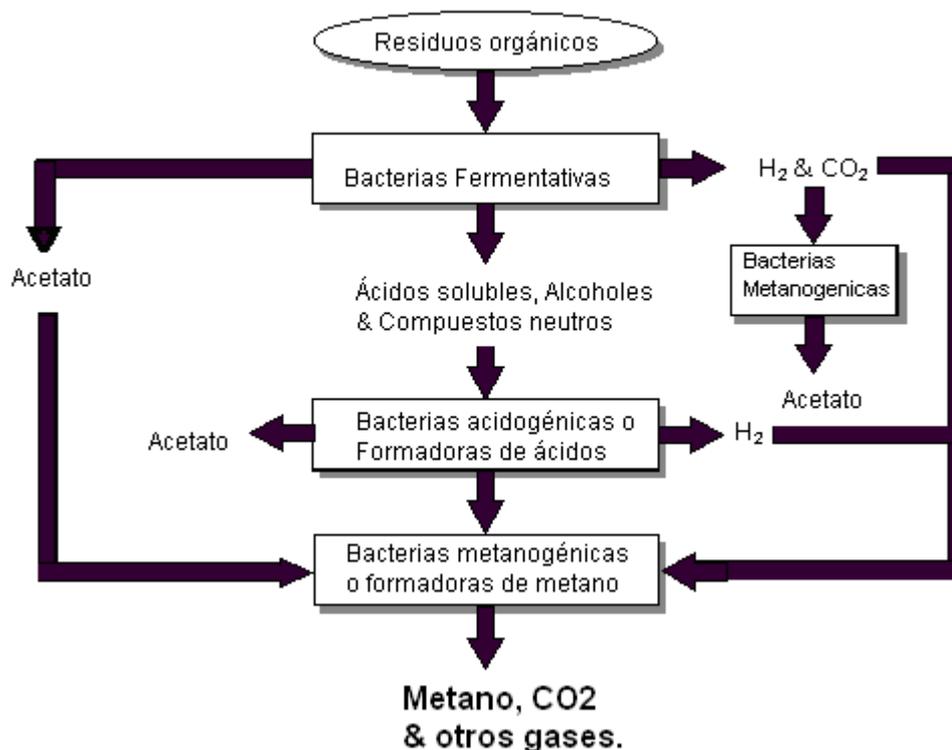
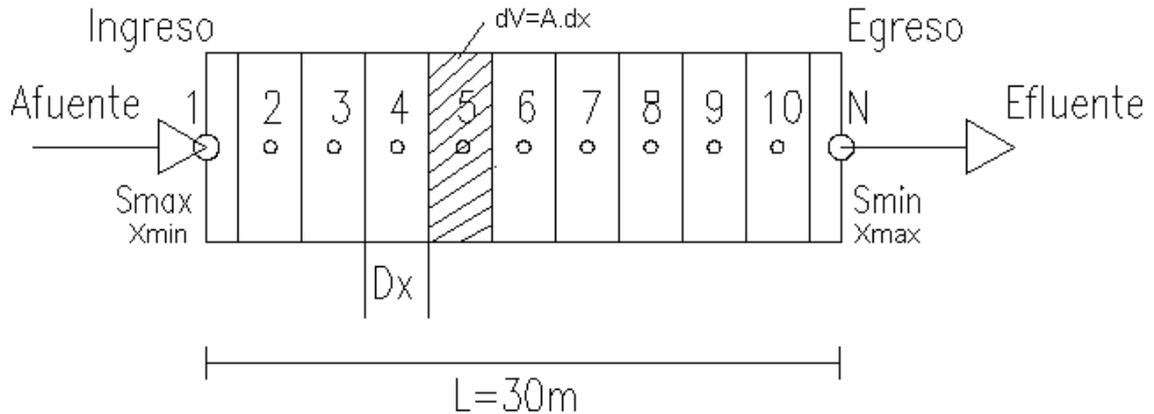


Figura 4.1 Proceso de degradación anaeróbica.

Para el modelamiento biológico se utilizó un biodigestor Flujo Pistón. Las ecuaciones que describen el proceso de biodegradación de la basura orgánica en un elemento diferencial de volumen, Figura 4.2, considerando dos tipos de sustratos, que serán explicados más adelante, son los siguientes:



**Figura 4.2** Discretización del modelo de biodigestor (Flujo Pistón).

- Sustrato fácilmente biodegradable.

$$\frac{\partial S}{\partial t} = -Vx * \frac{\partial S}{\partial x} - \frac{r_H}{Y_H} + r_h \quad \text{Ec. (4.1)}$$

Donde:

$r_H$ =rata de crecimiento. [mg/l\*h]

$Y_H$ =producción de bacterias heterotróficas. [mg/l\*h]

$r_h$ =hidrólisis del nitrógeno y materia orgánica. [mg/l\*h]

- Sustrato lentamente biodegradable.

$$\frac{\partial S}{\partial t} = -Vx * \frac{\partial S}{\partial x} + (1 - f_p) * (r_{h,d}) - r_h \quad \text{Ec. (4.2)}$$

Donde:

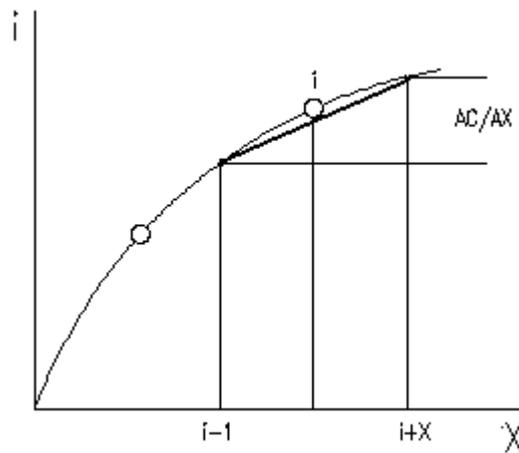
$f_p$ =Factor de biomasa convertido en material particulado.

$r_{h,d}$ =rata de decaimiento de las bacterias heterotróficas. [mg/l\*h]

- Biomasa.

$$\frac{\partial X}{\partial t} = -Vx * \frac{\partial X}{\partial x} + r_H + r_{h,d} \quad \text{Ec. (4.3)}$$

Para resolver estas ecuaciones diferenciales, se puede utilizar la aproximación numérica, para lo cual se necesita discretizarse el elemento físico (bioreactor). A fin de plantear las ecuaciones de los elementos discretos del modelo físico, se empleó el método de diferencias finitas, el cual asume que la concentración del sustrato o de la biomasa se concentra en el centro del elemento diferencial (nodo).



**Figura 4.3** Aproximación por diferencias finitas.

Aplicando la técnica de diferencias hacia delante y hacia atrás, ver Figura 4.3, las ecuaciones diferenciales 4.1, 4.2 y 4.3 se representan como:

*Sustratos fácilmente biodegradables.*

Para los elementos diferenciales intermedios.

$$\frac{S^{t+\Delta t} + S^t}{\Delta t} = -V_x * \frac{S(i+1) - 2 * S(i) + S(i-1)}{2 * \Delta x} - \frac{r_H}{Y_H} + r_h \quad \text{Ec. (4.4)}$$

Condiciones de borde:

- A la entrada  $S(0,t) = S_{max} = S_1 = 0.147 \text{ Kg/L}$  **Ec. (4.5)**

- A la salida:

$$\frac{S^{t+\Delta t} + S^t}{\Delta t} = -V_x * \frac{S(N-1) - S(N)}{2 * \Delta x} - \frac{r_H}{Y_H} + r_h \quad \text{Ec. (4.6)}$$

*Sustratos lentamente biodegradables.*

Para los elementos diferenciales intermedios.

$$\frac{S_L^{t+\Delta t} + S_L^t}{\Delta t} = -V_x * \frac{S_L(i+1) - 2 * S_L(i) + S_L(i-1)}{2 * \Delta x} + (1 - f_p) * (r_{h,d}) - r_h \quad \text{Ec. (4.7)}$$

Condiciones de borde:

- A la entrada  $S_L(0,t) = S_L \text{ max} = S_{L1} = 0.147 \text{ Kg/L}$  **Ec. (4.8)**

- A la salida:

$$\frac{S_L^{t+\Delta t} + S_L^t}{\Delta t} = -V_x * \frac{S_L(N-1) - S_L(N)}{2 * \Delta x} + (1 - f_p) * (r_{h,d}) - r_h \quad \text{Ec. (4.9)}$$

*Biomasa.*

Para los elementos diferenciales intermedios.

$$\frac{X^{t+\Delta t} + X^t}{\Delta t} = -V_x * \frac{X(i+1) - 2 * X(i) + X(i-1)}{2 * \Delta x} + r_H + r_{h,d} \quad \text{Ec. (4.10)}$$

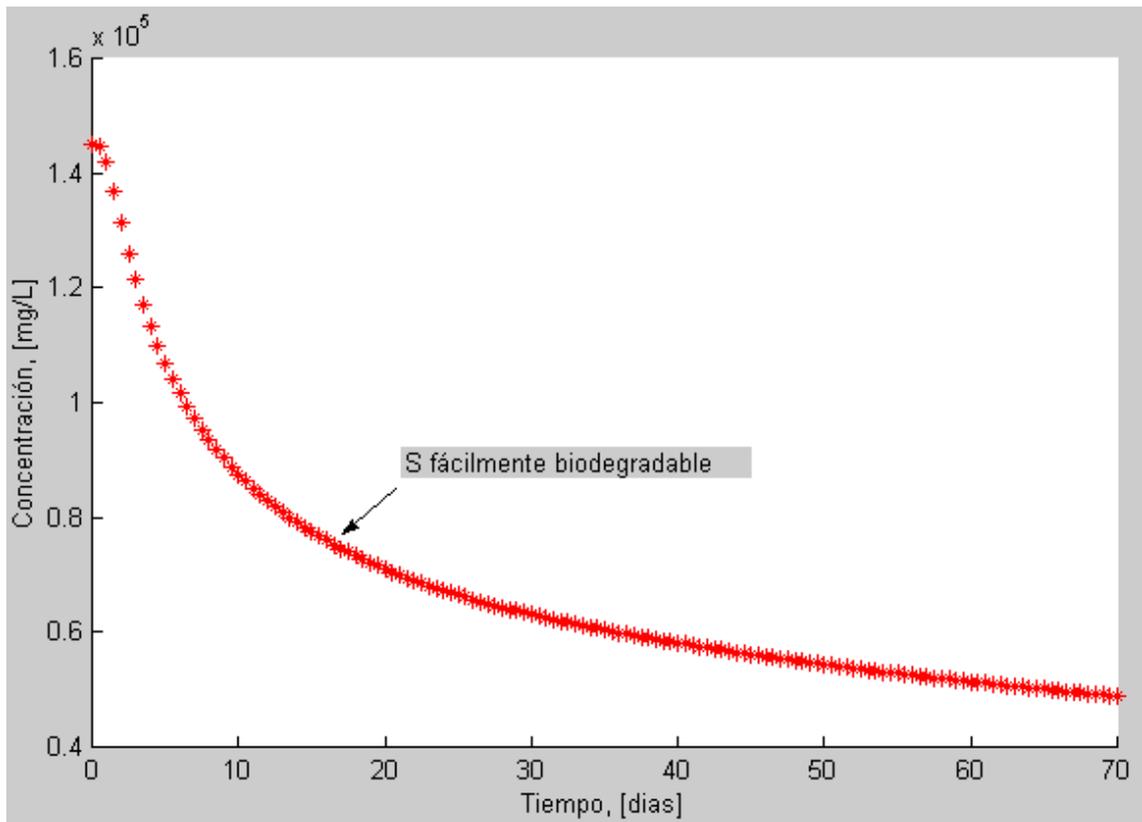
Condiciones de borde:

- A la entrada  $S(0,t) = X_{\text{min}} = X_1 = 2000 \text{ mg/L}$  **Ec. (4.11)**

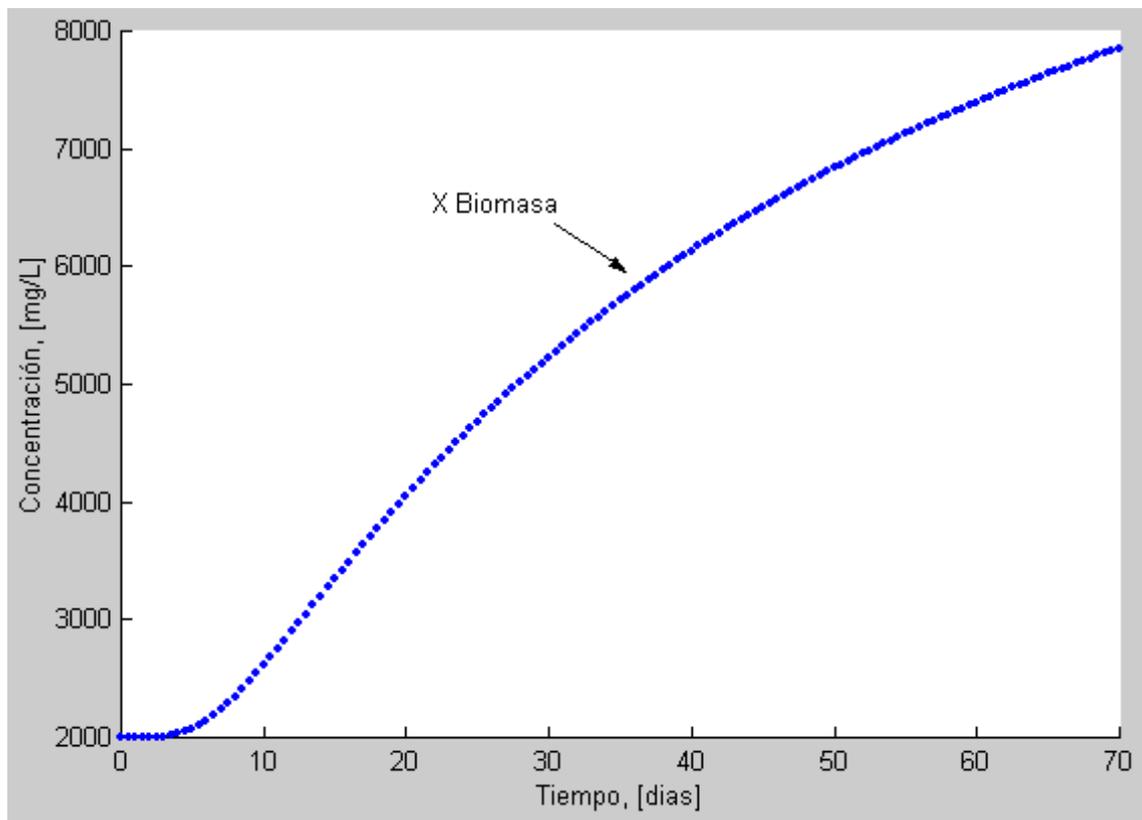
- A la salida:

$$\frac{X^{t+\Delta t} + X^t}{\Delta t} = -V_x * \frac{X(N-1) - X(N)}{2 * \Delta x} + r_H + r_{h,d} \quad \text{Ec. (4.12)}$$

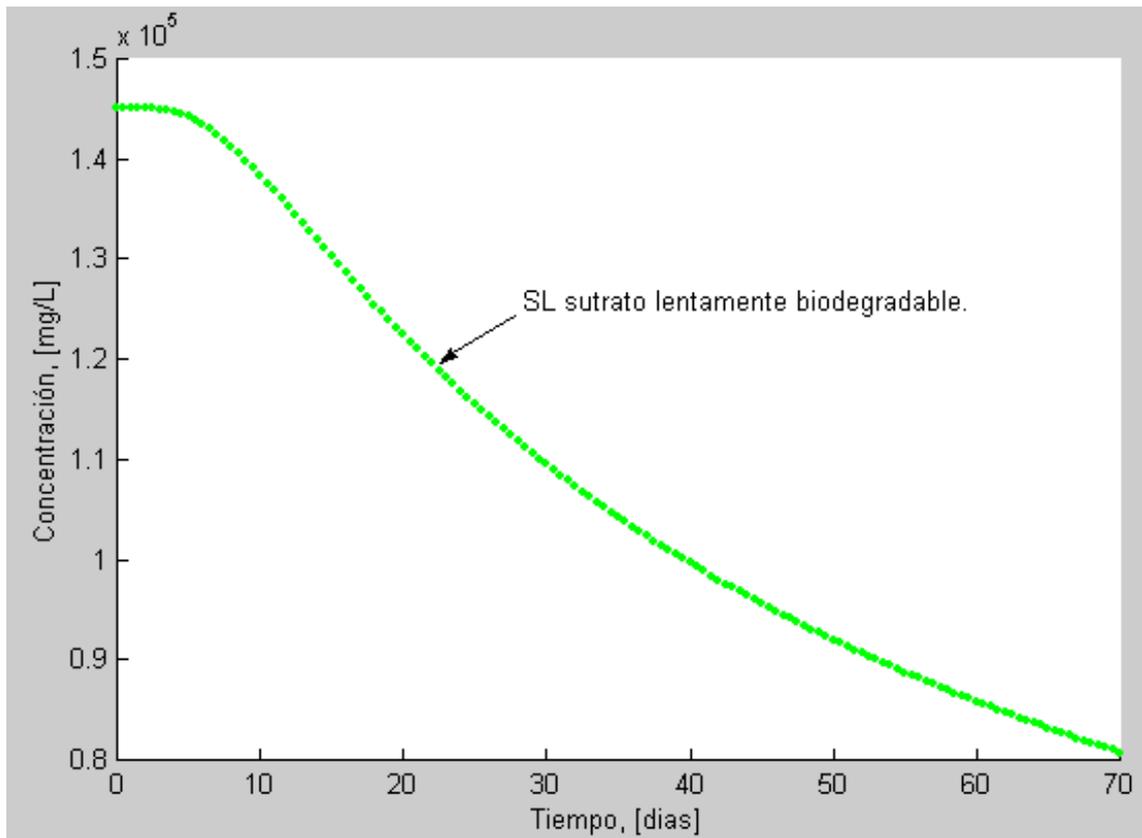
El sistema formado por las ecuaciones (4.4, 4.5, 4.6, 4.7, 4.8, 4.9, 4.10, 4.11 y 4.12), se resuelve aplicando un programa en MATLAB, ver **ANEXO 1**, el cual genera las relaciones del consumo del sustrato fácilmente biodegradable, el sustrato lentamente biodegradable y el crecimiento bacteriano versus tiempo, ver Figura 4.4, 4.5 y 5.6.



**Figura 4.4** Variación de la concentración de sustrato fácilmente degradable Vs. Tiempo



**Figura 4.5** Crecimiento de la biomasa Vs. Tiempo



**Figura 4.6** Variación de la concentración de sustrato lentamente degradable Vs. Tiempo.

En la Figura 4.4 se observa que el sustrato fácilmente biodegradable es degradado rápidamente en los primeros 35 días y luego del día 60 su biodegradación se estabiliza sin que exista una posterior degradación. Tomando en cuenta este resultado, se determina que el tiempo de retención recomendado para la degradación de la basura orgánica es de 35 días.

En la Figura 4.5 se observa que la biomasa permanece sin mayores cambios hasta el día 4, después experimenta un crecimiento acelerado hasta el día 34 para empezar a disminuir su crecimiento hasta el día 70. El retardo inicial se debe, a que las bacterias pasan por un período de aclimatación.

En la Figura 4.6 se observa que el sustrato lentamente biodegradable es degradado con mayor velocidad en los primeros 52 días y luego del día 64 su biodegradación se estabiliza sin que exista una posterior degradación.

**(ANEXO 1).**

## 4.2 PRODUCCIÓN DE BIOGÁS

Para el presente estudio es fundamental establecer el volumen de biogás generado, al degradarse los desechos orgánicos, en los biodigestores.

Para la cuantificación del biogás se utilizan dos criterios, los que proporcionan exclusivamente la masa de generación de metano.

### **Primer criterio.**

El primer criterio se basa en las investigaciones realizadas por dos profesores turcos, quienes proporcionaron una fórmula para la basura, separándola en materiales fácilmente biodegradables y en materiales lentamente biodegradables<sup>1</sup>.

La Tabla 3.2 proporciona la composición de los desechos domésticos, la misma que es empleada para obtener el peso seco de la basura (Tabla 4.1 y Tabla 4.2).

**Tabla 4.1** Peso sin humedad de los materiales fácilmente biodegradables.

<b>Fácilmente biodegradables</b>	<b>Peso [%] tabla 3,2</b>	<b>Humedad [%] tabla 3,2</b>	<b>Peso seco</b>
Desperdicio de alimentos	54,19	70	16,257
Papel, cartón	9,66	6	9,0804

**Tabla 4.2** Peso sin humedad de los materiales lentamente biodegradables.

<b>Lentamente biodegradables</b>	<b>Peso [%] tabla 3,2</b>	<b>Humedad [%] tabla 3,2</b>	<b>Peso seco</b>
Textiles	7,2	10	6,48
Compuestos orgánicos*	0,87	21,8	0,68034

\* Los compuestos orgánicos considerados en este estudio son madera y residuos de jardinería.

El peso seco de los desperdicios de alimentos se obtienen, ejemplo:

$$54,19 \times (1 - 0.7) = 16.257$$

---

1.ZUBKOV M.V. y M. BURKILL, Determinación del a fórmula química de los desechos biodegradables

Mediante ensayos de combustión y posterior análisis de gases productos de la combustión, se determina la cantidad de cada elemento químico (C, H, O, N, S). (Tabla 4.3 y tabla 4.4).

**Tabla 4.3 Componentes químicos de materiales fácilmente biodegradables.**

<b>Fácilmente biodegradables</b>	<b>Peso Seco</b>	<b>C</b>	<b>H</b>	<b>O</b>	<b>N</b>	<b>S</b>	<b>Ceniza</b>
Desperdicio de alimentos	16,257	7,81	1,04	6,11	0,42	0,065	0,813
%	<b>100%</b>	<b>48,04</b>	<b>6,39</b>	<b>37,58</b>	<b>2,58</b>	<b>0,40</b>	<b>5,01</b>
Papel, carton	9,08	3,95	0,55	3,99	0,027	0,018	0,55
%	<b>100%</b>	<b>43,50</b>	<b>6,06</b>	<b>43,94</b>	<b>0,30</b>	<b>0,20</b>	<b>6,00</b>
<b>TOTAL</b>	25,34	11,76	1,59	10,1	0,447	0,083	1,363

**Tabla 4.4 Componentes químicos de materiales lentamente biodegradables.**

<b>Lentamente biodegradables</b>	<b>Peso Seco</b>	<b>C</b>	<b>H</b>	<b>O</b>	<b>N</b>	<b>S</b>	<b>Ceniza</b>
Textiles	6,48	3,565	0,43	2,02	0,298	0,0097	0,162
%	<b>100%</b>	<b>55,01</b>	<b>6,63</b>	<b>31,17</b>	<b>4,60</b>	<b>0,14</b>	<b>2,45</b>
Compuestos orgánicos	0,68	0,258	0,031	0,169	0,002	0,0171	0,2163
%	<b>100%</b>	<b>37,94</b>	<b>4,56</b>	<b>24,85</b>	<b>0,29</b>	<b>2,51</b>	<b>39,94</b>
<b>TOTAL</b>	7,16	3,823	0,461	2,189	0,3	0,0268	0,3783

Luego se obtienen el peso por mol de los residuos fácilmente biodegradables y lentamente biodegradables, los pesos se dividen para el peso molecular de cada uno y se obtienen los resultados de la Tabla 4.5.

**Tabla 4.5 Componentes químicos Kg/mol.**

	<b>C</b>	<b>H</b>	<b>O</b>	<b>N</b>	<b>S</b>
<b>Kg/mol</b>	12,01	1,01	16	14,01	32,06
<b>Fácilmente Biodegradables</b>	0,97918401	1,57425743	0,63125	0,03190578	0,0025889
<b>Lentamente Biodegradables</b>	0,31831807	0,45673267	0,1368375	0,02143398	0,00083497

Finalmente se estima la fórmula de los desechos por 1 mol de nitrógeno (Tabla 4.6), debido a que la cantidad de azufre es prácticamente nula, ejemplo para el carbono.

Fácilmente biodegradable:

$$\# \text{ moles} = \frac{1}{0.0319} * 0.979184 \cong 31$$

Las moles del resto de componentes son calculadas en forma similar y se resumen en la tabla 4.6.

**Tabla 4.6** Fórmula estequiométrica de los desechos.

Componente	Fácilmente biodegradables	Lentamente biodegradables
Carbon	31	15
Hidrógeno	50	22
Oxígeno	20	7
Nitrógeno	1	1

De manera que la formula para los desechos fácilmente biodegradables se representa como:



Y para los lentamente biodegradables:

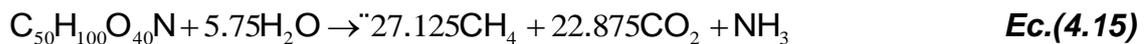


Con esta información se calcula la producción de metano y luego se extrapola para los valores que se tienen en Quito.

El programa (MathCad 2001 *i*) para el cálculo de la producción de biogás, según el primer criterio, se encuentra en el **ANEXO 2**.

### Segundo criterio.

Según Tchobanoglous la fórmula de la basura orgánica es:



El programa (MathCad 2001 *i*) para el cálculo de la producción de biogás, según el segundo criterio, se encuentra en el **ANEXO 3**.

Los resultados obtenidos son los siguientes:

- Primer criterio  $1.256 \times 10^5$  Kg de  $CH_4$
- Segundo criterio  $1.128 \times 10^5$  Kg de  $CH_4$

La diferencia entre las dos es de 10.19%, lo que no es tan considerable puesto que se usan diferentes tipos de basura y de análisis.

El criterio que se va a utilizar es el primero, debido a que la diferenciación entre los materiales, por su velocidad de biodegradabilidad es de vital importancia.

### 4.3 LIMPIEZA DEL BIOGÁS.

La limpieza del biogás es fundamental; puesto que la pérdida de poder calórico al usar biogás es significativa, se debe recordar que el biogás se compone de  $CH_4$  y  $CO_2$  casi en su totalidad, y que el  $CO_2$  está en su estado de oxidación máximo, por lo que no es posible combustionarlo para generar más trabajo útil.

- Poder calórico de  $CH_4$  12.610 Kcal/Kg, cantidad aproximadamente 57% en biogás.
- Poder calórico de biogás 4.700 Kcal/Kg.

En 1 Kg de biogás posee una energía de 4.700 Kcal, si se separa el metano significa que se tiene 0.57 Kg del mismo, si  $0.57 \times 12.610 = 7187.7$  Kcal, con la separación se gana un 52.9 % teóricamente puesto que es imposible obtener metano puro.

#### 4.3.1 SEPARACIÓN DE METANO Y OTROS GASES.

Para separar el metano del biogás es recomendable usar carbón activado porque su precio es relativamente bajo y además se lo puede regenerar y reusar.

La composición típica del biogás sin humedad es 57 por ciento de metano (gas natural), 42 por ciento de dióxido de carbono, 0.5 por ciento nitrógeno, 0.2 por ciento de hidrógeno, y 0.2 por ciento de oxígeno<sup>2</sup>. También se encuentran muchos componentes como alcanos, aromáticos, cloro carbonados y en mayor proporción dióxido de azufre.

Después de removido el dióxido de carbono, el gas metano se aconseja alimentar a turbinas de gas o celdas de combustible para generar electricidad.

#### 4.3.2 SEPARADOR Y CANTIDAD DE $CH_4$ .

El filtro de carbón activado funciona por el mismo principio que el filtro de arena, la diferencia radica en los elementos filtrantes y su finalidad. El carbón

---

2.DE LEMOS CHERNICHARO C. Reactores anaeróbios, 1ra ed. Brasil, SEGRAC, 1997

activado es un material natural que con millones de agujeros microscópicos intercepta, y captura moléculas de contaminantes presentes en corrientes gaseosas o líquidas. Los filtros de carbón se diseñan para remover cloro, sabores, olores y demás químicos orgánicos. También es uno de los procesos finales del sistema de tratamiento de agua, su función es pulir la descarga final. Son fabricados en acero al carbón de alta resistencia y recubrimiento interno de polietileno para evitar la corrosión. Los retrolavadores, a fin de reutilizar el carbón activado, que se utiliza son 100% automáticos, con temporizador o volumen tratado.

La eficiencia de separación de estos sistemas oscila entre 90% – 96%. El tiempo de operación de los filtros de carbón, se determina monitoreando la concentración del CO<sub>2</sub> de salida de la columna, cuando la razón entre el CO<sub>2</sub> a la salida y el CO<sub>2</sub> es del 5% al 10%, se inicia el proceso de retrolavado.

#### 4.4 MODELAMIENTO ENERGÉTICO.

El modelamiento energético de una turbina que quema metano puro con un 30% de pérdidas por transferencia de calor, sigue el siguiente procedimiento

##### 4.4.1 VARIABLES DE ENTRADA.

Entre las variables de entrada, la más importante es la cantidad de metano (obtenida en el subcapítulo 4.2). La cantidad de metano que se generaría para el Distrito Metropolitano de Quito es de 125.600 Kg por día. Se requiere además conocer las propiedades del metano a fin de establecer los balances energéticos.

La Tabla 4.7 provee las principales propiedades de este gas.

**Tabla 4.7 Propiedades generales del metano.**

<b>Propiedad</b>	<b>Valor</b>	<b>Unidad</b>
Peso molecular	16,043	g/mol
<b>Fase sólida</b>		
Punto de fusión	-182,5	°C
Calor latente de fusión (1,013 bar)	58,68	KJ/Kg
<b>Fase líquida</b>		
Densidad del líquido (1,013 bar)	422,62	Kg/m <sup>3</sup>
Líquido/Gas equivalente (1,013 bar y 15 °C)	630	vol/vol
Punto de ebullición (1,013 bar)	-161,6	°C
Calor latente de vaporización (1,013 bar)	510	KJ/Kg

**Continuación Tabla 4.7**

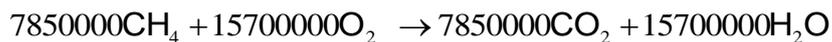
<b>Punto crítico</b>		
Temperatura crítica	-82,7	°C
Presión crítica	45,96	bar
<b>Fase gaseosa</b>		
Densidad del gas (1,013 bar)	1,819	Kg/m <sup>3</sup>
Factor de compresibilidad (Z) (1,013 bar y 21 °C)	0,998	
Gravedad específica (aire=1)	0,55	
Volumen específico (1,013 bar y 21 °C)	1,48	m <sup>3</sup> /Kg
Capacidad calorífica a presión constante (Cp)	0,035	KJ/(mol*°K)
Capacidad calorífica a volumen constante (Cv)	0,027	KJ/(mol*°K)
Ratio de calores específicos (Cp/Cv)	1,305454	
Viscosidad (1,013 bar)	0,0001027	Poise
Conductividad térmica (1,013 bar)	32,81	mW/(m*°K)
<b>Varios</b>		
Solubilidad en agua (1,013 bar)	0,054	
Temperatura de auto ignición	595	°C

El metano al quemarse con oxígeno puro da origen a la siguiente reacción:

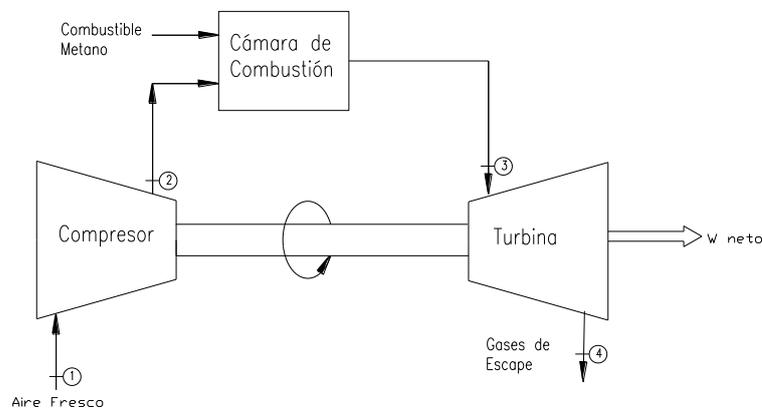


**Ec.( 4.16)**

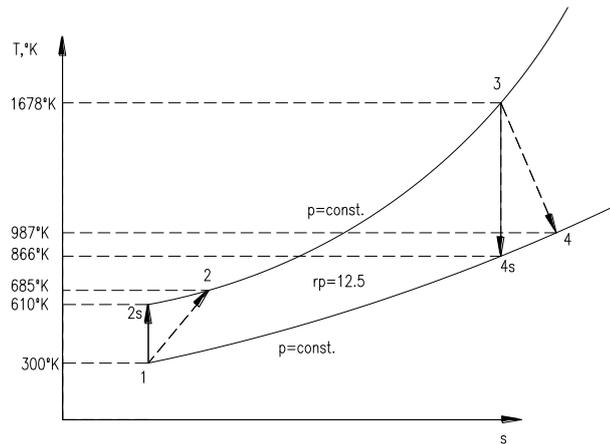
Para el caso de la cantidad de metano producido idealmente para Quito, se tiene la siguiente ecuación



**Ec.( 4.17)**



**Figura 4.7 Un motor de turbina de gas de ciclo abierto**



**Figura 4.8** Diagrama T-s para el caso.

Para la selección de la turbina es necesario estimar la cantidad de aire que debe suministrar el compresor.

$$(A/C)_{\text{real}} = \frac{2 \text{ moles O}_2}{1 \text{ mol CH}_4} * \frac{1 \text{ mol aire}}{0.21 \text{ mol O}_2} * \frac{1 \text{ mol CH}_4}{16 \text{ gr}} * \frac{28.96 \text{ gr}}{1 \text{ mol aire}} * 1.15 = 19.82^3 \quad \text{Ec. (4.18)}$$

El ciclo Brayton, es empleado para el modelamiento energético de turbinas de gas, donde los procesos tanto de compresión como de expansión se consideran idealmente isentrópicos. Las turbinas de gas, usualmente operan en un ciclo abierto, como se muestra en la Figura 4.7. Aire fresco en condiciones ambiente se introduce dentro del compresor donde su temperatura y presión se eleva. El aire de alta presión sigue hacia la cámara de combustión, donde el combustible se quema a presión constante. Luego, los gases de alta temperatura que resultan de la combustión, entran a la turbina lugar donde se expanden hasta la presión atmosférica.

Los cuatro procesos internos del ciclo Brayton son:

- 1 – 2 Compresión isentrópica.
- 2 – 3 Adición de calor a P = constante.
- 3 – 4 Expansión isentrópica (en una turbina).
- 4 – 1 Rechazo de calor.

En la Figura 4.8 se muestra el diagrama T – s con correcciones en la compresión y expansión isentrópicas las cuales asemejan al ciclo Brayton real.

Cuando los cambios de energía cinética y potencial se ignoran, la ecuación de la conservación de la energía para un proceso de flujo permanente puede expresarse, con una masa unitaria, como:

$$q - w = h_{salida} - h_{entrada} \quad \text{Ec. (4.19)}$$

Al suponer calores específicos constantes a temperatura ambiente (suposición de aire frío estándar), la transferencia de calor hacia y del fluido de trabajo es

$$q_{en} = q_{2-3} = h_3 - h_{2s} \quad \text{Ec. (4.20)}$$

$$q_{sal} = -q_{4-1} = h_{4s} - h_1 \quad \text{Ec. (4.21)}$$

La Figura 4.8 representa el funcionamiento de una turbina de gas en condiciones casi reales

$$q_{en} = q_{2-3} = h_3 - h_2 \quad \text{Ec. (4.22)}$$

$$q_{sal} = -q_{4-1} = h_4 - h_1 \quad \text{Ec. (4.23)}$$

En caso de la eficiencia térmica del ciclo Brayton se vuelve:

$$\eta_{t,Brayton} = \frac{W_{neto}}{q_{en}} = 1 - \frac{q_{sal}}{q_{en}} \quad \text{Ec. (4.24)}$$

El programa (MathCad 2001 ) para el modelamiento energético de la turbina de gas, se encuentra en el **ANEXO 4**.

#### 4.4.2 VARIABLES DE SALIDA.

Las variables de salida son las siguientes:

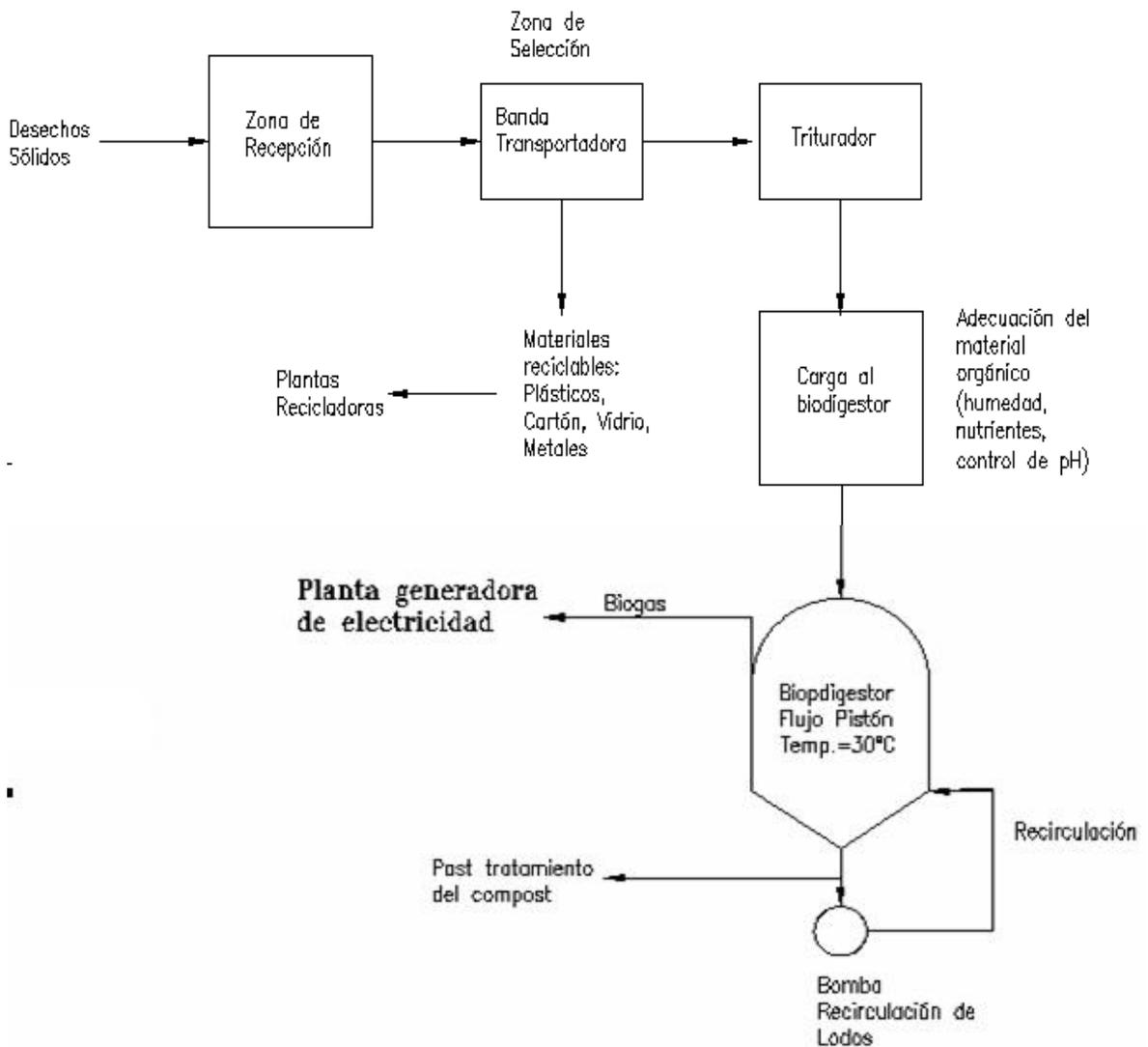
- ✓ Temperatura de salida del compresor: 685 °K.
- ✓ Temperatura de entrada a la turbina: 1678 °K.
- ✓ Relación de trabajo de retroceso: 48.7 %
- ✓ Eficiencia térmica: 36.128 %
- ✓ Capacidad de generar electricidad: 27.723 MW
- ✓ Alta temperatura de salida de la turbina: 987 °K

Los componentes de una planta generadora de gas se indican en la Figura 4.9.

## 4.5 DISEÑO DE PLANTA GENERADORA DE GAS.

*Parámetros de diseño:*

- Cantidad de basura, 1297 ton/día.
- Cantidad de basura orgánica, 900 ton/día.
- Tiempo de retención, 35 días.
- Temperatura de biodegradación, 30 °C.
- pH en el reactor, 6 – 7.



**Figura 4.9** Planta de producción de gas para recuperar energía de los desechos sólidos.

Las partes que se seleccionan se agrupan a continuación.

### PLANTA GENERADORA DE GAS

Codigo	#	Descripción	Capacidad
G1	3	Banda transportadora	20 ton/hora
G2	3	Triturador	13 ton/hora
G3	30	Reactor anaeróbico flujo pistón	1.5 ton/hora 6x6x30 m 1080 m <sup>3</sup>
G4	30	Tubería perforada, captar gas	306 Kg/hora
G5	3	Separador de gas	3060 Kg/hora
G6	3	Acumuladores de gas	125600 Kg
G7		Tuberías de agua	
G8	30	Bomba de agua	2 Hp – 3.5 l/min
G9	30	Bomba para recirculación de lodo	1.5 Hp

#### G1. Banda transportadora.

Los desechos sólidos para la ciudad de Quito son 1297 ton/día, se selecciona un diseño modular, porque cada banda transportadora, está seguida por un triturador, 10 biodigestores, 1 turbina y un generador.

Para esta aplicación se estiman 3 bandas transportadoras  $1297/(3*24) = 18$  ton/hora\*banda, por seguridad se aumentan a 20. Los materiales de la banda deben ser fabricados con acero inoxidable porque transportan desechos corrosivos.

#### G2. Triturador.

Para 900 ton/día de desechos orgánicos, la capacidad de cada triturador es 13 ton/hora, deben ser diseñado y fabricado con acero inoxidable debido a que los materiales triturados son corrosivos.

#### G3. Reactor anaeróbico.

El reactor seleccionado es el flujo pistón, por que los tiempos de retención son más cortos, lo cual reduce el tamaño de los biodigestores.

Si la densidad de la basura es de 0,82 Kg/ m<sup>3</sup>, las 900 ton/día x 35 días(tiempo de retención) x densidad es igual a 25830 m<sup>3</sup>, más los 150 m<sup>3</sup> de agua de carga diaria un total de 31.080 m<sup>3</sup>.

Si se seleccionan reactores con dimensiones 6x6x30m, el volumen individual es de 1080 m<sup>3</sup>. Para 30 biodigestores el volumen total de 32.400 m<sup>3</sup>.

### **G5. Separador de gas**

Existen 3 separadores (uno por cada módulo) la capacidad individual debe ser de 3060 Kg/hora para procesar todo el biogás generado.

### **G6. Acumuladores de gas.**

Ver subcapítulo 4.5.4

### **G8. Bomba de agua.**

El caudal de agua necesario es 150.000 l por día y si se coloca una bomba por biodigestor, la capacidad de cada bomba sería de 5.000 l/día, 3.5 l/min.

## **4.5.1 ESTUDIO DE LOCALIZACIÓN.**

Para realizar un estudio de localización sería necesario, acceder a datos de planificación de EMASEO o Vida para Quito (*fundación encargada de los desechos sólidos*), si el proyecto se iniciaría hasta fin de este año, la localización sería cercana a la del actual relleno sanitario:

- Localización del relleno sanitario de la empresa “Corpsys” Provincia de Pichincha, cantón Quito, Parroquia Pintag, lugar Itulcachi.

En la Figura 4.10 se indican los sitios analizados para la próxima ubicación del relleno sanitario para el Distrito Metropolitano.

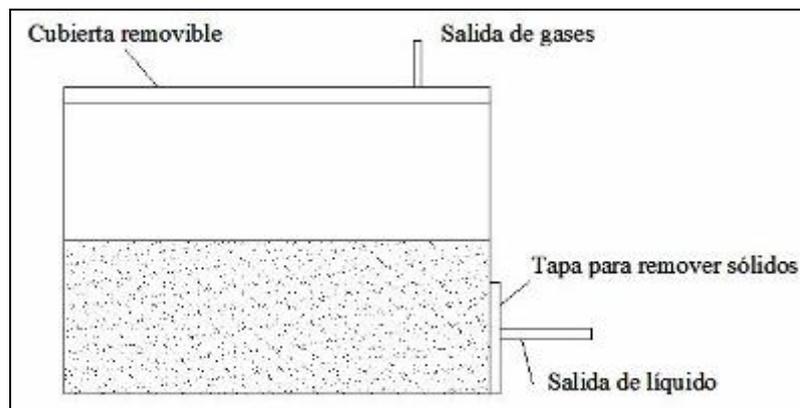
La planificación a mediano plazo del D.M.Q. considera varias alternativas para la localización del relleno sanitario sería:

- De acuerdo a la información obtenida de EMASEO y Vida para Quito, Oyacoto, Guayabamba (Jerusalén) y Chillogallo (Cuscungo), son los lugares más opcionados.



### *Digestores de lote (batch). [Utilizado en el prototipo]*

Se cargan de una vez en forma total o por intervalos durante varios días, y la descarga se efectúa cuando han dejado de producir gas combustible. Es aplicable cuando se presenten problemas de manejo o cuando la materia orgánica está disponible de forma intermitente.



**Figura 4.11 Biodigestor de lote (batch)**

Este tipo de digestores, se caracterizan por ser una estructura hermética bastante simple, de forma cúbica o cilíndrica, que puede ser construida sobre o dentro de la tierra. En éste último caso la tierra actúa en dos formas sobre el reactor: por un lado, gracias a su baja conductividad térmica se convierte en un aislante económico y por otro lado, si el suelo no es arenoso, puede convertirse en un excelente soporte estructural.

Una vez que se ha construido el reactor, se carga con la materia prima más sustrato con células que permitan el inicio de la fermentación. Algunas veces es necesario adicionar algún químico para mantener un pH satisfactorio.

Usos más comunes:

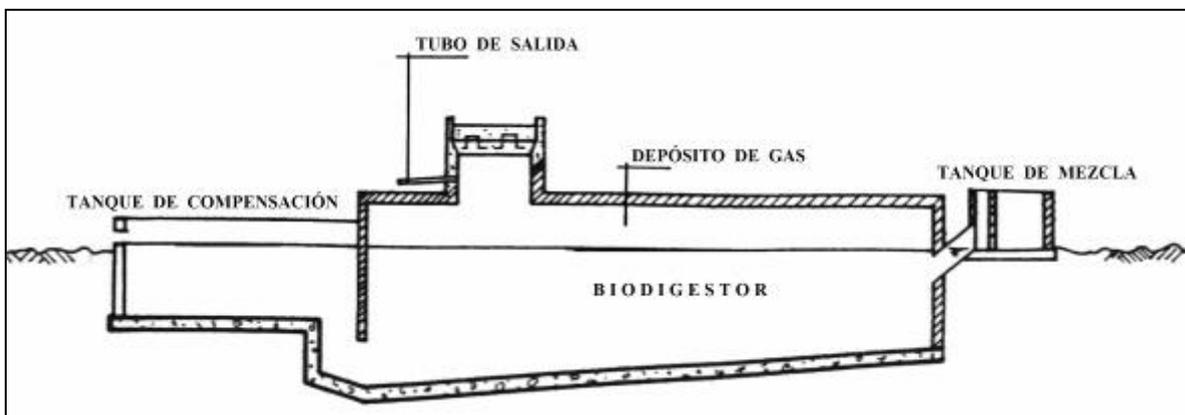
- Cuando se dispone de materia orgánica en forma intermitente.
- Cuando el interés principal es el de obtener bioabono, en una época específica del año.
- En una investigación de laboratorio con el objeto de medir parámetros de interés (modelo prototipo).

## DIGESTORES HORIZONTALES O DE FLUJO PISTÓN [Recomendado en este proyecto]

Son recipientes semejantes a un canal o túnel y que se construyen bajo tierra.

Su sección es cuadrada o en forma de "V". La relación largo ancho fluctúa entre 5:1 y 8:1. Para evitar que la carga salga antes de cumplir el tiempo de retención adecuado, se construyen paredes divisorias ranuradas que provocan que el material fluya sinusoidalmente.

Es utilizado para aplicaciones mayores a 15 m<sup>3</sup>, donde la excavación de un pozo vertical presenta dificultades. Para el presente proyecto el volumen por biodigestor es de 1080 m<sup>3</sup>.



**Figura 4.12 Biodigestor horizontal**

*Fuente: El Biogás y sus Aplicaciones, F. PESENCIA*

### 4.5.2.2 Selección de materiales.

Los biodigestores deben ser diseñados con hormigón armado, con los elementos estructurales dispuestos a la tracción.

Es de vital importancia varias capas de enlucido (550mm.) y una geomembrana (2mm) para evitar fugas, el resto de elementos como tapas de manhole, tuberías deben ser diseñadas de aluminio, acero inoxidable o con recubrimientos superficiales anticorrosivos debido a exposición en medios destructivos.

### 4.5.3 DIMENSIONAMIENTO DE TUBERÍAS.

Para la selección de la tubería consideramos los siguientes parámetros:

- Conducto de acero calibre 40 estándar.

- Velocidad de flujo recomendada 3.0 [m/s]<sup>4</sup>
- Q = 4187 m<sup>3</sup>/día o 0,04845 m<sup>3</sup>/s.

$$A = \frac{Q}{v} \quad \text{Ec. (4.25)}$$

$$A = \frac{0.04845 \text{ m}^3 / \text{s}}{3 \text{ m/s}} = 0.01615 \text{ m}^2$$

El Apéndice F proporciona las dimensiones de tubos de acero<sup>5</sup>, el tamaño nominal seleccionado es **6 pulgadas**.

#### 4.5.4 CÁLCULO DE ACUMULADORES DE GAS<sup>6</sup>.

V<sub>gas a 14.7 Psi</sub> = 175.840 m<sup>3</sup>

r = 10 m (radio del acumulador hemisférico)

$$V = \frac{4\pi.r^3}{3}$$

V = 4.189x10<sup>3</sup> Volumen del acumulador.

Presión interna necesaria del acumulador.

$$P = \frac{7850000 \text{ moles} \cdot 0.082 \frac{\text{atm.l}}{\text{moles}^\circ\text{K}} \cdot 300^\circ\text{K}}{V \cdot 1000 \text{ l}} \cdot 14.7 \frac{\text{psi}}{\text{atm}}$$

P = 677,694 psi

S = 166000 psi Acero SA-515 Gr 70.

E=1 Soldaduras totalmente verificadas.

Para el cálculo de espesor de los acumuladores se utiliza la siguiente fórmula, donde:

$$t = \frac{P.r \cdot \frac{1000}{25.4}}{S.E - 0.6P} \quad \text{Ec. (4.26)}$$

t = 1.611 pulgadas.

4. MOTT ROBERT, Mecánica de fluidos aplicada. Traducido del inglés por Carlos Cordero. 4ta ed. México, Prentice Hall, 1996

5. MOTT ROBERT, Mecánica de fluidos aplicada. Traducido del inglés por Carlos Cordero. 4ta ed. México, Prentice Hall, 1996

6. Pressure Vessel Handbook.

#### 4.5.5 PRODUCCIÓN DE LA PLANTA GENERADORA DE GAS.

La producción de la planta generadora es de 27.723 MW, usando el ciclo combinado podrían incrementarse a 34MW, puesto que los gases de escape por diseño de la turbina salen a 866°K, los que serían transportados a un intercambiador de calor para generar vapor que aumentaría la producción de trabajo. (Los cálculos se encuentran en el subcapítulo 4.4.1).

#### 4.6 DISEÑO PLANTA GENERADORA DE ELECTRICIDAD.

Parámetros de diseño:

- Cantidad de metano, 125.600 Kg/día.

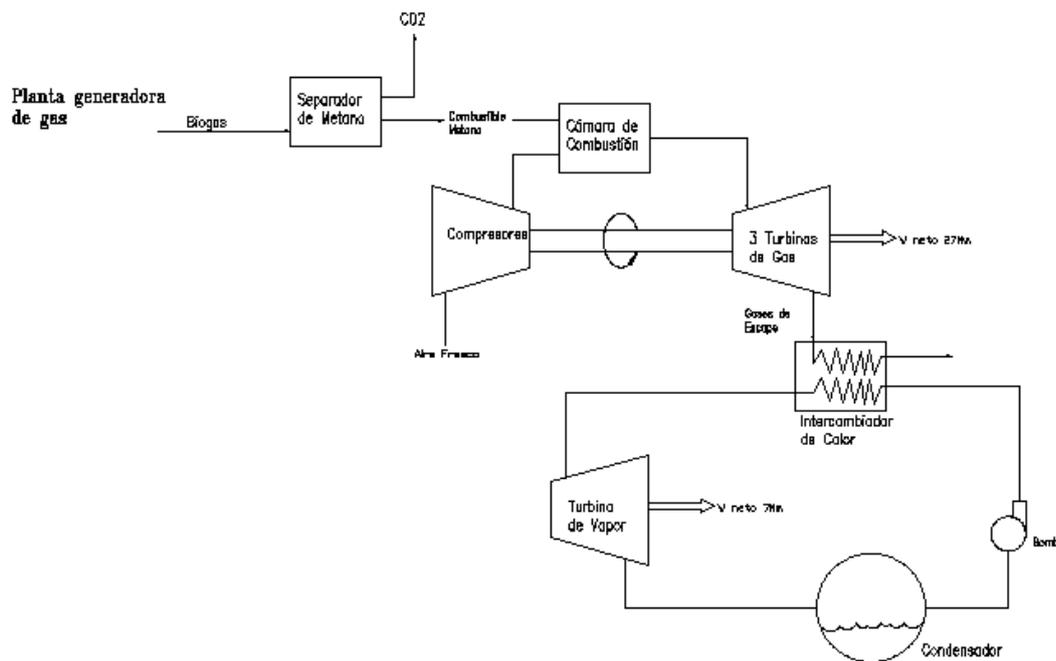


Figura 4.13 Planta Generadora de electricidad.

#### PLANTA GENERADORA DE ELECTRICIDAD

##### TURBINA DE GAS

Codigo #	Descripción	Capacidad
EG1	3 Compresor de gas (metano)	1750 Kg/hora
EG2	3 Cámara de combustión (metano + aire)	35000 Kg/hora
EG3	3 Compresor de aire	36750 Kg/hora
EG4	3 Turbina de gas	9 MW
EG5	3 Generador	9 MW
EG6	Tuberías de metano y gases de combustión	

##### CICLO COMBINADO

Codigo #	Descripción	Capacidad
EC1	1 Intercambiador de calor (gases escape, agua)	106340.9 Kg/hora
EC2	1 Turbina de vapor	7 MW
EC3	1 Generador	7 MW
EC4	Tuberías de vapor	

### **EG1. Compresor de gas metano.**

El compresor se seleccionó de acuerdo al caudal de gas y presión necesaria en los acumuladores.

El caudal de gas metano es 125.600 Kg/día. Si se instalarían tres acumuladores el caudal sería aproximadamente 1750 Kg/hora. La presión de diseño de los acumuladores sería 678 psi., considerando pérdidas en las tuberías el compresor sería de 700 psi.

### **EG3. Compresor de aire.**

La relación  $(A/C)_{real}$  sería de 19.82 calculada ideal en la **Ec. (4.18)**. Con una cantidad de 1750 Kg/día de metano, la cantidad de aire sería aproximadamente de 35.000 Kg/día.

### **EG4. Turbinas de gas y vapor.**

El diseño es modular por facilidad de mantenimiento (300 toneladas de basura orgánica por módulo). La capacidad total es de 27 MW, cada módulo tendrá una turbina de 9MW, debido a lo cual se consultó a General Electric y ABB sobre la disponibilidad de esta capacidad de turbina, afirmando la misma.

De acuerdo a la cantidad de gas y temperatura, la capacidad máxima de generación de la turbina de vapor sería 7MW.

### **EG6 Tuberías de metano y gases de combustión.**

#### Metano

Para la selección de la tubería consideramos los siguientes parámetros:

- Conducto de acero calibre 40 estándar.
- Velocidad de flujo recomendada 3.0 [m/s]
- $Q = 1225 \text{ m}^3/\text{hora}$  o  $0,34027 \text{ m}^3/\text{s}$ .

$$A = \frac{Q}{v}$$

$$A = \frac{0.34027 \text{ m}^3 / \text{s}}{3 \text{ m/s}} = 0.1134 \text{ m}^2$$

El Apéndice F proporciona las dimensiones de tubos de acero, el tamaño nominal seleccionado es **16 pulgadas**.

#### Gases de combustión

Para la selección de la tubería consideramos los siguientes parámetros:

- Conducto de acero calibre 40 estándar.
- Velocidad máxima de flujo recomendada 3.0 [m/s]
- $Q = 8.232 \text{ m}^3/\text{hora}$  o  $2,286 \text{ m}^3/\text{s}$ .

$$A = \frac{Q}{v}$$

$$A = \frac{2.286 \text{ m}^3/\text{s}}{6 \text{ m/s}} = 0.381 \text{ m}^2$$

El tamaño nominal seleccionado es **30 pulgadas**.

## **4.7 CONSTRUCCIÓN DEL MODELO PROTOTIPO**

Debido a que no es posible construir una planta piloto, para el presente estudio se utiliza un prototipo, que consta de: Un motor de dos tiempos en el cual se produce trabajo mecánico que luego es convertido en energía eléctrica, tanques generadores de biogás, gasificador, difusor de gas, válvulas y mangueras.

### **4.7.1 SELECCIÓN DE PARTES Y MATERIALES.**

El biodigestor seleccionado para el prototipo fue de tipo lote, debido a que la finalidad del prototipo fue generar electricidad y la cantidad necesaria de biogás a ser combustionada en el motor fue considerable, los tanques utilizados (Figura 4.16) también sirvieron como acumuladores del biogás.

#### Generador de biogás.

Se utilizaron dos tanques de 500 L.(1000L en total), se llenaron con 300L con mezcla orgánica (basura, lodos, agua y suelo), los restantes 700 L., se usaron como acumuladores de biogás. Se instaló un manómetro de (0 – 30 psi) para medir la presión, que en forma indirecta indica la cantidad de biogás generada.

### Generador de potencia.

Se seleccionó un motor de dos tiempos GMS 61/2000. Debido a su cilindrada de 0,61cc, se garantizaba un bajo consumo de biogás y alta potencia en volumen reducido, característica de los motores de dos tiempos.

El sistema de gas, marca **Marini**, el más utilizado en el mercado, ya que su eficiencia es elevada. El sistema posee un difusor de gas, que para la presente aplicación, se adaptó un serpentín al tubo de escape para realizar la correcta difusión del gas metano. También dispone de electro válvulas para realizar el cambio electrónico gasolina – gas metano y un dosificador de aceite para lubricación del motor.

Los conductos seleccionados fueron de neopreno por condiciones de ductilidad y temperatura. Fue necesario además instalar un tanque de combustible para realizar el precalentamiento del gas.

Como accesorios se usaron, una batería para el sistema eléctrico y un denominado “chispero” que mantiene a la bujía cargada para el encendido inicial de encendido para el motor.

Las Figuras 4.17, 4.18, 4.19, 4.20, 4.21 y 4.22 indican los diferentes componentes del prototipo.

**Tabla 4.8** Lista de materiales del modelo prototipo.

<b>Código</b>	<b>Lista de Materiales</b>	<b>Cantidad</b>	<b>Capacidad</b>	<b>Capacidad Total</b>
	<b>Generador de Biogás</b>			
PB01	Tanque plástico	2	500 L	1000 L
PB02	Manómetro	1	0 - 30 psi	0 – 30 psi
	<b>Generador de Electricidad</b>			
EG01	Motor GMS 61/2000	1	0,6 cc	0,6 cc
EG02	Bujía O.S. A 8	1		
EG03	Bancada Motor	1		
EG04	Chispero	1	Crg 110	Crg 110
EG05	Batería	1	12V	12V
EG06	Galón combustible	1	1Galón al 15%	1 Galón al 15%
EG07	Neopreno	1	1 m	1 m
EG08	Tanque	1	14 Oz.	14 Oz.
EG09	Difusor de gas	1	Motor 2 tiempos	Motor 2 tiempos
EG10	Electroválvulas	3	12V	12V
EG11	Dosificador aceite	1		

## **Generador de Biogás**



**Figura 4.14 PB01 Tanques de almacenamiento**



**Figura 4.15 PB02 Manómetro (marca 1,7 psi).**

**Generador de electricidad.**



**Figura 4.16 EG01 Motor GMS 61/2000 dos tiempos y EG02] bujía.**



**Figura 4.17 EG03 Bancada y EG04 chispero.**



**Figura 4.18 EG05 Batería, EG06 Combustible al 15% y EG07 Neopreno.**



**Figura 4.19** EG08 Tanque almacenamiento combustible y EG09 Difusor de gas.



**Figura 4.20** EG10 Electro válvula y EG11 Dosificador de aceite.



**Figura 4.21** Vista conjunto derecha y vista conjunto izquierda.



**Figura 4.22** Prototipo.

#### 4.7.2 REGISTRO DE LA CARGA (TIEMPO, FECHAS, CARGA DIARIA).

A fin de cuantificar la cantidad de gas generada se pesó la carga de desechos y el tiempo de biodegradación, que se resume en la Tabla 4.9.

**Tabla 4.9** Registro de carga.

Tiempo[días]	Fechas	Carga
57	25/06/2005	Cáscaras de papa, y desechos de fruta [60 Kg].
57	26/06/2005	Desechos de comida [60Kg].
57	27/06/2005	Desechos de comida y frutas [60 Kg].



**Figura 4.23** Gráficos de carga.

El incremento de presión en el interior del reactor (tanque) se resume a continuación en la Figura 4.24, donde se puede observar que después del día 20 la presión se estabiliza. Se asume que, cuando la presión sobrepasa los 1.7psi, existen fugas en el tanque.

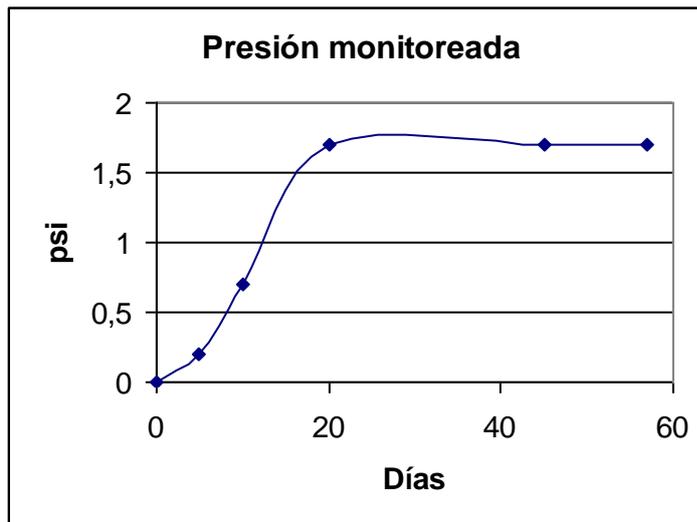


Figura 4.24 Presión monitoreada

### 4.7.3 RESULTADOS OBTENIDOS.

Los resultados de potencia generada que se obtuvieron con un lote de producción de biogás se indican a continuación en la Figura 4.25

La cantidad de gas obtenido se calculó con la ecuación general de los gases.

$$P \cdot V = n \cdot R \cdot T$$

$$\frac{16.4\text{psi}}{14.7\text{psi/atm}} \cdot 700\text{L} = n \cdot 0.082 \frac{\text{atm} \cdot \text{L}}{\text{mol} \cdot ^\circ\text{K}} \cdot 293^\circ\text{K}$$

$$n = 32.5\text{moles}$$

$$n = m / \text{PM}$$

$$m = n \cdot 28 \frac{\text{g}}{\text{mol}}$$

$$m = 910\text{g}$$

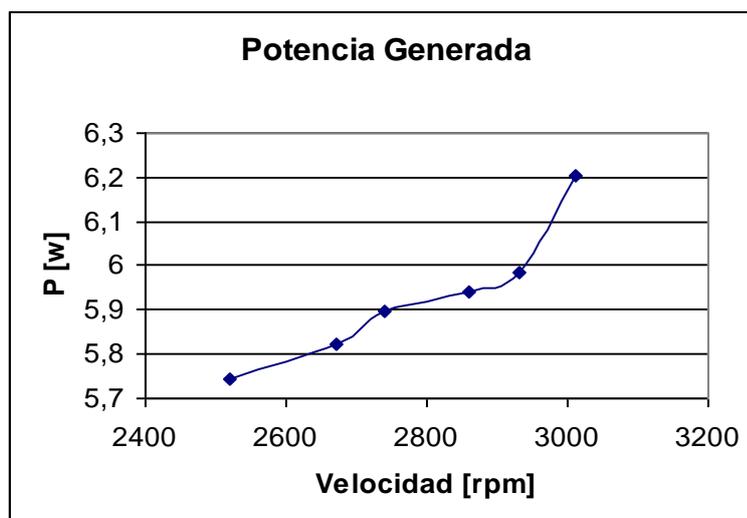


Figura 4.25 Potencia Generada.

Promedio de potencia = **5.93W**

La Figura 4.25 indica las marcas de los niveles de carga y los lodos finales obtenidos luego de la biodegradación de la basura orgánica que podría ser utilizada como bioabono.



**Figura 4.26 Desechos (basura) después del proceso de biodegradación (lodos).**

#### **4.7.4 CALIBRACIÓN MEDIANTE UN PROTOTIPO.**

A fin de comprobar la posibilidad de generar electricidad mediante la biodegradación de la basura, le utilizó un prototipo descrito anteriormente y que tiene las siguientes características.

- Generación de trabajo 1.5 Hp (motor de dos tiempos).
- Carga de desechos sólidos 180 Kg.
- Gasificador para realizar la completa separación del biogás.

- Acumulador 1000 L.
- En la siguiente comparación realizada (cálculo) con el prototipo se debe indicar inconvenientes operacionales, el sello no fue hermético y se perdió aproximadamente el 20% del gas producido en el reactor anaeróbico.
- El motor de combustión interna posee una eficiencia cercana al 28%, mientras la turbina del 36%.
- No se hizo la separación de metano en el biogás, lo que disminuye el poder calórico aproximadamente a la mitad

$$\frac{100 * 4}{60 * 12} = 0.55.$$

- Con estos inconvenientes la potencia de la planta es aproximadamente de:

$$\frac{900000\text{Kg}/\text{dia} * 36\%}{180\text{Kg}/\text{dia} * 28\% * 0.8 * 0.55} * 1.5 * \frac{1\text{Hp}}{0.745\text{Kw}} = 29.416 \text{ kW}.$$

En el subcapítulo 4.4.1 se obtuvo una potencia de 27.723 kW, comparando los dos valores se deduce que la potencia generada con la turbina de gases es un 6% menor que la producida con el prototipo y consecuentemente es factible generar aproximadamente 30 MW con los desechos sólidos urbanos del Distrito Metropolitano.

## CAPÍTULO 5

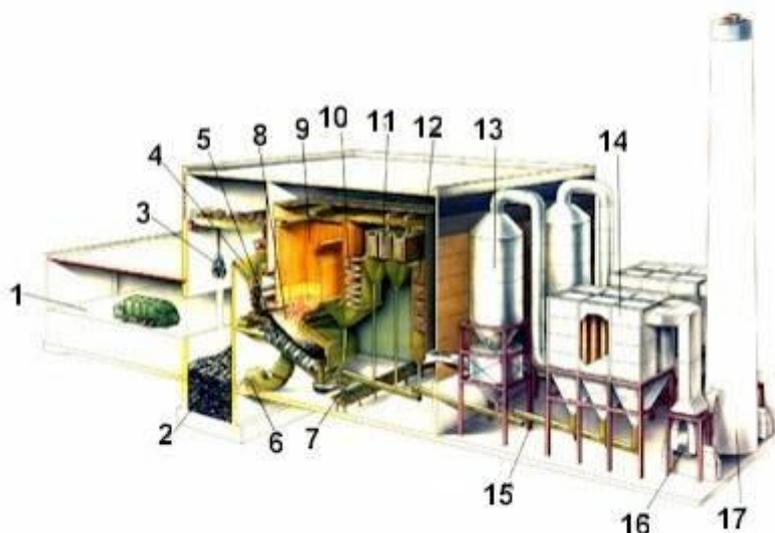
### COMPARACIÓN CON OTROS MÉTODOS DE APROVECHAMIENTO DE ENERGÍA (COMBUSTIÓN).

La comparación con otros tipos de aprovechamiento energético es vital para seleccionar el método adecuado.

#### 5.1 VENTAJAS Y DESVENTAJAS INCINERACIÓN

La incineración últimamente se ha convertido en un sistema que ha reemplazado el manejo de rellenos sanitarios principalmente, en países en los cuales el valor de la tierra es alto y además puedan afrontar los costos de las tecnologías apropiadas.

##### Planta de incineración de basura<sup>1</sup>.



1. Piso de descarga
2. Contenedor de desechos
3. Mano mecánica
4. Conducto de alimentación
5. Triturador
6. Ventilador del aire de combustión

1. LA GRECA, M., BUCKINGHAM, P., EVANS, J., ERM. Hazardous Waste Management, 1994

7. Descargador de ceniza
8. Cámara de Combustión
9. Horno
10. Intercambiador de calor
11. Súper calentador
12. Economizador
13. Scrubber de gas seco
14. Zona de empaquetamiento
15. Distribuidor de ceniza
16. Ventilador
17. Chimenea

### **5.1.1 OPERATIVAS.**

#### Ventajas

- La técnica de incineración es excelente para tratar desechos hospitalarios.
- No es necesario una selección exhaustiva de los materiales.

#### Desventajas

- Se necesitan técnicos bien calificados, que son escasos, puesto que la operación y mantenimiento son complejos y presentan muchos problemas.
- La operación de altas tecnologías para evitar la contaminación del aire requieren mucho cuidado y dinero.
- No es flexible para adaptarse a tratar mayores cantidades adicionales.

### **5.1.2 AMBIENTALES.**

#### Ventajas

- La incineración de los residuos sólidos logra una importante reducción de volumen, dejando un material inerte (escorias y cenizas) de cerca del 10% de inicial.
- Se reducen las emisiones de sulfuro y nitrógenos.

### Desventajas

- El proceso, que se realiza en hornos especiales, emite gases durante la combustión, por lo que se generan humos, cenizas y olores indeseables.
- Se requieren equipos de control para evitar la contaminación del aire.
- Las emisiones de monóxido de carbono son iguales a las que usan carbón.
- Existieron problemas en el aire (New England y Pacific N.W.) por su reducción de visibilidad.

### **5.1.3 ENERGÉTICAS.**

#### Ventajas

- Reduce dependencia de los combustibles sólidos.

#### Desventajas

- Se requieren de combustibles auxiliares, ya que el poder calórico de la basura es bajo porque contiene mucha humedad.
- Necesario sistemas deshumidificadores.

### **5.1.4 ECONÓMICAS.**

#### Ventajas

- Ingresos significativos por la generación de energía eléctrica.
- Incremento de mano de obra.

#### Desventajas

- Se requiere de un elevado capital inicial.
- Altos costos operativos, fuera de alcance para países en vías de desarrollo.

## **5.2 VENTAJAS Y DESVENTAJAS BIO-GENERACIÓN.**

La bio - generación es un proceso por el cual el contenido orgánico de la basura es reducido por la acción bacteriológica de microorganismos en ausencia de oxígeno. Del proceso anaeróbico resulta una mezcla de gases

(biogás) cuyos principales componentes son el gas combustible metano y gas dióxido de carbono, quedando como residuo un lodo con características de bioabono que al pasar por un proceso puede ser utilizado como mejorador del suelo en agricultura

### **5.2.1 OPERATIVAS.**

#### Ventajas

- Es flexible para adaptarse a tratar mayores cantidades, puesto que los desechos son separados por líneas de producción lo que permite instalar una nueva, para tratar mayores cantidades.
- No se requieren controles ambientales muy rigurosos del aire, debido a que el gas metano es el menos contaminante de los hidrocarburos.

#### Desventajas

- Se necesitan técnicos bien calificados, que son escasos, puesto que la operación y mantenimiento son complejos y presentan muchos problemas.
- Es necesario una selección de los materiales separando lo biodegradable del resto.
- Tiempos de retención grandes.
- Necesidad de controles en la temperatura, humedad, nutrientes, alcalinidad (pH), etc.

### **5.2.2 AMBIENTALES.**

#### Ventajas

- La bio - generación de los residuos sólidos logra una importante reducción de volumen (orgánico), al 30% de inicial.
- Se reducen las emisiones de sulfuro y nitrógenos.
- Se eliminan malos olores y plagas.

- Se reducen los efectos de enfermedades patogénicas (22 producidas por la basura).
- Las emisiones de monóxido de carbono se pueden controlar, reducir puesto que el gas metano de los hidrocarburos es de los menos nocivos al ambiente.
- Al consumir el metano reduces el impacto en el efecto invernadero (el efecto del metano es 21 veces mayor al efecto producido por el  $CO_2$ ).

#### Desventajas

- Al aprovechar el poder calórico del metano, mediante combustión es inevitable las emisiones de  $CO_2$ .

### **5.2.3 ENERGÉTICAS.**

#### Ventajas

- No existe la necesidad de combustibles auxiliares debido a que el poder calórico del metano es muy alto.
- No tiene la necesidad de tratar a la basura ya seleccionada.
- Reduce la dependencia de los combustibles sólidos

#### Desventajas

- No se puede obtener beneficio energético de plásticos e inorgánicos.

### **5.2.4 ECONÓMICAS.**

#### Ventajas

- Ingresos significativos por la generación de energía eléctrica.
- Incremento de mano de obra.

- Permite obtener beneficio del reciclaje de plásticos, metales y vidrios, debido a la selección previa.

### Desventajas

- Se requiere de un elevado capital inicial.
- Altos costos operativos, fuera de alcance para países en vías de desarrollo.

## 5.3 CUADRO COMPARATIVO FINAL.

Índices de ponderación

- 1 ---- Muy bajas.  
 2 ---- Bajas.  
 3 ---- Regular.  
 4 ---- Altas.  
 5 ---- Muy altas.

	Incineración		Bio - generación	
	Ventajas	Desventajas	Ventajas	Desventajas
<b>Operativas</b>	4	2	3	3
<b>Ambientales</b>	2	3	5	1
<b>Energéticas</b>	4	3	4	2
<b>Económicas</b>	5	2	5	2
<b>Sub - Total</b>	15	10	17	8
<b>TOTAL</b>	5		9	

## **CAPÍTULO 6**

### **ANÁLISIS ECONÓMICO**

#### **COSTOS DEL PROYECTO**

##### **MAQUINARIA Y EQUIPO**

Para el presente análisis financiero se tomaron valores con referencia de dos empresas ABB y General Electric los valores son solamente estimados, debido a la dificultad de la obtención de los mismos.

Ver Tabla 6.1, 6.2, 6.3 donde se encuentran detalladas todas las inversiones.

##### **COSTOS DE OPERATIVIDAD Y MANTENIMIENTO**

En vista del tamaño de la planta, la que contiene elementos complejos, que deberán ser importados para su instalación o construcción, los costos de operatividad son altos.

Como se trata de una planta grande para su operación se necesita 60 personas. El personal que operará será de alrededor de 10 personas, quienes deberán recibir una capacitación en el manejo y control la planta, en clasificación y manejo de la materia prima, descarga de bio-fertilizante, revisión de tuberías y ductos, revisión y manejo de la turbinas y demás maquinas, etc. que son actividades que garantizan la operatividad de la planta. Debida a complejidad de la operación se necesita de personas con conocimiento y especialización para realizar cada tipo de actividad requerida en la planta de generación.

En cuanto al mantenimiento, los costos en los cuales hay que invertir son a largo plazo, y son considerables debido a que los elementos que conforman la planta son bastante costosos.

##### **ANÁLISIS FINANCIERO - COMPARATIVO**

En el análisis de rentabilidad de plantas de generación eléctrica se debe considerar que éstas, al ser una tecnología de última generación, permite

reducir los problemas generados en cuanto a generación eléctrica que hoy en día atraviesa el país.

En el mercado de los energéticos, la planta, como productora de metano, compite con el gas propano y permite la generación de electricidad, sustituyendo la dependencia de la gasolina o el diesel, como combustibles para motores de generación eléctrica en plantas.

En el mercado de los abonos, la planta generadora de electricidad también es una potencial productora de bio-fertilizante al que se conoce como “compost”, el cual puede competir con el estiércol fresco y con los fertilizantes químicos, ya que posee características no contaminantes y cuya comercialización mejoraría la rentabilidad del proyecto.

Finalmente, en el mercado del tratamiento de desechos contaminantes, la planta puede imponerse sobre los sistemas de tratamiento aeróbicos tradicionales disminuyendo la contaminación y eliminando en un 50% los rellenos sanitarios.

Lo anterior, permite afirmar que la tecnología con energías renovables podrían contribuir con la demanda energética del país, no sólo técnicamente sino económicamente y disminuir la dependencia de la generación tradicional.

En el capítulo 2 se muestra las capacidades de generación eléctrica con las energías renovables.

## **ANÁLISIS DE RENTABILIDAD**

Para el cálculo de rentabilidad de cualquier inversión, se procede a registrar todos los gastos e ingresos que surgen con respecto a la inversión planeada.

Los gastos que deben registrarse son:

- Costos de construcción (materiales, mano de obra, etc.)
- Costos de operación y mantenimiento.

En el momento de determinar los beneficios, el principal problema se presenta al tratar de cuantificar en términos monetarios.

Sin embargo para el presente caso se realizará una comparación entre el costo del kW-H generado en la planta a US\$ 0.05 frente al de una tarifa media aplicada al consumidor final US\$ 0.1038 del kW-H (Figura. 1.1)

Para los cálculos, se ha considerado una tasa de interés  $i = 16\%$  anual, y una tasa impositiva sobre la utilidad de  $12\%$  anual.<sup>1</sup>

El cálculo de los indicadores financieros, utiliza un FNC (flujo neto de caja) para los 10 años, tiempo en el que se estima la recuperación de la inversión. El Valor Actual Neto (VAN), y la tasa interna de retorno (TIR) son calculados en una hoja electrónica.

La hoja electrónica calcula el valor del VAN a partir de la fórmula:

$$VAN = -I_0 + \sum FNC_i \quad \text{Ec. (6.1)}$$

donde:

$I_0$ : Inversión inicial

$FNC_i$ :  $\Sigma$  Ingresos –  $\Sigma$  Egresos (para cada período)

El valor del TIR, se calcula a partir de la fórmula:

$$I_0 = \sum FNC_i \quad \text{Ec. (6.2)}$$

Manipulando algebraicamente la **Ec. (6.2)** se obtiene:

$$\sum FNC_i = \sum \frac{A}{(1+r)^n} \quad \text{Ec. (6.3)}$$

donde:

$A$ : Ingreso (+) ó Egreso (-)

$r$ : Tasa de actualización. Para calcular el VAN, se emplea la tasa de interés  $r = 16\%$  anual para este proyecto.

$n$ : # de período en el que se encuentra.

La idea del **VAN** es actualizar todos los flujos futuros al período inicial (cero), compararlos para verificar si los beneficios son mayores que los costos. Si los beneficios actualizados son mayores que los costos actualizados, significa que la rentabilidad del proyecto es mayor que la tasa de descuento, se dice por tanto, que **“es conveniente invertir”** en esa alternativa.

Ver las Tablas 6.4, 6.5, 6.6, 6.7, 6.8, 6.9 y 6.10 donde se detalla el análisis de rentabilidad.

---

<sup>1</sup> La tasa de actualización citada es la que se emplea en préstamos en entidades financiera. Tanto la tasa de actualización como la tasa de interés pasiva son valores vigentes por la ley en el país, suministrados por el Banco Central del Ecuador actualización AGO-2004.

## 6.1 PLANTA DE GAS.

**Tabla 6.1 Planta generadora de gas.**

CODIGO	Descripción	Capacidad	Cantidad	P. unitario	Precio
<b>PLANTA GENERADORA DE GAS</b>					
G1	Banda trasportadora	20 ton/h	3	30000	90000
G2	Trituradora	13 ton/h	3	40000	120000
G3	Reactor anaeróbico flujo pistón ( 6x6x30 m)	1.5 ton/h	30	140000	4200000
G4	Tubería perforada ( captar gas)	306 Kg/h	30	2800	84000
G5	Separadores de gas	3060 Kg/h	3	700000	2100000
G6	Acumuladores de gas	125600 kg.patm	3	76000	228000
G7	Tubería de agua		1	3000	3000
G8	Bombas de agua		30	600	18000
G9	Bomba recirculación de lodo		30	1100	33000
<b>SUBTOTAL</b>					<b>6876000</b>

## 6.2 PLANTA DE GENERACIÓN ELÉCTRICA.

**Tabla 6.2 Planta generadora de electricidad**

<b>PLANTA GENERADORA DE ELECTRICIDAD</b>					
<b>TURBINA DE GAS</b>					
EG1	Compresor de gas (metano)	1750 Kg/h	3	2300	6900
EG2	Cámara de combustión (metano – aire)	36750 Kg/h	3	180000	540000
EG3	Compresor de aire	35000 Kg/h	3	5000	15000
EG4	Turbina de gas	9Mw	3	2800000	8400000
EG5	Generadores	9Mw	3	1100000	3300000
EG6	Tuberías de metano, aire y gas de combustión		1	20000	20000
<b>CICLO COMBINADO</b>					
EC1	Intercambiador de calor (gases escape , agua)	35000 Kg/h	1	420000	420000
EC2	Turbina de vapor	7Mw	1	1400000	1400000
EC3	Generador	7Mw	1	700000	700000
EC4	Tuberías de vapor		1	10000	10000
<b>SUBTOTAL</b>					<b>14811900</b>

## 6.3 OTRAS INVERSIONES.

**Tabla 6.3 Otras inversiones**

CODIGO	Descripción	Unidad	Cantidad	P. unitario	Precio
<b>CONSTRUCCIÓN DE PLANTA</b>					
1	Limpieza y adecuación del terreno	m2	60000	0,3	18000
2	Infraestructura física	m2	800	500	400000
3	Equipos de oficina		3	15000	45000
4	Vehículos		2	10000	20000
<b>SUBTOTAL</b>					<b>483000</b>

<b>TOTAL</b>	<b>22170900</b>
<b>IMPREVISTOS 10%</b>	<b>2217090</b>
<b>TOTAL GENERAL</b>	<b>24870990</b>

**Tabla 6.4 Vida útil**

INVERSION	VALOR	VIDA UTIL	VALOR VENTA
Terreno			
Equipo y maquinaria	22170900	15	100000
Equipo de oficina	45000	10	500
Edificacion	400000	40	60000
Vehiculos	20000	10	7000

Valor residual libro **0**

Vida util proyecto **10**

**Depreciación lineal**

Tasa impositiva sobre utl **0,12**

Financiamiento del 100% **0,16**

de la Inv. a 10 años

Costo unitario Kw = 0,05

Cantidad generada por año = 1er a 10 año

**6.4 RENTABILIDAD E ÍNDICES ECONÓMICOS.**

**Tabla 6.5 Cálculo de depreciación**

**CALCULO DEPRECIACION**

Costo variable Kw = 0,019

INVERSION	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Equipo y maquinaria	1478060,00	1478060,00	1478060,00	1478060,00	1478060,00	1478060,00	1478060,00	1478060,00	1478060,00	1478060,00
Equipo de oficina	4500,00	4500,00	4500,00	4500,00	4500,00	4500,00	4500,00	4500,00	4500,00	4500,00
Edificacion	9999,75	9999,75	9999,75	9999,75	9999,75	9999,75	9999,75	9999,75	9999,75	9999,75
Vehiculos	2000,00	2000,00	2000,00	2000,00	2000,00	2000,00	2000,00	2000,00	2000,00	2000,00
TOTAL	1494559,75	1494559,75	1494559,75	1494559,75	1494559,75	1494559,75	1494559,75	1494559,75	1494559,75	1494559,75

$D = (I - Vr)/n$

**Tabla 6.6 Cálculo valor libros**

**CALCULO VALOR LIBROS**

INVERSION	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Equipo y maquinaria	20692840,00	19214780,00	17736720,00	16258660,00	14780600,00	13302540,00	11824480,00	10346420,00	8868360,00	7390300,00
Equipo de oficina	40500,00	36000,00	31500,00	27000,00	22500,00	18000,00	13500,00	9000,00	4500,00	0,00
Edificacion	390000,25	380000,50	370000,75	360001,00	350001,25	340001,50	330001,75	320002,00	310002,25	300002,50
Vehiculos	18000,00	16000,00	14000,00	12000,00	10000,00	8000,00	6000,00	4000,00	2000,00	0,00

**Tabla 6.7 Cálculo servicio de la deuda**

**CALCULO SERVICIO DE LA DEUDA**

AÑO	DEUDA ANTERIOR	INTERES	CUOTA	AMORTIZ.	DEUDA ACTUAL
0					24870990
1	24870990,00	3979358,40	5145834,77	1166476,37	23704513,63
2	23704513,63	3792722,18	5145834,77	1353112,59	22351401,05
3	22351401,05	3576224,17	5145834,77	1569610,60	20781790,44
4	20781790,44	3325086,47	5145834,77	1820748,30	18961042,15
5	18961042,15	3033766,74	5145834,77	2112068,02	16848974,12
6	16848974,12	2695835,86	5145834,77	2449998,91	14398975,22
7	14398975,22	2303836,03	5145834,77	2841998,73	11556976,48
8	11556976,48	1849116,24	5145834,77	3296718,53	8260257,95
9	8260257,95	1321641,27	5145834,77	3824193,50	4436064,46
10	4436064,46	709770,31	5145834,77	4436064,46	0,00

$$R = P(1+ip)^n * ip / ((1+ip)^n - 1)$$

**Tabla 6.8 Ingresos y costos**

**CALCULO DE PRECIOS , CANTIDAD INGRESOS Y COSTOS**

ANO	P	Q	P*Q	Cv*Q
	PRECIO REAL\$	CANTIDAD kw	INGRESO OPERAC.	COSTO VARIABLE
1	0,05	219000000	10950000	4161000
2	0,05	222000000	11100000	4218000
3	0,05	229000000	11450000	4351000
4	0,05	300000000	15000000	5700000
5	0,05	310000000	15500000	5890000
6	0,05	340000000	17000000	6460000
7	0,05	400000000	20000000	7600000
8	0,05	420000000	21000000	7980000
9	0,05	450000000	22500000	8550000
10	0,05	500000000	25000000	9500000

**Tabla 6.9 Utilidad fiscal e impuestos**

**CALCULO DE LA UTILIDAD FISCAL E IMPUESTOS**

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Ingresos operacionales	10950000	11100000	11450000	15000000	15500000	17000000	20000000	21000000	22500000	25000000
Utilidad venta terreno										
Utilidad venta planta fisica										3747,5
Utilidad venta equ. Oficina										500
Utilidad venta Eq. Maq.										-32033,33
Utilidad venta Vehic.										7000
<b>TOTAL UTILIDADES</b>	<b>10950000,00</b>	<b>11100000,00</b>	<b>11450000,00</b>	<b>15000000,00</b>	<b>15500000,00</b>	<b>17000000,00</b>	<b>20000000,00</b>	<b>21000000,00</b>	<b>22500000,00</b>	<b>24979214,17</b>
Costos fijos	135000,00	135000,00	135000,00	135000,00	135000,00	135000,00	135000,00	135000,00	135000,00	135000,00
Costos variables	4161000,00	4218000,00	4351000,00	5700000,00	5890000,00	6460000,00	7600000,00	7980000,00	8550000,00	9500000,00
Depreciación	1494559,75	1494559,75	1494559,75	1494559,75	1494559,75	1494559,75	1494559,75	1494559,75	1494559,75	1494559,75
Interes	3979358,40	3792722,18	3576224,17	3325086,47	3033766,74	2695835,86	2303836,03	1849116,24	1321641,27	709770,31
<b>TOTAL COSTOS</b>	<b>9769918,15</b>	<b>9640281,93</b>	<b>9556783,92</b>	<b>10654646,22</b>	<b>10553326,49</b>	<b>10785395,61</b>	<b>11533395,78</b>	<b>11458675,99</b>	<b>11501201,02</b>	<b>11839330,06</b>
<b>TOTAL</b>	<b>1180081,85</b>	<b>1459718,07</b>	<b>1893216,08</b>	<b>4345353,78</b>	<b>4946673,51</b>	<b>6214604,39</b>	<b>8466604,22</b>	<b>9541324,01</b>	<b>10998798,98</b>	<b>13139884,11</b>
Calculo impuestos	141609,82	175166,17	227185,93	521442,45	593600,82	745752,53	1015992,51	1144958,88	1319855,88	1576786,09

# FLUJO DE CAJA

Tabla 6.10 Flujo de caja

## FLUJO DE CAJA

	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
<b>INVERSIONES</b>											
Terreno											
Equipo y maquinaria	22170900										-32033,33
Equipo de oficina	45000										500
Edificacion	400000										3747,5
Vehiculos	20000										7000
<b>INGRESOS</b>											
operacionales		10950000,00	11100000,00	11450000,00	15000000,00	15500000,00	17000000,00	20000000,00	21000000,00	22500000,00	25000000
venta terreno											
venta planta fisica											
equ. Oficina											
venta Eq. Maq.											
venta Vehic.											
<b>COSTOS</b>											
Fijos		-0,05	-0,05	-0,05	-0,05	-0,05	-0,05	-0,05	-0,05	-0,05	-0,05
Variables		-4161000,00	-4218000,00	-4351000,00	-5700000,00	-5890000,00	-6460000,00	-7600000,00	-7980000,00	8550000,00	-9500000
Impuestos		-141609,82	-175166,17	-227185,93	-521442,45	-593600,82	-745752,53	-1015992,51	-1144958,88	-1319855,88	-1576786,09
<b>PRESTAMOS</b>	24870990,00	-5145834,77	-5145834,77	-5145834,77	-5145834,77	-5145834,77	-5145834,77	-5145834,77	-5145834,77	-5145834,77	-5145834,77
<b>FLUJO NETO</b>	-22635900,00	1501555,36	1560999,01	1725979,25	3632722,73	3870564,36	4648412,66	6238172,68	6729206,30	24584309,30	13902428

<b>VAN =</b>	<b>\$ 1.709.412,29</b>
<b>TIR =</b>	<b>16%</b>

# CAPÍTULO 7

## CONCLUSIONES

- El presente estudio muestra la posibilidad de generar 30 [MW], con los desechos sólidos del Distrito Metropolitano de Quito. En la actualidad se producen 297 ton, el transporte y la disposición final del mismo, cuesta US\$14.40 por tonelada con un total de US\$ 648.000.00 por mes, este monto se reduciría a US\$ 360.000.00 por mes con un ahorro extra de **US\$ 288.000.00 por mes.**
- El déficit de electricidad en el Ecuador está bordeando el 4% anual lo que significa que el país necesita instalar **132 MW por año**, por lo que se hace necesario el importar energía eléctrica de Colombia y Perú. Además, en época de estiaje (Octubre – Marzo, en cuencas orientales), los recursos hídricos (46%) dejan de producir a capacidades normales, lo que ocasiona apagones y falta de electricidad.
- De acuerdo a muchos investigadores las energías renovables son la solución para abastecer en un futuro, de energía al mundo, por lo que se debe priorizar el desarrollo de proyectos energéticos usando fuentes no contaminantes y renovables. La energía eólica es la de mayor éxito, sus turbinas en Europa generan casi 35 MIL MEGAWATTS, en California la basura genera 971 MEGAWATTS y sigue creciendo. En este contexto es preocupante saber que en el Ecuador, se dispone de gran cantidad de recursos renovables sin utilización.
- En el Distrito Metropolitano de Quito se dispone aproximadamente de 65% de desechos orgánicos aprovechables para generación eléctrica que en la actualidad son desperdiciadas.

- Un conocimiento profundo del tratamiento microbiológico, es esencial para la optimización de proyectos que operen con sistemas de degradación biológica.
- El manejo de la basura ha sido un problema por generaciones, con el reciclaje y la generación eléctrica, los residuos pueden reducirse aproximadamente hasta el 15% de los originales aumentando 6 veces la vida útil del relleno sanitario. Debido al reciclaje (reducción del 35% de los desechos originales), 15% se convierte en biogás y más el uso del compost o bioabono con su respectivo post – tratamiento (35%).
- Para el modelamiento energético se tomó como ejemplo una turbina de General Electric, sin embargo un estudio completo de eficiencia del sistema, requiere datos de una turbina estacionaria que quema metano.
- Para llegar a los resultados se utilizó como fluido termodinámico aire en condiciones ideales se utilizaron eficiencias de compresor y de turbina de 80% y 85%, respectivamente.
- De los cálculos realizados, se determina que idealmente se generará 34 MW lo que significa un suministro de electricidad aproximadamente para 240.000 habitantes en la ciudad de Quito.
- La operación del prototipo, demostró que es posible obtener electricidad mediante la biodegradación de desechos domésticos.
- La cantidad de energía eléctrica que podría generarse por Kg de basura biodegradada es aproximadamente de 0.693 Kw-h de energía, valor obtenido en el prototipo.

- Durante la operación del prototipo existió la dificultad en el arranque, al tener un motor frío. Es necesario un precalentamiento del gas antes de la cámara de combustión.
- Al usar un ciclo combinado, gas y vapor, la eficiencia térmica puede incrementarse hasta el 45%; no obstante, es necesario la purificación del biogás, a fin de obtener metano con el 95% de pureza, con lo cual la cantidad de energía disponible se aumenta casi al doble.
- El costo del proyecto sería aproximadamente US\$ 25.000.000.00, de los 30MW que se pueden obtener, mediante la degradación de la basura 25MW entrarían al mercado normal de electricidad, a un precio por kW-H considerado en el presente estudio es de US\$ 0.05. Con estos valores, la TIR del proyecto es de 16%. En el mercado spot (Oct – Mar.) se puede alcanzar un precio por kW-H de US\$ 0.14, los 5 MW restantes entrarían al mercado spot aumentando la rentabilidad.

## **RECOMENDACIONES.**

- Se deberá continuar la investigación para desarrollar análisis más específicos sobre las bacterias y análisis dinámicos del presente proyecto para mejorar y perfeccionar esta tecnología.
- Se recomienda realizar el estudio de pre-factibilidad del presente proyecto para determinar otras variables que pueden influir en el mismo.
- Es necesario realizar una revisión periódica de los conductos y uniones, con el fin de evitar posibles fugas del biogás (es un combustible de olor fuerte ), por lo que debe evitarse su utilización en recintos cerrados.
- Dentro del biodigestor, sobre la superficie de la fase líquida, tiende a formarse una "nata" flotante constituida por el material fibroso no digerido por las bacterias; ésta puede resquebrajarse desde el exterior al hacer presión a todo lo largo de la superficie del tanque. El rompimiento de la "nata" permite que el biogás salga libre desde el líquido hacia la parte superior.
- La utilización de materiales sintéticos (polietileno, caucho, acrílico, polivinilo o PVC) en todos los conductos que entran en contacto con el biogás, evita la alta corrosión que el fluido provoca sobre metales.

- No utilizar insecticidas, detergentes o desinfectantes, las aguas utilizadas no deben ingresar al biodigestor en un periodo inferior a tres días después de la aplicación, para evitar que su efecto inhiba las bacterias productoras de biogás.

## BIBLIOGRAFÍA

- GORE A. Earth in the balance, 1ra ed. Estados Unidos, ÉMECO, 1996.
- Quito, Primeras Jornadas de Energía más CD, Departamento de conversión y usos de la energía, 2004
- CARRASCO F. ESPE Monografía de Energías no convencionales, 2003
- VON SPERLING M. Principios básicos do tratamento de esgotos. 1ra ed. Brasil, SEGRAC, 1996
- VON SPERLING M. Lodos Ativados, 1ra ed. Brasil, SEGRAC, 1996.
- DE LEMOS CHERNICHARO C. Reactores anaeróbios, 1ra ed. Brasil, SEGRAC, 1997
- GIPE P. Energía Eólica Práctica, 2da ed. España, Progensa, 2002.
- Nacional Geographic, Agosto de, Pg. 4-27. 2005
- MOORE C. Energía: Una nueva Era, documento verde 2003
- CENGEL Y.y , M BOLES Termodinámica 3ra ed. Traducido del inglés por Gabriel Nagure Cázares. 2da ed. México, MacGraw Hill, 2000
- ALLEN, R.P y R.P. TRIASSI, 33rd GE Turbina State-of-Art-technology Seminal for industrial, Cogeneration, and Independent Power Turbine Users. General Electric Company. 1993

- FUNDACIÓN PESENCA. El Biogás y sus Aplicaciones. Colombia,1992
- Confronting Climate Change: Strategies for Energy Research and Development.National Academy Press, 1990
- ANDERSON, G.K., DONNELLY T. Y MCKEOWN, K.J., Process Biochem, 3ra ed. Estados Unidos, 1998
- MOORE C. y ALLAN S. El oro verde: Japón, Alemania, los Estados Unidos y la carrera de la tecnología ambiental,1994
- CD sobre situación energética del Ecuador, Ministerio de Energía y Minas.
- GUNNERSON, C.G. AND STUCKEY D.C. Anaerobic Digestion - Principles and Practices for Biogás Systems, Washington D.C, 1986
- NAKAMURA S. Análisis numérico y visualización gráfica con MATLAB Traducido del inglés por Roberto Escalona. 2da ed. México, Prentice Hall, 2001
- MOTT ROBERT, Mecánica de fluidos aplicada. Traducido del inglés por Carlos Cordero. 4ta ed. México, Prentice Hall, 1996

# ANEXOS

## ANEXO 1

```
function y=tesis1
% Modelamiento biologico de Sustrato
% Ecuaciones diferenciales parciales
clear
clc
% La ecuacion que modela la degradacion
% de sustrato es la siguiente:
%  $S = -Vx*S - rH/Yh + rh$  (1)
% t x
%
% con las siguientes consiciones de borde
%  $S(0,t)=Smax = 0.147$  (2)
global rH YH rh L uo ua N Dx Vx;
Vx=12;
L1=30;
rH=1.2;
YH=0.09;
rh=0.7;
uo=145000;
ua=25000;
reitol=1.0e-02;
abstol=1.0e-04;
N=51;
nm=11;
L=L1;
Dx=L/(N-1);
fprintf('\n k = %4.2f L = %5.2f...',
,rH,L)
fprintf('\n\n t(d) S(1) S(nm)" S(n)\n');
%Variables de integraci3n
t0=0.0;
tf=70.0;
tout=[t0:0.5:tf]';
nout=141;
%Condiciones iniciales
for i=1:N
u0(i)=uo;
end

%Resoluci3n de Ecuaciones diferenciales ordinarias
options=odeset('RelTol',reitol,'AbsTol',abstol);
[t,u]=ode15s('f521p1b',tout,u0,options);

% Soluci3n
for j=1:nout
t(j)=t(j,1);
fprintf('%10.3f%15.5f%15.5f%15.5f\n',t(j),u(j,1),u(j,nm),u(j,N));
% Impresi3n
tplot1(j)=t(j);
uplot11(j)=u(j,N);
uplot12(j)=u(j,nm);
uplot13(j)=u(j,1);
end
figure(1)
```

```

plot(tplot1,uplot11,'+b');
hold on
plot(tplot1,uplot12,'og');
plot(tplot1,uplot13,'*r');
title('Figura 1: Sustrato facilmente biodegradable');
xlabel('Tiempo, [dias]');
ylabel('Concentración, [mg/L]');
hold off

```

```

function ut=f521p1b(t,u)
global rH YH rh L uo ua N Dx Vx;
ut(1)=(2.0*(u(2)-u(1))+(ua^4-u(1)^4))/Dx^2-(rH/YH)+rh;
for k=2:N-1
    ut(k)=Vx*(u(k+1)-2.0*u(k)+u(k-1))/(2*Dx);
end
ut(N)=Vx*(u(N-1)-u(N))/(2*Dx);

ut=ut';

```

```

function y=tesis2
% Modelamiento biologico de biomasa
% Ecuaciones diferenciales parciales
clear
clc
% La ecuacion que modela el crecimiento
% de biomasa es el siguiente:
%  $X = -Vx \cdot X + rH - rh,d$  (1)
% t x
%
% con las siguientes consiciones de borde
%  $S(0,t)=Xmin = 2000$  (2)
global rH rhd L uo ua N Dx Vx ;
Vx=12;
L1=30;
rH=1.2;
rhd=0.15;
uo=2000;
ua=15000;
reltol=1.0e-02;
abstol=1.0e-04;
N=51;
nm=11;
L=L1;
Dx=L/(N-1);
fprintf('\n k = %4.2f L = %5.2f...',
,rH,L)
fprintf('\n\n t(d) S(1) S(nm)" S(n)\n');
%Variables de integraci3n
t0=0.0;
tf=70.0;
tout=[t0:0.5:tf]';
nout=141;
%Condiciones iniciales
for i=1:N
u0(i)=uo;
end

%Resoluci3n de Ecuaciones diferenciales ordinarias
options=odeset('RelTol',reltol,'AbsTol',abstol);
[t,u]=ode15s('f522p1b',tout,u0,options);

% Soluci3n
for j=1:nout
t(j)=t(j,1);
fprintf('%10.3f%15.5f%15.5f%15.5f\n',t(j),u(j,1),u(j,nm),u(j,N));
% Impresi3n
tplot1(j)=t(j);
uplot11(j)=u(j,N);
uplot12(j)=u(j,nm);
uplot13(j)=u(j,1);
end
figure(1)
plot(tplot1,uplot11,'+b');
hold on
plot(tplot1,uplot12,'og');

```

```

plot(tplot1,uplot13,'*r');
title('Figura 2: Crecimiento de la biomasa en un reactor anaerobico flujo piston');
xlabel('Tiempo, [días]');
ylabel('Concentración, [mg/L]');
hold off

```

```

function ut=f522p1b(t,u)
global rH rhd L uo ua N Dx Vx;
ut(1)=(Vx/8)*(2.0*(u(2)-u(1))+(ua^4-u(1)^4))/2*Dx + (rH - rhd);
for k=2:N-1
    ut(k)=(Vx/8)*(u(k+1)-2.0*u(k)+u(k-1))/(2*Dx);
end
ut(N)=(Vx/8)*(u(N-1)-u(N))/(2*Dx);

ut=ut';

```

```

function y=tesis3
% Modelamiento biologico de biomasa
% Ecuaciones diferenciales parciales
clear
clc
% La ecuacion que modela el crecimiento
% de biomasa es el siguiente:
%  $X = -Vx \cdot X + rH - rh,d$  (1)
% t x
%
% con las siguientes consiciones de borde
%  $S(0,t)=Xmin = 2000$  (2)
global rhd fp rh L uo ua N Dx Vx ;
Vx=12;
L1=30;
rh=0.7;
rhd=0.15;
fp=0.85;
uo=15000;
ua=2000;
reltol=1.0e-02;
abstol=1.0e-04;
N=51;
nm=11;
L=L1;
Dx=L/(N-1);
fprintf('\n k = %4.2f          L = %5.2f'...
        ,rhd,L)
        fprintf('\n\n t(d)          S(1)          S(nm)"          S(n)\n');
%Variables de integración
t0=0.0;
tf=70.0;
tout=[t0:0.5:tf]';
nout=141;
%Condiciones iniciales
for i=1:N
    u0(i)=uo;
end

%Resolución de Ecuaciones diferenciales ordinarias
options=odeset('RelTol',reltol,'AbsTol',abstol);
[t,u]=ode15s('f523p1b',tout,u0,options);

% Solución
for j=1:nout
    t(j)=t(j,1);
    fprintf('%10.3f%15.5f%15.5f%15.5f\n',t(j),u(j,1),u(j,nm),u(j,N));
% Impresión
tplot1(j)=t(j);
uplot11(j)=u(j,N);
uplot12(j)=u(j,nm);
uplot13(j)=u(j,1);
end
figure(1)
plot(tplot1,uplot11,'+b');
hold on

```

```

plot(tplot1,uplot12,'og');
plot(tplot1,uplot13,'*r');
title('Figura 3: Sustrato lentamente biodegradable');
xlabel('Tiempo, [dias]');
ylabel('Concentración, [mg/L]');
hold off

```

```

function ut=f521p1b(t,u)
global rhd rh fp L uo ua N Dx Vx;
ut(1)=(Vx/8)*(2.0*(u(2)-u(1))+(ua^4-u(1)^4))/2*Dx + (1 - fp)*rhd - rh;
    for k=2:N-1
        ut(k)=(Vx/8)*(u(k+1)-2.0*u(k)+u(k-1))/(2*Dx);
    end
    ut(N)=(Vx/8)*(u(N-1)-u(N))/(2*Dx);

ut=ut';

```

```

function [tout,yout,varargout] =
ode15s(odefile,tspan,y0,options,varargin)
%ODE15S Solve stiff differential equations and DAEs, variable order
method.
% [T,Y] = ODE15S('F',TSPAN,Y0) with TSPAN = [T0 TFINAL] integrates the
% system of differential equations  $y' = F(t,y)$  from time T0 to TFINAL
with
% initial conditions Y0. 'F' is a string containing the name of an ODE
% file. Function F(T,Y) must return a column vector. Each row in
% solution array Y corresponds to a time returned in column vector T.
To
% obtain solutions at specific times T0, T1, ..., TFINAL (all
increasing
% or all decreasing), use TSPAN = [T0 T1 ... TFINAL].
%
% [T,Y] = ODE15S('F',TSPAN,Y0,OPTIONS) solves as above with default
% integration parameters replaced by values in OPTIONS, an argument
% created with the ODESET function. See ODESET for details. Commonly
% used options are scalar relative error tolerance 'RelTol' (1e-3 by
% default) and vector of absolute error tolerances 'AbsTol' (all
% components 1e-6 by default).
%
% [T,Y] = ODE15S('F',TSPAN,Y0,OPTIONS,P1,P2,...) passes the additional
% parameters P1,P2,... to the ODE file as F(T,Y,FLAG,P1,P2,...) (see
% ODEFILE). Use OPTIONS = [] as a place holder if no options are set.
%
% It is possible to specify TSPAN, Y0 and OPTIONS in the ODE file (see
% ODEFILE). If TSPAN or Y0 is empty, then ODE15S calls the ODE file
% [TSPAN,Y0,OPTIONS] = F([],[],'init') to obtain any values not
supplied
% in the ODE15S argument list. Empty arguments at the end of the call
% list may be omitted, e.g. ODE15S('F').
%
% The Jacobian matrix  $dF/dy$  is critical to reliability and efficiency.
% Use ODESET to set JConstant 'on' if  $dF/dy$  is constant. Set
Vectorized
% 'on' if the ODE file is coded so that F(T,[Y1 Y2 ...]) returns
% [F(T,Y1) F(T,Y2) ...]. Set JPattern 'on' if  $dF/dy$  is a sparse matrix
% and the ODE file is coded so that F([],[],'jpattern') returns a
sparsity
% pattern matrix of 1's and 0's showing the nonzeros of  $dF/dy$ . Set
% Jacobian 'on' if the ODE file is coded so that F(T,Y,'jacobian')
returns
%  $dF/dy$ .
%
% As an example, the command
%
%     ode15s('vdpode',[0 3000],[2 0],[[],1000]);
%
% solves the system  $y' = vdpode(t,y)$  with  $\mu = 1000$ , using the default
% relative error tolerance 1e-3 and the default absolute tolerance of
1e-6
% for each component. When called with no output arguments, as in this
% example, ODE15S calls the default output function ODEPLOT to plot the
% solution as it is computed.
%

```

```

% ODE15S can solve problems  $M(t,y)*y' = F(t,y)$  with a mass matrix M
that
% is nonsingular. Use ODESET to set Mass to 'M', 'M(t)', or 'M(t,y)'
if
% the ODE file is coded so that F(T,Y,'mass') returns a constant,
% time-dependent, or time- and state-dependent mass matrix,
respectively.
% The default value of Mass is 'none'. See FEM1ODE, FEM2ODE, or
% BATONODE.
%
% If M is singular,  $M(t)*y' = F(t,y)$  is a differential-algebraic
equation
% (DAE). DAEs have solutions only when y0 is consistent, i.e. there is
a
% vector yp0 such that  $M(t0)*yp0 = f(t0,y0)$ . ODE15S can solve DAEs of
% index 1 provided that M is not state dependent and y0 is sufficiently
% close to being consistent. You can use ODESET to set MassSingular to
% 'yes', 'no', or 'maybe'. The default of 'maybe' causes ODE15S to
test
% whether the problem is a DAE. If it is, ODE15S treats y0 as a guess,
% attempts to compute consistent initial conditions that are close to
y0,
% and goes on to solve the problem. When solving DAEs, it is very
% advantageous to formulate the problem so that M is diagonal (a
% semi-explicit DAE). See HB1DAE or AMP1DAE.
%
% [T,Y,TE,YE,IE] = ODE15S('F',TSPAN,Y0,OPTIONS) with the Events
property
% in OPTIONS set to 'on', solves as above while also locating zero
% crossings of an event function defined in the ODE file. The ODE file
% must be coded so that F(T,Y,'events') returns appropriate
information.
% See ODEFILE for details. Output TE is a column vector of times at
which
% events occur, rows of YE are the corresponding solutions, and indices
in
% vector IE specify which event occurred.
%
% See also ODEFILE and
% other ODE solvers: ODE23S, ODE23T, ODE23TB, ODE45, ODE23,
ODE113
% options handling: ODESET, ODEGET
% output functions: ODEPLOT, ODEPHAS2, ODEPHAS3, ODEPRINT
% odefile examples: VDPODE, BRUSSODE, B5ODE, CHM6ODE, FEM1ODE
% Jacobian functions: NUMJAC, COLGROUP

% ODE15S is a quasi-constant step size implementation in terms of
backward
% differences of the Klopfenstein-Shampine family of Numerical
% Differentiation Formulas of orders 1-5. The natural "free"
interpolants
% are used. Local extrapolation is not done. By default, Jacobians
are
% generated numerically.

% Details are to be found in The MATLAB ODE Suite, L. F. Shampine and
% M. W. Reichelt, SIAM Journal on Scientific Computing, 18-1, 1997.

```

```

% Mark W. Reichelt, Lawrence F. Shampine, and Jacek Kierzenka, 12-18-97
% Copyright (c) 1984-98 by The MathWorks, Inc.
% $Revision: 1.62 $ $Date: 1998/05/18 15:06:36 $

```

```

true = 1;
false = ~true;

```

```

nsteps = 0; % stats
nfailed = 0; % stats
nfevals = 0; % stats
npds = 0; % stats
ndecomps = 0; % stats
nsolves = 0; % stats

```

```

if nargin == 0
    error('Not enough input arguments. See ODE15S.');
```

```
elseif ~isstr(odefile) & ~isa(odefile, 'inline')
    error('First argument must be a single-quoted string. See ODE15S.');
```

```
end

```

```

if nargin == 1
    tspan = []; y0 = []; options = [];
elseif nargin == 2
    y0 = []; options = [];
elseif nargin == 3
    options = [];
elseif ~isempty(options) & ~isa(options, 'struct')
    if (length(tspan) == 1) & (length(y0) == 1) & (min(size(options)) == 1)
        tspan = [tspan; y0];
        y0 = options;
        options = [];
        varargin = {};
        msg = sprintf('Use odel5s('%s',tspan,y0,...) instead.',odefile);
        warning(['Obsolete syntax. ' msg]);
    else
        error('Correct syntax is odel5s('odefile',tspan,y0,options).');
```

```
end
end

```

```

% Get default tspan and y0 from odefile if none are specified.
if isempty(tspan) | isempty(y0)
    if (nargout(odefile) < 3) & (nargout(odefile) ~= -1)
        msg = sprintf('Use odel5s('%s',tspan,y0,...) instead.',odefile);
        error(['No default parameters in ' upper(odefile) '. ' msg]);
    end
    [def_tspan,def_y0,def_options] =
feval(odefile,[],[],'init',varargin{:});
    if isempty(tspan)
        tspan = def_tspan;
    end
    if isempty(y0)
        y0 = def_y0;
    end
    if isempty(options)
        options = def_options;
    else

```

```

        options = odeset(def_options,options);
    end
end

% Test that tspan is internally consistent.
tspan = tspan(:);
ntspan = length(tspan);
if ntspan == 1
    t0 = 0;
    next = 1;
else
    t0 = tspan(1);
    next = 2;
end
tfinal = tspan(ntspan);
if t0 == tfinal
    error('The last entry in tspan must be different from the first
entry.');
```

```

end
tdir = sign(tfinal - t0);
if any(tdir * (tspan(2:ntspan) - tspan(1:ntspan-1)) <= 0)
    error('The entries in tspan must strictly increase or decrease.');
```

```

end

t = t0;
y = y0(:);
neq = length(y);
one2neq = (1:neq)';

% Get options, and set defaults.
rtol = odeget(options,'RelTol',1e-3);
if (length(rtol) ~= 1) | (rtol <= 0)
    error('RelTol must be a positive scalar.');
```

```

end
if rtol < 100 * eps
    rtol = 100 * eps;
    warning(['RelTol has been increased to ' num2str(rtol) '.']);
end

atol = odeget(options,'AbsTol',1e-6);
if any(atol <= 0)
    error('AbsTol must be positive.');
```

```

end

normcontrol = strcmp(odeget(options,'NormControl','off'),'on');
if normcontrol
    if length(atol) ~= 1
        error('Solving with NormControl 'on' requires a scalar AbsTol.');
```

```

    end
    normy = norm(y);
else
    if (length(atol) ~= 1) & (length(atol) ~= neq)
        error(sprintf(['Solving %s requires a scalar AbsTol, ' ...
                        'or a vector AbsTol of length
%d'],upper(odefile),neq));
    end
    atol = atol(:);
end

```

```

end
threshold = atol / rtol;

% By default, hmax is 1/10 of the interval.
hmax = min(abs(tfinal-t), abs(odeget(options, 'MaxStep', 0.1*(tfinal-t))));
if hmax <= 0
    error('Option ' 'MaxStep' ' must be greater than zero. ');
end
htry = abs(odeget(options, 'InitialStep'));
if htry <= 0
    error('Option ' 'InitialStep' ' must be greater than zero. ');
end

haveeventfun = strcmp(odeget(options, 'Events', 'off'), 'on');
if haveeventfun
    valt = feval(odefile, t, y, 'events', varargin{:});
    teout = [];
    yeout = [];
    ieout = [];
end

if nargin > 0
    outfun = odeget(options, 'OutputFcn');
else
    outfun = odeget(options, 'OutputFcn', 'odeplot');
end
if isempty(outfun)
    haveoutfun = false;
else
    haveoutfun = true;
    outputs = odeget(options, 'OutputSel', one2neq);
end
refine = odeget(options, 'Refine', 1);
printstats = strcmp(odeget(options, 'Stats', 'off'), 'on');

Janalytic = strcmp(odeget(options, 'Jacobian', 'off'), 'on');
Jconstant = strcmp(odeget(options, 'JConstant', 'off'), 'on');
vectorized = strcmp(odeget(options, 'Vectorized', 'off'), 'on');
Jpattern = strcmp(odeget(options, 'JPattern', 'off'), 'on');
if Jpattern
    Js = feval(odefile, [], [], 'jpattern', varargin{:});
else
    Js = [];
end

mass = lower(odeget(options, 'Mass', 'none'));

% Grandfathering code -- should be removed in a subsequent release.
Mconstant = odeget(options, 'MassConstant');
if strcmp(mass, 'on') | strcmp(mass, 'off') | ...
    strcmp(Mconstant, 'on') | strcmp(Mconstant, 'off')
    if strcmp(mass, 'on') | strcmp(mass, 'off')
        warning(['Mass property values are ' 'none', ' 'M', ' 'M(t)', ' ' ...
            'and ' 'M(t,y)' ' (see ODESET). Support for the ' 'on' ' and ' ...
            ' 'off' ' values has been grandfathered and will disappear ' ...
            'in a future release.']);
    end
end

```

```

if strcmp(Mconstant,'on') | strcmp(Mconstant,'off')
    warning(['The MassConstant property has been grandfathered and will '
...
            'disappear in a future release (see ODESET).']);
end
if strcmp(Mconstant,'on')
    mass = 'm';
    warning('Assuming Mass value ''M'', a constant mass matrix.');
```

```

elseif strcmp(mass,'on')
    mass = 'm(t)';
    warning('Assuming Mass value ''M(t)'', a time-dependent mass
matrix.');
```

```

else
    mass = 'none';
    warning('Assuming Mass value ''none'', no mass matrix.');
```

```

end
end

switch(mass)
    case 'none', Mtype = 0;
    case 'm', Mtype = 1;
    case 'm(t)', Mtype = 2;
    case 'm(t,y)', Mtype = 3;
    otherwise, error('Unrecognized Mass property value. See ODESET.');
```

```

end

Msingular = odeget(options,'MassSingular');
if Mtype == 3
    if strcmp(Msingular,'maybe')
        warning(['Solver assumes MassSingular is ''no'' for state-dependent '
...
                'mass matrices.']);
        Msingular = 'no';
    elseif strcmp(Msingular,'yes')
        error(['MassSingular cannot be ''yes'' for state-dependent mass '...'
                'matrices M(t,y).']);
    else
        Msingular = 'no';
    end
elseif isempty(Msingular)
    Msingular = 'maybe';
end

DAE = false;
RowScale = [];
SE = false;
if Mtype > 0
    Mt = feval(odefile,t,y,'mass',varargin{:});

    if nnz(Mt) == 0
        error('The mass matrix must have some non-zero entries.')
```

```

    end

    if ~strcmp(Msingular,'no')

        % If Mt is singular, DAE = true. It is very advantageous to
        % to recognize a problem that is semi-explicit, SE = true.

```

```

    [r,c] = find(Mt);
    SE = isequal(r,c); % Test for a diagonal mass
matrix.

    DAE = true;
    if strcmp(Msingular, 'maybe')
        if SE
            DAE = any(diag(Mt) == 0);
        else
            DAE = (eps*nnz(Mt)*condest(Mt) > 1);
        end
    end
end

else
    Mt = sparse(one2neq,one2neq,1,neq,neq); % Mtype = 0, mass matrix is
sparse I.
end
Mcurrent = true;
Mtnew = Mt;

maxk = odeget(options, 'MaxOrder', 5);
bdf = strcmp(odeget(options, 'BDF', 'off'), 'on');

% Set the output flag.
if ntspan > 2
    outflag = 1; % output only at tspan points
elseif refine <= 1
    outflag = 2; % computed points, no refinement
else
    outflag = 3; % computed points, with
refinement
    S = (1:refine-1)' / refine;
end

% Initialize method parameters.
G = [1; 3/2; 11/6; 25/12; 137/60];
if bdf
    alpha = [0; 0; 0; 0; 0];
else
    alpha = [-37/200; -1/9; -0.0823; -0.0415; 0];
end
invGa = 1 ./ (G .* (1 - alpha));
erconst = alpha .* G + (1 ./ (2:6)');
difU = [ -1, -2, -3, -4, -5; % difU is its own inverse!
         0, 1, 3, 6, 10;
         0, 0, -1, -4, -10;
         0, 0, 0, 1, 5;
         0, 0, 0, 0, -1 ];
maxK = 1:maxk;
[kJ,kI] = meshgrid(maxK,maxK);
difU = difU(maxK,maxK);
maxit = 4;

% The input arguments of odefile determine the args to use to evaluate f.
if (exist(odefile) == 3) | (nargin(odefile) == 2) % don't nargin MEX
files

```

```

    args = {}; % odefile accepts only (t,y)
else
    args = [{' ' varargin]; % use (t,y,' ',p1,p2,...)
end

f0 = feval(odefile,t,y,args{:});
nfevals = nfevals + 1; % stats
[m,n] = size(f0);
if n > 1
    error([upper(odefile) ' must return a column vector.'])
elseif m ~= neq
    msg = sprintf('an initial condition vector of length %d.',m);
    error(['Solving ' upper(odefile) ' requires ' msg]);
end

warnstat = warning;

% Compute the initial slope yp. For DAEs the y input is usually just a
% guess. Compute consistent initial conditions when necessary.
jthresh = atol + zeros(neq,1);
if DAE
    if SE | ~issparse(Mt)
        [y,yp,f0,dfdy,nFE,nPD,fac,g] = icsedae(odefile,t,SE,Mt,y,f0,rtol,...
            Janalytic,jthresh,vectorized,Js,varargin{:});
    else
        [y,yp,f0,dfdy,nFE,nPD,fac,g] =
icsdae(odefile,tspan,htry,Mt,y,f0,rtol,...
            Janalytic,jthresh,vectorized,Js,varargin{:});
    end
    nfevals = nfevals + nFE;
    npds = npds + nPD;
else
    if Mtype > 0
        [L,U] = lu(Mt);
        yp = U \ (L \ f0);
        ndecomps = ndecomps + 1; % stats
        nsolves = nsolves + 1; % stats
    else
        yp = f0;
    end

    if Janalytic
        dfdy = feval(odefile,t,y,'jacobian',varargin{:});
    else
        [dfdy,fac,g,nF] = ...
            numjac(odefile,t,y,f0,jthresh,[],vectorized,Js,[],args{:});
        nfevals = nfevals + nF; % stats
    end
    npds = npds + 1; % stats
end
Jcurrent = true;

% hmin is a small number such that t + hmin is clearly different from t
in
% the working precision, but with this definition, it is 0 if t = 0.
hmin = 16*eps*abs(t);

```

```

if isempty(htry)
    % Compute an initial step size h using yp = y'(t).
    if normcontrol
        wt = max(normy, threshold);
        rh = 1.25 * (norm(yp) / wt) / sqrt(rtol); % 1.25 = 1 / 0.8
    else
        wt = max(abs(y), threshold);
        rh = 1.25 * norm(yp ./ wt, inf) / sqrt(rtol);
    end
    absh = min(hmax, abs(tspan(next) - t));
    if absh * rh > 1
        absh = 1 / rh;
    end
    absh = max(absh, hmin);

    if ~DAE
        % The error of BDF1 is 0.5*h^2*y''(t), so we can determine the
        optimal h.
        h = tdir * absh;
        tdel = (t + tdir*min(sqrt(eps)*max(abs(t), abs(t+h)), absh)) - t;
        f1 = feval(odefile, t+tdel, y, args{:});
        nfevals = nfevals + 1; % stats
        dfdt = (f1 - f0) ./ tdel;
        if normcontrol
            if Mtype > 0
                rh = 1.25 * sqrt(0.5 * (norm(U \ (L \ (dfdt + dfdy*yp)))) / wt) /
                rtol);
            else
                rh = 1.25 * sqrt(0.5 * (norm(dfdt + dfdy*yp) / wt) / rtol);
            end
        else
            if Mtype > 0
                rh = 1.25*sqrt(0.5*norm((U \ (L \ (dfdt+dfdy*yp)))) ./ wt, inf) /
                rtol);
            else
                rh = 1.25 * sqrt(0.5 * norm((dfdt + dfdy*yp) ./ wt, inf) / rtol);
            end
        end
        absh = min(hmax, abs(tspan(next) - t));
        if absh * rh > 1
            absh = 1 / rh;
        end
        absh = max(absh, hmin);
    end
else
    absh = min(hmax, max(hmin, htry));
end
h = tdir * absh;

% Initialize.
k = 1; % start at order 1 with BDF1
K = 1; % K = 1:k
klast = k;
abshlast = absh;

dif = zeros(neq, maxk+2);
dif(:,1) = h * yp;

```

```

hinvGak = h * invGa(k);
nconhk = 0; % steps taken with current h and
k
Miter = Mt - hinvGak * dfdy;
% Use explicit scaling of the equations when solving DAEs.
if DAE
    RowScale = 1 ./ max(abs(Miter), [], 2);
    Miter = sparse(one2neq, one2neq, RowScale) * Miter;
end
[L,U] = lu(Miter);
nde comps = nde comps + 1; % stats
havrate = false;

% Initialize the output function.
if haveoutfun
    feval(outfun, [t tfinal], y(outputs), 'init');
end

% Allocate memory if we're generating output.
if nargout > 0
    if ntspan > 2 % output only at tspan points
        tout = zeros(ntspan, 1);
        yout = zeros(ntspan, neq);
    else % alloc in chunks
        chunk = max(ceil(128 / neq), refine);
        tout = zeros(chunk, 1);
        yout = zeros(chunk, neq);
    end
    nout = 1;
    tout(nout) = t;
    yout(nout, :) = y.';
end

% THE MAIN LOOP

done = false;
while ~done

    hmin = 16*eps*abs(t);
    absh = min(hmax, max(hmin, absh));
    h = tdir * absh;

    % Stretch the step if within 10% of tfinal-t.
    if 1.1*absh >= abs(tfinal - t)
        h = tfinal - t;
        absh = abs(h);
        done = true;
    end

    if (absh ~= abshlast) | (k ~= klast)
        difRU = cumprod((kI - 1 - kJ*(absh/abshlast)) ./ kI) * difU;
        dif(:,K) = dif(:,K) * difRU(K,K);

        hinvGak = h * invGa(k);
        nconhk = 0;
    end
end

```

```

    if ~Mcurrent                                % possible only if state-
dependent
        Mt = feval(odefile,t,y,'mass',varargin{:});
        Mcurrent = true;
    end
    Miter = Mt - hinvGak * dfdy;
    if DAE
        RowScale = 1 ./ max(abs(Miter), [], 2);
        Miter = sparse(one2neq,one2neq,RowScale) * Miter;
    end
    [L,U] = lu(Miter);
    ndecomps = ndecomps + 1;                    % stats
    havrate = false;
end

% LOOP FOR ADVANCING ONE STEP.
nofailed = true;                               % no failed attempts
while true                                     % Evaluate the formula.

    gotynew = false;                           % is ynew evaluated yet?
    while ~gotynew

        % Compute the constant terms in the equation for ynew.
        psi = dif(:,K) * (G(K) * invGa(k));

        % Predict a solution at t+h.
        tnew = t + h;
        pred = y + sum(dif(:,K), 2);
        ynew = pred;

        % The difference, difkpl, between pred and the final accepted
        % ynew is equal to the backward difference of ynew of order
        % k+1. Initialize to zero for the iteration to compute ynew.
        difkpl = zeros(neq,1);
        if normcontrol
            normynew = norm(ynew);
            invwt = 1 / max(max(normy, normynew), threshold);
            minnrm = 100*eps*(normynew * invwt);
        else
            invwt = 1 ./ max(max(abs(y), abs(ynew)), threshold);
            minnrm = 100*eps*norm(ynew .* invwt, inf);
        end

        % Mtnew is required in the RHS function evaluation.
        if Mtype == 2
            Mtnew = feval(odefile,tnew,ynew,'mass',varargin{:});
        end

        % Iterate with simplified Newton method.
        tooslow = false;
        for iter = 1:maxit
            if Mtype == 3
                Mtnew = feval(odefile,tnew,ynew,'mass',varargin{:});
            end
            rhs = hinvGak*feval(odefile,tnew,ynew, args{:}) -
Mtnew*(psi+difkpl);
            if DAE                                % Account for row scaling.

```

```

    rhs = RowScale .* rhs;
end
warning('off');
del = U \ (L \ rhs);
warning(warnstat);
if normcontrol
    newnorm = norm(del) * invwt;
else
    newnorm = norm(del .* invwt,inf);
end
difkpl = difkpl + del;
ynew = pred + difkpl;

if newnorm <= minnorm
    gotynew = true;
    break;
elseif iter == 1
    if havrate
        errit = newnorm * rate / (1 - rate);
        if errit <= 0.05*rtol           % More stringent when using old
rate.
            gotynew = true;
            break;
        end
    else
        rate = 0;
    end
elseif newnorm > 0.9*oldnorm
    tooslow = true;
    break;
else
    rate = max(0.9*rate, newnorm / oldnorm);
    havrate = true;
    errit = newnorm * rate / (1 - rate);
    if errit <= 0.5*rtol
        gotynew = true;
        break;
    elseif iter == maxit
        tooslow = true;
        break;
    elseif 0.5*rtol < errit*rate^(maxit-iter)
        tooslow = true;
        break;
    end
end
end

oldnorm = newnorm;
end                                     % end of Newton loop
nfevals = nfevals + iter;              % stats
nsolves = nsolves + iter;              % stats

if tooslow
    nfailed = nfailed + 1;              % stats
    % Speed up the iteration by forming J(t,y) or reducing h.
    if ~Jcurrent
        if Janalytic
            dfdy = feval(odefile,t,y,'jacobian',varargin{:});

```

```

else
    f0 = feval(odefile,t,y,args{:});
    [dfdy,fac,g,nF] = ...
numjac(odefile,t,y,f0,jthresh,fac,vectorized,Js,g,args{:});
    nfevals = nfevals + nF + 1; % stats
end
npds = npds + 1; % stats
Jcurrent = true;
elseif absh <= hmin
    msg = sprintf(['Failure at t=%e. Unable to meet integration '
...
                    'tolerances without reducing the step size below
' ...
                    'the smallest value allowed (%e) at time t.\n'],
...
                    t,hmin);
warning(msg);
if haveoutfun
    feval(outfun,[],[],'done');
end
if printstats % print cost statistics
    fprintf('%g successful steps\n', nsteps);
    fprintf('%g failed attempts\n', nfailed);
    fprintf('%g function evaluations\n', nfevals);
    fprintf('%g partial derivatives\n', npds);
    fprintf('%g LU decompositions\n', ndecomps);
    fprintf('%g solutions of linear systems\n', nsolves);
end
if nargout > 0
    tout = tout(1:nout);
    yout = yout(1:nout,:);
    if haveeventfun
        varargout{1} = teout;
        varargout{2} = yeout;
        varargout{3} = ieout;
        varargout{4} = [nsteps;nfailed;nfevals; npds; ndecomps;
nsolves];
    else
        varargout{1} = [nsteps;nfailed;nfevals; npds; ndecomps;
nsolves];
    end
end
return;
else
    abshlast = absh;
    absh = max(0.3 * absh, hmin);
    h = tdir * absh;
    done = false;

    difFRU = cumprod((kI - 1 - kJ*(absh/abshlast)) ./ kI) * difU;
    dif(:,K) = dif(:,K) * difFRU(K,K);

    hinvGak = h * invGa(k);
    nconhk = 0;
end

```

```

        if ~Mcurrent                                % possible only if state-
dependent
            Mt = feval(odefile,t,y,'mass',varargin{:});
            Mcurrent = true;
        end
        Miter = Mt - hinvGak * dfdy;
        if DAE
            RowScale = 1 ./ max(abs(Miter),[],2);
            Miter = sparse(one2neq,one2neq,RowScale) * Miter;
        end
        [L,U] = lu(Miter);
        ndecomps = ndecomps + 1;                    % stats
        havrate = false;
    end
end % end of while loop for getting ynew

% difkpl is now the backward difference of ynew of order k+1.
if normcontrol
    err = (norm(difkpl) * invwt) * erconst(k);
else
    err = norm(difkpl .* invwt,inf) * erconst(k);
end

if err > rtol                                    % Failed step
    nfailed = nfailed + 1;                        % stats
    if absh <= hmin
        msg = sprintf(['Failure at t=%e. Unable to meet integration '
...
                        'tolerances without reducing the step size below '
...
                        'the smallest value allowed (%e) at time
t.\n'],t,hmin);
        warning(msg);
        if haveoutfun
            feval(outfun,[],[],'done');
        end
        if printstats                            % print cost statistics
            fprintf('%g successful steps\n', nsteps);
            fprintf('%g failed attempts\n', nfailed);
            fprintf('%g function evaluations\n', nfevals);
            fprintf('%g partial derivatives\n', npds);
            fprintf('%g LU decompositions\n', ndecomps);
            fprintf('%g solutions of linear systems\n', nsolves);
        end
        if nargout > 0
            tout = tout(1:nout);
            yout = yout(1:nout,:);
            if haveeventfun
                varargout{1} = teout;
                varargout{2} = yeout;
                varargout{3} = ieout;
                varargout{4} = [nsteps; nfailed; nfevals; npds; ndecomps;
nsolves];
            else
                varargout{1} = [nsteps; nfailed; nfevals; npds; ndecomps;
nsolves];
            end
        end
    end
end

```

```

    end
    return;
end

abshlast = absh;
if nofailed
    nofailed = false;
    hopt = absh * max(0.1, 0.833*(rtol/err)^(1/(k+1))); % 1/1.2
    if k > 1
        if normcontrol
            errkm1 = (norm(dif(:,k) + difkp1) * invwt) * erconst(k-1);
        else
            errkm1 = norm((dif(:,k) + difkp1) .* invwt,inf) * erconst(k-
1);
        end
        hkm1 = absh * max(0.1, 0.769*(rtol/errkm1)^(1/k)); % 1/1.3
        if hkm1 > hopt
            hopt = min(absh,hkm1); % don't allow step size increase
            k = k - 1;
            K = 1:k;
        end
    end
    absh = max(hmin, hopt);
else
    absh = max(hmin, 0.5 * absh);
end
h = tdir * absh;
if absh < abshlast
    done = false;
end

difRU = cumprod((kI - 1 - kJ*(absh/abshlast)) ./ kI) * difU;
dif(:,K) = dif(:,K) * difRU(K,K);

hinvGak = h * invGa(k);
nconhk = 0;
if ~Mcurrent % possible only if state-
dependent
    Mt = feval(odefile,t,y,'mass',varargin{:});
    Mcurrent = true;
end
Miter = Mt - hinvGak * dfdy;
if DAE
    RowScale = 1 ./ max(abs(Miter), [], 2);
    Miter = sparse(one2neq,one2neq,RowScale) * Miter;
end
[L,U] = lu(Miter);
nde comps = nde comps + 1; % stats
havrate = false;

else % Successful step
    break;

end
end % while true
nsteps = nsteps + 1; % stats

```

```

dif(:,k+2) = difkp1 - dif(:,k+1);
dif(:,k+1) = difkp1;
for j = k:-1:1
    dif(:,j) = dif(:,j) + dif(:,j+1);
end

tstep = tnew;
ystep = ynew;
if haveeventfun
    [te,ye,ie,valt,stop] = ...

odezero('ntrp15s',odefile,valt,t,y,tnew,ynew,t0,varargin,h,dif,k);
nnte = length(te);
if nnte > 0
    if nargout > 2
        teout = [teout; te];
        yeout = [yeout; ye.'];
        ieout = [ieout; ie];
    end
    if stop % stop on a terminal event
        tnew = te(nnte);
        ynew = ye(:,nnte);
        done = true;
    end
end
end

if nargout > 0
    oldnout = nout;
    if outflag == 2 % computed points, no refinement
        nout = nout + 1;
        if nout > length(tout)
            tout = [tout; zeros(chunk,1)];
            yout = [yout; zeros(chunk,neq)];
        end
        tout(nout) = tnew;
        yout(nout,:) = ynew.';
    elseif outflag == 3 % computed points, with
refinement
        nout = nout + refine;
        if nout > length(tout) % requires chunk >= refine
            tout = [tout; zeros(chunk,1)];
            yout = [yout; zeros(chunk,neq)];
        end
        i = oldnout+1:nout-1;
        tout(i) = t + (tnew-t)*S;
        yout(i,:) = ntrp15s(tout(i),[],[],tstep,ystep,h,dif,k).';
        tout(nout) = tnew;
        yout(nout,:) = ynew.';
    elseif outflag == 1 % output only at tspan points
        while next <= ntspan
            if tdir * (tnew - tspan(next)) < 0
                if haveeventfun & done
                    nout = nout + 1;
                    tout(nout) = tnew;
                    yout(nout,:) = ynew.';
                end
            end
        end
    end
end

```

```

        break;
    elseif tnew == tspan(next)
        nout = nout + 1;
        tout(nout) = tnew;
        yout(nout,:) = ynew.';
        next = next + 1;
        break;
    end
    nout = nout + 1; % tout and yout are already
allocated
    tout(nout) = tspan(next);
    yout(nout,:) = ntrp15s(tspan(next), [], [], tstep, ystep, h, dif, k).';
    next = next + 1;
end
end

if haveoutfun
    i = oldnout+1:nout;
    if ~isempty(i) & (feval(outfun,tout(i),yout(i,outputs).') == 1)
        tout = tout(1:nout);
        yout = yout(1:nout,:);
        if haveeventfun
            varargout{1} = teout;
            varargout{2} = yeout;
            varargout{3} = ieout;
            varargout{4} = [nsteps; nfailed; nfevals; npds; ndecomps;
nsolves];
        else
            varargout{1} = [nsteps; nfailed; nfevals; npds; ndecomps;
nsolves];
        end
        return;
    end
end

elseif haveoutfun
    if outflag == 2
        if feval(outfun,tnew,ynew(outputs)) == 1
            return;
        end
        elseif outflag == 3 % computed points, with
refinement
            tinterp = t + (tnew-t)*S;
            yinterp = ntrp15s(tinterp, [], [], tstep, ystep, h, dif, k);
            if feval(outfun, [tinterp; tnew], [yinterp(outputs,:),
ynew(outputs)]) == 1
                return;
            end
        elseif outflag == 1 % output only at tspan points
            ninterp = 0;
            while next <= ntspan
                if tdir * (tnew - tspan(next)) < 0
                    if haveeventfun & done
                        ninterp = ninterp + 1;
                        tinterp(ninterp,1) = tnew;
                        yinterp(:,ninterp) = ynew;
                    end
                end
            end
        end
    end
end

```

```

        break;
    elseif tnew == tspan(next)
        ninterp = ninterp + 1;
        tinterp(ninterp,1) = tnew;
        yinterp(:,ninterp) = ynew;
        next = next + 1;
        break;
    end
    ninterp = ninterp + 1;
    tinterp(ninterp,1) = tspan(next);
    yinterp(:,ninterp) =
ntrp15s(tspan(next),[],[],tstep,ystep,h,dif,k);
    next = next + 1;
end
if ninterp > 0
    if feval(outfun,tinterp(1:ninterp),yinterp(outputs,1:ninterp)) ==
1
        return;
    end
end
end
end
end

klast = k;
abshlast = absh;
nconhk = min(nconhk+1,maxk+2);
if nconhk >= k + 2
    temp = 1.2*(err/rtol)^(1/(k+1));
    if temp > 0.1
        hopt = absh / temp;
    else
        hopt = 10*absh;
    end
end
kopt = k;
if k > 1
    if normcontrol
        errkm1 = (norm(dif(:,k)) * invwt) * erconst(k-1);
    else
        errkm1 = norm(dif(:,k) .* invwt,inf) * erconst(k-1);
    end
    temp = 1.3*(errkm1/rtol)^(1/k);
    if temp > 0.1
        hkm1 = absh / temp;
    else
        hkm1 = 10*absh;
    end
end
if hkm1 > hopt
    hopt = hkm1;
    kopt = k - 1;
end
end
if k < maxk
    if normcontrol
        errkp1 = (norm(dif(:,k+2)) * invwt) * erconst(k+1);
    else
        errkp1 = norm(dif(:,k+2) .* invwt,inf) * erconst(k+1);
    end
end

```

```

temp = 1.4*(errkp1/rtol)^(1/(k+2));
if temp > 0.1
    hkp1 = absh / temp;
else
    hkp1 = 10*absh;
end
if hkp1 > hopt
    hopt = hkp1;
    kopt = k + 1;
end
end
if hopt > absh
    absh = hopt;
    if k ~= kopt
        k = kopt;
        K = 1:k;
    end
end
end

% Advance the integration one step.
t = tnew;
y = ynew;
if normcontrol
    normy = normynew;
end
Jcurrent = Jconstant;
switch Mtype
case {0,1}
    Mcurrent = true;                % Constant mass matrix I or M.
case 2
    % M(t) has already been evaluated at tnew in Mtnew.
    Mt = Mtnew;
    Mcurrent = true;
case 3
    % M(t,y) has not yet been evaluated at the accepted ynew.
    Mcurrent = false;
end

end % while ~done

if haveoutfun
    feval(outfun, [], [], 'done');
end

if printstats                % print cost statistics
    fprintf('%g successful steps\n', nsteps);
    fprintf('%g failed attempts\n', nfailed);
    fprintf('%g function evaluations\n', nfevals);
    fprintf('%g partial derivatives\n', npds);
    fprintf('%g LU decompositions\n', ndecomps);
    fprintf('%g solutions of linear systems\n', nsolves);
end

if nargout > 0
    tout = tout(1:nout);
    yout = yout(1:nout,:);
end

```

```
if haveeventfun
    varargout{1} = teout;
    varargout{2} = yeout;
    varargout{3} = ieout;
    varargout{4} = [nsteps; nfailed; nfevals; npds; ndecomps; nsolves];
else
    varargout{1} = [nsteps; nfailed; nfevals; npds; ndecomps; nsolves];
end
end
end
```

```

function options = odeset(varargin)
%ODESET Create/alter ODE OPTIONS structure.
%   OPTIONS = ODESET('NAME1',VALUE1,'NAME2',VALUE2,...) creates an
%   integrator options structure OPTIONS in which the named properties
have
%   the specified values. Any unspecified properties have default
values.
%   It is sufficient to type only the leading characters that uniquely
%   identify the property. Case is ignored for property names.
%
%   OPTIONS = ODESET(OLDOPTS,'NAME1',VALUE1,...) alters an existing
options
structure OLDOPTS.
%
%   OPTIONS = ODESET(OLDOPTS,NEWOPTS) combines an existing options
structure
%   OLDOPTS with a new options structure NEWOPTS. Any new properties
%   overwrite corresponding old properties.
%
%   ODESET with no input arguments displays all property names and their
%   possible values.
%
%ODESET PROPERTIES
%
%RelTol - Relative error tolerance [ positive scalar {1e-3} ]
%   This scalar applies to all components of the solution vector, and
%   defaults to 1e-3 (0.1% accuracy) in all solvers. The estimated error
in
%   each integration step satisfies e(i) <=
max(RelTol*abs(y(i)),AbsTol(i)).
%
%AbsTol - Absolute error tolerance [ positive scalar or vector {1e-6} ]
%   A scalar tolerance applies to all components of the solution vector.
%   Elements of a vector of tolerances apply to corresponding components
of
%   the solution vector. AbsTol defaults to 1e-6 in all solvers.
%
%Refine - Output refinement factor [ positive integer ]
%   This property increases the number of output points by the specified
%   factor producing smoother output. Refine defaults to 1 in all
solvers
%   except ODE45, where it is 4. Refine doesn't apply if length(TSPAN) >
2.
%
%OutputFcn - Name of installable output function [ string ]
%   This output function is called by the solver after each time step.
When
%   a solver is called with no output arguments, OutputFcn defaults to
%   'odeplot'. Otherwise, OutputFcn defaults to ''.
%
%OutputSel - Output selection indices [ vector of integers ]
%   This vector of indices specifies which components of the solution
vector
%   are passed to the OutputFcn. OutputSel defaults to all components.
%
%Stats - Display computational cost statistics [ on | {off} ]
%

```

```

%Jacobian - Jacobian available from ODE file [ on | {off} ]
% Set this property 'on' if the ODE file is coded so that
% F(t,y,'jacobian') returns dF/dy.
%
%JConstant - Constant Jacobian matrix dF/dy [ on | {off} ]
% Set this property 'on' if the Jacobian matrix dF/dy is constant.
%
%JPattern - Jacobian sparsity pattern available from ODE file [ on |
{off} ]
% Set this property 'on' if the ODE file is coded so
F([],[],'jpattern')
% returns a sparse matrix with 1's showing nonzeros of dF/dy.
%
%Vectorized - Vectorized ODE file [ on | {off} ]
% Set this property 'on' if the ODE file is coded so that F(t,[y1 y2
...])
% returns [F(t,y1) F(t,y2) ...].
%
%Events - Locate events [ on | {off} ]
% Set this property 'on' if the ODE file is coded so that
F(t,y,'events')
% returns the values of the event functions. See ODEFILE.
%
%Mass - Mass matrix available from ODE file [ {none} | M | M(t) | M(t,y)
]
% Change this property from 'none' if the ODE file is coded so that
% F(t,[],'mass') returns a mass matrix. 'M' indicates a constant mass
% matrix, 'M(t)' indicates a time-dependent mass matrix, and 'M(t,y)'
% indicates a time- and state-dependent mass matrix.
%
%MassSingular - Mass matrix is singular [ yes | no | {maybe} ]
% Set this property to 'no' if the mass matrix is not singular.
%
%MaxStep - Upper bound on step size [ positive scalar ]
% MaxStep defaults to one-tenth of the tspan interval in all solvers.
%
%InitialStep - Suggested initial step size [ positive scalar ]
% The solver will try this first. By default the solvers determine an
% initial step size automatically.
%
%MaxOrder - Maximum order of ODE15S [ 1 | 2 | 3 | 4 | {5} ]
%
%BDF - Use Backward Differentiation Formulas in ODE15S [ on | {off} ]
% This property specifies whether the Backward Differentiation Formulas
% (Gear's methods) are to be used in ODE15S instead of the default
% Numerical Differentiation Formulas.
%
%NormControl - Control error relative to norm of solution [ on | {off}
]
% Set this property 'on' to request that the solvers control the error
in
% each integration step with norm(e) <= max(RelTol*norm(y),AbsTol). By
% default the solvers use a more stringent component-wise error
control.
%
% See also ODEGET, ODEFILE, ODE45, ODE23, ODE113, ODE15S, ODE23S.

```

```

% Mark W. Reichelt and Lawrence F. Shampine, 5/6/94
% Copyright (c) 1984-98 by The MathWorks, Inc.
% $Revision: 1.37 $ $Date: 1998/04/10 12:24:17 $

% Print out possible values of properties.
if (margin == 0) & (nargout == 0)
    fprintf('      AbsTol: [ positive scalar or vector {1e-6} ]\n');
    fprintf('      BDF: [ on | {off} ]\n');
    fprintf('      Events: [ on | {off} ]\n');
    fprintf('      InitialStep: [ positive scalar ]\n');
    fprintf('      Jacobian: [ on | {off} ]\n');
    fprintf('      JConstant: [ on | {off} ]\n');
    fprintf('      JPattern: [ on | {off} ]\n');
    fprintf('      Mass: [ {none} | M | M(t) | M(t,y) ]\n');
    fprintf('      MassSingular: [ yes | no | {maybe} ]\n');
    fprintf('      MaxOrder: [ 1 | 2 | 3 | 4 | {5} ]\n');
    fprintf('      MaxStep: [ positive scalar ]\n');
    fprintf('      NormControl: [ on | {off} ]\n');
    fprintf('      OutputFcn: [ string ]\n');
    fprintf('      OutputSel: [ vector of integers ]\n');
    fprintf('      Refine: [ positive integer ]\n');
    fprintf('      RelTol: [ positive scalar {1e-3} ]\n');
    fprintf('      Stats: [ on | {off} ]\n');
    fprintf('      Vectorized: [ on | {off} ]\n');
    fprintf('\n');
    return;
end

Names = [
    'AbsTol'      '
    'BDF'        '
    'Events'     '
    'InitialStep'
    'Jacobian'   '
    'JConstant'  '
    'JPattern'   '
    'Mass'       '
    'MassConstant'           % grandfathered
    'MassSingular'
    'MaxOrder'   '
    'MaxStep'    '
    'NormControl'
    'OutputFcn'  '
    'OutputSel'  '
    'Refine'     '
    'RelTol'    '
    'Stats'      '
    'Vectorized' '
    ];
[m,n] = size(Names);
names = lower(Names);

% Combine all leading options structures o1, o2, ... in
odeset(o1,o2,...).
options = [];
for j = 1:m
    eval(['options.' Names(j,:) '= [];']);
end

```

```

end
i = 1;
while i <= nargin
    arg = varargin{i};
    if isstr(arg) % arg is an option name
        break;
    end
    if ~isempty(arg) % [] is a valid options argument
        if ~isa(arg, 'struct')
            error(sprintf(['Expected argument %d to be a string property name '
...
                        'or an options structure\ncreated with ODESET.'],
i));
        end
        for j = 1:m
            if any(strcmp(fieldnames(arg), deblank(Names(j, :))))
                eval(['val = arg.' Names(j, :) ';'']);
            else
                val = [];
            end
            if ~isempty(val)
                eval(['options.' Names(j, :) '= val;']);
            end
        end
    end
    i = i + 1;
end

% A finite state machine to parse name-value pairs.
if rem(nargin-i+1,2) ~= 0
    error('Arguments must occur in name-value pairs.');
```

```

end
expectval = 0; % start expecting a name, not a
value
while i <= nargin
    arg = varargin{i};

    if ~expectval
        if ~isstr(arg)
            error(sprintf(['Expected argument %d to be a string property name.',
i]));
        end

        lowArg = lower(arg);
        j = strmatch(lowArg, names);
        if isempty(j) % if no matches
            error(sprintf('Unrecognized property name '%s''.', arg));
        elseif length(j) > 1 % if more than one match
            % Check for any exact matches (in case any names are subsets of
others)
            k = strmatch(lowArg, names, 'exact');
            if length(k) == 1
                j = k;
            else
                msg = sprintf('Ambiguous property name '%s'' ', arg);
                msg = [msg '(' deblank(Names(j(1), :))];
                for k = j(2:length(j))'
```

```

        msg = [msg ', ' deblank(Names(k,:))];
    end
    msg = sprintf('%s).', msg);
    error(msg);
end
end
expectval = 1;                                % we expect a value next

else
    eval(['options.' Names(j,:) '= arg;']);
    expectval = 0;

end
i = i + 1;
end

if expectval
    error(sprintf('Expected value for property '%s'.'.', arg));
end

```

## Corrida.

<b>t(d)</b>	<b>S(1)</b>	<b>S(nm)'</b>	<b>S(n)</b>
0.000	145000.00000	145000.00000	145000.00000
5.000	25000.00000	106949.39667	144999.67677
10.000	25000.00000	87488.77381	144911.21526
15.000	25000.00000	77482.70596	144156.08810
20.000	25000.00000	70996.75061	142222.84766
25.000	25000.00000	66457.34165	139231.06467
30.000	25000.00000	63092.61798	135530.65877
35.000	25000.00000	60418.09153	131406.72623
40.000	25000.00000	58120.22306	127100.06448
45.000	25000.00000	56126.03701	122760.56947
50.000	25000.00000	54380.65028	118463.89727
55.000	25000.00000	52817.37518	114268.60445
60.000	25000.00000	51397.00896	110199.10297
65.000	25000.00000	50082.58188	106268.44059
70.000	25000.00000	48852.57285	102488.80528

<b>t(d)</b>	<b>X(1)</b>	<b>X(nm)'</b>	<b>X(n)</b>
0.000	2000.00000	2000.00000	2000.00000
5.000	14991.65838	2072.00597	2000.00000
10.000	14996.01803	2607.59401	2000.00000
15.000	15003.32755	3343.96317	2000.00000
20.000	14957.19823	4049.89472	2000.00000
25.000	15017.82898	4678.40463	2000.00007
30.000	14993.67342	5227.35058	2000.00081
35.000	14996.73165	5709.03537	2000.01054
40.000	15008.45887	6130.50673	2000.04170
45.000	15007.12707	6502.32695	2000.12580
50.000	15002.64524	6833.06953	2000.32910
55.000	14998.20751	7127.59036	2000.71456
60.000	14998.48636	7392.47489	2001.38689
65.000	14999.76405	7633.53357	2002.53196
70.000	15000.26851	7851.75019	2004.20703

<b>t(d)</b>	<b>SL(1)</b>	<b>SL(nm)'</b>	<b>SL(n)</b>
0.000	15000.00000	15000.00000	15000.00000
5.000	1993.17120	14926.80388	15000.00000
10.000	1996.79894	14400.63889	15000.00000
15.000	2001.46710	13664.03723	15000.00000
20.000	2001.94569	12952.74098	14999.99998
25.000	1997.14067	12318.89864	14999.99975
30.000	1999.30949	11767.46884	14999.99828
35.000	2002.16212	11284.86030	14999.98584
40.000	2003.70378	10864.14295	14999.94873
45.000	2001.97831	10494.56693	14999.86076
50.000	1999.77743	10164.71093	14999.64955
55.000	1998.27469	9870.78551	14999.24967
60.000	1998.59004	9606.36477	14998.56280
65.000	1999.93869	9365.95691	14997.42720
70.000	2000.61307	9147.53567	14995.73684

## ANEXO 2

### Materiales fácilmente Biodegradables

Componentes una mol de Basura	Número de mole
C := 31	Basura := 1
H := 50	H <sub>2</sub> O := 9.25
O := 20	CH <sub>4</sub> := 16.375
N := 1	CO <sub>2</sub> := 14.625
	NH <sub>3</sub> := 1

#### Peso Moleculares (Pm)

$$PmC := 12$$

$$PmH := 1$$

$$PmO := 16$$

$$PmN := 14$$

$$\text{Metano} := 1000 \cdot \frac{CH_4 \cdot (1 \cdot PmC + 4 \cdot PmH)}{\text{Basura} \cdot (C \cdot PmC + H \cdot PmH + O \cdot PmO + N \cdot PmN)}$$

$$\text{Metano} = 346.561 \quad \frac{\text{Kg}}{\text{Ton}}$$

$$FS := 0.85 \quad \text{Tchobanoglous}$$

$$\text{Metano} := \text{MetanoFS}$$

$$\text{Metano} = 294.577 \quad \frac{\text{Kg}}{\text{Ton}}$$

#### Total de Basura para Quito

$$TB := 1297 \quad \text{Ton}$$

## Facilmente Biodegradables

Desechos de Comida (DC)

PorcentajeDC= 54.19

HumedadDC= 70

Papel y carton (PC)

PorcentajePC= 9.66

HumedadPC= 6

Peso del material seco fácilmente biodegradables por día (Mo)

$$M_o := TB \cdot \left[ \left[ \frac{\text{PorcentajeDC} \cdot (100 - \text{HumedadDC})}{100} \right] + \left[ \frac{\text{PorcentajePC} \cdot (100 - \text{HumedadPC})}{100} \right] \right]$$

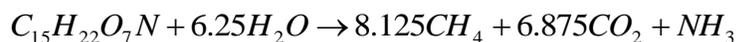
$M_o = 328.626$  Ton

## Posible cantidad de Metano de material fácilmente biodegradable (PFMo)

$PFM_o := \text{Metano} M_o$

$PFM_o = 9.681 \times 10^4$  Kg

## Materiales lentamente Biodegradables



Componentes una mol de Basura      Número de moles

C := 15

Basura := 1

H := 22

H<sub>2</sub>O := 6.25

O := 7

CH<sub>4</sub> := 8.125

N := 1

CO<sub>2</sub> := 6.875

NH<sub>3</sub> := 1

$$\text{Metano} := 1000 \cdot \frac{CH_4 \cdot (1 \cdot PmC + 4 \cdot PmH)}{Basura \cdot (C \cdot PmC + H \cdot PmH + O \cdot PmO + N \cdot PmN)}$$

Metano= 396.341      Kg  
Ton

Metano:= MetanoFS

Metano= 336.89 Kg  
Ton

### **Materiales lentamente Biodegradables**

Textiles (T)

PorcentajeT= 7.2 HumedadT= 20

Compuestos Organicos(CO)

PorcentajeCO= 0.87 HumedadCO= 5.35

Peso del material seco lentamente biodegradables por dia (MoL)

$$\text{MoL} := \text{TB} \cdot \left[ \left[ \frac{\text{PorcentajeT} (100 - \text{HumedadT})}{100} \right] + \left[ \frac{\text{PorcentajeCO} (100 - \text{HumedadCO})}{100} \right] \right]$$

MoL= 85.387 Ton

### **Posible cantidad de Metano de material lentamente biodegradable (PLMo)**

PLMo:= MetanoMoL

PLMo=  $2.877 \times 10^4$  Kg

### **Posible cantidad de Metano Total Biodegradable (PTMo)**

PTMo:= PFMo + PLMo

PTMo=  $1.256 \times 10^5$  Kg

### **Poderes Calóricos**

Manual Ingeniero Mecánico

PCI:=  $11954 \frac{\text{Kcal}}{\text{Kg}}$  PCS:=  $13272 \frac{\text{Kcal}}{\text{Kg}}$

PCP:=  $\frac{\text{PCI} + \text{PCS}}{2}$  PCP=  $1.261 \times 10^4 \frac{\text{Kcal}}{\text{Kg}}$

### **Posible cantidad de Energía (CE)**

$$CE := \frac{PCP \cdot PT Mo 4.186}{1000 \cdot 86400}$$

$$CE = 76.735 \quad \text{Mw teóricos}$$

## ANEXO 3

### Segundo criterio.

Componentes una mol de Basura	Número de moles
C := 50	Basura := 1
H := 100	H <sub>2</sub> O := 5.75
O := 40	CH <sub>4</sub> := 27.125
N := 1	CO <sub>2</sub> := 22.875
	NH <sub>3</sub> := 1

#### **Peso Moleculares (Pm)**

$$PmC := 12$$

$$PmH := 1$$

$$PmO := 16$$

$$PmN := 14$$

$$\text{Metano} := 1000 \cdot \frac{CH_4 \cdot (1 \cdot PmC + 4 \cdot PmH)}{\text{Basura} \cdot (C \cdot PmC + H \cdot PmH + O \cdot PmO + N \cdot PmN)}$$

$$\text{Metano} = 320.532 \frac{\text{Kg}}{\text{Ton}}$$

$$FS := 0.85 \quad \text{Tchobanoglous}$$

$$\text{Metano} := \text{Metano} \cdot FS$$

$$\text{Metano} = 272.452 \frac{\text{Kg}}{\text{Ton}}$$

#### **Total de Basura para Quito**

$$TB := 1297 \quad \text{Ton}$$

## Cantidad de material seco de componentes orgánicos

Desechos de Comida (DC)

$$\text{PorcentajeDC} := 54.19 \quad \text{HumedadDC} := 70$$

Papel y carton (PC)

$$\text{PorcentajePC} := 9.66 \quad \text{HumedadPC} := 6$$

Peso del material seco fácilmente biodegradables por día (Mo1)

$$\text{Mo1} := \text{TB} \cdot \left[ \left[ \frac{\text{PorcentajeDC} \cdot (100 - \text{HumedadDC})}{100} \right] + \left[ \frac{\text{PorcentajePC} \cdot (100 - \text{HumedadPC})}{100} \right] \right]$$

$$\text{Mo1} = 328.626 \text{ Ton}$$

Textiles (T)

$$\text{PorcentajeT} := 7.2 \quad \text{HumedadT} := 20$$

Compuestos Organicos (CO)

$$\text{PorcentajeCO} := 0.87 \quad \text{HumedadCO} := 5.35$$

Peso del material seco lentamente biodegradables por día (Mo2)

$$\text{Mo2} := \text{TB} \cdot \left[ \left[ \frac{\text{PorcentajeT} \cdot (100 - \text{HumedadT})}{100} \right] + \left[ \frac{\text{PorcentajeCO} \cdot (100 - \text{HumedadCO})}{100} \right] \right]$$

$$\text{Mo2} = 85.387 \quad \text{Ton}$$

$$\text{Mo3} := \text{Mo1} + \text{Mo2}$$

$$\text{Mo3} = 414.013 \quad \text{Ton}$$

## Posible cantidad de Metano (PMo)

$$\text{PMo} := \text{Metano} \cdot \text{Mo3}$$

$$\text{PMo} = 1.128 \times 10^5 \quad \text{Kg}$$

## Poderees Calóricos

Manual Ingeniero Mecánico

$$\text{PCI} := 11954 \frac{\text{Kcal}}{\text{Kg}} \quad \text{PCS} := 13272 \frac{\text{Kcal}}{\text{Kg}}$$

$$\text{PCP} := \frac{\text{PCI} + \text{PCS}}{2} \quad \text{PCP} = 1.261 \times 10^4 \frac{\text{Kcal}}{\text{Kg}}$$

### Posible cantidad de Energía (CE)

$$CE := \frac{PCP \cdot PMo \cdot 4.186}{1000 \cdot 86400}$$

$$CE = 68.93 \quad \text{Mw teóricos}$$

## ANEXO 4

### Modelamiento energético

#### Turbina de gas ciclo Brayton con desviaciones para un ciclo real.

$$M_{\text{metano}} := 125600 \text{ Kg}$$

$$PCP := 12610 \frac{\text{Kcal}}{\text{Kg}}$$

$$M_{\text{co2}} := 345400 \text{ Kg}$$

$$M_{\text{h2o}} := 282600 \text{ Kg}$$

$$M_{\text{n2}} := 1984480 \text{ Kg}$$

$$\text{Masa} := \frac{M_{\text{n2}}}{0.79} + M_{\text{metano}}$$

$$\text{Masa} = 2.638 \times 10^6 \text{ Kg}$$

$$C_{\text{pco2}} := 1.327 \frac{\text{KJ}}{(\text{Kg} \cdot ^\circ\text{K})} \text{ a } 1500^\circ\text{K}$$

$$C_{\text{ph2o}} := 2.596 \frac{\text{KJ}}{(\text{Kg} \cdot ^\circ\text{K})} \text{ a } 1500^\circ\text{K}$$

$$C_{\text{pn2}} := 1.25 \frac{\text{KJ}}{(\text{Kg} \cdot ^\circ\text{K})} \text{ a } 1500^\circ\text{K}$$

$$\eta_{\text{camaraduc}} := 55 \%$$

$$\Delta\text{Temp} := \frac{M_{\text{metano}} \cdot PCP \cdot 4.186 \cdot \frac{\eta_{\text{camaraduc}}}{100}}{C_{\text{pco2}} \cdot M_{\text{co2}} + C_{\text{ph2o}} \cdot M_{\text{h2o}} + C_{\text{pn2}} \cdot M_{\text{n2}}}$$

$$\Delta\text{Temp} = 992.878 \text{ } ^\circ\text{C}$$

#### Temperatura entrada del compresor = T1

$$T1 := 300\text{K} \quad r_{\text{comp}} := 12.5 \quad \text{Valores tomados de diseño de turbinas General Electric}$$

Proceso 1-2

#### Compresión isentrópica de gas ideal aire

$$T1 := 300^\circ\text{K}$$

$$h1 := 300.19 \frac{\text{KJ}}{\text{Kg}}$$

Pr1 := 1.386    Tabla A-17 de Termodinámica Yunus Cengel 2  
Propiedades de gas ideal aire

H1 := Masa · h1

$$H1 = 7.918 \times 10^8 \text{ KJ}$$

Pr2 := rcomp · Pr1

$$Pr2 = 17.325$$

### Constantes de desviación de los ciclos de gas reales a los ideallizados

$\eta_{\text{comp}} := 80 \%$

$\eta_{\text{turb}} := 85 \%$

### Temperatura salida compresor = T2

$$T2s := 610.235 \text{ }^\circ\text{K}$$

$h2s := 617.778 \frac{\text{KJ}}{\text{Kg}}$     Tabla A-17 de Termodinámica Yunus Cengel 2  
Propiedades de gas ideal aire

### Eficiencia compresor = $W_s/W_{\text{real}}$

$$W_{\text{real}} := \frac{h2s - h1}{\frac{\eta_{\text{comp}}}{100}}$$

$$W_{\text{real}} = 396.985$$

$$h2_{\text{real}} := W_{\text{real}} + h1$$

$$h2_{\text{real}} = 697.175 \frac{\text{KJ}}{\text{Kg}}$$

$T2_{\text{real}} := 685.004 \text{ }^\circ\text{K}$     Tabla A-17 de Termodinámica Yunus Cengel 2  
Propiedades de gas ideal aire

$$H2_{\text{real}} := \text{Masa} \cdot h2_{\text{real}}$$

$$H2_{\text{real}} = 1.839 \times 10^9 \text{ KJ}$$

$$W_{\text{realcomp}} := H2_{\text{real}} - H1$$

$$W_{\text{realcomp}} = 1.047 \times 10^9 \text{ KJ}$$

### Temperatura entrada de la turbina = T3

$$T3 := T2_{\text{real}} + \Delta T_{\text{emp}}$$

$$T3 = 1.678 \times 10^3 \text{ } ^\circ\text{K}$$

### Temperatura permisible de entrada a la tubina = 1698 °K

$$T4 := 593 \text{ } ^\circ\text{C}$$

Valores tomados de diseño de turbinas  
General Electric.

**Como la temperatura T3 es < a la Temperatura permisible podemos seguir**

$$h_{3\text{aire}} := 1853.46 \frac{\text{KJ}}{\text{Kg}}$$

Tabla A-17 de Termodinámica Yunus Cengel 2  
Propiedades de gas ideal aire

$$H_{3\text{aire}} := \text{Masa} \cdot h_{3\text{aire}}$$

$$H_{3\text{aire}} = 4.889 \times 10^9 \text{ KJ}$$

$$h_{4\text{sair}} := 894.957 \frac{\text{KJ}}{\text{Kg}}$$

Tabla A-17 de Termodinámica Yunus Cengel 2  
Propiedades de gas ideal aire

$$h_{4\text{aire}} := h_{3\text{aire}} - (h_{3\text{aire}} - h_{4\text{sair}}) \cdot \frac{\eta_{\text{turb}}}{100}$$

$$h_{4\text{aire}} = 1.039 \times 10^3 \frac{\text{KJ}}{\text{Kg}}$$

$$H_{4\text{aire}} := \text{Masa} \cdot h_{4\text{aire}}$$

$$H_{4\text{aire}} = 2.74 \times 10^9 \text{ KJ}$$

$$W_{\text{tur}} := H_{3\text{aire}} - H_{4\text{aire}}$$

$$W_{\text{tur}} = 2.149 \times 10^9 \text{ KJ}$$

### Relación del trabajo de retroceso rtr

$$r_{\text{tr}} := \frac{W_{\text{realcomp}}}{W_{\text{tur}}}$$

$$r_{\text{tr}} = 0.487$$

**Es decir, el 48.7 % de la salida de trabajo de la turbina se emplea sólo para activar el compresor.**

$$q_{en} := h_{3aire} - h_{2real}$$

$$q_{en} = 1.156 \times 10^3 \frac{KJ}{Kg}$$

$$Q_{en} := Masa \cdot q_{en}$$

$$Q_{en} = 3.05 \times 10^9 \text{ KJ}$$

$$W_{neto} := W_{tur} - W_{realcomp}$$

$$W_{neto} = 1.102 \times 10^9 \text{ KJ}$$

### **Eficiencia térmica $\eta_t$**

$$\eta_t := \frac{W_{neto}}{Q_{en}} \cdot 100$$

$$\eta_t = 36.128$$

### **Capacidad de energía generada CEG**

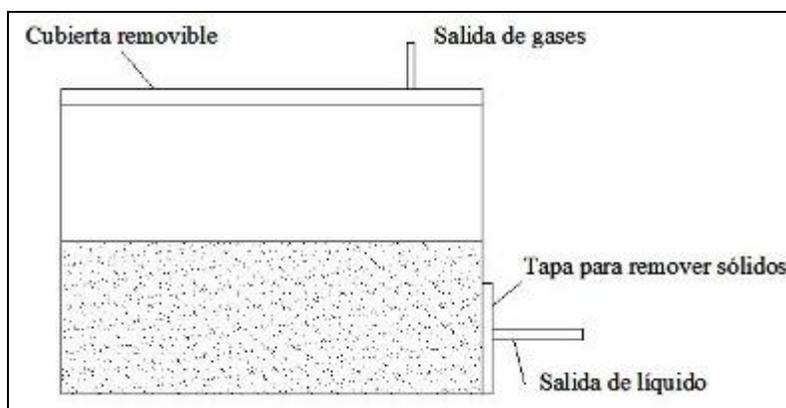
$$CEG := \frac{\eta_t}{100} \cdot \frac{M_{metano} \cdot PCP \cdot 4.186}{1000 \cdot 86400}$$

$$CEG = 27.723 \text{ Mw}$$

## ANEXO 5

### *Digestores de lote (batch). [Utilizado en el prototipo]*

Se cargan de una vez en forma total o por intervalos durante varios días, y la descarga se efectúa cuando han dejado de producir gas combustible. Es aplicable cuando se presenten problemas de manejo o cuando la materia orgánica está disponible de forma intermitente.



**Figura 4.11 Biodigestor de lote (batch)**

Este tipo de digestores, se caracterizan por ser una estructura hermética bastante simple, de forma cúbica o cilíndrica, que puede ser construida sobre o dentro de la tierra. En éste último caso la tierra actúa en dos formas sobre el reactor: por un lado, gracias a su alta conductancia se convierte en un aislante económico y por otro lado, si no es arenosa, se puede convertir en un excelente soporte estructural.

Una vez que se ha construido el reactor, se carga con la materia prima más sustrato con células que permitan el inicio de la fermentación. Algunas veces es necesario colocar algún químico para mantener un pH satisfactorio.

Usos más comunes:

- Cuando se dispone de materia orgánica en forma intermitente.
- Cuando el interés principal es el de obtener bioabono, en una época específica del año.
- En una investigación de laboratorio con el objeto de medir parámetros de interés (modelo prototipo).

### *Digestores de régimen semicontinuo.*

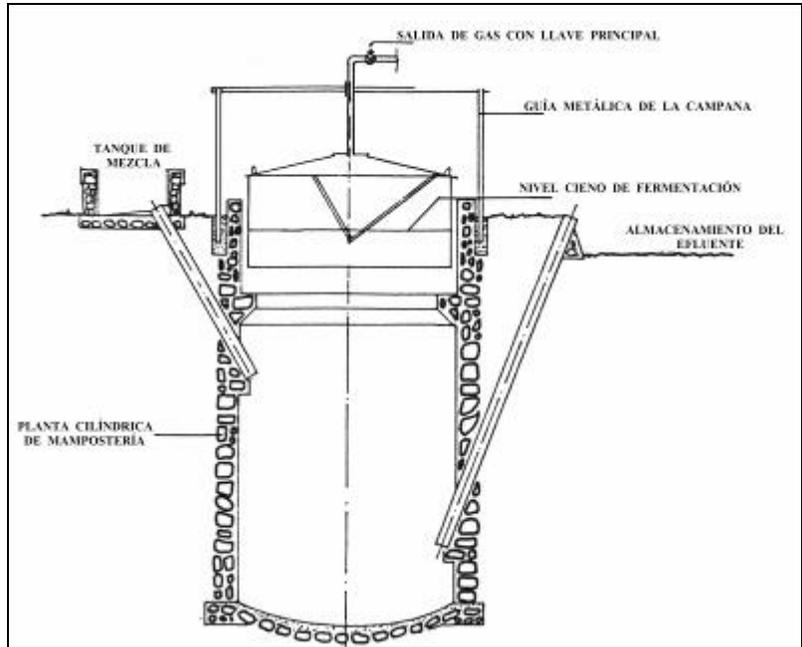
Este tipo de digestores es más usado en la zona rural, cuando se trata de sistemas de uso doméstico. Se cargan por gravedad una vez al día con volúmenes de mezcla que dependen del tiempo de fermentación. Producen una cantidad de gas constante al día.

### *Digestor de campana flotante (tipo hindú)*

De campana flotante o tipo hindú. Es el más popular en la India, país en el que varias instituciones hasta 1985 han construido diferentes tipos de estas plantas, resultando en la instalación de más de 460 000 unidades. Estos biodigestores poseen una campana donde se almacena el biogás y que a su vez flota sobre el residual. La campana sube a medida que se produce gas y baja a medida que es consumido, lo que produce que la presión dentro del reactor sea baja y constante. La experiencia demuestra que la presión dentro del reactor puede estar entre 0.015 y 0.017 atm. En el caso de que se desee una mayor presión se puede colocar peso sobre la campana.

La campana se desliza sobre una guía lo que proporciona cierta facilidad de movimiento. Esto produce el rompimiento de la nata que se suele formar en la superficie de la mezcla y que puede llegar a impedir que el gas escape.

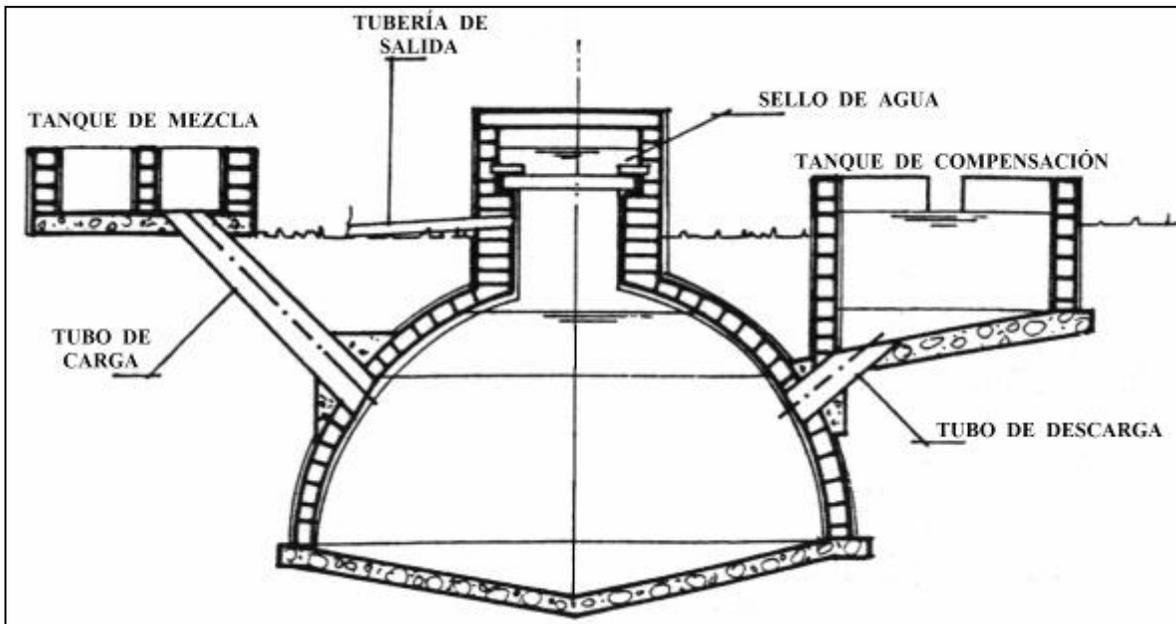
Aunque una cantidad de estas plantas fueron construidas con ladrillos, cemento y acero, más tarde se desarrolló la tecnología KVIC con campana de diversos materiales como: ferrocemento, fibra de vidrio, de polietileno de alta densidad, de PVC, de láminas rígidas de PVC y hasta de cemento y bambú. Esta variante se construye de forma vertical u horizontal y en cuanto a su uso social y volumen pueden ser individuales o comunales.



**Figura 4.11 Biodigestor de campana flotante**

Fuente: *El Biogás y sus Aplicaciones*, F. PESEÑA

**DIGESTOR DE CAMPANA FIJA (TIPO CHINO)**



**Figura 4.12 Biodigestor de campana fija**

Fuente: *El Biogás y sus Aplicaciones*, F. PESEÑA

De tipo chino o de cúpula fija. Alrededor de 7 millones de plantas han sido construidas en China, las cuales son fabricadas de distintas formas y capacidades, con diferentes materiales pero tienen un diseño básico en el que el biogás es colectado en una cúpula fija.

En Tailandia se ha diseñado este tipo de biodigestor pero con anillos de bambú, mientras los coreanos desarrollaron uno de bajo costo que consiste en un tanque de ladrillos y cemento cubierto con lona de PVC.

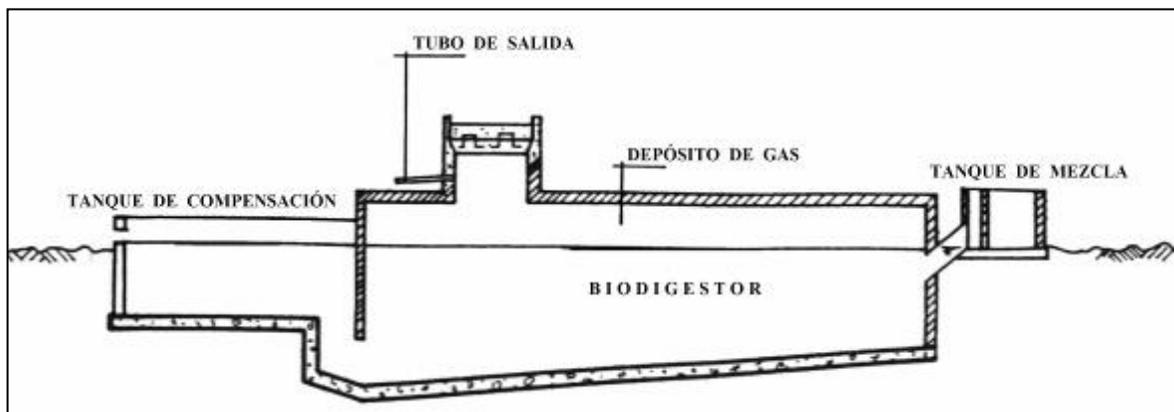
Su principal característica es que trabaja con presión variable. Y consiste en un digestor cerrado en forma de bóveda esférica, con el gasómetro fijo e inmóvil. El gas se almacena en un volumen libre de la parte superior del digestor; cuando éste se llena, la presión desplaza el material de fermentación hacia el tanque de compensación. Si el consumo excede a la producción, el volumen ocupado por el biogás disminuye, y por lo tanto, el sustrato desplazado regresa al digestor.

*DIGESTORES HORIZONTALES O DE FLUJO PISTÓN [Recomendado en este proyecto]*

Son recipientes semejantes a un canal o túnel y que se construyen bajo tierra.

Su sección es cuadrada o en forma de "V". La relación largo ancho fluctúa entre 5:1 y 8:1. Para evitar que la carga salga antes de cumplir el tiempo de retención adecuado, se construyen paredes divisorias ranuradas que provocan que el material fluya sinusoidalmente.

Es utilizado para aplicaciones mayores a 15 m<sup>3</sup>, donde la excavación de un pozo vertical presenta dificultades

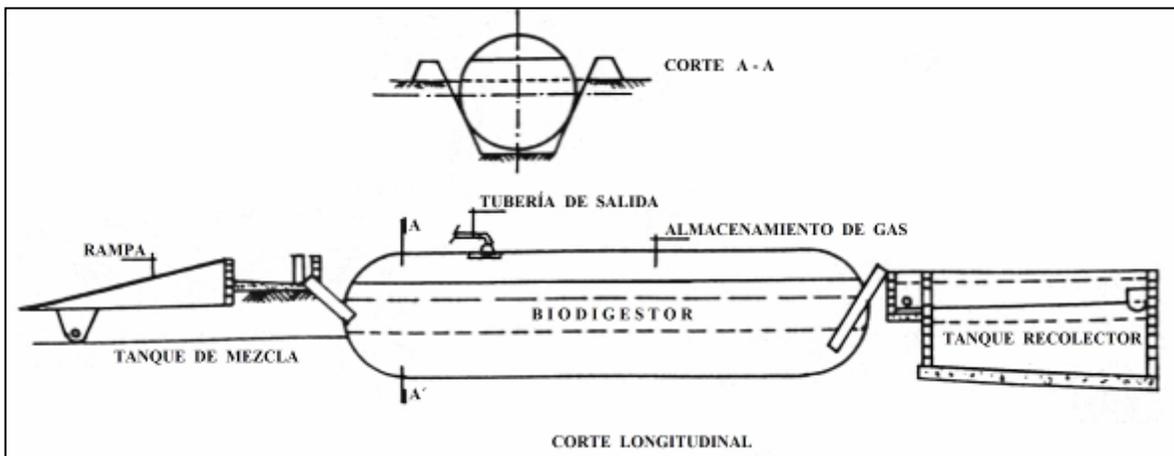


**Figura 4.13 Biodigestor horizontal**

### TIPO TUBULAR O DE PLUG FLOW

Consiste en una bolsa o balón plástico completamente sellado. El gas se almacena en la parte superior, aproximadamente un 25% del volumen total. Los tubos de entrada y salida están directamente sujetos a la pared de la bolsa

Esta planta funciona como una de cúpula fija, cuando la cámara de gas está llena. El costo en relación con el digestor de cúpula fija se puede reducir en un 50% o más. Este tipo de planta es recomendado donde el peligro de que se dañe la bolsa es mínimo, y donde hay temperaturas altas y constantes. Su instalación es rápida y sencilla pero debido a su baja presión cerca de 15 cm de columna de agua es necesario colocarle sobrepesos al balón para aumentarla. Tiene una vida útil corta de aproximadamente 5 años.



**Figura 4.14 Biodigestor tubular**

Fuente: El Biogás y sus Aplicaciones, F. PESENCA

El material plástico debe ser resistente a la intemperie, así como a los rayos ultravioletas.

Al principio los digestores de RMP se hacían tubulares, más tarde se construyeron en forma de tiendas de campaña. También de esta forma se han construido biodigestores en Nepal, pero de PVC. En los últimos años, países

como Colombia, Etiopía, Tanzania, Vietnam, Cambodia y Bangladesh han estado utilizando este tipo de biodigestor.

También han sido bien recibidos por los campesinos pobres en Vietnam para producir combustible limpio y reemplazar la leña. En tres años se instalaron en Vietnam más de 800 digestores de polietileno, en su mayoría pagados por los propios campesinos.

#### *DE REGIMEN CONTINUO*

Este tipo de digestor se desarrolló principalmente para el tratamiento de aguas negras y en la actualidad su uso se ha extendido al manejo de otros substratos. Son plantas de gran tamaño en las que se emplean equipos comerciales para alimentarlos, proporcionarles agitación y control. Por estas razones son grandes consumidoras de energía.

#### *COMPLETAMENTE MEZCLADOS*

Estos sistemas requieren menores tiempos de retención (10 a 30 días). Son aplicados a residuos con alto porcentaje de sólidos totales, a fin de lograr un mayor contacto entre la biomasa microbiana y el sustrato en cuestión.

En la actualidad, para garantizar la mezcla en el interior del reactor se emplean diversos sistemas tales como: sistema de paletas internas, los digestores con movimiento circular a través de un eje central y por medio del retorno del propio biogás a presión.

El tiempo de mezclado varía en dependencia de la complejidad del sustrato empleado, regulándose en cada caso a fin de controlar la velocidad global del proceso. La principal desventaja de estos reactores la constituyen las bajas velocidades de carga con que pueden ser operados y los relativamente altos tiempos de retención requeridos.