



**ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE CHIMBORAZO**  
**FACULTAD DE MECÁNICA**  
**CARRERA INGENIERÍA INDUSTRIAL**

**ANÁLISIS TECNO-ECONÓMICO DE LA CONVERSIÓN DE BIOMASA RESIDUAL EN ENERGÍA DENTRO DEL SECTOR INDUSTRIAL PORCINO EN LA GRANJA “EL CHANCHITO” DE LA PROVINCIA DE CHIMBORAZO.**

**Trabajo de Titulación**

Tipo: Propuesta Tecnológica

Presentado para optar al grado académico de:

**INGENIERO INDUSTRIAL**

**AUTOR:**

**DIEGO RAFAEL ALLAUCA PEÑAFIEL**

Riobamba - Ecuador

2023



**ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE CHIMBORAZO**  
**FACULTAD DE MECÁNICA**  
**CARRERA INGENIERÍA INDUSTRIAL**

**ANÁLISIS TECNO-ECONÓMICO DE LA CONVERSIÓN DE  
BIOMASA RESIDUAL EN ENERGÍA DENTRO DEL SECTOR  
INDUSTRIAL PORCINO EN LA GRANJA “EL CHANCHITO” DE  
LA PROVINCIA DE CHIMBORAZO**

**Trabajo de Titulación**

Tipo: Propuesta Tecnológica

Presentado para optar al grado académico de:

**INGENIERO INDUSTRIAL**

**AUTOR:** DIEGO RAFAEL ALLAUCA PEÑAFIEL

**DIRECTOR:** Ing. MARCELO ESTEBAN CALISPA AGUILAR MPhil.

Riobamba - Ecuador

2023

**©2023, Diego Rafael Allauca Peñafiel**

Se autoriza la reproducción total o parcial, con fines académicos, por cualquier medio o procedimiento, incluyendo la cita bibliográfica del documento, siempre y cuando se reconozca el Derecho de Autor.

Yo, Diego Rafael Allauca Peñafiel declaro que el presente Trabajo de Titulación es de mi autoría y los resultados de este son auténticos. Los textos en el documento que provienen de otras fuentes están debidamente citados y referenciados.

Como autor asumo la responsabilidad legal y académica de los contenidos de este Trabajo de titulación; El patrimonio intelectual pertenece a la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo.

Riobamba, 3 de febrero del 2023



---

**Diego Rafael Allauca Peñafiel**

060398611-8

**ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE CHIMBORAZO**  
**FACULTAD DE MECÁNICA**  
**CARRERA INGENIERÍA INDUSTRIAL**

El Tribunal de Trabajo de Titulación certifica que: El Trabajo de Titulación: Tipo: Propuesta Tecnológica **ANÁLISIS TECNO-ECONÓMICO DE LA CONVERSIÓN DE BIOMASA RESIDUAL EN ENERGÍA DENTRO DEL SECTOR INDUSTRIAL PORCINO EN LA GRANJA “EL CHANCHITO” DE LA PROVINCIA DE CHIMBORAZO**, realizado por el señor: **DIEGO RAFAEL ALLAUCA PEÑAFIEL**, ha sido minuciosamente revisado por los Miembros del Tribunal del Trabajo de Titulación, el mismo que cumple con los requisitos científicos, técnicos, legales, en tal virtud que el Tribunal Autoriza su presentación.

<b>NOMBRE</b>	<b>FIRMA</b>	<b>FECHA</b>
Ing. Gloria Elizabeth Miño Cascante PhD. <b>PRESIDENTE DEL TRIBUNAL</b>		2023-02-03
Ing. Marcelo Esteban Calispa Aguilar MPhil. <b>DIRECTOR DEL TRABAJO DE TITULACIÓN.</b>		2023-02-03
Ing. Jaime Iván Acosta Velarde MSc. <b>MIEMBRO DEL TRIBUNAL.</b>		2023-02-03

## **DEDICATORIA**

El presente trabajo de titulación se lo dedico a mi familia quienes son el pilar fundamental para mi vida académica, en especial con mi más profundo amor a mis dos hijos: Mateo y Adrián, quienes fueron especial motivación en este trayecto.

**Diego R. Allauca.**

## **AGRADECIMIENTO**

Mis más sinceros agradecimientos a los docentes Ing. Iván Acosta por brindarme la oportunidad de adquirir más conocimientos y al Ing. Marcelo Calispa por despertarme el interés del estudio de energías renovables, docentes con vocación para enseñar que definitivamente aportaron a mi vida personal y profesional. A mi familia que estuvo presente en momentos difíciles, a mi madre por su voz de aliento, a mi padre por el apoyo incondicional y la resiliencia que aprendí para seguir adelante a pesar de las circunstancias que se presentaron en el trayecto

**Diego R. Allauca.**

## TABLA DE CONTENIDO

ÍNDICE DE TABLAS.....	xii
ÍNDICE DE ILUSTRACIONES .....	xiv
ÍNDICE DE ANEXOS .....	xvi
RESUMEN.....	xvii
SUMMARY .....	xviii
INTRODUCCIÓN .....	1

### CAPITULO I

<b>1. DIAGNÓSTICO DEL PROBLEMA .....</b>	<b>2</b>
1.1 Antecedentes .....	2
1.2 Planteamiento del problema.....	3
1.3 Justificación .....	3
1.4 Objetivos .....	4
1.4.1 <i>Objetivo General.</i> .....	4
1.4.2 <i>Objetivos Específicos.</i> .....	4
1.4.3 <i>Alcance.</i> .....	4

### CAPITULO II

<b>2. MARCO TEÓRICO .....</b>	<b>6</b>
2.1 Antecedentes de investigación .....	6
2.1.1 <i>A nivel nacional:</i> .....	6
2.1.2 <i>A nivel regional:</i> .....	7
2.1.3 <i>A nivel internacional:</i> .....	10
2.2 Referencias Teóricas.....	11
2.2.1 <i>Biomasa.</i> .....	11
2.2.2 <i>Clasificación de la Biomasa</i> .....	11



<b>2.2.3</b>	<b><i>Productos de la Biomasa</i></b> .....	<b>11</b>
<b>2.2.4</b>	<b><i>Sistemas de obtención de energía de la biomasa.</i></b> .....	<b>12</b>
<b>2.2.5</b>	<b><i>Digestión anaerobia</i></b> .....	<b>12</b>
<b>2.2.5.2</b>	<b><i>Fases de la digestión anaeróbica</i></b> .....	<b>13</b>
<b>2.2.6</b>	<b><i>Hidrolisis</i></b> .....	<b>14</b>
<b>2.2.7</b>	<b><i>Acidogénesis</i></b> .....	<b>15</b>
<b>2.2.8</b>	<b><i>Acetogénesis</i></b> .....	<b>15</b>
<b>2.2.9</b>	<b><i>Metanogénesis.</i></b> .....	<b>15</b>
<b>2.2.10</b>	<b><i>Factores esenciales en el proceso</i></b> .....	<b>16</b>
<b>2.2.10.1</b>	<b><i>Materiales de carga para la fermentación</i></b> .....	<b>16</b>
<b>2.2.10.2</b>	<b><i>Relación Carbono-Nitrógeno (C/N)</i></b> .....	<b>16</b>
<b>2.2.10.3</b>	<b><i>Concentración de la carga</i></b> .....	<b>18</b>
<b>2.2.10.4</b>	<b><i>Temperatura</i></b> .....	<b>18</b>
<b>2.2.10.5</b>	<b><i>Valor de pH</i></b> .....	<b>20</b>
<b>2.2.11</b>	<b><i>Biodigestor</i></b> .....	<b>21</b>
<b>2.2.12</b>	<b><i>Tipos de biodigestores</i></b> .....	<b>22</b>
<b>2.2.12.1</b>	<b><i>Modelo Chino</i></b> .....	<b>22</b>
<b>2.2.12.2</b>	<b><i>Modelo Indiano</i></b> .....	<b>23</b>
<b>2.2.12.3</b>	<b><i>Modelos horizontales</i></b> .....	<b>23</b>
<b>2.2.12.4</b>	<b><i>Tipo tubular o Taiwanés</i></b> .....	<b>24</b>
<b>2.2.13</b>	<b><i>Biogás</i></b> .....	<b>26</b>
<b>2.2.14</b>	<b><i>Poder calorífico del biogás</i></b> .....	<b>26</b>
<b>2.2.15</b>	<b><i>Utilidades del biogás</i></b> .....	<b>26</b>
<b>2.2.16</b>	<b><i>Tratamientos del biogás</i></b> .....	<b>27</b>
<b>2.3</b>	<b><i>Definición de demanda química de oxígeno (DQO)</i></b> .....	<b>28</b>
<b>2.4</b>	<b><i>Modelo ADM1</i></b> .....	<b>28</b>
<b>2.5</b>	<b><i>Ecuaciones para el modelo ADM1</i></b> .....	<b>29</b>
<b>2.5.2</b>	<b><i>Simbología y unidades</i></b> .....	<b>29</b>
<b>2.5.3</b>	<b><i>Procesos bioquímicos</i></b> .....	<b>32</b>

2.5.4	<i>Ecuaciones para fase líquida</i> .....	34
2.5.5	<i>Velocidad cinética del proceso.</i> .....	37
2.5.6	<i>Procesos inhibitorios</i> .....	39
2.5.7	<i>Proceso fisicoquímico líquido-líquido.</i> .....	40
2.5.8	<i>Proceso fisicoquímico líquido-gas.</i> .....	41
2.5.9	<i>Ecuaciones para el dimensionamiento y TRH</i> .....	43
2.5.10	<i>Parámetros de entrada.</i> .....	45
2.5.11	<i>Parámetros específicos de las excretas de cerdo y valores de entrada al ADM1.</i> .....	47
2.6	<b>Motor de combustión interna (MCI)</b> .....	49
2.6.1	<i>Motor de encendido por chispa (MEP)</i> .....	49
2.6.2	<i>Modificaciones en motores MEP para uso con biogás.</i> .....	49
2.7	<b>Marco legal.</b> .....	50
2.7.1	<i>Constitución de la Republica del Ecuador</i> .....	50
2.7.2	<i>Derechos de la naturaleza</i> .....	51

### **CAPITULO III**

3.	<b>Marco metodológico</b> .....	52
3.1	<b>Perspectiva metodológica y tipo de investigación</b> .....	52
3.2	<b>Límites de la investigación</b> .....	52
3.3	<b>Contexto y unidad de análisis: Población y muestra</b> .....	52
3.3.1	<i>Población y muestra</i> .....	52
3.4	<b>Métodos y recursos empleados</b> .....	53
3.4.1	<i>Métodos</i> .....	53
3.4.2	<i>Recursos empleados</i> .....	53
3.5	<b>Procedimiento de recolección y análisis de datos</b> .....	54
3.5.1	<i>Recolección de datos</i> .....	54
3.5.2	<i>Procesamiento de información</i> .....	54
3.5.3	<i>Análisis e interpretación de la información.</i> .....	54
3.6	<b>Implementación del modelo</b> .....	55

<b>3.6.1</b>	<b><i>Diagramas de bloques en Simulink</i>®</b> .....	<b>55</b>
<b>3.6.2</b>	<b><i>Subsistemas</i></b> .....	<b>56</b>
3.6.2.1	<i>Parámetros</i> .....	57
3.6.2.2	<i>Parámetros de composición del efluente</i> .....	58
3.6.2.3	<i>Tasas de procesos bioquímicos</i> .....	58
3.6.2.4	<i>Tasa para los procesos acido-base</i> .....	59
3.6.2.5	<i>Tasa de transferencia de gas</i> .....	59
3.6.2.6	<i>Inhibidores</i> .....	60
3.6.2.7	<i>Ecuaciones diferenciales para las variables de estado</i> .....	60
3.6.2.8	<i>Ecuaciones para la transferencia liquido-gas</i> .....	63
<b>3.7</b>	<b>Validación del modelo</b> .....	<b>66</b>
<b>3.8</b>	<b>Aplicación del modelo a los datos específicos de ganado porcino</b> .....	<b>67</b>
<b>3.9</b>	<b>Análisis económico</b> .....	<b>67</b>
<b>3.10</b>	<b>Propuesta tecnológica</b> .....	<b>67</b>

#### **CAPÍTULO IV**

<b>4.</b>	<b>MARCO DE ANÁLISIS E INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS</b> .....	<b>68</b>
<b>4.1</b>	<b>Características del lugar</b> .....	<b>68</b>
4.1.1	<i>Ubicación</i> .....	68
4.1.2	<i>Ubicación Política:</i> .....	68
4.1.3	<i>Temperatura</i> .....	68
4.1.4	<i>Ubicación Geográfica</i> .....	68
<b>4.2</b>	<b>Resultados de simulación</b> .....	<b>68</b>
<b>4.3</b>	<b>Datos de producción del biodigestor en dólares</b> .....	<b>76</b>
<b>4.4</b>	<b>Datos históricos de consumo energético y pérdidas de crías de la granja</b> .....	<b>77</b>
<b>4.5</b>	<b>Análisis económico</b> .....	<b>77</b>

#### **CAPITULO V**

<b>5.</b>	<b>PROPUESTA TECNOLÓGICA (GESTIÓN DEL PROYECTO)</b> .....	<b>79</b>
-----------	---	-----------

<b>5.1</b>	<b>Capacidad y características del biodigestor .....</b>	<b>79</b>
<b>5.2</b>	<b>Obra civil. ....</b>	<b>79</b>
<b>5.3</b>	<b>Cronograma de implementación generalizado .....</b>	<b>80</b>
	<b>CONCLUSIONES .....</b>	<b>81</b>
	<b>RECOMENDACIONES .....</b>	<b>82</b>
	<b>GLOSARIO</b>	
	<b>BIBLIOGRAFÍA</b>	
	<b>ANEXOS</b>	

## ÍNDICE DE TABLAS

<b>Tabla 1-2:</b>	Cantidades y rendimientos en gas de diferentes excretas.....	16
<b>Tabla 2-2:</b>	Relación C/N de algunos materiales usados en biodigestión anaeróbica. ....	17
<b>Tabla 3-2:</b>	Sólidos totales en material de fermentación comúnmente usados. ....	18
<b>Tabla 4-2:</b>	Rendimiento en producción de gas con materia comúnmente usada. ....	18
<b>Tabla 5-2:</b>	Rendimiento de gas en digestores pequeños. ....	19
<b>Tabla 6-2:</b>	Concentración inhibitoria de inhibidores comunes. ....	21
<b>Tabla 7-2:</b>	Componentes del biodigestor tubular.....	25
<b>Tabla 8-2:</b>	PCI para biogás con diferentes cantidades de CH <sup>4</sup> . ....	26
<b>Tabla 9-2:</b>	Unidades para el modelo matemático. ....	29
<b>Tabla 10-2:</b>	Coefficientes estequiométricos. ....	30
<b>Tabla 11-2:</b>	Constantes de equilibrio. ....	30
<b>Tabla 12-2:</b>	Parámetros cinéticos. ....	31
<b>Tabla 13-2:</b>	Variables de estado y algebraicas. ....	31
<b>Tabla 14-2:</b>	Procesos bioquímicos, para componentes solubles.....	32
<b>Tabla 15-2:</b>	Procesos bioquímicos, para componentes insolubles.....	33
<b>Tabla 16-2:</b>	Variables de estado dinámicas.....	34
<b>Tabla 17-2:</b>	Tasas para los procesos bioquímicos. ....	38
<b>Tabla 18-2:</b>	Ecuaciones de Inhibidores por Amoníaco o H. ....	39
<b>Tabla 19-2:</b>	Ecuaciones de Inhibición por nitrógeno limitado. ....	39
<b>Tabla 20-2:</b>	Ecuaciones de Inhibición por pH.....	39
<b>Tabla 21-2:</b>	Ecuaciones de inhibidores agrupados. ....	40
<b>Tabla 22-2:</b>	Ecuaciones algebraicas para el pH.....	40
<b>Tabla 23-2:</b>	Ecuaciones para la velocidad cinética (liq. -liq.). ....	41
<b>Tabla 24-2:</b>	Ecuaciones para la velocidad cinética (liq. - gas). ....	42
<b>Tabla 25-2:</b>	Ecuaciones de las presiones parciales de los gases.....	42
<b>Tabla 26-2:</b>	Ecuaciones para conversión a kg. ....	43
<b>Tabla 27-2:</b>	Valores de peso promedio para especies pecuarias.....	43
<b>Tabla 28-2:</b>	Valores y características de excretas de algunos animales. ....	43
<b>Tabla 29-2:</b>	Ecuaciones para cálculo de parámetros de entrada. ....	44
<b>Tabla 30-2:</b>	Parámetros estequiométricos. ....	45
<b>Tabla 31-2:</b>	Parámetros bioquímicos. ....	46
<b>Tabla 32-2:</b>	Parámetros fisicoquímicos.....	47
<b>Tabla 33-2:</b>	Valores iniciales de entrada al ADM1. ....	48
<b>Tabla 34-2:</b>	Parámetros de entrada al ADM1.....	48

<b>Tabla 1-3:</b>	Variables de entrada.....	55
<b>Tabla 2-3:</b>	Resultados obtenidos vs Modelo implementado.....	67
<b>Tabla 1-4:</b>	Datos de entrada para el módulo BIODIGESTOR. ....	69
<b>Tabla 2-4:</b>	Valores obtenidos del simulador ADM1.....	75
<b>Tabla 3-4:</b>	Producción y costo en dólares de biodigestor, para diferentes temperaturas. ....	76
<b>Tabla 4-4:</b>	Valores de energía consumida proyectada a 200 días.....	77
<b>Tabla 5-4:</b>	Contraste entre producción del biodigestor y gastos energéticos. ....	77
<b>Tabla 6-4:</b>	Costos de implantación de biodigestor.....	78
<b>Tabla 1-5:</b>	Cronograma de actividades para la implementación del biodigestor.....	80

## ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

<b>Ilustración 1 - 2:</b> Sistemas de obtención de energía de la biomasa. ....	12
<b>Ilustración 2 - 2:</b> Esquema general de una planta de digestión anaerobia. ....	13
<b>Ilustración 3 - 2:</b> Fases de la digestión anaeróbica. ....	14
<b>Ilustración 4 - 2:</b> Efecto de la temperatura y tiempo de retención en la producción de gas. ....	20
<b>Ilustración 5 - 2:</b> Digestor de balón, se infla cuando recoge biogás. ....	21
<b>Ilustración 6 - 2:</b> Biodigestor tipo chino. ....	22
<b>Ilustración 7 - 2:</b> Biodigestor tipo Indiano. ....	23
<b>Ilustración 8 - 2:</b> Biodigestor tipo horizontal. ....	24
<b>Ilustración 9 - 2:</b> Biodigestor tubular. ....	25
<b>Ilustración 10 - 2:</b> Usos típicos del biogás. ....	27
<b>Ilustración 11 - 2:</b> Tratamientos del biogás. ....	27
<b>Ilustración 12 - 2:</b> Distribución de la DQO del biogás. ....	28
<b>Ilustración 13 - 2:</b> Esquema de una reacción típica en un biodigestor. ....	29
<b>Ilustración 14 - 2:</b> Funcionamiento MCL. ....	49
<b>Ilustración 15 - 2:</b> Generador a biogás. ....	50
<b>Ilustración 1 - 3:</b> Asignación de parámetros en Simulink ®. ....	57
<b>Ilustración 2 - 3:</b> Representación del parámetro $K_w$ en Simulink ®. ....	57
<b>Ilustración 3 - 3:</b> Representación del parámetro de la forma $K_{H,i}$ en Simulink ®. ....	58
<b>Ilustración 4 - 3:</b> Representación del parámetro $p_{gas,H_2O}$ en Simulink ®. ....	58
<b>Ilustración 5 - 3:</b> Representación del parámetro $\rho_8$ en Simulink ®. ....	59
<b>Ilustración 6 - 3:</b> Representación del parámetro $\rho_{A,4}$ en Simulink ®. ....	59
<b>Ilustración 7 - 3:</b> Representación del parámetro $\rho_{T,10}$ en Simulink ®. ....	60
<b>Ilustración 8 - 3:</b> Representación del Inhibidor $I_{pH,h_2}$ en Simulink ®. ....	60
<b>Ilustración 9 - 3:</b> Representación de la variable $SIN$ en Simulink ®. ....	61
<b>Ilustración 10 - 3:</b> Representación de la variable $Xc$ en Simulink ®. ....	62
<b>Ilustración 11 - 3:</b> Representación de la variable $Scat +$ en Simulink ®. ....	62
<b>Ilustración 12 - 3:</b> Representación de la variable $San -$ en Simulink ®. ....	63
<b>Ilustración 13 - 3:</b> Representación de la variable $Sva -$ en Simulink ®. ....	63
<b>Ilustración 14 - 3:</b> Representación de la variable $S_{gas,h_2}$ en Simulink ®. ....	64
<b>Ilustración 15 - 3:</b> Representación de las variables $p_{gas,h_2}$ , $p_{gas,ch_4}$ , $p_{gas,co_2}$ en Simulink ®. ....	65
<b>Ilustración 16 - 3:</b> Representación de las variables $q_{gas}$ , en Simulink ®. ....	66
<b>Ilustración 1 - 4:</b> Datos de entrada para modelo matemático. ....	69

<b>Ilustración 2 - 4:</b> Resultados utilizando el módulo BIODIGESTOR, con T=25°C.....	70
<b>Ilustración 3 - 4:</b> Resultados utilizando el módulo GENERADOR, con T=25°C.....	70
<b>Ilustración 4 - 4:</b> Curva de concentración de gas H <sub>2</sub> , con T=25°C.....	70
<b>Ilustración 5 - 4:</b> Curva de concentración de gas CH <sub>4</sub> , con T=25°C.....	71
<b>Ilustración 6 - 4:</b> Curva de concentración de gas CO <sub>2</sub> , con T=25°C.....	71
<b>Ilustración 7 - 4:</b> Resultados utilizando el módulo BIODIGESTOR, con T=35°C.....	72
<b>Ilustración 8 - 4:</b> Resultados utilizando el módulo GENERADOR, con T=35°C.....	72
<b>Ilustración 9 - 4:</b> Curva de concentración de gas H <sub>2</sub> , con T=35°C.....	72
<b>Ilustración 10 - 4:</b> Curva de concentración de gas CH <sub>4</sub> , con T=35°C.....	73
<b>Ilustración 11 - 4:</b> Curva de concentración de gas CO <sub>2</sub> , con T=35°C.....	73
<b>Ilustración 12 - 4:</b> Resultados utilizando el módulo BIODIGESTOR, con T=40°C.....	74
<b>Ilustración 13 - 4:</b> Resultados utilizando el módulo GENERADOR, con T=40°C.....	74
<b>Ilustración 14 - 4:</b> Curva de concentración de gas H <sub>2</sub> , con T=40°C.....	74
<b>Ilustración 15 - 4:</b> Curva de concentración de gas CH <sub>4</sub> , con T=40°C.....	75
<b>Ilustración 16 - 4:</b> Curva de concentración de gas CO <sub>2</sub> , con T=40°C.....	75
<b>Ilustración 17 - 4:</b> Amortización de equipos para biodigestor, con T=25°C.....	78
<b>Ilustración 1 - 5:</b> Detalle de partes del biodigestor.....	79
<b>Ilustración 2 - 5:</b> Área de excavación para biodigestor.....	79



## ÍNDICE DE ANEXOS

- ANEXO A:** EVOLUCIÓN DE FUENTES DE ENERGÍA Y FLUJOS: ECUADOR – CONSUMO FINAL.
- ANEXO B:** PARTICIPACIÓN DEL CONSUMO FINAL POR ENERGÉTICO Y SECTORES: ECUADOR - 2010 | CONSUMO FINAL: 72930,34 [10<sup>3</sup> bep].
- ANEXO C:** EVOLUCIÓN DE FUENTES DE ENERGÍA Y FLUJOS: ECUADOR – PRODUCCIÓN.
- ANEXO D:** EMISIONES DE CO<sub>2</sub>: ECUADOR – 2010 | EMISIONES TOTALES: 34 643,51 Gg.
- ANEXO E:** GRAFICA DEL DESARROLLO DE LAS CONCENTRACIONES EN EL BIOGÁS.

## RESUMEN

El objetivo principal del presente trabajo fue proponer la digestión anaerobia para la obtención de energía que ha sido poco explotada en la industria del ganado porcino, esta ha sido capaz de disminuir la contaminación de ríos cercanos a las plantas de producción, así como problemas sociales derivados, se sabe que también pudo generar energía eléctrica autosustentable e ingresos económicos adicionales por la venta de abono orgánico. Se utilizó el modelo matemático ADM1, que consta de 35 ecuaciones diferenciales de estado, desarrollado en Simulink®, para simular la digestión anaeróbica, se tuvieron en cuenta parámetros como la temperatura, el pH, y concentraciones iniciales de la biomasa residual, inicialmente con datos tabulados para aguas residuales urbanas de ingreso al reactor, y posteriormente se validó el modelo con investigaciones previas, ayudándose de parámetros específicos para excretas de ganado porcino, de ahí se simuló el proceso para obtención de biogás en tres corridas: a 25°C, 35°C y 40°C, quedando demostrado que era más viable una temperatura de 25°C, pues resultó un biogás compuesto por 90% de Metano aproximadamente. Con base en estos resultados, se realizó una comparación con los costos de energía consumida por la granja y se encontró que con esta tecnología se podría proveer cerca del 40% de la demanda energética de la misma, además de un subproducto llamado Biol, que es un biofertilizante con precios de venta de hasta \$35,00 por un envase de 5gal, que podría convertirse en ingreso económico para la granja. También se pudo encontrar que los costos de implementar esta tecnología se amortizarían en 3 años y 4 meses aproximadamente. Finalmente se propuso un biodigestor flexible tipo Taiwanés prefabricado horizontal de 60m<sup>3</sup> de capacidad.

**Palabras clave:** <MODELO MATEMÁTICO ADM1>, <DIGESTIÓN ANAEROBIA>, <BIODIGESTOR>, <DESARROLLO SOSTENIBLE>, <ENERGÍA RENOVABLE>, <BIOMASA RESIDUAL>.

0357-DBRA-UPT-2023



## SUMMARY

The main aim was to propose anaerobic digestion for obtaining energy that has been little studied in the swine industry, which has been able to reduce the contamination of rivers near the production plants, as well as the social problems associated with it; it is known that it could also generate self-sustainable electric energy and additional economic income from the sale of organic fertilizer. The ADM1 mathematical model, consisting of 35 differential equations of state, designed in Simulink®, to simulate anaerobic digestion, taking into account parameters such as temperature, pH, and initial concentrations of the residual biomass, based initially on tabulated data for urban wastewater entering the reactor, and later the model was validated with previous research, using specific parameters for swine excreta, and then the process was simulated to obtain biogas in three runs: At 25°C, 35°C and 40°C, it was determined that a temperature of 25°C was more viable, since the result was a biogas composed of approximately 90% methane. Based on these results, a comparison was made with the costs of energy consumed by the farm and it was found that this technology could provide about 40% of the farm's energy demand, in addition to a by-product called Biol, which is a biofertilizer with sales prices of up to \$35.00 for a 5-gallon container, which could become economic income for the farm. It was also found that the costs of implementing this technology would be amortized in approximately 3 years and 4 months. And finally a flexible Taiwanese type prefabricated horizontal biodigester with a capacity of 60m<sup>3</sup> was proposed.

**Key words:** <MATHEMATICAL MODEL ADM1>, <ANAEROBIC DIGESTION>, <BIODIGESTOR>, <SUSTAINABLE DEVELOPMENT>, <RENEWABLE ENERGY>, <RESIDUAL BIOMASS>.



Mgs. Mónica Paulina Castillo Niama.

C.I. 060311780-5

## **INTRODUCCIÓN**

El desarrollo de la sociedad se basa en el consumo de grandes cantidades de energía. La mayor parte de esta proviene de recursos naturales disponibles en nuestro planeta, principalmente carbón y petróleo. Estos combustibles fósiles, que han llevado al mundo a la evolución más rápida jamás conocida, siguen siendo los medios que aportan aproximadamente el 80% de la energía básica mundial (Grupo Banco Mundial 2015, p. 2). Sin embargo, la limitación en su número, debido a la explotación irracional a la que están sometidos y su carácter no renovable, los convierte en un motivo de preocupación frecuente. Es por esto la necesidad actual de encontrar fuentes de energía alternativas, además de las convencionales, que puedan satisfacer las crecientes necesidades energéticas del mundo. Ante estas limitaciones, se han iniciado varios proyectos de investigación basados en nuevas fuentes de energía potencialmente rentables, pero de menor dependencia de los mercados convencionales, desarrollo de la economía local y creación de empleo, además de que estas tecnologías pueden reducir contaminación ambiental. La captura de energía mediante la fermentación de biomasa en biogás y su combustión para producir electricidad en cogeneración se ha convertido en un segmento independiente para la industria de la bioenergía en rápido crecimiento. El biogás se puede obtener de diferentes fuentes: de componentes orgánicos como vertederos, aguas residuales negras, residuos orgánicos comerciales e industriales, y principalmente los provenientes de la agricultura.

Este trabajo tiene como objetivo presentar una propuesta tecnológica para el aprovechamiento energético a partir de las excretas provenientes de la crianza de ganado porcino.

## **CAPITULO I**

### **1. DIAGNÓSTICO DEL PROBLEMA**

#### **1.1 Antecedentes**

La facilidad de uso, obtención de los derivados del petróleo y obtención de energía proveniente de estos, nos ha hecho dependientes en gran manera de este recurso, el cual es evidentemente limitado y además causa severos daños ambientales tanto en su uso como en su obtención, lo cual de cierta manera se ha visto algo minimizado en tiempos pasados debido a la facilidad y cierta costumbre en el uso de derivados del petróleo. Según (OLADE 2020a, p. 2) al inicio de la producción petrolera ecuatoriana, se produjeron aproximadamente 1,6 millones de barriles de petróleo, la cual ha sido creciente, a tal punto que, en el año 2019, fueron 195 millones de barriles de petróleo y en el año 2020, 177 millones de barriles de petróleo. Lo cual demuestra una dependencia cada vez más grande debido a la creciente demanda de energía.

Ante este panorama y con el compromiso del Acuerdo de Paris, Ecuador se ha comprometido a reducir un 9% las emisiones estimadas a 2025, contando con el apoyo financiero y logístico de la comunidad internacional esta cifra se podría reducir hasta un 20,9% las emisiones previstas para el mismo periodo. Lo cual representa una gran oportunidad de desarrollo de energías autosustentables, estas metas aplican para los sectores de agricultura, procesos industriales, residuos y energía(Grupo EL COMERCIO 2019, p. 3).

Dentro de este marco de reducción de emisiones y aprovechamiento de nuevas fuentes de energía, y mirando al pasado, el uso del biogás ha sido una opción en las primeras civilizaciones, como las de los Sumerios, alrededor del año 3000 A.C. Alessandro Volta examinó gas proveniente del Lago Komo, evidenciando la formación del gas a través de un proceso de fermentación, el cual, combinado con el aire adyacente, forma una mezcla que puede ser detonada. Posteriormente Dalton, Henry y Davy alrededor del año 1800, representaron la estructura química del metano. Posteriormente Amedeo Avogadro en 1821, explica de mejor manera dicha estructura(Landeros Gutiérrez & Odilón 2012, p. 3).

Para algunos analistas de la bioenergía, el biogás, puede aportar significativamente a las naciones a alcanzar sus objetivos de emisiones del Acuerdo climático de Paris, la producción mundial de biogás aumentó aproximadamente 40% en la década pasada, actualmente existen al menos 130 000 biodigestores de pequeña, mediana y gran escala funcionando en todo el mundo, especialmente en Europa, China y EE. UU. El consumo de biogás es apenas el 0,3% de la energía global actualmente, según proyecciones se estima que esa cifra será de al menos el doble para el año 2040 (MONGABAY 2022, p. 4).

En el Ecuador la producción energética por medio de otras fuentes primarias como Biogás, solar, eólica, y residuos vegetales ha tenido un aumento desde 2000 bep en el año 2010, hasta 391000 bep en el año 2020 (OLADE 2020b, p. 2).

## **1.2 Planteamiento del problema**

La economía a nivel general de la población ecuatoriana se ha visto gravemente golpeada por la pandemia del COVID-19, asimismo el hecho de tener una granja de ganado porcino alejada de la zona urbana, por la naturaleza de esta actividad que incomoda a los habitantes cercanos, hace que la disponibilidad y calidad de servicios básicos como la electricidad y el manejo de desechos, sean muy bajos o nulos, como resultado de estas carencias se desecha gran parte de las excretas a ríos cercanos provocando contaminación ambiental y aumentando el porcentaje de coliformes fecales en el agua, y en cuanto al espacio dedicado a la crianza del ganado porcino, quedan ciertas cantidades de excretas provocando problemas de insalubridad, esto además de dar una mala imagen de la granja a los habitantes cercanos a la misma, todo esto para bajar costos en cuanto al manejo de estos desechos. Conjuntamente por la naturaleza de la crianza del ganado porcino, la temperatura requerida continuamente es complicada de obtener y esto deriva en la mortalidad moderada de algunas crías y en cuanto a la alimentación, se hace necesario el uso de horas-hombre para mezclar los balanceados y para la obtención de agua, para estos procesos se hace necesaria energía calórica en la cocción de parte de los alimentos y ambientación del sitio de crianza, lo cual significa es significativo, tanto en lo económico como en la logística de obtención del combustible como la leña o GLP para este objetivo; conjuntamente debido al proceso empírico para la obtención de agua, mezcla de balanceados y combustibles, posiblemente en un futuro a mediano o largo plazo es muy probable, una demanda por enfermedades profesionales del personal involucrado en estas actividades, derivadas de estos procedimientos.

## **1.3 Justificación**

Uno de los principales objetivos de la industria de crianza del ganado porcino, es la obtención de ganancias, y que el conflicto social con la población aledaña a los ríos donde se desechan gran parte de las excretas del ganado porcino sea mínimo o nulo. Además, según criterios técnicos es conveniente minimizar las excretas presentes en el sitio de crianza, para evitar enfermedades del ganado porcino. Para esto se debe encontrar una solución que abarque estas dos problemáticas que, además, resulten en una mejor ganancia para la granja.

Para obtener una temperatura en el sitio de crianza de aproximadamente de 21°C, y energía térmica para la cocción de los alimentos del ganado porcino lo cual deriva en una mortalidad mínima de la producción, se hace indispensable tener una fuente de energía a buen precio.

Para la alimentación y aseo, es indispensable usar agua, la cual se obtiene mediante energía mecánica, realizada por los trabajadores, tanto para mezclar el balanceado, como para obtener agua de lugares cercanos, estos procesos deben presentar mínimamente riesgos ergonómicos para el personal que lo realiza, esto sería irrelevante si se hiciera uso de bombas para el agua y mezcladoras, ambas eléctricas, lo que se hace sumamente complicado debido a la falta de infraestructura para la llegada de energía eléctrica a la granja, desde el punto de vista de la economía, es mejor si se hace uso de energía proveniente de desechos, lo cual mejora aspectos como ahorro en obtención de energía térmica, eléctrica, manejo de desechos y el costo de horas hombre, además de minimizar o eliminar el riesgo de futuros gastos legales, debido a demandas por enfermedades profesionales derivadas de la falta de ergonomía al realizar actividades de obtención de combustible y agua, quedando además como opción la venta del abono orgánico llamado Biol, lo cual significaría un ingreso económico adicional para la cadena productiva.

Actualmente todos estos aspectos se controlan empíricamente, lo cual afecta directamente a las ganancias que deberían obtenerse, por energía térmica y eléctrica que se debe pagar a proveedores externos, las horas-hombre desperdiciadas en labores que puede ser asistidas por energía obtenida de los desechos, esto deriva en pagos a personal, costos energéticos y dinero que se deja de recibir por muerte de las crías.

## **1.4 Objetivos**

### ***1.4.1 Objetivo General.***

Evaluar técnica y económicamente la utilización de biomasa residual para generación de energía en la granja “El chanchito” de la provincia de Chimborazo.

### ***1.4.2 Objetivos Específicos.***

Colectar datos de disponibilidad y caracterización de la biomasa residual.

Evaluar el potencial energético de la biomasa disponible.

Valorar la capacidad de conversión de la biomasa en biogás.

Proponer un biodigestor adecuado para la conversión de biomasa en biogás.

Estimar económicamente su implementación y los beneficios en el tema de auto sustentabilidad energética de la granja.

### ***1.4.3 Alcance.***

Se realizará el levantamiento de la información de la cantidad de biomasa residual generada en la granja porcina, esto concierne a toda la industria de crianza de cerdos de la sierra ecuatoriana, especialmente a los que se encuentran a alturas sobre el nivel del mar similares.

Se estimará la cantidad de energía aprovechable de la biomasa convertida en biogás haciendo uso de bibliografía relacionada y simulación del proceso mediante Simulink de Matlab.

Se evaluará económicamente la viabilidad del uso de biogás en la industria de crianza de ganado porcino como recurso de energía alternativa en el entorno social de la localidad de la granja.

Como producto final se realizará el planteamiento del método para obtención, generación y aprovechamiento energético del biogás obtenido a partir de las excretas de ganado porcino.



## **CAPITULO II**

### **2. MARCO TEÓRICO**

#### **2.1 Antecedentes de investigación**

A continuación, se muestran resultados de investigaciones anteriores y relacionadas directamente al tema de estudio:

##### **2.1.1 A nivel nacional:**

- Pazmiño Macas (2016) Argumenta en el trabajo de titulación “Biodigestores una solución energética para la población rural. Uso del biogás en un caso de estudio”:

La organización de cerdos en las chancheras permitió el control de las plagas por mosquitos, y desaparecieron los malos olores en las fincas, se evitó la contaminación de las acequias aledañas y se facilitaron las tareas de limpieza de las chancheras realizada por las mujeres de la casa. Las mismas manifiestan que usando biogás pueden dejar la cocina encendida mientras realizan otras tareas dentro o fuera de la casa, debido a que si la llama del biogás se extingue por sus características no causa la muerte ya sea por aspiración o explosión como lo hace el gas licuado de petróleo. Económicamente beneficia algunas familias que disponen de este combustible para cocinar, minimizando la necesidad de consumir GLP en al menos 3 meses, lo que conduce al ahorro de dinero de la familia. El uso de biodigestores es viable para el manejo de desechos orgánicos a pequeña y gran escala, es una energía alternativa dependiente de estos desechos en especial de los provenientes de animales de granja, totalmente adaptable a la temperatura ambiente y beneficia a la actividad agrícola, deteniendo la tala de árboles y además produciendo biol, que es abono mejorador de suelos para esta actividad, su construcción es de bajo costo, mejora la calidad de vida de los usuarios de este combustible al eliminar los gases provenientes del consumo de leña al cocinar sus alimentos, lo que les producía graves afecciones respiratorias, les evita largas horas recolectando madera, que a su vez disminuía su tiempo de desarrollo personal, y debido a su uso también se eliminaron los incendios provocados por la combustión de madera, evitando además la emisión de gases de efecto invernadero (Pazmiño Macas 2016, p. 85-103).

- Orozco Cantos (2017) deja en evidencia en el trabajo de titulación “Levantamiento y análisis del potencial energético aprovechable de la biomasa forestal en el cantón Riobamba y su viabilidad a través de gasificación tipo Downdraft”:

Este estudio cuantifica e indica la biomasa residual forestal del sector maderero, que está disponible para uso energético dentro del cantón Riobamba, la cual puede ser convertida en combustible gaseoso por el proceso de gasificación Down draft, que destina el poder calorífico a generar energía térmica y de ahí energía eléctrica. La obtención de esta información se realizó censando establecimientos que trabajan con madera, divididos en 35 sectores, de los cuales 24

son urbanos y 11 rurales. Para el proceso de gasificación se utiliza un equipo existente en la ESPOCH, en la etapa experimental se revelan los parámetros reales de este proceso, además de las características de este combustible, hallando así los parámetros técnicos y económicos para generación térmica y eléctrica. Se generan alrededor de 61,21 t cada semana de biomasa forestal, de esta cantidad se puede destinar alrededor del 17,37% que son alrededor de 39,34MWh, la eficiencia en frío del proceso de gasificación es de 72,28% y 5,198MJ/kg, en cuanto al costo frente al GLP (precio internacional), es bastante atractivo, mientras que en generación eléctrica es superior al valor de kWh ofertado por CONELEC. La generación térmica es viable, comparada al precio internacional del GLP (Orozco Cantos 2017, p. 12-23, 87-99).

### 2.1.2 A nivel regional:

- Andrade, Tibaquirá y Restrepo (2018) Argumenta en el proyecto de investigación “Estimación de biogás de relleno sanitario, caso de estudio: Colombia”:

Posterior a una revisión bibliográfica y estado del arte, es evidente que los modelos ampliamente utilizados para estimación del biogás son el modelo US-EPA y el del Intergubernamental Panel on Climate Change IPCC. En esta investigación se usó el modelo colombiano de biogás, aprobado por la US-EPA, el que permite tener en cuenta diferentes regiones del país, con variedad de pisos térmicos y niveles de pluviosidad. El biogás obtenido del relleno sanitario La Glorita es,  $5500 \left[ \frac{m^3}{h} \right]$ , con una eficiencia de recuperación del 77% equivalente a  $4235 \left[ \frac{m^3}{h} \right]$  hasta el año 2033. Se contrastaron modelos teóricos con mediciones experimentales del relleno sanitario, resultado de este proceso se observó que la generación de biogás es significativa en las celdas 5 y 6. De las cuales, la celda 6 genera mayor cantidad de metano, debido a la mayoritaria presencia de residuos orgánicos que provienen de alimentos en descomposición, rápidamente degradables. En el resto de las celdas, la generación es bastante menor porque al cerrarlos quedaron abiertos a la atmosfera liberando el biogás a la atmosfera. La composición del biogás de la celda 6 es de 53,75% metano y 41,79 dióxido de carbono, aproximadamente. El poder calorífico se calculó mediante las correlaciones de Boie, Wilson y Laura Meratz, porque el contenido de carbono proviene del dióxido de carbono, que es no combustible, se hizo el equilibrio químico utilizando el software GASEQ y despejando las entalpías de los reactantes y los productos, resultando un poder calorífico inferior de  $15,86 \left[ \frac{MJ}{kg} \right]$  y  $40,85 \left[ \frac{MJ}{kg} \right]$  con el biogás refinado, con un exceso de aire del 15%. Además, de una capacidad máxima instalada de 60 000 MW-h/año. Conforme a los resultados obtenidos, se concluye que Colombia tiene el potencial para generar electricidad como energía renovable a partir del biogás captado de relleno sanitario. Para futuras investigaciones, se propone comparar las mediciones de potencia eléctrica generada en moto generadores de combustión interna alimentados por

biogás, usando como combustible de referencia el gas natural o el gas propano. También se propone investigar aplicaciones del biogás de relleno sanitario en motores de combustión interna para aplicaciones de transporte masivo (Andrade, Tibaquirá & Restrepo 2018, p. 1-25, 95-105).

- Suárez-Hernández et al. (2018) Demuestra en el artículo científico “Evaluación del potencial de producción del biogás en Cuba”:

En Cuba existe un significativo potencial para la producción y utilización del biogás, debido a la diversidad y el volumen de residuos contaminantes generados por los sectores agropecuario y agroalimentario; pero, aún no se conoce con precisión este potencial para uso en generación de bioenergía. El objetivo del artículo es presentar una evaluación del potencial de producción y utilización del biogás en el país. Para facilitarla se hizo la sectorización (MINAG, MINAL, AZCUBA); dentro del sector pecuario, en aves de corral, porcino (estatales y productores cooperativos) y ganado vacuno, solo se tuvo en cuenta la actividad productiva directamente vinculada al MINAG. Para la industria (MINAL y AZCUBA), se tomaron los datos de las 12 industrias más contaminantes y de las destilerías de alcohol, respectivamente. El potencial diario de producción de biogás es de  $674\,609\text{ m}^3$ , donde destacan la producción porcina y avícola; este potencial significa una producción de energía de  $1\,477\,394\text{ MW} - h/año$ , equivalente a  $132\,856\text{ t}$  de diesel, que cuesta a Cuba  $48\,615\,065\text{ USD}$  según los precios actuales. Asimismo, si se considera la intensidad en  $CO_2$  del diésel, las emisiones evitadas por la sustitución de este combustible fósil por biogás se estiman en  $440\,778\text{ t } CO_{2eq}/año$ . (Suárez-Hernández et al. 2018, p. 10-25).

- Venegas Venegas (2019) sustenta en el Análisis Económico “Biogás, la energía renovable para el desarrollo de granjas porcícolas en el estado de Chiapas”:

Generar energía con base en combustibles fósiles, y el metano ( $CH_4$ ) generado en la actividad pecuaria causan severos daños al ambiente. Aprovechar estiércol de cerdo para generar energía renovable y minimizar problemas de contaminación es viable haciendo más competitivas a las granjas porcícolas de Chiapas. Se identificaron 39 granjas tecnificadas en 14 municipios en el estado, con las metodologías de Chen, United States Environmental Protection Agency (USEPA) y United Nations Framework Convention on Climate Change (UNFCCC) se calculó el potencial de biogás, energía eléctrica y reducción de dióxido de carbono equivalente ( $CO_{2eq}$ ). Además, se realizó una evaluación financiera para sistema biodigestor - moto generador con la metodología de Baca para dos tamaños propuestos, de 500 y 1,000 cerdos; los indicadores financieros como Valor Actual Neto (VAN), Tasa Interna de Retorno (TIR) y Beneficio-Costo (B/C) para los dos tamaños evaluados resultaron económicamente rentables (Venegas Venegas 2019, p. 95-100).

- Blanco et al. (2017) denota en el Análisis teórico-práctico “Generación de Electricidad a Partir de Biogás Capturado de Residuos Sólidos Urbanos: Un Análisis Teórico-Práctico”:

El predio está dividido en tres sectores o módulos, correspondientes a San Javier I (aproximadamente 10 has, con disposición de residuos en el período 1986 a 1998); San Javier II (aproximadamente 19 has, altura de 12 m, operado durante el período 1999 a junio 2011); y San Javier III (9 has, cota aproximada de 12 m, en operación desde junio 2011 hasta aproximadamente 2015). El módulo de San Javier II tiene posee un sistema de captura activa de biogás con tuberías verticales que llevan el biogás hacia la planta de combustión. Este consiste en aproximadamente 100 tubos verticales los cuales funcionan la mitad. El biogás capturado es transportado a la planta de combustión previa separación de condensados. En el módulo coexisten las actividades de disposición final de RSU y captura de biogás con separación manual de residuos por parte de miembros de la Cooperativa de reciclado San Benito, instalados en la Finca San Javier desde hace varios años y autorizados por del Municipio de Salta. La cantidad de biogás generado depende de la cantidad y composición de los RSU, la infraestructura y el equipamiento disponible (compactación, aislante, captación y transporte de lixiviados, sistema de cobertura y tapada periódica), y del diseño del sistema de captura que afecta su eficiencia. Se realizó la estimación de la generación de biogás con base en la modelización del sitio, considerando la cantidad y composición de RSU dispuestos en los sitios San Javier II, III y el futuro San Javier IV, factores de manejo del sitio, y otros parámetros relacionados a las características climáticas como temperatura y precipitación media anual (Blanco et al. 2017, p. 1-10, 85-95).

- Suárez-Chernov, López-Díaz y Álvarez-González (2019) en el artículo científico “ESTIMACIÓN DE LA PRODUCCIÓN DE BIOGÁS A PARTIR DE UN MODELO DE SIMULACIÓN DE PROCESOS”:

El trabajo tiene como objetivo la simulación del proceso de digestión anaeróbica para estimar la producción de biogás mediante el software ASPEN PLUS. El Modelo de simulación de procesos (MSP) desarrolla las etapas de la digestión anaeróbica mediante bloques operativos admitiendo la composición de cualquier sustrato y condiciones de operación. El MSP se compone en total de 46 reacciones químicas desarrolladas por separado según la etapa y complejidad. La hidrólisis fue desarrollada a partir de reacciones con base estequiométrica para fracciones de conversión de los reactantes, mientras que la acidogénesis, la acetogénesis y la metanogénesis se establecieron a partir de un submodelo que determina la cinética de las reacciones. La simulación fue validada con un valor experimental de producción de biogás y un modelo analítico para comprobar su comportamiento en el tiempo. Se desarrolla un análisis de sensibilidad para distintas composiciones de sustrato obteniéndose la influencia en la producción de biogás y el contenido de metano (Suárez-Chernov, López-Díaz & Álvarez-González 2019, p. 3).

### **2.1.3 A nivel internacional:**

- Feiz (2016) en su tesis doctoral titulada “Systems analysis for eco-industrial development: applied on cement and biogas production systems”:

Nuestros sistemas industriales no son sostenibles, un desafío importante que exige varios tipos de respuestas. El desarrollo eco industrial puede verse como una respuesta de este tipo, con el objetivo de establecer sistemas industriales que sean tanto ecológicos como económicos. La Ecología Industrial es otra respuesta estrechamente relacionada. Se basa en la idea de que los sistemas naturales se pueden utilizar para comprender cómo diseñar sistemas industriales sostenibles, por ejemplo, cambiando de procesos industriales lineales a sistemas cíclicos, donde los flujos de residuos pueden evitarse o minimizarse mediante la utilización como materias primas para otros procesos. En esta tesis, se investigan las posibles contribuciones de la ecología industrial / simbiosis al desarrollo eco industrial mediante el uso de enfoques de análisis de sistemas. Se utilizan dos métodos de análisis de sistemas: la evaluación del ciclo de vida y el análisis multicriterio. Estos métodos se aplican en dos tipos de sistemas industriales: cemento y biogás. El cemento se encuentra entre los materiales más utilizados en el mundo con un amplio consumo de recursos e impacto ambiental, manifestado por ejemplo por los altos niveles de emisiones de CO<sub>2</sub> (Feiz 2016, p. 3).

Se utilizó el análisis multicriterio para identificar, clasificar y evaluar diferentes medidas para mejorar el rendimiento climático de la producción de cemento, mientras que la evaluación del ciclo de vida se empleó para cuantificar las emisiones de CO<sub>2</sub>. Se utilizaron análisis combinados de múltiples criterios y evaluación del ciclo de vida para una evaluación integrada de diferentes vías de desarrollo eco industrial. La mayoría de las medidas de mejora viables y eficientes en el uso de los recursos estaban relacionadas con la utilización de recursos secundarios, por ejemplo, la reducción al mínimo del contenido de Clinker del cemento sustituyéndolo por subproductos de la fabricación de acero y hierro o utilizando combustibles derivados de desechos. La utilización efectiva de estas materias primas y combustibles secundarios se puede lograr a través de la simbiosis industrial. El biogás se considera parte de una transición más amplia hacia una economía basada en la biotecnología donde los recursos, biomateriales y bioenergía, se utilizan de manera en cascada, circular y renovable. Se utilizó un análisis multicriterio para evaluar la viabilidad y la eficiencia de los recursos del uso de diferentes tipos de biomasas como materia prima para la producción de biogás y biofertilizantes. Además de aspectos como la energía renovable y el reciclaje de nutrientes, se consideraron la eficiencia de costos, las condiciones institucionales, el desempeño ambiental, el potencial por unidad y el potencial general. (Feiz 2016, p. 89)

En otro estudio, se utilizó la evaluación del ciclo de vida para analizar el desempeño ambiental de la producción de biogás a partir de residuos de alimentos clasificados en origen utilizando un

proceso de digestión seca. El estudio mostró que el rendimiento de este proceso seco es superior a la mayoría de los procesos de biogás húmedo existentes en Suecia. Se analizaron las fuentes críticas de incertidumbre y su impacto en el rendimiento general del sistema. Los factores que influyen en la producción de metano, así como los procesos relacionados con el suelo después de que el digestato se aplica como biofertilizante en la tierra, tienen la mayor influencia en el rendimiento de estos sistemas. (Feiz 2016, p. 90)

Tanto para los sistemas de cemento como para los de biogás, la simbiosis industrial que implica la colaboración y una mejor utilización de los recursos secundarios locales / regionales, puede resultar en un desarrollo eco industrial eficiente en el uso de los recursos. La evaluación del ciclo de vida y los enfoques multicriterio pueden servir como dos métodos complementarios para investigar la viabilidad, el potencial y la eficiencia de los recursos de las diferentes vías de desarrollo. Estos enfoques pueden proporcionar información en los procesos de toma de decisiones y conducir a decisiones más informadas (Feiz 2016, p. 91).

## **2.2 Referencias Teóricas.**

### **2.2.1 Biomasa.**

Se denomina con este término toda materia orgánica proveniente de animales o plantas de cualquier tipo, o provenientes de actividades agrícolas o madereras, también de residuos como aguas negras provenientes de poblaciones urbanas, basura orgánica; pudiendo estos convertirse en energía por combustión directa o después de un debido proceso, siendo así una fuente de energía renovable ((BUN-CA) 2002, p. 4).

### **2.2.2 Clasificación de la Biomasa**

Se puede clasificar en función de cómo se obtiene y la humedad que posee:

**Biomasa Natural:** Se encuentra naturalmente por procesos propios de la naturaleza, por ejemplo, las hojas o brozas que se desprenden de árboles (Román Gía 2016, p. 5-6).

**Cultivos energéticos:** producidos por actividad agrícola específica para el fin de obtener biomasa, con producto final de bioetanol o biodiesel, entre los más notorios se encuentran la *Saccharum officinarum* (caña de azúcar) y especies productoras de aceites (Román Gía 2016, p. 5-6).

**Biomasa residual seca:** generada a partir de actividades agrícolas industriales o artesanales, industria alimenticia, y desechos urbanos (Román Gía 2016, p. 5-6).

**Biomasa residual húmeda:** residuo de las industrias agropecuaria, ganadera, y desechos orgánicos de las ciudades (Román Gía 2016, p. 5-6).

### **2.2.3 Productos de la Biomasa**

Actualmente destacan tres tipos de combustibles producidos a partir de biomasa:

Combustibles líquidos: Etanol, biodiesel, metanol, aceite vegetal, y aceite de pirólisis (Basu 2018, p. 3).

Combustibles gaseosos: biogás (CH<sub>4</sub>, CO<sub>2</sub>), gas de gasógeno o gas de producto o gas pobre (CO, H<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>), gas de síntesis o sintegas (CO, H<sub>2</sub>), gas natural renovable (CH<sub>4</sub>) (Basu 2018, p. 3).

#### 2.2.4 Sistemas de obtención de energía de la biomasa.

En la actualidad existen varios sistemas industrializados, como por ejemplo para la biomasa residual seca, se puede optar entre la combustión de esta o su gasificación; en el caso de biomasa residual húmeda se puede optar por la digestión anaerobia de la misma y para las demás se puede obtener biocarburantes, como los provenientes de cultivos energéticos (NOGUÉS 2002, p. 11).

<b>TIPO DE RECURSO</b>	<b>SISTEMA DE APROVECHAMIENTO</b>	<b>PRODUCTO OBTENIDO</b>
<b>Biomasa residual seca</b> ⇒	Basado en la combustión del recurso ⇒	Vapor Aceite térmico Agua caliente Aire caliente
	Basado en la gasificación del recurso ⇒	Gas combustible <sup>(1)</sup> Gas de síntesis <sup>(1)</sup>
	Producción de biocarburantes ⇒	Aceite vegetal <sup>(2)</sup> Biodiesel <sup>(2)</sup> Etanol <sup>(2)</sup> ETBE <sup>(2)</sup>
<b>Biomasa residual húmeda</b> ⇒	Compostaje ⇒	Compost
	Digestión anaerobia ⇒	Biogás <sup>(1)</sup>
	Basado en la combustión del recurso	
<b>Cultivos energéticos</b> ⇒	Basado en la gasificación del recurso	
	Producción de biocarburantes ⇒	Aceite vegetal <sup>(2)</sup> Biodiesel <sup>(2)</sup> Etanol <sup>(2)</sup> ETBE <sup>(2)</sup>

<sup>(1)</sup> Estos productos se pueden emplear para producir energía térmica o mecánica en un eje  
<sup>(2)</sup> Estos productos se pueden emplear para generar energía mecánica en un eje (motor de combustión interna)

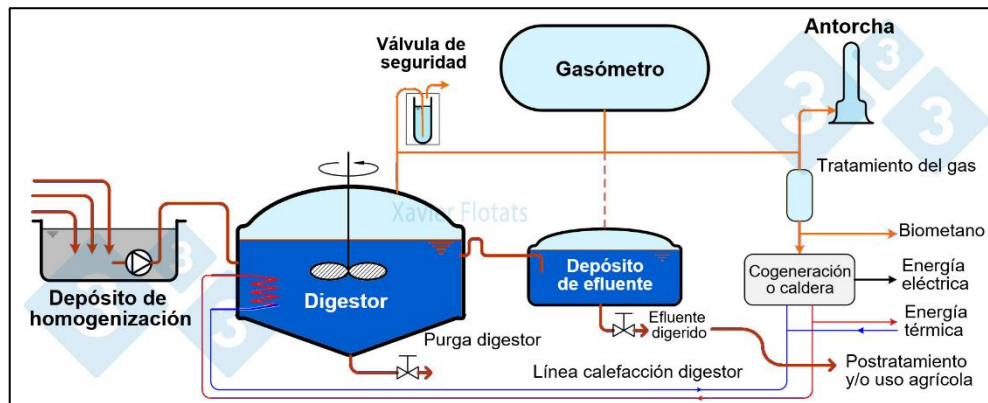
**Ilustración 1 - 2:** Sistemas de obtención de energía de la biomasa.

Fuente: NOGUÉS, 2002

#### 2.2.5 Digestión anaerobia

A partir de la biomasa residual húmeda, resultado de actividades agrícolas o humanas, por su contenido de agua y materia orgánica puede ser aprovechada mediante un proceso biológico. Los procesos biológicos pueden aprovechar el potencial energético de la biomasa húmeda, además de disminuir su carga contaminante y generar subproductos como fertilizantes que actualmente son usados a escala comercial. Un esquema de una planta de digestión anaerobia básica se puede observar en la Ilustración 2 - 2: El proceso de digestión anaerobia se produce en ausencia de oxígeno, degradando o descomponiendo la biomasa por actividad de microorganismos específicos, teniendo como resultado un gas de alto contenido energético

llamado biogás y otros productos que contienen mayormente minerales y compuestos de difícil degradación llamados “fangos”. Este biogás compuesto principalmente por metano y anhídrido carbónico puede ser usado en la generación de energía térmica, eléctrica o en sistemas de cogeneración, el componente que confiere el valor energético a este gas es el metano, haciendo que por ejemplo  $1\text{m}^3$  de biogás con un 60 % de metano pueda tener un poder calorífico de 6,4 kWh. Para que este proceso tenga su eficiencia máxima, debe haber un control de factores como el pH, alcalinidad, temperatura, nutrientes inhibidores y los tiempos de residencia (NOGUÉS 2002, p. 13).



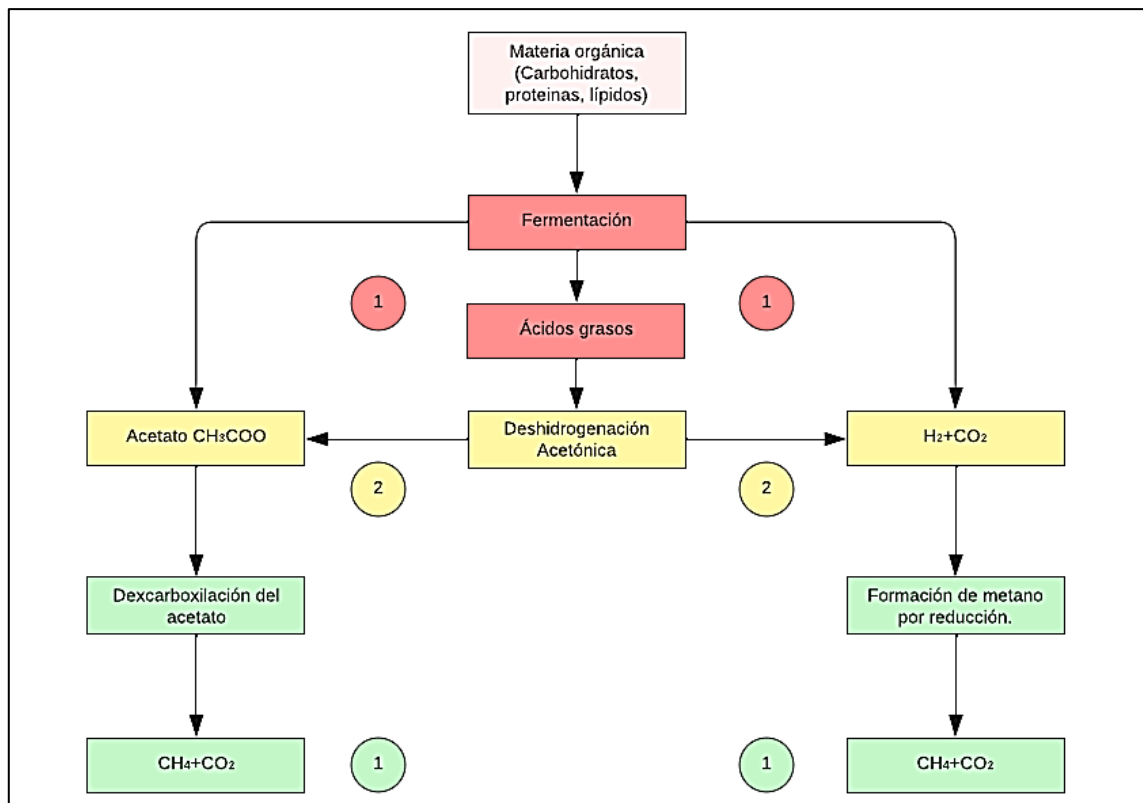
**Ilustración 2 - 2:** Esquema general de una planta de digestión anaerobia.

Fuente: NOGUÉS, 2002

### 2.2.5.2 Fases de la digestión anaeróbica

Principalmente se encuentran 3 fases, que son realizadas por un grupo diferente de bacterias. En la Ilustración 3 - 2:, se encuentra una breve secuencia del proceso.





**Ilustración 3 - 2:** Fases de la digestión anaeróbica.

**Fuente:** McInerney, Bryant y Stafford, 1980

Primera fase: bacterias celulolíticas y proteolíticas descomponen la biomasa en compuestos neutros y ácidos grasos (McInerney, Bryant & Stafford 1980, p. 91-98).

Segunda fase: los ácidos grasos orgánicos se convierten en acetatos y en  $H_2$  y  $CO_2$ . Simultáneamente bacterias homoacetogénicas, descomponen los ácidos de la cadena larga a acetato,  $H_2$  y  $CO_2$ . (McInerney, Bryant & Stafford 1980, p. 91-98)

Tercera fase: las bacterias metanogénicas usan el acetato,  $H_2$  y  $CO_2$  para generar metano (McInerney, Bryant & Stafford 1980, p. 91-98).

### 2.2.6 Hidrolisis

Cuando se desarrolla esta fase, proteínas, lípidos carbohidratos y demás complejos orgánicos obtenidos en la desintegración, se disuelven hacia sus monómeros: ácidos grasos de cadena larga, aminoácidos y monosacáridos, esto es posible mediante enzimas producidas por los microorganismos, que se denominan hidrolíticas, estos procesos son realizados por exoenzimas liberadas por bacterias anaeróbicas como *Propionibacterium*, *Clostridium*, *Peptostreptococcus*, *Enterobacteriácea*, *Bacillus*, *Bacteroides*, *Micrococcus* (Jain et al. 1992, p. 339-343). En cambio, para lodos activos obtenidos de la digestión anaeróbica de sólidos viables, es necesaria una conversión adicional conocida como muerte celular previo a su hidrolización (Pavlostathis & Giraldo-Gomez 1991, p. 36-39). De la hidrolisis se generan productos que deben entrar en la célula

por medio de una membrana celular para que se puedan metabolizar, para este fin existen múltiples formas de ser transportados las cuales se diferencian en su energía consumida y especificidad que generalmente se clasifican en transporte activo, difusión simple y facilitada (Martin 1994, p. 3020–3030).

Esta etapa es primordial porque los microorganismos que realizan la digestión anaeróbica actúan solamente en materia orgánica disuelta, siendo limitante en efluentes que contengan bastantes sólidos, siendo la hidrólisis previa totalmente indispensable y donde se podría decir que la tasa de producción de biogás es proporcional a la tasa de solubilización de la materia orgánica. Esta necesidad puede reducirse aplicando tratamientos fisicoquímicos previos que permiten aumentar la tasa de crecimiento de la hidrólisis, siendo uno de estos tratamientos el tratar mecánicamente el suelo (triturarlo), el ultrasonido, ataque con ácido o alcalino y tratamiento térmico (Palmowski & Müller 2000, p. 155-162, 231-238).

### **2.2.7 Acidogénesis**

También llamada fermentación, en esta fase se metabolizan los monómeros en ácidos grasos volátiles como valerato, acetato, butirato y propianato además de CO<sub>2</sub> y H<sub>2</sub>, en esta fase actúan bacterias formadoras de ácidos, para esta producción las proporciones son muy variadas que dependen del consumo de H<sub>2</sub>, al ser consumido, las bacterias formadoras de ácidos favorecen la formación de Hidrogeno y liberan energía como ATP (Adenosín Trifosfato) que es la molécula que transporta energía principal de las bacterias (Lay, Lee & Noike 1999, p. 2580-2585).

### **2.2.8 Acetogénesis**

En esta fase los resultados de la acidogénesis son convertidos químicamente por dos formas de reacción: homoacetogénesis hidrogenotrófica y acetogénesis ecetoclástica (Pavlostathis and Giraldo-Gomez 1991, p. 410–489) para la homoacetogénesis se realiza mediante integración de acetato por medio del consumo de CO<sub>2</sub> y H<sub>2</sub>, estas reacciones requieren ingreso de energía proveniente de microorganismos acetogénicos y de quienes consumen hidrogeno (Stams 1994, p. 270-290). Tales microorganismos acetogénicos son: *Clostridium Aceticum*, *Syntrophomonas Wolfei*, *Acetobacterium Woodii* y *Syntrophobacter Wolini* (McCarty 1964, p. 90-94).

### **2.2.9 Metanogénesis.**

Esta fase exclusivamente anaerobia donde bacterias se encargan de generar metano desde átomos de carbono en enlace covalente o sustratos de mono carbono como metanol, acetato, dióxido de carbono y metilaminas. Este proceso es relativamente lento en comparación al resto de fases, las bacterias presentes en esta fase se distinguen por el sustrato que usan (Madigan, Martinko & Parker 1999, p. 175):

Hidrogenotróficas: a partir de Hidrogeno y ácido fórmico se reduce a dióxido de carbono y metano (Madigan, Martinko & Parker 1999, p. 175).

Acetoclásticas: generan metano desde el ácido acético, metabolizando aminas, metanol y acetato, no es significativo para el proceso la concentración de hidrogeno. Al menos el 70% del metano obtenido se debe a la acción de estas bacterias (Madigan, Martinko & Parker 1999, p. 176).

### 2.2.10 Factores esenciales en el proceso

Para la generación de metano, fundamentalmente debe haber ausencia de oxígeno, por la naturaleza del proceso se condicionan varios factores, en los puntos siguientes se revisan los más importantes para poder mantenerlos en su intervalo óptimo para su fin que es generar metano (Ángel Siles López, Li & Thompson 2010, p. 64-68).

#### 2.2.10.1 Materiales de carga para la fermentación

Los materiales de carga son todo lo que debe estar presente para la descomposición. La cantidad suficiente de materia orgánica es fundamental para la degradación completa de la biomasa, pero la cantidad suficiente no es lo único a considerar, esta puede ser clasificada según su contenido de nitrógeno y carbono. El nitrógeno es indispensable para la construcción de estructuras celulares y el carbono proporciona la energía necesaria (Guevara Vera 1996, p. 15).

“El proceso microbiológico además de fuentes de carbono y nitrógeno, deben tener en un cierto equilibrio, sales minerales (azufre, fósforo, potasio, calcio, magnesio, hierro, manganeso y otros menores). Normalmente las excretas y lodos cloacales presentan estos elementos en proporciones adecuadas.” (Hilbert 1992, p. 7).

La Tabla 1-2: muestra cantidades de excretas producidas por distintos tipos de animales y el rendimiento aproximado en gas de estos, refiriéndose en kilogramo de solidos volátiles.

**Tabla 1-2:** Cantidades y rendimientos en gas de diferentes excretas.

ESPECIE	PESO VIVO (KG)	excretas kg /día	1/kg SV	%CH <sub>4</sub>
Cerdos	50	4.5-6	340-550	65-70
Vacunos	400	25-40	90-310	65
Equinos	450	12-16	200-300	65
Ovinos	45	2.5	90-310	63
Aves	1.5	0.06	310-620	60
Caprinos	40	1.5	110-290	--

Fuente: Hilbert 1992

Realizado por: Allauca D, 2022.

#### 2.2.10.2 Relación Carbono-Nitrógeno (C/N)

En cuanto a la biomasa se pueden ser que sea rica en carbono o rica en nitrógeno, esto es útil para diferentes funciones, esto se toma muy en cuenta para garantizar que exista un adecuado proceso, el valor de la relación Carbono-Nitrógeno (C/N) perteneciente a la biomasa necesita ser de un valor determinado o cercano al mismo (Guevara Vera 1996, p. 130) en la Tabla 2-2: se

muestran los valores para los materiales usados comúnmente en biodigestores (McInerney, Bryant & Stafford 1980, p. 91-98).

**Tabla 2-2:** Relación C/N de algunos materiales usados en biodigestión anaeróbica.

Materias Primas	Contenido de <b>CARBONO</b> de las materias primas por peso (%)	Contenido de <b>NITRÓGENO</b> de las materias primas por peso (%)	C/N
Paja seca de trigo	46.00	0.53	87:1
Paja seca de arroz	42.00	0.64	67:1
Tallo de maíz	40.00	0.75	53:1
Hojas secas	41.00	1.30	32:1
Estiércol de aves	41.00	1.30	32:1
Pasto	14.00	0.54	27:1
Cacahuets tallos y hojas	11.00	0.59	19:1
Estiércol fresco de ovejas	16.00	0.55	23:1
Estiércol fresco de vaca	7.30	0.29	25:1
Estiércol fresco de caballo	10.00	0.42	24:1
Vísceras de frigorífico	9.00	0.60	15:1
Estiércol fresco de cerdo	7.80	0.60	13:1
Excretas frescas humanas	2.50	0.85	2.9:1

**Fuente:** Rafaela 1996

**Realizado por:** Allauca D, 2022.

### 2.2.10.3 Concentración de la carga

Otro factor importante es considerar que tan concentrada esta la materia, la Tabla 3-2: nos brinda algunos datos al respecto, la carga de materia no debe estar muy diluida o concentrada, según varios autores se ha concertado que con 5 al 10% de concentración es lo más adecuado para el proceso. Estos valores influyen en el contenido de nitrógeno y fósforo lo que favorece el desarrollo de las familias de bacterias (Valladares Carnero 2017, p. 10).

**Tabla 3-2:** Solidos totales en material de fermentación comúnmente usados.

Materias Primas	Contenido seco (%)	Contenido hídrico (%)
Paja de arroz	83	17
Paja de trigo seca	82	18
Excretas humanas	20	80
Estiércol de cerdo	18	82
Estiércol de vaca	17	83

**Fuente:** Valladares Carnero 2017

**Realizado por:** Allauca D, 2022.

### 2.2.10.4 Temperatura

Este factor es el más influyente en el rendimiento en la producción de biogás, pues afecta directamente al desarrollo bacteriano, al producir un incremento geométrico en la velocidad de degradación y producción de biogás, en la Tabla 4-2: el rendimiento de la producción de gas en función de la temperatura, es evidente que al aumentar al doble la temperatura el rendimiento sube proporcionadamente, la temperatura también influye en la solubilidad, absorción de gases y la viscosidad. En elevadas temperaturas aumenta la solubilidad de sólidos en la fase líquida y disminuye la absorción de gases, con este de solubilidad, el proceso de degradación es acelerado, además la disminución de absorción de gases como H<sub>2</sub> o el H<sub>2</sub>S mejora el proceso de fermentación, pero la presencia de NH<sub>3</sub> produce un aumento del pH lo que provoca aumento de CO<sub>2</sub> en lugar de METANO (Ward et al. 2008, p. 7929-7939).

**Tabla 4-2:** Rendimiento en producción de gas con materia comúnmente usada.

Materias Primas	Mesofílico (35°C)	Ambiente (8-25°C)
Paja de trigo	0.45 adimensional	0.20-0.25 adimensional
Paja de arroz	0.40 adimensional	0.20-0.25 adimensional
Excretas humanas	0.43 adimensional	0.25-0.30 adimensional
Estiércol de vaca	0.30 adimensional	0.20-0.25 adimensional
Estiércol de cerdo	0.42 adimensional	0.25-0.30 adimensional

**Fuente:** Valladares Carnero 2017

**Realizado por:** Allauca D, 2022.

En el proceso de digestión anaerobia se puede tener estos rangos de temperaturas:

**Rango psicrófilo (Ambiente):** en el rango de los 10°C a 25°C, para que haya un desarrollo óptimo de bacterias, el proceso debe ser adiabático (no intercambia calor con su entorno), a una

temperatura baja, la velocidad de fermentación será menor, siendo mayor el tiempo de fermentación (100 días aprox.) y capacidad de retención, no se requiere agitación de los sustratos (Valladares Carnero 2017, p. 12).

**Rango mesofílico:** en el rango de los 25°C a 45°C, se debe agregar calor adicional, similar a la digestión natural en rendimiento, tiempo de fermentación alrededor de 40 días, se hace necesaria la agitación del sustrato (Valladares Carnero 2017, p. 12).

**Rango termofílico:** en el rango de los 45°C a 65°C, obtenido al agregar calor adicional, con un menor tiempo de retención, de alrededor de 10 días, se requiere mayor control de la agitación de sustratos (Valladares Carnero 2017, p. 12).

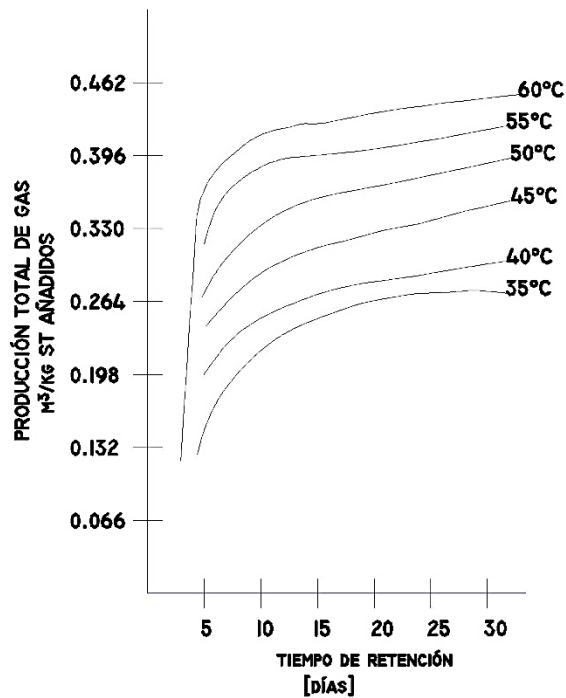
**Tabla 5-2:** Rendimiento de gas en digestores pequeños.

Materias Primas	Temperatura (°C)	Producción de gas (m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup> x día)
Paja de arroz + estiércol	29-30	0.55
Porcino + pastos	24-26	0.21
Porcino + pastos	16-20	0.10
Porcino + pastos	12-15	0.07
Porcino + pastos	Menor a 8	escaso

**Fuente:** Guevara Vera 1996

**Realizado por:** Allauca D, 2022.

Un método para subir la temperatura del efluente es usar un intercambiador de calor tipo serpentín, dentro de la cámara de fermentación, además se determina que, por ser el ciclo digestivo más rápido a altas temperaturas, y en bajas temperaturas más lento, la capacidad del digestor debe ser mayor en bajas temperaturas (Guevara Vera 1996, p. 18).



**Ilustración 4 - 2:** Efecto de la temperatura y tiempo de retención en la producción de gas.

Fuente: Guevara Vera 1996

#### 2.2.10.5 Valor de pH

La digestión anaerobia en cuanto al factor del pH tiene un desempeño óptimo cuando este se encuentra entre 6.5 y 7.5, al estar fuera de este rango podría inhibirse o detenerse el proceso de fermentación. Generalmente al usar residuos domésticos y agropecuarios, el proceso mismo es quien ajusta el pH. En el caso que esta corrección no sea suficiente, se corrige al agregar efluente y materia prima en igual proporción, simultáneamente, si el pH es bajo, se debe agregar agua amoniacal diluida, fertilizante, cenizas, o ambos con licor fermentado (Guevara Vera 1996, p. 20).

Algunos inhibidores y promotores del desarrollo de los componentes de la biodigestión: *para promover el proceso* se utiliza urea y carbonato de calcio, la urea acelera la producción de metano y degradación de sustratos, el carbonato de calcio incrementa la producción de metano. *Para inhibir el proceso* se usa amoníaco y nitrógeno, que si se usa en concentración excesiva destruyen los microorganismos, a continuación, en la Tabla 6-2: elementos inhibidores y su concentración inhibidora (Guevara Vera 1996, p. 20).

**Tabla 6-2:** Concentración inhibidora de inhibidores comunes.

Inhibidores	Concentración inhibidora	Inhibidores	Concentración inhibidora
SO <sub>4</sub>	5000 ppm	CN	25 mg/L
NaCl	40 000 ppm	Detergente sintético	20-40 mg/L
Nitrato	0.05 mg/mL	Na	3500-5500 mg/L
Cu	100 mg/L	K	3500-5500 mg/L
Cr	200 mg/L	Ca	2500-4500 mg/L
Ni	200-500 mg/L		

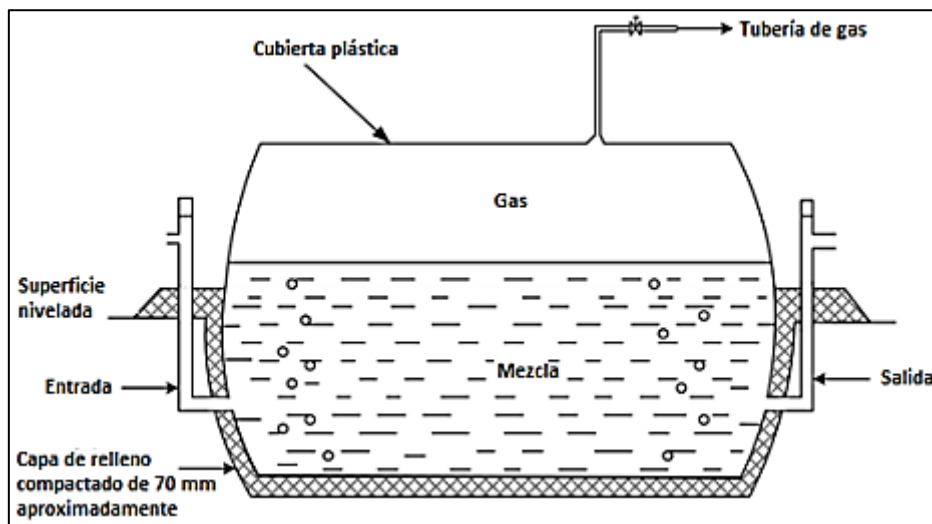
Fuente: Guevara Vera 1996

Realizado por: Allauca D, 2022.

### 2.2.11 Biodigestor

También llamado reactor, es el contenedor donde se desarrolla la digestión anaerobia, cerrado, hermético e impermeable, en él se introduce materia orgánica (estiércol animal, excretas humanas, residuos vegetales, etc.) diluida en agua, dentro de este se lleva a cabo la fermentación de los sustratos, con el objetivo de producir gas metano y fertilizantes orgánicos ricos en nitrógeno, fósforo y potasio. Generalmente están compuestos por los siguientes elementos principales (García, Alamo & Marcelo 2017, p. 36-42).

- Sistema de carga de materia orgánica. (Entrada)
- Cámara de fermentación o digestión. (Mezcla)
- Cámara de depósito de gas. (Gas)
- Sistema de descarga de gas. (Tubería de gas)
- Sistema de descarga de materia fermentada. (Salida) Ver Ilustración 5 - 2:



**Ilustración 5 - 2:** Digestor de balón, se infla cuando recoge biogás.

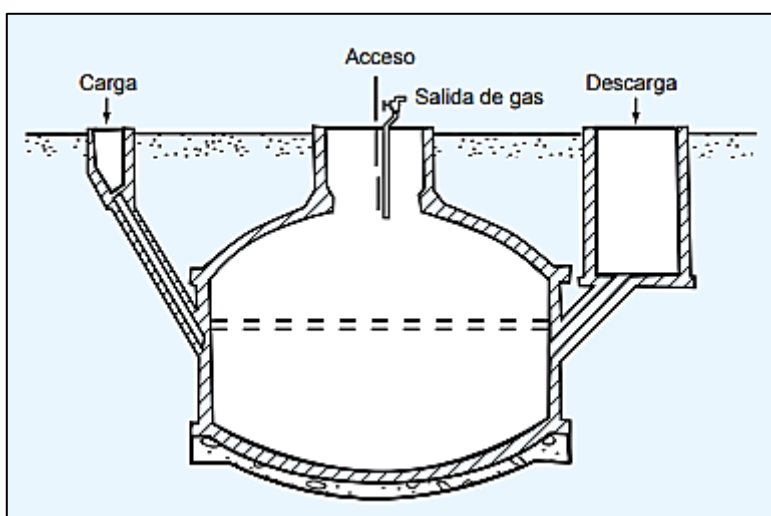
Fuente: García, Alamo y Marcelo 2017



## 2.2.12 Tipos de biodigestores

### 2.2.12.1 Modelo Chino

Este tipo de digestores están formados por tanques cilíndricos con techo y piso en forma de domo, se construyen totalmente enterrados. Este tipo de digestor inicia el proceso llenando con residuos agrícolas compostados mezclados con lodos activos de digestor donante, por la cubierta superior, que es removible. Debe seguir alimentado diariamente con residuos disponibles, son buenas opciones los provenientes de letrinas y excretas de animales domésticos, en esta ocasión por el tubo de carga, que llega al centro del digestor. Este modelo carece de gasómetro, por lo que el biogás se almacena dentro del sistema. Mientras el volumen del gas almacenado aumenta en el domo del digestor, este aumenta su presión por acción directa, el líquido también lo hace en los tubos de entrada y salida, lo que provoca que suba y llegue a alcanzar presiones de hasta 100 cm de columna de agua, de esto se produce entre 0.15 y 0.20 volúmenes de gas por volumen de digestor/día. Debido a la variación de presión, la que sube al crear el gas y baja al ser consumido, la eficiencia en los equipos consumidores se reduce. Debe extraerse una parte del líquido en fermentación por medio del tubo de salida, haciendo uso de una cubeta, además, debe vaciarse por completo el digestor una o dos veces al año y aplicar el residuo (sólido) a los campos de cultivo. La eficiencia para generar biogás es baja, pero esto es compensado en la producción de bioabono, y además se tiene gran cantidad de este, para ser usado en la mezcla con el suelo previo a la siembra. El tiempo de retención para este tipo de biodigestores ronda entre los 30 a 60 días, para llegar a una eficiencia (máximo 50% de reducción de la materia orgánica) de 1/2 a 1/3 para este tiempo de retención en los biodigestores tipo hindú (Varnero Moreno 2011, p. 98-99).



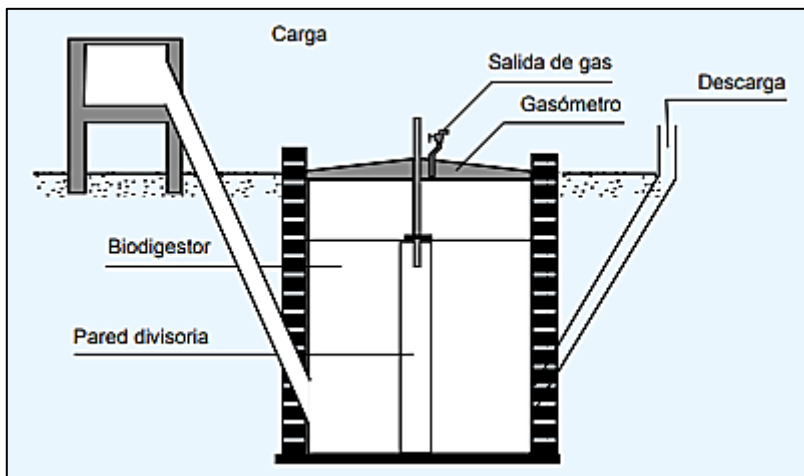
**Ilustración 6 - 2:** Biodigestor tipo chino.

Fuente: Varnero Moreno 2011

### 2.2.12.2 Modelo Indiano

Este tipo de biodigestor es enterrado al igual que el de tipo chino, son verticales como un pozo, el ingreso del material se realiza diariamente, esta mezcla es dependiente del periodo de fermentación lo que resulta en una producción de biogás a diario casi constante cuando se mantienen las condiciones requeridas de operación (Varnero Moreno 2011, p. 99–100).

Contienen un gasómetro en su parte superior, esto mediante el uso de una campana flotante que almacena el biogás, esto hace que la presión sobre la mezcla del reactor sea sumamente baja (30cm.c.a.) el uso de la campana hace que exista una presión constante permitiendo una eficiente operación de los equipos alimentados. Esta campana minimiza o anula la presencia de espuma formada en algunos biodigestores, el cargar la mezcla hace que esta vaya hacia el fondo del reactor, lo que produce agitación y evacua constantemente los lodos digeridos, para utilizarlos en cultivos, posee un tabique central para retener la mezcla, en este tipo de biodigestor se prefieren las excretas las cuales deben ser diluidas y mezcladas uniformemente. Este biodigestor obtiene una considerable eficiencia de producción del gas que esta entre 0,5 y 1,0 volumen de gas por volumen del biodigestor en cada día (Varnero Moreno 2011, p. 99–100).

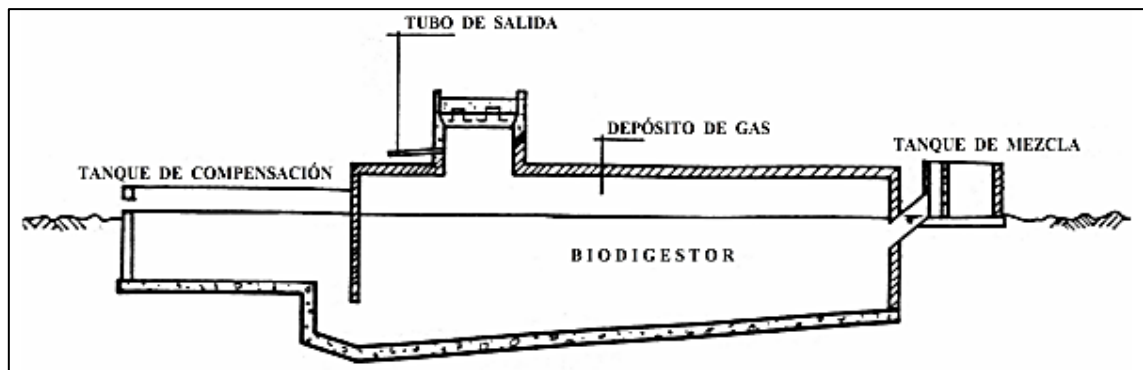


**Ilustración 7 - 2:** Biodigestor tipo Indiano.

Fuente: Varnero Moreno 2011

### 2.2.12.3 Modelos horizontales

Este modelo puede ser enterrado como en Ilustración 8 - 2:, o no, por lo general son de forma rectangular hechos en hormigón con acero de refuerzo, se usan para ser alimentados por cloacas, debido a su forma alargada, el efluente podría salir del biodigestor siendo debidamente descompuesto dentro del tiempo de retención. Para su revisión posee una tapa metálica en la parte superior, controlado por un sello de agua, posee un gasómetro por su bajo espacio de almacenamiento del biogás (Villafuerte López & Razo Achig 2007).



**Ilustración 8 - 2:** Biodigestor tipo horizontal.

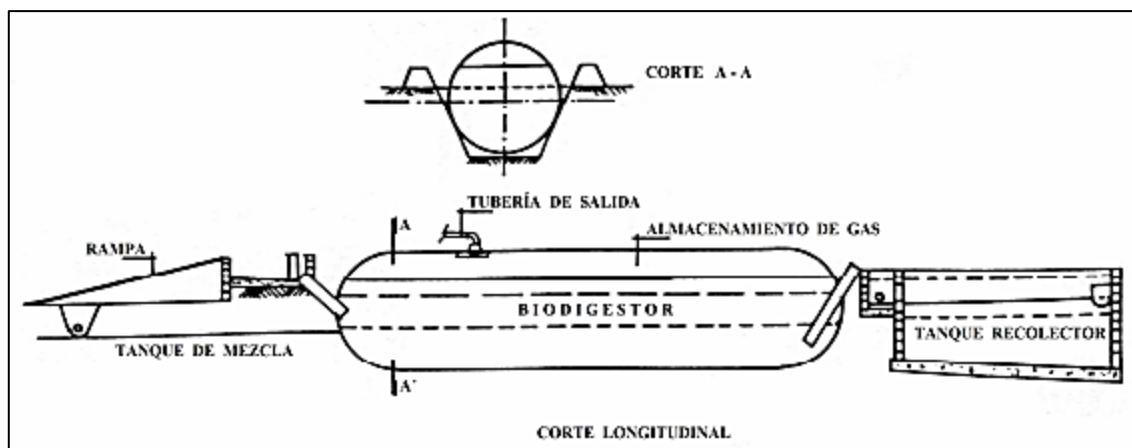
Fuente: Villafuerte López y Razo Achig 2007

#### 2.2.12.4 Tipo tubular o Taiwanes

Constituidos en plástico sellado completamente en forma de bolsa o un tipo balón, al igual que el resto de los modelos, el biogás es almacenado en su parte superior, alrededor del 25% de su volumen total, las entradas y salidas se derivan directamente de las paredes de la bolsa, tiene un funcionamiento similar al de cúpula fija, al estar llena su cámara de gas. Su costo es de alrededor del 50% en relación con el de cúpula fija. Altamente recomendado en lugares donde la bolsa tenga un bajo riesgo de daño y donde se pueda obtener temperaturas constantes, o al menos dentro del rango psicofílico (10-25°C) (Villafuerte López & Razo Achig 2007, p. 33-34).

Instalarlo es relativamente sencillo y requiere de corto tiempo para este fin, de baja presión en su funcionamiento, siendo necesario el uso de contrapesos sobre el balón para aumentar esta presión de alimentación. Debido a que estará a la intemperie el material de construcción debe ser resistente a esta y a los rayos UV. Inicialmente eran construidos de forma tubular, posteriormente se construyeron con la forma de tienda de campaña, en Nepal se usa esta forma, pero de PVC, su uso ha ido fomentándose en países como Bangladesh, Tanzania, Vietnam y Colombia, esto ha sido muy aceptado por los usuarios de Vietnam para producir combustible limpio que reemplaza a la leña, solucionando dos problemas a la vez: talar madera para combustión y el manejo de sus desechos. Se han instalado cerca de 800 biodigestores en alrededor de 3 años en construcción de polietileno, todo esto autofinanciado por los propios usuarios (Villafuerte López & Razo Achig 2007, p. 33-34).

En cuanto a su funcionamiento el flujo de material es horizontal, tanto para la carga y la salida del biol, se caracteriza por su fácil operación y costo bastante accesible, pero en cuanto a su vida útil es más corta que los digestores realizados con obra civil, estos digestores actualmente pueden tener una vida útil de alrededor de 15 años (Forget 2011, p. 12).



**Ilustración 9 - 2:** Biodigestor tubular.

Fuente: Villafuerte López y Razo Achig 2007

#### 2.2.12.4.2 Componentes del biodigestor tubular

Los componentes están descritos En la Tabla 7-2: hay que recalcar que aparte de los componentes hace falta obra civil, siendo esta: abrir una zanja y colocar un recubrimiento en el fondo con aislante térmico que además es útil para acomodar y aislar el biodigestor de la humedad, lo que sería contraproducente para el reactor (Forget 2011).

**Tabla 7-2:** Componentes del biodigestor tubular.

Componente	¿Es opcional?	Definición y/o uso
<b>Reactor</b>	No	Es sencillamente una “bolsa” de plástico, donde se desarrollará el proceso de digestión, que suele ser PE o geomembrana de PVC; ésta es más sólida y por tanto más cara que el PE.
<b>Invernadero</b>	SI	En regiones frías (sierra alta, altiplano) es imprescindible ponerlo para aumentar la temperatura del reactor y garantizar que su interior no hele. Además, el invernadero, o carpa solar, protege el plástico del reactor de los dañinos rayos solares UV. Se sujeta el plástico a tapiales mediante palos y ligas.
<b>Tuberías</b>	No	De PVC, conducen el gas del reactor a la cocina o a la instalación que usa el gas.
<b>Válvulas</b>	No	En varios sitios de las tuberías se ponen válvulas. La más importante es la válvula de seguridad, que garantiza una presión más o menos constante en el reactor, impidiendo así que se dañe si el biogás no es utilizado durante un cierto tiempo, y que impide que aire entre al biodigestor
<b>Reservorio</b>	No	Almacena el biogás producido. Se encuentra cerca de la cocina (o de cualquier instalación que hace uso del biogás) y se debe poner de tal manera que sea fácil darle presión
<b>Cocina</b>	Si	Si el biogás es utilizado para cocinar, hay que instalar una cocina, que puede ser de metalo (en general una cocina a gas de bombona adaptada al biogás) o de arcilla con un quemador metálico.
<b>Manómetro</b>	Si	Puede ser construido artesanalmente, sirve a controlar la producción de biogás.

Fuente: Forget 2011

Realizado por: Allauca D, 2022.

### 2.2.13 Biogás

Es el combustible resultante de la degradación o digestión anaeróbica, como se puede observar en la Tabla 8-2: compuesto en gran parte de metano (CH<sub>4</sub>) y dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>). Con un contenido de metano en el biogás de alrededor del 45% y 60% hasta un máximo del 95%. (Moncayo Romero 2009). Para que el biogás sea inflamable el contenido de metano (CH<sub>4</sub>) debe ser superior al 45% (Varnero Moreno 2011, p. 16).

### 2.2.14 Poder calorífico del biogás

Esta propiedad describe la cantidad de calor liberada durante la combustión de un determinado volumen, la cual es dependiente de la fase en que se encuentra el agua que compone los resultantes de la combustión, *si esta es gas*: será Poder calorífico Inferior (PCI) es inferior ya que se resta el calor requerido para convertir el agua en gas, si está en la fase líquida: Poder calorífico superior (PCS). En la Tabla 8-2: se muestra el PCI del biogás, el cual es dependiente de la cantidad de Metano y su densidad, porque este es el que aporta energía para la combustión (Cengel & Boles 2011).

**Tabla 8-2:** PCI para biogás con diferentes cantidades de CH<sub>4</sub>.

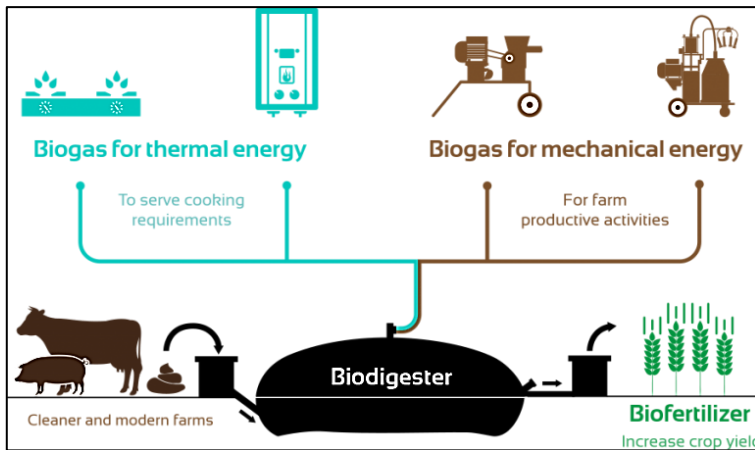
Composición	Densidad a 15,6°C (kg/m <sup>3</sup> )	PCI (kJ/kg)
100% CH <sub>4</sub>	-	50014,00
90% CH <sub>4</sub> y 10% CO <sub>2</sub>	0,800	38258,81
70% CH <sub>4</sub> y 30% CO <sub>2</sub>	1,037	22927,41
50% CH <sub>4</sub> y 50% CO <sub>2</sub>	1,275	13319,73

Fuente: Jeppsson 2007

Realizado por: Allauca D, 2022.

### 2.2.15 Utilidades del biogás

Compuesto en su mayoría por Metano (50% a 60% generalmente, o hasta mayor a 90%), es un hidrocarburo, puede ser utilizado como combustible para automotores o en calefacción, en la cocina, iluminación, generación de electricidad, etc. De todos estos, se hace mayor énfasis en la generación de electricidad, porque es utilizada en la gran mayoría de actividades diarias, tanto en la zona urbana como rural, además de usos industriales. En el caso de industria de producción los usos más destacados son: calefacción, cocción de alimentos y generación de electricidad. El CH<sub>4</sub> (metano) puede ser usado en motores de combustión interna que funcionen bajo el ciclo de Otto, o Diesel, haciendo pequeñas modificaciones mecánicas (Román Gía 2016, p. 31-32).

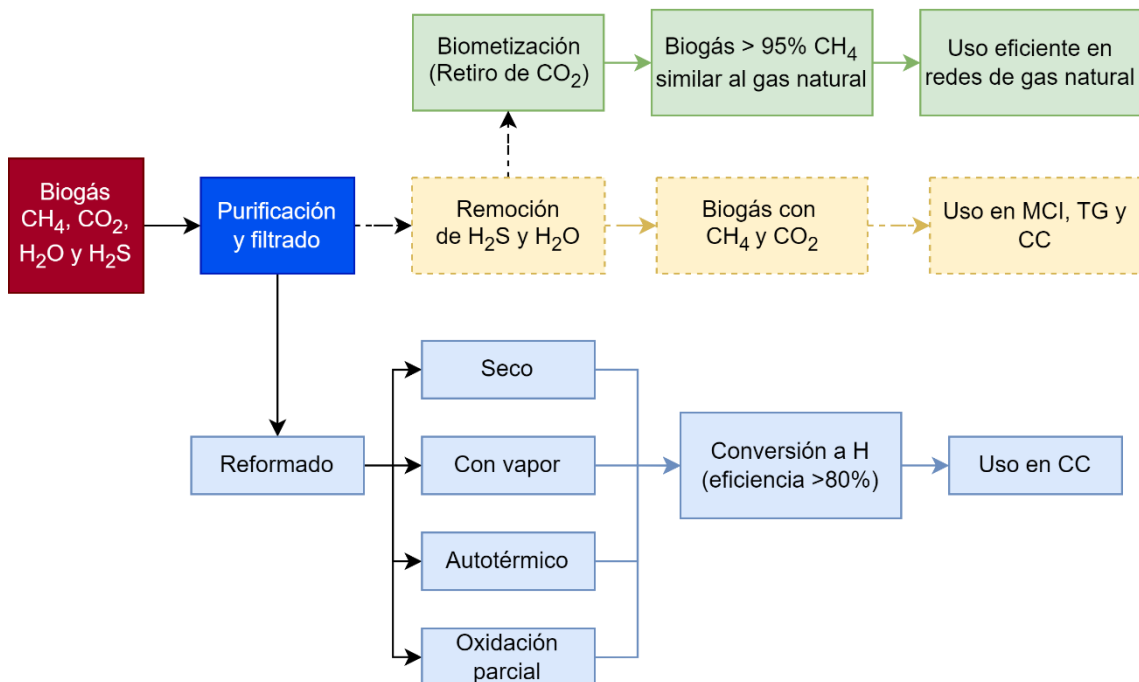


**Ilustración 10 - 2:** Usos típicos del biogás.

Fuente: Sistema.bio 2022

### 2.2.16 Tratamientos del biogás

El biogás puede ser utilizado en Motores de combustión interna (MCI), Turbinas de gas (TG), y celdas de combustible (CC), para poder utilizarlos eficientemente se debe someter a procesos de secado y desulfuración eliminando así contaminantes como el ácido sulfúrico y el agua los que disminuyen su poder calorífico y generar corrosión en sistemas de generación eléctrica. Para conseguir llegar a contenidos mayores al 90% de Metano, se hace necesaria la ayuda de procesos adicionales como la biometanización o el reformado a H, la gran desventaja es que estos procesos adicionales requieren de infraestructura y equipos especializados que elevan su costo de producción (Hernández 1996).



**Ilustración 11 - 2:** Tratamientos del biogás.

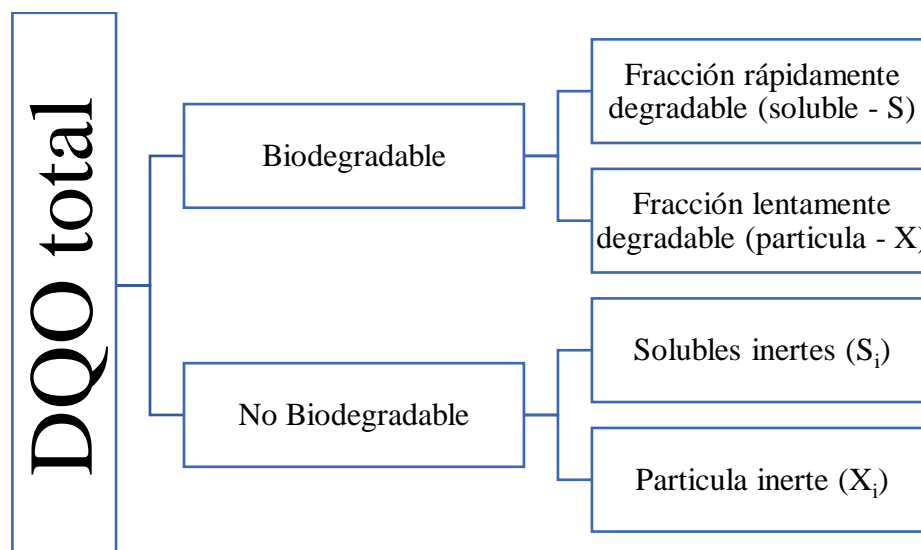
Realizado por: Allauca D, 2022.

### 2.3 Definición de demanda química de oxígeno (DQO)

Este parámetro se define como cualquier sustancia, ya sea orgánica o inorgánica que puede ser oxidada por medios químicos que hay presentes en la muestra (Núñez Pintado 2017, p. 24).

### 2.4 Modelo ADM1

Como se describe en las secciones anteriores, la digestión anaerobia es dependiente de factores como la temperatura, la relación C/N el pH y demás, el realizar el proceso con el desconocimiento del comportamiento de los antes mencionados en ciertas ocasiones genera inestabilidad la cual se podría minimizar con el uso de un control adecuado, pensando en esto en el año 2002 por el grupo investigativo “Task group for mathematical modelling of anaerobic Digestion Process” publica el resultado de su investigación del modelo IWA-ADM1 (*International Water Association – Anaerobic Digestion Model N°1*) o más conocido como ADM1, que simula (incluidos los transitorios) la digestión anaeróbica, modelo estructurado con los componentes como sustratos complejos como carbohidratos, proteínas, aminoácidos, azúcares, ácidos grasos, además de procesos múltiples que cuentan los procesos bioquímicos y fisicoquímicos que están presentes en el proceso anaeróbico de desintegración de compuestos orgánicos complejos. Este sistema usa como pilar fundamental la demanda química de oxígeno (DQO) para modelar el comportamiento de los factores de la biomasa, pudiendo relacionarla con el sustrato inorgánico, biomasa, el oxígeno, y ser simulado, en cuanto a su uso en el modelo matemático ADM1, permite un monitoreo de los factores y su modificación fácilmente mediante el oxígeno consumido y conservando los balances de masa, la DQO se puede diferenciar en los bloques descritos a continuación (Batstone et al. 2002, p. 15-18).

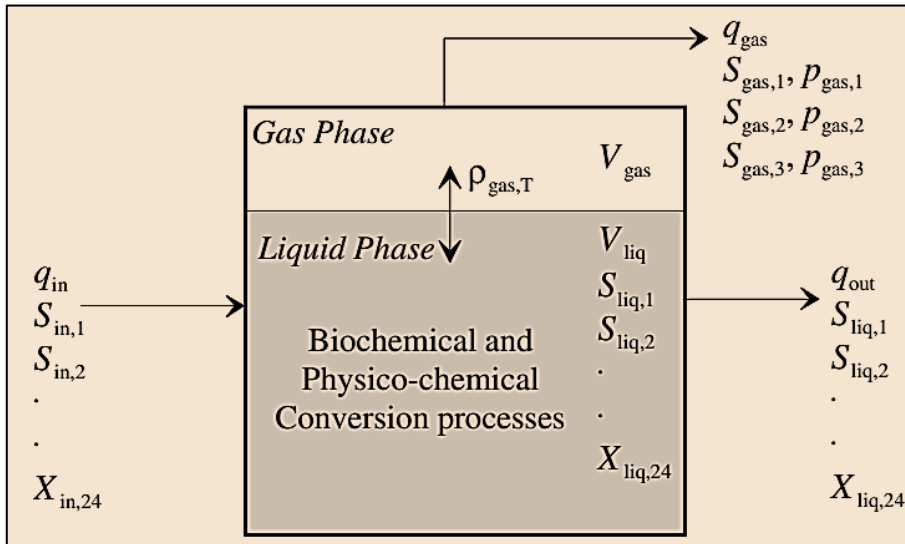


**Ilustración 12 - 2:** Distribución de la DQO del biogás.

Realizado por: Allauca D, 2022.

## 2.5 Ecuaciones para el modelo ADM1

El sistema de digestión anaerobia está formado por un volumen de líquido y gas sellados, básicamente es un balance masico, que involucra las reacciones intermedias, pero básicamente se dice que la cantidad de masa que ingresa debe ser igual a la que sale,  $q_{in} = q_{out}$  esto se aprecia mejor en la Ilustración 13 - 2:



**Ilustración 13 - 2:** Esquema de una reacción típica en un biodigestor.

Fuente: Batstone et al. 2002

### 2.5.2 Simbología y unidades

Para este modelo es necesario usar unidades coherentes y adecuadas a la realidad del proceso, para que los resultados de este puedan ser interpretados fácilmente. En la Tabla 9-2: se muestra las unidades utilizadas en el modelo matemático

**Tabla 9-2:** Unidades para el modelo matemático.

Medida	Unidad
Concentración	kgDQO/m <sup>3</sup>
Concentración (no-DQO)	kmolC/m <sup>3</sup>
Concentración (nitrógeno no-DQO)	kmolC/m <sup>3</sup>
Presión	Bar
Temperatura	K
Distancia	m
Volumen	m <sup>3</sup>
Energía	kJ
Tiempo	d (día)
DQO soluble	DQOs
DQO particulada	DQOx

Fuente: Batstone et al. 2002

Realizado por: Allauca D, 2022.



Este modelo consta de los siguientes parámetros y variables: en la Tabla 10-2: coeficientes estequiométricos, en la 0 constantes de equilibrio, en la Tabla 12-2: parámetros cinéticos, en la 0 variables de estado y algebraicas.

**Tabla 10-2:** Coeficientes estequiométricos.

Símbolo	Descripción	Unidades
$C_i$	Contenido de carbono del compuesto i	KmolC/kgDQO
$N_i$	Contenido de nitrógeno del compuesto i	KmolN/kgDQO
$v_{i,j}$	Coefficientes de velocidad para el compuesto i en el proceso j.	kgDQO
$f_{\text{producto, sustrato}}$	Rendimiento (solo catabolismo) de producto sobre el sustrato.	kgDQO/kgDQO

**Fuente:** Batstone et al. 2002

**Realizado por:** Allauca D, 2022.

**Tabla 11-2:** Constantes de equilibrio.

Símbolo	Descripción	Unidades
$K_{a, \text{acid}}$	Constante de equilibrio acido-base	M(kmol/m <sup>3</sup> )
$K_H$	Constante de Henry	M <sub>liq</sub> bar <sup>-1</sup>
$pK_a$	$-\log_{10}[K_a, \text{ácido}]$	adimensional
$R$	Constante de gases	bar m <sup>3</sup> /kmol K

**Fuente:** Batstone et al. 2002

**Realizado por:** Allauca D, 2022.

**Tabla 12-2:** Parámetros cinéticos.

Símbolo	Descripción	Unidades
$k_{A/Bi}$	Parámetro cinético acido-base	$M^{-1}d^{-1}$
$k_{dec}$	Constante de respiración endógena	$d^{-1}$
$k_{hyd,i}$	Constante de hidrólisis	$d^{-1}$
$I_i$	Función de inhibición	Adimensional
$k_{proceso}$	Parámetro de primer orden	$d^{-1}$
$k_{LA}$	Coefficiente de transferencia liquido-gas	$d^{-1}$
$K_{inhibición, sustrato}$	Concentración inhibidora al 50%	$kgDQO/m^3$
$k_{m, proceso}$	Tasa de consumo específico de Monod ( $\mu_{max}/Y$ )	$kgDQOs/kgDQO \cdot d$
$K_{S, proceso}$	Constante de saturación media del sustrato	$kgDQOs/m^3$
$\rho_j$	Velocidad cinética del proceso j	$kgDQOs/m^3 \cdot d$
$Y_{sustrato}$	Rendimiento de biomasa sobre el sustrato	$kgDQOs/kgDQOx$
$\mu_{max}$	Tasa de crecimiento específico máxima de Monod	$d^{-1}$

Fuente: Batstone et al. 2002

Realizado por: Allauca D, 2022.

**Tabla 13-2:** Variables de estado y algebraicas.

Símbolo	Descripción	Unidades
pH	$-\log_{10}[H^+]$	Adimensional
$P_{gas, i}$	Presión del gas i	bar
$P_{gas}$	Presión total de gas	bar
$S_i$	Componente soluble i	$kgDQO/m^3$
$X_i$	Componente soluble i	$kgDQO/m^3$
T	Temperatura	K
V	Volumen	$m^3$

Fuente: Batstone et al. 2002

Realizado por: Allauca D, 2022.

### 2.5.3 Procesos bioquímicos

**Tabla 14-2:** Procesos bioquímicos, para componentes solubles.

Component →	i	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	Rate ( $\rho_i$ , kg COD.m <sup>-3</sup> .d <sup>-1</sup> )
<b>j</b>	<b>Process ↓</b>	$S_{su}$	$S_{aa}$	$S_{fa}$	$S_{va}$	$S_{bu}$	$S_{pro}$	$S_{ac}$	$S_{h2}$	$S_{ch4}$	$S_{ic}$	$S_{in}$	$S_i$	
1	Disintegration												$f_{xl,xc}$	$k_{dis}X_c$
2	Hydrolysis Carbohydrates	1												$k_{hyd,ch}X_{ch}$
3	Hydrolysis of Proteins		1											$k_{hyd,pr}X_{pr}$
4	Hydrolysis of Lipids	$1 - f_{fa,li}$		$f_{fa,li}$										$k_{hyd,li}X_{li}$
5	Uptake of Sugars	-1				$(1 - Y_{su})f_{bu,su}$	$(1 - Y_{su})f_{pro,su}$	$(1 - Y_{su})f_{ac,su}$	$(1 - Y_{su})f_{h2,su}$		$-\sum_{j=1-9,11-24} C_j v_{j,5}$	$-(Y_{su})N_{bac}$		$k_{m,su} \frac{S_{su}}{K_S + S} X_{su} I_1$
6	Uptake of Amino Acids		-1		$(1 - Y_{aa})f_{va,aa}$	$(1 - Y_{aa})f_{bu,aa}$	$(1 - Y_{aa})f_{pro,aa}$	$(1 - Y_{aa})f_{ac,aa}$	$(1 - Y_{aa})f_{h2,aa}$		$-\sum_{j=1-9,11-24} C_j v_{j,6}$	$N_{aa} - (Y_{aa})N_{bac}$		$k_{m,aa} \frac{S_{aa}}{K_S + S_{AA}} X_{aa} I_1$
7	Uptake of LCFA			-1				$(1 - Y_{fa})0.7$	$(1 - Y_{fa})0.3$			$-(Y_{fa})N_{bac}$		$k_{m,fa} \frac{S_{fa}}{K_S + S_{fa}} X_{fa} I_2$
8	Uptake of Valerate				-1		$(1 - Y_{c4})0.54$	$(1 - Y_{c4})0.31$	$(1 - Y_{c4})0.15$			$-(Y_{c4})N_{bac}$		$k_{m,c4} \frac{S_{va}}{K_S + S_{va}} X_{c4} \frac{1}{1 + S_{bu}/S_{va}} I_2$
9	Uptake of Butyrate					-1		$(1 - Y_{c4})0.8$	$(1 - Y_{c4})0.2$			$-(Y_{c4})N_{bac}$		$k_{m,c4} \frac{S_{bu}}{K_S + S_{bu}} X_{c4} \frac{1}{1 + S_{va}/S_{bu}} I_2$
10	Uptake of Propionate						-1	$(1 - Y_{pro})0.57$	$(1 - Y_{pro})0.43$		$-\sum_{j=1-9,11-24} C_j v_{j,10}$	$-(Y_{pro})N_{bac}$		$k_{m,pr} \frac{S_{pro}}{K_S + S_{pro}} X_{pro} I_2$
11	Uptake of Acetate							-1		$(1 - Y_{ac})$	$-\sum_{j=1-9,11-24} C_j v_{j,11}$	$-(Y_{ac})N_{bac}$		$k_{m,ac} \frac{S_{ac}}{K_S + S_{ac}} X_{ac} I_3$
12	Uptake of Hydrogen								-1	$(1 - Y_{h2})$	$-\sum_{j=1-9,11-24} C_j v_{j,12}$	$-(Y_{h2})N_{bac}$		$k_{m,h2} \frac{S_{h2}}{K_S + S_{h2}} X_{h2} I_1$
13	Decay of $X_{su}$													$k_{dec,xsu}X_{su}$
14	Decay of $X_{aa}$													$k_{dec,xaa}X_{aa}$
15	Decay of $X_{fa}$													$k_{dec,xfa}X_{fa}$
16	Decay of $X_{c4}$													$k_{dec,xc4}X_{c4}$
17	Decay of $X_{pro}$													$k_{dec,xpro}X_{pro}$
18	Decay of $X_{ac}$													$k_{dec,xac}X_{ac}$
19	Decay of $X_{h2}$													$k_{dec,xh2}X_{h2}$
		Monosaccharides (kgCOD m <sup>-3</sup> )	Amino Acids (kgCOD m <sup>-3</sup> )	Long chain fatty acids (kgCOD m <sup>-3</sup> )	Total valerate (kgCOD m <sup>-3</sup> )	Total butyrate (kgCOD m <sup>-3</sup> )	Total propionate (kgCOD m <sup>-3</sup> )	Total acetate (kgCOD m <sup>-3</sup> )	Hydrogen gas (kgCOD m <sup>-3</sup> )	Methane gas (kgCOD m <sup>-3</sup> )	Inorganic Carbon (kmoleC m <sup>-3</sup> )	Inorganic nitrogen (kmoleN m <sup>-3</sup> )	Soluble inerts (kgCOD m <sup>-3</sup> )	Inhibition factors (3,7): $I_1 = I_{pH} I_{N,lim}$ $I_2 = I_{pH} I_{N,lim} I_{h2}$ $I_3 = I_{pH} I_{N,lim} I_{NH3,Xac}$

Fuente: Batstone et al. 2002

Realizado por: Allauca D, 2022.

**Tabla 15-2:** Procesos bioquímicos, para componentes insolubles.

Component →	i	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	Rate ( $\rho_j$ , kg COD·m <sup>-3</sup> ·d <sup>-1</sup> )
j	Process ↓	X <sub>c</sub>	X <sub>ch</sub>	X <sub>pr</sub>	X <sub>li</sub>	X <sub>su</sub>	X <sub>aa</sub>	X <sub>fa</sub>	X <sub>c4</sub>	X <sub>pro</sub>	X <sub>ac</sub>	X <sub>h2</sub>	X <sub>i</sub>	
1	Disintegration	-1	$f_{ch,xc}$	$f_{pr,xc}$	$f_{li,xc}$									$k_{dis}X_c$
2	Hydrolysis Carbohydrates		-1											$k_{hyd,ch}X_{ch}$
3	Hydrolysis of Proteins			-1										$k_{hyd,pr}X_{pr}$
4	Hydrolysis of Lipids				-1									$k_{hyd,li}X_{li}$
5	Uptake of Sugars					$Y_{su}$								$k_{m,su} \frac{S_{su}}{K_s + S_{su}} X_{su} I_1$
6	Uptake of Amino Acids						$Y_{aa}$							$k_{m,aa} \frac{S_{aa}}{K_s + S_{aa}} X_{aa} I_1$
7	Uptake of LCFA							$Y_{fa}$						$k_{m,fa} \frac{S_{fa}}{K_s + S_{fa}} X_{fa} I_2$
8	Uptake of Valerate								$Y_{c4}$					$k_{m,c4} \frac{S_{va}}{K_s + S_{va}} X_{c4} \frac{1}{1 + S_{bu}/S_{va}} I_2$
9	Uptake of Butyrate								$Y_{c4}$					$k_{m,c4} \frac{S_{bu}}{K_s + S_{bu}} X_{c4} \frac{1}{1 + S_{va}/S_{bu}} I_2$
10	Uptake of Propionate									$Y_{pro}$				$k_{m,pr} \frac{S_{pro}}{K_s + S_{pro}} X_{pro} I_2$
11	Uptake of Acetate										$Y_{ac}$			$k_{m,ac} \frac{S_{ac}}{K_s + S_{ac}} X_{ac} I_3$
12	Uptake of Hydrogen											$Y_{h2}$		$k_{m,h2} \frac{S_{h2}}{K_s + S_{h2}} X_{h2} I_1$
13	Decay of X <sub>su</sub>	1				-1								$k_{dec, Xsu} X_{su}$
14	Decay of X <sub>aa</sub>	1					-1							$k_{dec, Xaa} X_{aa}$
15	Decay of X <sub>fa</sub>	1						-1						$k_{dec, Xfa} X_{fa}$
16	Decay of X <sub>c4</sub>	1							-1					$k_{dec, Xc4} X_{c4}$
17	Decay of X <sub>pro</sub>	1								-1				$k_{dec, Xpro} X_{pro}$
18	Decay of X <sub>ac</sub>	1									-1			$k_{dec, Xac} X_{ac}$
19	Decay of X <sub>h2</sub>	1										-1		$k_{dec, Xh2} X_{h2}$
		Composites (kgCOD m <sup>-3</sup> )	Carbohydrates (kgCOD m <sup>-3</sup> )	Proteins (kgCOD m <sup>-3</sup> )	Lipids (kgCOD m <sup>-3</sup> )	Sugar degraders (kgCOD m <sup>-3</sup> )	Amino acid degraders (kgCOD m <sup>-3</sup> )	LCFA degraders (kgCOD m <sup>-3</sup> )	Valerate and butyrate degraders (kgCOD m <sup>-3</sup> )	Propionate degraders (kgCOD m <sup>-3</sup> )	Acetate degraders (kgCOD m <sup>-3</sup> )	Hydrogen degraders (kgCOD m <sup>-3</sup> )	Particulate inerts (kgCOD m <sup>-3</sup> )	Inhibition factors (3,7): I <sub>1</sub> =I <sub>pH</sub> I <sub>Nlim</sub> I <sub>2</sub> =I <sub>pH</sub> I <sub>Nlim</sub> I <sub>H2</sub> I <sub>3</sub> =I <sub>pH</sub> I <sub>Nlim</sub> I <sub>NH3,Xac</sub>

Fuente: (Batstone et al. 2002)

Realizado por: Allauca D, 2022.

En las dos tablas anteriores, se muestra la relación existente entre coeficientes de velocidad ( $v_{i,j}$ ), ecuaciones de velocidad cinética ( $\rho_j$ ), con las componentes solubles ( $S_i$ ) y solidas ( $X_i$ ) en cada proceso bioquímico ( $j$ ) (Batstone et al. 2002, p. 51).

#### 2.5.4 Ecuaciones para fase líquida

Con las variables presentes en este proceso que representan la concentración de los llamado degradadores, una especie química o degradadores del sustrato, se observa en la Tabla 16-2:

**Tabla 16-2:** Variables de estado dinámicas.

Solubles			Partículas		
Nº Estado	Variable	Descripción	Nº Estado	Variable	Descripción
1	S <sub>su</sub>	Monosacáridos	13	X <sub>c</sub>	Sustratos compuestos
2	S <sub>aa</sub>	Aminoácidos	14	X <sub>ch</sub>	carbohidratos
3	S <sub>fa</sub>	ácidos grasos de cadena larga	15	X <sub>pr</sub>	Proteínas
4	S <sub>va</sub>	Valerato total	16	X <sub>li</sub>	Lípidos
5	S <sub>bu</sub>	Butirato total	17	X <sub>su</sub>	Consumidores de azúcar
6	S <sub>pro</sub>	Propianato total	18	X <sub>aa</sub>	Consumidores de aminoácidos
7	S <sub>ac</sub>	Acetato total	19	X <sub>fa</sub>	Consumidores de LCFA
8	S <sub>h2</sub>	Hidrogeno gas	20	X <sub>c4</sub>	Consumidores de valerato y butirato.
9	S <sub>ch4</sub>	Metano gas	21	X <sub>pro</sub>	Consumidores de propianato.
10	S <sub>ic</sub>	Carbono inorgánico	22	X <sub>ac</sub>	Consumidores de acetato.
11	S <sub>in</sub>	nitrógeno inorgánico	23	X <sub>h2</sub>	Consumidores de hidrogeno.
12	S <sub>i</sub>	Solubles inertes	24	X <sub>i</sub>	Partículas inertes.

Fuente: Batstone et al. 2002

Realizado por: Allauca D, 2022.

Para representar el sistema, lo consideramos cerrado, entonces depende de cantidades de masa que ingresan, se acumulan, reaccionan y finalmente salen, convertidos en productos derivados. En la entrada y salida tenemos la razón de flujo de efluente e influente, además de las propiedades físicas del sistema, la acumulación se designa por el termino de variación de especie, y la razón de reacción consiste en obtenerla de una matriz de procesos, entonces:

$$\frac{dS_{liq,i}}{dt} = \frac{q_{in}S_{i,in}}{V_{liq}} - \frac{q_{out}S_{liq,i}}{V_{liq}} + \sum_{j=1}^{19} v_{i,j}\rho_j$$

Donde:

$S_{liq,i}$ : concentración de i en la fase líquida dentro del reactor.

$S_{i,in}$ : concentración de i en el efluente.

$q_{in}$  y  $q_{out}$ : cantidad de materia entrando y saliendo por unidad de tiempo.

$V_{liq}$ : volumen de la fase líquida dentro del reactor.

$v_{i,j}$ : constante estequiométrica del compuesto  $i$  en un proceso  $j$ .

$\rho_j$ : tasa del proceso  $j$ .

Además, ya que es bastante aproximado, en este proceso se asume caudal igual al ingreso y salida:

$$q_{in} = q_{out}$$

$$\frac{dS_{liq,i}}{dt} = \frac{q_{in}}{V_{liq}} (S_{i,in} - S_{liq,i}) + \sum_{j=1}^{19} v_{i,j} \rho_j$$

Teniendo en cuenta las consideraciones anteriores, para los componentes de cada fase, a continuación, se presentan las respectivas ecuaciones:

$$\frac{dS_{su}}{dt} = \frac{q_{in}}{V_{liq}} (S_{su,in} - S_{su}) + \rho_2 + (1 - f_{fa,li}) \cdot \rho_4 - \rho_5 \quad (1)$$

$$\frac{dS_{aa}}{dt} = \frac{q_{in}}{V_{liq}} (S_{aa,in} - S_{aa}) + \rho_3 - \rho_6 \quad (2)$$

$$\frac{dS_{fa}}{dt} = \frac{q_{in}}{V_{liq}} (S_{fa,in} - S_{fa}) + f_{fa,li} \cdot \rho_3 - \rho_7 \quad (3)$$

$$\frac{dS_{va}}{dt} = \frac{q_{in}}{V_{liq}} (S_{va,in} - S_{va}) + (1 - Y_{aa}) \cdot f_{va,aa} \cdot \rho_6 - \rho_8 \quad (4)$$

$$\frac{dS_{bu}}{dt} = \frac{q_{in}}{V_{liq}} (S_{bu,in} - S_{bu}) + (1 - Y_{su}) \cdot f_{bu,su} \cdot \rho_5 + (1 - Y_{aa}) \cdot f_{bu,aa} \cdot \rho_6 - \rho_9 \quad (5)$$

$$\frac{dS_{pro}}{dt} = \frac{q_{in}}{V_{liq}} (S_{pro,in} - S_{pro}) + (1 - Y_{su}) \cdot f_{pro,su} \cdot \rho_5 + (1 - Y_{aa}) \cdot f_{pro,aa} \cdot \rho_6 + (1 - Y_{c4}) \cdot 0,54 \cdot \rho_8 - \rho_{10} \quad (6)$$

$$\begin{aligned} \frac{dS_{ac}}{dt} = & \frac{q_{in}}{V_{liq}} (S_{ac,in} - S_{ac}) + (1 - Y_{su}) \cdot f_{ac,su} \cdot \rho_5 + (1 - Y_{aa}) \cdot f_{ac,aa} \cdot \rho_6 \\ & + (1 - Y_{fa}) \cdot 0,7 \cdot \rho_7 + (1 - Y_{c4}) \cdot 0,31 \cdot \rho_8 + (1 - Y_{c4}) \\ & \cdot 0,8 \cdot \rho_9 + (1 - Y_{pro}) \cdot 0,57 \cdot \rho_{10} - \rho_{11} \end{aligned} \quad (7)$$

$$\begin{aligned} \frac{dS_{h2}}{dt} = & \frac{q_{in}}{V_{liq}} (S_{h2,in} - S_{h2}) + (1 - Y_{su}) \cdot f_{h2,su} \cdot \rho_5 + (1 - Y_{aa}) \cdot f_{h2,aa} \cdot \rho_6 \\ & + (1 - Y_{fa}) \cdot 0,3 \cdot \rho_7 + (1 - Y_{c4}) \cdot 0,15 \cdot \rho_8 + (1 - Y_{c4}) \\ & \cdot 0,2 \cdot \rho_9 + (1 - Y_{pro}) \cdot 0,43 \cdot \rho_{10} - \rho_{12} - \rho_{T,8} \end{aligned} \quad (8)$$

$$\frac{dS_{ch4}}{dt} = \frac{q_{in}}{V_{liq}} (S_{ch4,in} - S_{ch4}) + (1 - Y_{ac}) \cdot \rho_{11} + (1 - Y_{h2}) \cdot \rho_{12} - \rho_{T,9} \quad (9)$$

$$\frac{dS_{IC}^*}{dt} = \frac{q_{in}}{V_{liq}} (S_{IC,in} - S_{IC}) + \sum_{j=1}^{19} \left( \sum_{i=1-9,11-24} C_i v_{i,j} \rho_j \right) - \rho_{T,10} \quad (10)$$

$$\begin{aligned} \frac{dS_{IN}}{dt} = & \frac{q_{in}}{V_{liq}} (S_{IN,in} - S_{IN}) - Y_{su} \cdot N_{bac} \cdot \rho_5 + (N_{aa} - Y_{aa} N_{bac}) \rho_6 \\ & - Y_{fa} \cdot N_{bac} \cdot \rho_7 - Y_{c4} \cdot N_{bac} \cdot \rho_8 - Y_{c4} \cdot N_{bac} \cdot \rho_9 \\ & - Y_{pro} \cdot N_{bac} \cdot \rho_{10} - Y_{ac} \cdot N_{bac} \cdot \rho_{11} - Y_{h2} \cdot N_{bac} \cdot \rho_{12} \end{aligned} \quad (11)$$

$$\begin{aligned} & + (N_{bac} - N_{xc}) \sum_{i=13}^{19} \rho_6 \\ & + (N_{xc} - f_{xl,xc} N_l - f_{sl,xc} N_l - f_{pr,xc} N_{aa}) \rho_1 \\ \frac{dS_I}{dt} = & \frac{q_{in}}{V_{liq}} (S_{I,in} - S_I) + f_{sl,xc} \cdot \rho_1 \end{aligned} \quad (12)$$

\* Mas específicamente, el sumatorio de la ecuación (10) se calcula a continuación:

$$\sum_{j=1}^{19} \left( \sum_{i=1-9,11-24} C_i v_{i,j} \rho_j \right) = \sum_{k=1}^{12} S_k \rho_k + (\rho_{13} + \rho_{14} + \rho_{15} + \rho_{16} + \rho_{17} + \rho_{18} + \rho_{19})$$

Donde:

$$S_1 = -C_{xc} + f_{sl,xc} C_{sl} + f_{ch,xc} C_{ch} + f_{pr,xc} C_{pr} + f_{li,xc} C_{li} + f_{xl,xc} C_{xl}$$

$$S_2 = -C_{ch} + C_{su}$$

$$S_3 = -C_{pr} + C_{aa}$$

$$S_4 = -C_{li} + (1 - f_{fa,li}) C_{su} + f_{fa,li} C_{fa}$$

$$S_5 = -C_{su} + (1 - Y_{su}) (f_{bu,su} C_{bu} + f_{pro,su} C_{pro} + f_{ac,su} C_{ac}) + Y_{su} C_{bac}$$

$$S_6 = -C_{aa} (1 - Y_{aa}) (f_{va,aa} C_{va} + f_{bu,aa} C_{bu} + f_{pro,aa} C_{pro} + f_{ac,aa} C_{ac}) + Y_{aa} C_{bac}$$

$$S_7 = -C_{fa} + (1 - Y_{fa}) \cdot 0,7 \cdot C_{ac} + Y_{fa} C_{bac}$$

$$S_8 = -C_{va} + (1 - Y_{c4}) \cdot 0,54 \cdot C_{pro} + (1 - Y_{c4}) \cdot 0,31 \cdot C_{ac} + Y_{c4} C_{bac}$$

$$S_9 = -C_{bu} + (1 - Y_{c4}) \cdot 0,8 \cdot C_{ac} + Y_{c4} C_{bac}$$

$$S_{10} = -C_{pro} + (1 - Y_{pro}) \cdot 0,57 \cdot C_{ac} + Y_{pro} C_{bac}$$

$$s_{11} = -C_{ac} + (1 - Y_{ac}) \cdot C_{ch4} + Y_{ac} C_{bac}$$

$$s_{12} = (1 - Y_{h2}) \cdot C_{ch4} + Y_{h2} C_{bac}$$

$$s_{13} = -C_{bac} + C_{xc}$$

$$\frac{dX_c}{dt} = \frac{q_{in}}{V_{liq}} (X_{c,in} - X_{su}) - \rho_1 + \sum_{i=13}^{19} \rho_i \quad (13)$$

$$\frac{dX_{ch}}{dt} = \frac{q_{in}}{V_{liq}} (X_{ch,in} - X_{ch}) + f_{ch,xc} \cdot \rho_1 - \rho_2 \quad (14)$$

$$\frac{dX_{pr}}{dt} = \frac{q_{in}}{V_{liq}} (X_{pr,in} - X_{pr}) + f_{pr,xc} \cdot \rho_1 - \rho_3 \quad (15)$$

$$\frac{dX_{li}}{dt} = \frac{q_{in}}{V_{liq}} (X_{li,in} - X_{li}) + f_{li,xc} \cdot \rho_1 - \rho_4 \quad (16)$$

$$\frac{dX_{su}}{dt} = \frac{q_{in}}{V_{liq}} (X_{su,in} - X_{su}) + Y_{su} \cdot \rho_5 - \rho_{13} \quad (17)$$

$$\frac{dX_{aa}}{dt} = \frac{q_{in}}{V_{liq}} (X_{aa,in} - X_{aa}) + Y_{aa} \cdot \rho_6 - \rho_{14} \quad (18)$$

$$\frac{dX_{fa}}{dt} = \frac{q_{in}}{V_{liq}} (X_{fa,in} - X_{fa}) + Y_{fa} \cdot \rho_7 - \rho_{15} \quad (19)$$

$$\frac{dX_{c4}}{dt} = \frac{q_{in}}{V_{liq}} (X_{c4,in} - X_{c4}) + Y_{c4} \cdot \rho_8 + Y_{c4} \cdot \rho_9 - \rho_{16} \quad (20)$$

$$\frac{dX_{pro}}{dt} = \frac{q_{in}}{V_{liq}} (X_{pro,in} - X_{pro}) + Y_{pro} \cdot \rho_{10} - \rho_{17} \quad (21)$$

$$\frac{dX_{ac}}{dt} = \frac{q_{in}}{V_{liq}} (X_{ac,in} - X_{ac}) + Y_{ac} \cdot \rho_{11} - \rho_{18} \quad (22)$$

$$\frac{dX_{h2}}{dt} = \frac{q_{in}}{V_{liq}} (X_{h2,in} - X_{h2}) + Y_{h2} \cdot \rho_{12} - \rho_{19} \quad (23)$$

$$\frac{dX_I}{dt} = \frac{q_{in}}{V_{liq}} (X_{I,in} - X_I) + f_{xl,xc} \cdot \rho_1 \quad (24)$$

### 2.5.5 Velocidad cinética del proceso.

El modelo está compuesto por 3 fases: acidogénesis, acetogénesis y metanogénesis, producidas por varias reacciones simultáneas, y etapas extracelulares: hidrolisis y desintegración. En la Tabla 17-2: se detallan las ecuaciones cinéticas para algunos de los procesos bioquímicos necesarios para el modelo.



**Tabla 17-2:** Tasas para los procesos bioquímicos.

j	Process ↓	Velocidad cinética ( $\rho_j$ )
1	Disintegration	$\rho_1 = k_{dis}X_c$
2	Hydrolysis Carbohydrates	$\rho_2 = k_{hyd,ch}X_{ch}$
3	Hydrolysis of Proteins	$\rho_3 = k_{hyd,pr}X_{pr}$
4	Hydrolysis of Lipids	$\rho_4 = k_{hyd,li}X_{li}$
5	Uptake of Sugars	$\rho_5 = k_{m,su} \frac{S_{su}}{K_{S,su} + S_{su}} X_{su} I_5$
6	Uptake of Amino Acids	$\rho_6 = k_{m,aa} \frac{S_{aa}}{K_{S,aa} + S_{aa}} X_{aa} I_6$
7	Uptake of LCFA	$\rho_7 = k_{m,fa} \frac{S_{fa}}{K_{S,fa} + S_{fa}} X_{fa} I_7$
8	Uptake of Valerate	$\rho_8 = k_{m,c4} \frac{S_{va}}{K_{S,c4} + S_{va}} X_{c4} \frac{S_{va}}{S_{bu} + S_{va} + 1e-6} I_8$
9	Uptake of Butyrate	$\rho_9 = k_{m,c4} \frac{S_{bu}}{K_{S,c4} + S_{bu}} X_{c4} \frac{S_{bu}}{S_{bu} + S_{va} + 1e-6} I_9$
10	Uptake of Propionate	$\rho_{10} = k_{m,pro} \frac{S_{pro}}{K_{S,pro} + S_{pro}} X_{pro} I_{10}$
11	Uptake of Acetate	$\rho_{11} = k_{m,ac} \frac{S_{ac}}{K_{S,ac} + S_{ac}} X_{ac} I_{11}$
12	Uptake of Hydrogen	$\rho_{12} = k_{m,h2} \frac{S_{h2}}{K_{S,h2} + S_{h2}} X_{h2} I_{12}$
13	Decay of $X_{su}$	$\rho_{13} = k_{dec,x_{su}} X_{su}$
14	Decay of $X_{aa}$	$\rho_{14} = k_{dec,x_{aa}} X_{aa}$
15	Decay of $X_{fa}$	$\rho_{15} = k_{dec,x_{fa}} X_{fa}$
16	Decay of $X_{c4}$	$\rho_{16} = k_{dec,x_{c4}} X_{c4}$
17	Decay of $X_{pro}$	$\rho_{17} = k_{dec,x_{pro}} X_{pro}$
18	Decay of $X_{ac}$	$\rho_{18} = k_{dec,x_{ac}} X_{ac}$
19	Decay of $X_{h2}$	$\rho_{19} = k_{dec,x_{h2}} X_{h2}$

Fuente: Batstone et al. 2002

Realizado por: Allauca D, 2022.

El crecimiento de los microorganismos produce un consumo, esto es descrito por el principio del modelo de Monod, siendo ( $X_i$ ) la cantidad específica de un grupo microbiano el cual consume el sustrato ( $S_i$ ), esto tiene el límite que viene dado por el consumo en exceso de cualquiera de los nutrientes (Andrews 1969, p. 96-115).

Al desarrollarse la desintegración e hidrólisis de lípidos, carbohidratos y proteínas que son insolubles, se relacionan con la cinética de primer orden, la cual dicta que la velocidad de estos procesos es proporcional a la concentración del componente involucrado, no es necesaria la diferencia entre hidrólisis exterior e interior de las células, con este antecedente el parámetro ( $k_{hyd,i}$ ) es válido en el caso de cualquier hidrólisis, en cuanto a la tasa de descomposición de microorganismos cumplen una cinética de primer orden enlazada a la constante de respiración endógena ( $k_{dec}$ ) (Andrews 1969, p. 96-115).

### 2.5.6 Procesos inhibitorios

En la DA se presenta cierta resistencia al desarrollo microbiano, podría decirse toxico, pero no letal para su metabolismo, el modelo toma en cuenta solamente las de tipo “bioestatica” siendo posible por los mecanismos, las ecuaciones que representan los inhibidores en las tablas a continuación:

**Tabla 18-2:** Ecuaciones de Inhibidores por Amoniac o H.

$I_{h2,fa} = \frac{[1]}{[1 + S_{h2}/K_{I,h2,fa}]}$	$I_{h2,pro} = \frac{[1]}{[1 + S_{h2}/K_{I,h2,pro}]}$
$I_{h2,c4} = \frac{[1]}{[1 + S_{h2}/K_{I,h2,c4}]}$	$I_{nh3} = \frac{[1]}{[1 + S_{nh3}/K_{I,nh3}]}$

**Fuente:** Batstone et al. 2002

**Realizado por:** Allauca D, 2022.

Este tipo de inhibición se produce por concentración elevada de amoniaco e hidrogeno.

**Tabla 19-2:** Ecuaciones de Inhibición por nitrógeno limitado.

$I_{IN,lim} = \frac{[1]}{[1 + K_{S,IN}/S_{IN}]}$
--

**Fuente:** Batstone et al. 2002

**Realizado por:** Allauca D, 2022.

Esta inhibición está relacionada con la relación C/N, puesto que una concentración mínima de Nitrógeno es requerida

**Tabla 20-2:** Ecuaciones de Inhibición por pH.

$pH < pH_{UL,aa} \quad ; \quad I_{pH,aa} = e^{-3\left(\frac{pH-pH_{UL,aa}}{pH_{UL,aa}-pH_{LL,aa}}\right)^2}$
$pH > pH_{UL,aa} \quad ; \quad I_{pH,aa} = 1$
$pH < pH_{UL,ac} \quad ; \quad I_{pH,ac} = e^{-3\left(\frac{pH-pH_{UL,ac}}{pH_{UL,ac}-pH_{LL,aa}}\right)^2}$
$pH > pH_{UL,ac} \quad ; \quad I_{pH,ac} = 1$
$pH < pH_{UL,h2} \quad ; \quad I_{pH,h2} = e^{-3\left(\frac{pH-pH_{UL,h2}}{pH_{UL,ac}-pH_{LL,h2}}\right)^2}$
$pH > pH_{UL,h2} \quad ; \quad I_{pH,h2} = 1$

**Fuente:** Batstone et al. 2002

**Realizado por:** Allauca D, 2022.

**Tabla 21-2:** Ecuaciones de inhibidores agrupados.

$I_{5,6} = I_{pH,aa} \cdot I_{IN,lim}$	$I_{10} = I_{pH,aa} \cdot I_{IN,lim} \cdot I_{h2,pro}$
$I_7 = I_{pH,aa} \cdot I_{IN,lim} \cdot I_{h2,fa}$	$I_{11} = I_{pH,ac} \cdot I_{IN,lim} \cdot I_{nh3}$
$I_{8,9} = I_{pH,aa} \cdot I_{IN,lim} \cdot I_{h2,c4}$	$I_{12} = I_{pH,h2} \cdot I_{IN,lim}$

**Fuente:** Batstone et al. 2002

**Realizado por:** Allauca D, 2022.

### 2.5.7 Proceso fisicoquímico liquido-liquido.

La variación del pH en la digestión anaerobia tiene una gran influencia en el proceso, a tal punto de que podría detenerlo, esto está plenamente relacionado con ecuaciones diferenciales para los procesos dinámicos y de equilibrio. Se distinguen de los procesos bioquímicos en el tiempo de reacción de estos es lo suficientemente corto como para tomarlos en su estado de equilibrio, y las ecuaciones diferenciales algebraicas se utilizan para describir estos procesos, calculando por medio de estas el pH, haciendo la suposición de equilibrio, esto se encuentra en la Tabla 22-2:

**Tabla 22-2:** Ecuaciones algebraicas para el pH.

$S_{H^+} = -\frac{\Theta}{2} + \frac{1}{2}\sqrt{\Theta^2 + 4K_W}$
$\Theta = S_{cat^+} + S_{nh4^+} - S_{hco3^-} - \frac{S_{ac^-}}{64} - \frac{S_{pro^-}}{112} - \frac{S_{bu^-}}{160} - \frac{S_{va^-}}{208} - S_{an^-}$
$S_{nh4^+} = S_{IN} - S_{nh3}$
$S_{co2} = S_{IC} - S_{hco^-}$

**Fuente:** Batstone et al. 2002

**Realizado por:** Allauca D, 2022.

En estas ecuaciones intervienen las variables de estado, las que se obtienen de las ecuaciones diferenciales detalladas a continuación:

En las ecuaciones 25-26, las correspondientes a cationes y aniones.

$$\frac{dS_{an^-}}{dt} = \frac{q_{in}}{V_{liq}} (S_{an^-,in} - S_{an^-}) \quad (25)$$

$$\frac{dS_{an^-}}{dt} = \frac{q_{in}}{V_{liq}} (S_{an^-,in} - S_{an^-}) \quad (26)$$

En las ecuaciones 27-32, las correspondientes a estados iónicos.

$$\frac{dS_{va^-}}{dt} = -\rho_{A,4} \quad (27)$$

$$\frac{dS_{bu^-}}{dt} = -\rho_{A,5} \quad (28)$$

$$\frac{dS_{pro^-}}{dt} = -\rho_{A,6} \quad (29)$$

$$\frac{dS_{ac^-}}{dt} = -\rho_{A,7} \quad (30)$$

$$\frac{dS_{nh3^-}}{dt} = -\rho_{A,11} \quad (31)$$

$$\frac{dS_{nh3^-}}{dt} = -\rho_{A,11} \quad (32)$$

La velocidad cinética representada por la letra  $\rho$  está representada por las ecuaciones algebraicas en la Tabla 23-2:

**Tabla 23-2:** Ecuaciones para la velocidad cinética (liq. -liq.).

$\rho_{A,4} = k_{A,Bva}(S_{va^-}(K_{a,va} + S_{H^+}) - K_{a,va}S_{va})$
$\rho_{A,5} = k_{A,Bbu}(S_{va^-}(K_{a,va} + S_{H^+}) - K_{a,va}S_{va})$
$\rho_{A,6} = k_{A,Bpro}(S_{va^-}(K_{a,va} + S_{H^+}) - K_{a,va}S_{va})$
$\rho_{A,7} = k_{A,Bac}(S_{va^-}(K_{a,va} + S_{H^+}) - K_{a,va}S_{va})$
$\rho_{A,10} = k_{A,Bco2}(S_{va^-}(K_{a,va} + S_{H^+}) - K_{a,va}S_{va})$
$\rho_{A,11} = k_{A,Bin}(S_{va^-}(K_{a,va} + S_{H^+}) - K_{a,va}S_{va})$

Fuente: Batstone et al. 2002

Realizado por: Allauca D, 2022.

### 2.5.8 Proceso fisicoquímico liquido-gas.

Los gases resultantes de la digestión anaerobia: H<sub>2</sub>, CO<sub>2</sub>, y CH<sub>4</sub>, para saber la concentración de estos en la fase gases hace uso de las ecuaciones descritas a continuación:

$$\frac{dS_{gas,h2}}{dt} = \frac{-S_{gas,h2}q_{gas}}{V_{gas}} + \rho_{T,8} \frac{V_{liq}}{V_{gas}} \quad [kgCOD/m^3] \quad (33)$$

$$\frac{dS_{gas,ch4}}{dt} = \frac{-S_{gas,ch4}q_{gas}}{V_{gas}} + \rho_{T,9} \frac{V_{liq}}{V_{gas}} \quad [kgCOD/m^3] \quad (34)$$

$$\frac{dS_{gas,co2}}{dt} = \frac{-S_{gas,co2}q_{gas}}{V_{gas}} + \rho_{T,10} \frac{V_{liq}}{V_{gas}} \quad [kmole C/m^3] \quad (35)$$

Con este subproceso se hace necesaria la velocidad cinética, esta viene dada por la siguiente relación:

$$\rho_{T,i} = k_L a (S_i - K_{H,i} p_{gas,i})$$

$k_L a$ : producto de la constante global de transferencia y el área de transferencia.

$S_i$ : Concentración del gas  $i$  en fase líquida.

$K_{H,i}$ : Constante de Henry.

$p_{gas,i}$ : Presión parcial del gas  $i$ .

Entonces para los gases resultantes de la digestión anaerobia, las ecuaciones de la velocidad cinética se muestran en la Tabla 24-2:

**Tabla 24-2:** Ecuaciones para la velocidad cinética (liq. - gas).

$\rho_{T,8} = k_L a (S_{h_2} - 16K_{H,h_2} p_{gas,h_2})$
$\rho_{T,9} = k_L a (S_{ch_4} - K_{H,i} p_{gas,ch_4})$
$\rho_{T,10} = k_L a (S_{co_2} - 16K_{H,co_2} p_{gas,co_2})$

**Fuente:** Batstone et al. 2002

**Realizado por:** Allauca D, 2022.

Para saber las presiones de cada uno de los gases resultantes se debe obtener mediante las ecuaciones mostradas en la

**Tabla 25-2:** Ecuaciones de las presiones parciales de los gases.

$p_{gas,ch_4} = S_{gas,ch_4} \frac{RT_{op}}{64}$
$p_{gas,h_2} = S_{gas,h_2} \frac{RT_{op}}{16}$
$p_{gas,co_2} = S_{gas,co_2} RT_{op}$

**Fuente:** Batstone et al. 2002

**Realizado por:** Allauca D, 2022.

Posterior a la información de los cambios en la fase gas, se hace necesario saber el caudal del gas generado, esto se obtiene por la expresión:

$$q_{gas} = k_p (P_{gas} - P_{atm}) \frac{P_{gas}}{P_{atm}}$$

$k_p$ : factor constante para la fricción del gas de salida.

$P_{gas}$ : presión total del gas.

$\frac{P_{gas}}{P_{atm}}$ : Factor compensatorio por la sobrepresión.

Además:

$$P_{gas} = P_{gas,h_2} + P_{gas,ch_4} + P_{gas,co_2} + P_{gas,h_2O}$$

Una de las desventajas del ADM1 es la presentación de las cantidades volumétricas las mismas que no permiten una apreciación directa de la comparación de los parámetros porque se hace necesario normalizar la presión y la temperatura del gas en cuestión. Por esto se hace necesario convertir estos parámetros a unidades de masa como el kg con las ecuaciones mostradas en la Tabla 26-2: ecuaciones de conversión, así se facilita el cálculo energético (Jeppsson 2007, p. 21-23).

**Tabla 26-2:** Ecuaciones para conversión a kg.

$CH_4 = \frac{1 \text{ mol } CH_4}{0,064 \text{ kg DQO}} \cdot \frac{0,016 \text{ kg } CH_4}{1 \text{ mol } CH_4} \cdot S_{gas,CH_4} \left( q_{gas} \cdot \frac{P_{atm}}{p_{gas,total}} \right) \quad \left[ \frac{\text{kg } CH_4}{d} \right]$
$CO_2 = \frac{44 \text{ kg } CO_2}{1 \text{ kmol } CO_2} \cdot S_{gas,CO_2} \left( q_{gas} \cdot \frac{P_{atm}}{p_{gas,total}} \right) \quad \left[ \frac{\text{kg } CO_2}{d} \right]$
$H_2 = \frac{1 \text{ mol } H_2}{0,016 \text{ kg DQO}} \cdot \frac{0,00201588 \text{ kg } H_2}{1 \text{ mol } H_2} \cdot S_{gas,H_2} \left( q_{gas} \cdot \frac{P_{atm}}{p_{gas,total}} \right) \quad \left[ \frac{\text{kg } H_2}{d} \right]$

Fuente: Jeppsson 2007, p. 21-23

Realizado por: Allauca D, 2022.

### 2.5.9 Ecuaciones para el dimensionamiento y TRH

Para poder obtener un volumen aproximado basado en el caudal de producción de excretas de los animales y en el tiempo mínimo de retención de los fluidos (TRH) para que la DA, estos valores se obtendrán con el ayuda los datos de las tablas y ecuaciones descritas a continuación.

**Tabla 27-2:** Valores de peso promedio para especies pecuarias.

Parámetro	Vaca lechera	Otros bovinos	Porcinos de cría	Porcinos de carne	Porcinos madre	Aves de corral
Peso promedio (kg)	400	305	15	100	100	1,8

Fuente: Adaptado de (Dong et al. 2006)

Realizado por: Allauca D, 2022.

**Tabla 28-2:** Valores y características de excretas de algunos animales.

Clase de animal	% por peso vivo		% del material de digestión		Relación C/N	P – Producción de biogás (m3 de gas/1kg SO)
	PE – Estiércol	PO – Orina	% EST Sólidos	% SO Sólidos Orgánicos		
Vacunos	5	4	15-16	13	20	0,250
Cerdos	2	3	16	12	13	0,350
Caprinos, ovejas	3	1,5	30	20	30	0,200
Caballos	5	4	25	15	20	0,250
Avícolas, gallinas	4,5	4,5	25	17	5-8	0,400
Humanos	1	2	20	15	8	0,300

Fuente: Adaptado de (Dong et al. 2006)

Realizado por: Allauca D, 2022.

Ecuaciones para la obtención del TRH y volumen del digestor:

**Tabla 29-2:** Ecuaciones para cálculo de parámetros de entrada.

Cantidad de estiércol [kg/día]	$E = NA * PVP * PE/100$	(36)
Cantidad de ORÍN [kg/día]	$O = NA * PVP * PO/100$	(37)
Materia prima para cargar [kg/día]	$MPC = E + O$	(38)
Porcentaje Solidos Totales [%]	$\%ST = E * \%EST/MPC$	(39)
Solidos Totales [kg/día]	$ST = \%ST * MPC/100$	(40)
Masa de agua para mezcla [kg/día]	$MH_2O = \left( MPC * \frac{ST}{10} \right) - MPC$	(41)
Carga diaria para ingreso a biodigestor [kg/día]	$C = MPC + MH_2O$	(42)
Tiempo de retención hidráulica [día]	$TR = -51,227 * \ln t + 206,72$	(43)
Volumen del digestor [l]	$V_d = C * TR * 1,2$	(44)

Fuente: Adaptado de (Armando & Romero 2013)

Realizado por: Allauca D, 2022.

NA: cantidad de animales de cada especie.

PVP: peso vivo del animal [kg]

PE: producción de excreta del animal en un día [% peso vivo]

PO: producción de orín del animal en un día [% peso vivo]

E: estiércol [kg/día]

O: orín [kg/día]

MPC: materia para cargar el biodigestor [kg/día]

%EST: Porcentaje de solidos en excretas [%]

%ST: porcentaje de solidos totales en la materia de carga [kg/día]

ST: cantidad de solidos contenidos en la materia de carga [kg/día]

T: temperatura promedio ambiental [°C]

C: carga diaria para alimentar el biodigestor [l/día]

%SO: porcentaje de materia orgánica de cada especie [%]

### 2.5.10 Parámetros de entrada.

Para el funcionamiento del modelo matemático se hace necesario el uso de parámetros específicos para cada sustrato, a continuación, parámetros de uso recomendados por los desarrolladores del ADM1 (Batstone et al. 2002).

**Tabla 30-2:** Parámetros estequiométricos.

Parameter	Value	Unit	Process(es)	Comment
$f_{sI,xc}$	0.1	–	1	
$f_{xI,xc}$	0.2	–	1	
$f_{ch,xc}$	0.2	–	1	
$f_{pr,xc}$	0.2	–	1	
$f_{ti,xc}$	0.3	–	1	Note: $1 - f_{ch,xc} - f_{pr,xc} - f_{sI,xc} - f_{xI,xc} - f_{ti,xc} = 0$
$N_{xc}$	0.0376/14	kmole N (kg COD) <sup>-1</sup>	1, 13-19	to maintain N mass balance for disintegration
$N_I$	0.06/14	kmole N (kg COD) <sup>-1</sup>	1	6% on weight basis in benchmark ASM
$N_{aa}$	0.007	kmole N (kg COD) <sup>-1</sup>	1,6	
$C_{xc}$	0.02786	kmole C (kg COD) <sup>-1</sup>	1,13-19	$C_{13}$ in Eq. 10
$C_{sI}$	0.03	kmole C (kg COD) <sup>-1</sup>	1	$C_{12}$ in Eq. 10
$C_{ch}$	0.0313	kmole C (kg COD) <sup>-1</sup>	1,2	$C_{14}$ in Eq. 10
$C_{pr}$	0.03	kmole C (kg COD) <sup>-1</sup>	1,3	$C_{15}$ in Eq. 10
$C_{iI}$	0.022	kmole C (kg COD) <sup>-1</sup>	1,4	$C_{16}$ in Eq. 10
$C_{xI}$	0.03	kmole C (kg COD) <sup>-1</sup>	1	$C_{24}$ in Eq. 10
$C_{su}$	0.0313	kmole C (kg COD) <sup>-1</sup>	2,5	$C_1$ in Eq. 10
$C_{aa}$	0.03	kmole C (kg COD) <sup>-1</sup>	3,6	$C_2$ in Eq. 10
$f_{fa,ti}$	0.95	–	4	
$C_{fa}$	0.0217	kmole C (kg COD) <sup>-1</sup>	4,7	$C_3$ in Eq. 10
$f_{h2,su}$	0.19	–	5	
$f_{bu,su}$	0.13	–	5	
$f_{pro,su}$	0.27	–	5	
$f_{ac,su}$	0.41	–	5	
$N_{bac}$	0.08/14	kmole N (kg COD) <sup>-1</sup>	5-19	8% on weight basis in benchmark ASM
$C_{bu}$	0.025	kmole C (kg COD) <sup>-1</sup>	5,6,9	$C_5$ in Eq. 10
$C_{pro}$	0.0268	kmole C (kg COD) <sup>-1</sup>	5,6,8,10	$C_6$ in Eq. 10
$C_{ac}$	0.0313	kmole C (kg COD) <sup>-1</sup>	5-11	$C_7$ in Eq. 10
$C_{bac}$	0.0313	kmole C (kg COD) <sup>-1</sup>	5-19	$C_{17-23}$ in Eq. 10
$Y_{su}$	0.1	–	5	$\text{kg COD}_x (\text{kg COD}_s)^{-1}$
$f_{h2,aa}$	0.06	–	6	
$f_{va,aa}$	0.23	–	6	
$f_{bu,aa}$	0.26	–	6	
$f_{pro,aa}$	0.05	–	6	
$f_{ac,aa}$	0.40	–	6	
$C_{va}$	0.024	kmole C (kg COD) <sup>-1</sup>	6,8	$C_4$ in Eq. 10
$Y_{aa}$	0.08	–	6	$\text{kg COD}_x (\text{kg COD}_s)^{-1}$
$Y_{fa}$	0.06	–	7	$\text{kg COD}_x (\text{kg COD}_s)^{-1}$
$Y_{c4}$	0.06	–	8,9	$\text{kg COD}_x (\text{kg COD}_s)^{-1}$
$Y_{pro}$	0.04	–	10	$\text{kg COD}_x (\text{kg COD}_s)^{-1}$
$C_{ch4}$	0.0156	kmole C (kg COD) <sup>-1</sup>	11,12	$C_9$ in Eq. 10
$Y_{ac}$	0.05	–	11	$\text{kg COD}_x (\text{kg COD}_s)^{-1}$
$Y_{h2}$	0.06	–	12	$\text{kg COD}_s (\text{kg COD}_x)^{-1}$

-Note that  $C_{h2}$  and  $C_{IN}$ , i.e.  $C_8$  and  $C_{11}$ , are equal to zero in Equation 10.

Fuente: (Batstone et al. 2002)



**Tabla 31-2:** Parámetros bioquímicos.

Parameter	Value	Unit	Process(es)	Comment
$k_{dis}$	0.5	d <sup>-1</sup>	1	
$k_{hyd,ch}$	10	d <sup>-1</sup>	2	
$k_{hyd,pr}$	10	d <sup>-1</sup>	3	
$k_{hyd,li}$	10	d <sup>-1</sup>	4	
$K_{S,IN}$	1e-4	M	5-12	
$k_{m,su}$	30	d <sup>-1</sup>	5	
$K_{S,su}$	0.5	kg COD m <sup>-3</sup>	5	
$pH_{UL,aa}$	5.5	–	5-10	in $I_{5-10}$
$pH_{LL,aa}$	4	–	5-10	in $I_{5-10}$
$k_{m,aa}$	50	d <sup>-1</sup>	6	
$K_{S,aa}$	0.3	kg COD m <sup>-3</sup>	6	
$k_{m,fa}$	6	d <sup>-1</sup>	7	
$K_{S,fa}$	0.4	kg COD m <sup>-3</sup>	7	
$K_{Ih2,fa}$	5e-6	kg COD m <sup>-3</sup>	7	in $I_7$
$k_{m,c4}$	20	d <sup>-1</sup>	8,9	
$K_{S,c4}$	0.2	kg COD m <sup>-3</sup>	8,9	
$K_{Ih2,c4}$	1e-5	kg COD m <sup>-3</sup>	8,9	in $I_8$ and $I_9$
$k_{m,pro}$	13	d <sup>-1</sup>	10	
$K_{S,pro}$	0.1	kg COD m <sup>-3</sup>	10	
$K_{Ih2,pro}$	3.5e-6	kg COD m <sup>-3</sup>	10	in $I_{10}$
$k_{m,ac}$	8	d <sup>-1</sup>	11	
$K_{S,ac}$	0.15	kg COD m <sup>-3</sup>	11	
$K_{I,nh3}$	0.0018	M	11	in $I_{11}$
$pH_{UL,ac}$	7	–	11	in $I_{11}$
$pH_{LL,ac}$	6	–	11	in $I_{11}$
$k_{m,h2}$	35	d <sup>-1</sup>	12	
$K_{S,h2}$	7e-6	kg COD m <sup>-3</sup>	12	
$pH_{UL,h2}$	6	–	12	in $I_{12}$
$pH_{LL,h2}$	5	–	12	in $I_{12}$
$k_{dec,Xsu}$	0.02	d <sup>-1</sup>	13	
$k_{dec,Xaa}$	0.02	d <sup>-1</sup>	14	
$k_{dec,Xfa}$	0.02	d <sup>-1</sup>	15	
$k_{dec,Xc4}$	0.02	d <sup>-1</sup>	16	
$k_{dec,Xpro}$	0.02	d <sup>-1</sup>	17	
$k_{dec,Xac}$	0.02	d <sup>-1</sup>	18	
$k_{dec,Xh2}$	0.02	d <sup>-1</sup>	19	

The unit M is defined as kmole m<sup>-3</sup> according to Batstone *et al.* (2002).

**Fuente:** Batstone et al. 2002

**Realizado por:** Allauca D, 2022.

**Tabla 32-2:** Parámetros fisicoquímicos.

Parameter	Value	Unit	Comment
$R$	0.083145	bar M <sup>-1</sup> K <sup>-1</sup>	
$T_{base}$	298.15	K	
$T_{op}$	308.15	K	user defined
$K_w$	$\exp\left(\frac{55900}{R*100} * \left(\frac{1}{T_{base}} - \frac{1}{T_{op}}\right)\right)$	M 10 <sup>-14</sup>	≈ 2.08e-14
$K_{a,va}$	10 <sup>-4.86</sup>	M	≈ 1.38e-5
$K_{a,bu}$	10 <sup>-4.82</sup>	M	≈ 1.5e-5
$K_{a,pro}$	10 <sup>-4.88</sup>	M	≈ 1.32e-5
$K_{a,ac}$	10 <sup>-4.76</sup>	M	≈ 1.74e-5
$K_{a,co2}$	10 <sup>-6.35</sup> $\exp\left(\frac{7646}{R*100} \left(\frac{1}{T_{base}} - \frac{1}{T_{op}}\right)\right)$	M	≈ 4.94e-7
$K_{a,IN}$	10 <sup>-9.25</sup> $\exp\left(\frac{51965}{R*100} \left(\frac{1}{T_{base}} - \frac{1}{T_{op}}\right)\right)$	M	≈ 1.11e-9
$k_{A,Bva}$	1e10	M <sup>-1</sup> d <sup>-1</sup>	set to be at least three orders of magnitude higher than the fastest time constant of the system
$k_{A,Bbu}$	1e10	M <sup>-1</sup> d <sup>-1</sup>	
$k_{A,Bpro}$	1e10	M <sup>-1</sup> d <sup>-1</sup>	
$k_{A,Bac}$	1e10	M <sup>-1</sup> d <sup>-1</sup>	
$k_{A,Bco2}$	1e10	M <sup>-1</sup> d <sup>-1</sup>	
$k_{A,BIN}$	1e10	M <sup>-1</sup> d <sup>-1</sup>	
$P_{atm}$	1.013	bar	
$p_{gas,h2o}$	0.0313 $\exp\left(5290 \left(\frac{1}{T_{base}} - \frac{1}{T_{op}}\right)\right)$	bar	≈ 0.0557
$k_p$	5e4	m <sup>3</sup> d <sup>-1</sup> bar <sup>-1</sup>	
$k_{La}$	200	d <sup>-1</sup>	
$K_{H,co2}$	0.035 $\exp\left(\frac{-19410}{R*100} \left(\frac{1}{T_{base}} - \frac{1}{T_{op}}\right)\right)$	M <sub>iq</sub> bar <sup>-1</sup>	≈ 0.0271
$K_{H,ch4}$	0.0014 $\exp\left(\frac{-14240}{R*100} \left(\frac{1}{T_{base}} - \frac{1}{T_{op}}\right)\right)$	M <sub>iq</sub> bar <sup>-1</sup>	≈ 0.00116
$K_{H,h2}$	7.8e-4 $\exp\left(\frac{-4180}{R*100} \left(\frac{1}{T_{base}} - \frac{1}{T_{op}}\right)\right)$	M <sub>iq</sub> bar <sup>-1</sup>	≈ 7.38e-4

### Physical parameter values

Parameter	Value	Unit	Comment
$V_{liq}$	3400	m <sup>3</sup>	
$V_{gas}$	300	m <sup>3</sup>	

Fuente: Batstone et al. 2002

Realizado por: Allauca D, 2022.

#### 2.5.11 Parámetros específicos de las excretas de cerdo y valores de entrada al ADM1.

Para obtener resultados más cercanos a la realidad, se muestran a continuación los parámetros de entrada y valores iniciales de las variables requeridas que se refieren a las excretas de cerdo, estos valores son presentados en las dos siguientes tablas (Jurado et al. 2016).

**Tabla 33-2:** Valores iniciales de entrada al ADM1.

Variable	Ganado porcino	Unidades
$S_{su}$	0	kgDQO/m <sup>3</sup>
$S_{aa}$	7,0004	kgDQO/m <sup>3</sup>
$S_{fa}$	7,8625	kgDQO/m <sup>3</sup>
$S_{va}$	0	kgDQO/m <sup>3</sup>
$S_{bu}$	1,4726	kgDQO/m <sup>3</sup>
$S_{pro}$	3,1302	kgDQO/m <sup>3</sup>
$S_{ac}$	12,8575	kgDQO/m <sup>3</sup>
$S_{IC}$	0,1961	kgDQO/m <sup>3</sup>
$S_{IN}$	0,2701	kgDQO/m <sup>3</sup>
$S_I$	1,6502	kgDQO/m <sup>3</sup>
$X_{xc}$	0	kgDQO/m <sup>3</sup>
$X_{ch}$	2,257	kgDQO/m <sup>3</sup>
$X_{pr}$	10,36	kgDQO/m <sup>3</sup>
$X_{li}$	12,0805	kgDQO/m <sup>3</sup>
$X_{su}$	0	kgDQO/m <sup>3</sup>
$X_{aa}$	0	kgDQO/m <sup>3</sup>
$X_{fa}$	0	kgDQO/m <sup>3</sup>
$X_{c4}$	0	kgDQO/m <sup>3</sup>
$X_{pro}$	0	kgDQO/m <sup>3</sup>
$X_{ac}$	0	kgDQO/m <sup>3</sup>
$X_{h2}$	0	kgDQO/m <sup>3</sup>
$X_I$	4,5769	kgDQO/m <sup>3</sup>
$S_{cat}$	0,04	kmol/m <sup>3</sup>
$S_{an}$	0,02	kmol/m <sup>3</sup>

Fuente: Adaptado de (Jurado et al. 2016)

Realizado por: Allauca D, 2022.

**Tabla 34-2:** Parámetros de entrada al ADM1.

Variable	Ganado porcino	Unidades
$k_{dis}$	0,096	kgDQO/m <sup>3</sup>
$k_{hyd,pr}$	3,00E3	kgDQO/m <sup>3</sup>
$k_{hyd,li}$	2,80E04	kgDQO/m <sup>3</sup>
$k_{m,fa}$	0,93	kgDQO/m <sup>3</sup>
$k_{m,c4}$	13,1	kgDQO/m <sup>3</sup>
$k_{m,pro}$	6,56	kgDQO/m <sup>3</sup>
$k_{m,ac}$	45,02	kgDQO/m <sup>3</sup>

Fuente: Adaptado de (Batstone et al. 2002)

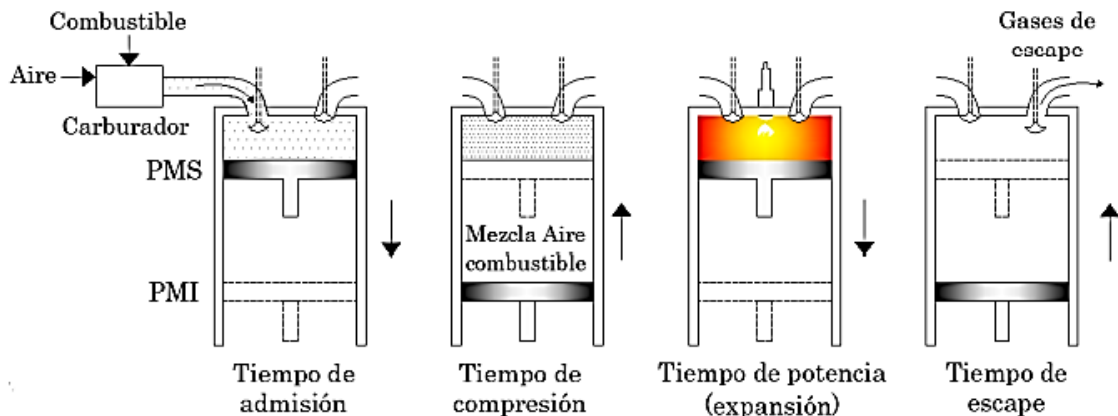
Realizado por: Allauca D, 2022.

## 2.6 Motor de combustión interna (MCI).

Posterior a la obtención de biogás, se hace necesaria la tecnología para convertirlo en energía lo más eficientemente posible, una de las más difundidas es el motor de combustión interna (MCI), turbina de gas, siendo este el más desarrollado, transforma la energía química del biogás en energía mecánica, mediante la combustión de un llamado “fluido de trabajo” que es una mezcla aire-combustible dentro de sus cámaras de combustión, siendo esta iniciada por una chispa (MEP) o por autoencendido debido a la alta compresión (MEC), pudiendo ser convertida a energía eléctrica acoplando un generador (Cengel & Boles 2011, p. 78).

### 2.6.1 Motor de encendido por chispa (MEP)

Fueron diseñados para poder funcionar con gas natural, por lo que al realizar unas pequeñas modificaciones pueden ser alimentados con biogás. El funcionamiento básico de estos motores inicia al abrirse la o las válvulas de admisión para el ingreso de combustible al cilindro, con en la Ilustración 14 - 2:, dicha mezcla aire combustible es dosificada electrónicamente en el caso de inyección o en un carburador, posteriormente esta mezcla es comprimida y antes de llegar al PMS una bujía controlada electrónicamente o mecánicamente produce una chispa que prende la mezcla en un proceso a volumen constante lo que aumenta la presión y temperatura, esto expande los gases y realizando un trabajo mecánico, finalmente estos gases generados son expulsados por la válvula de escape. En estos motores el control de potencia y velocidad es gracias a una válvula mariposa que origina una caída de presión en el suministro aire-combustible (Pulkrabek 2007).



**Ilustración 14 - 2:** Funcionamiento MCI.

Fuente: Cengel y Boles 2011

### 2.6.2 Modificaciones en motores MEP para uso con biogás.

La modificación necesaria es la adición de un mezclador que realice una mezcla homogénea de biogás y aire, y debido al mayor octanaje del biogás que el de la gasolina, motores de mayor relación de compresión pueden ser utilizados lo que mejora el rendimiento compensando el bajo poder calorífico del biogás (Gómez, Vargas & Leal 2014, p. 152-164).

El contenido de CO<sub>2</sub> del biogás hace que su combustión resulte algo “lenta” comparada con la de otros combustibles convencionales, y con ello menor temperatura de llama y trabajo reducido, siendo necesario que el tiempo de ignición (ángulo de encendido) sea adelantado para que el biogás pueda quemarse adecuadamente (Mantilla Gonzalez, Aguirre Junco & Sarmiento Pinilla 2008).

Para el uso de estos motores en regiones como la sierra ecuatoriana debido a la reducida presión atmosférica, y por consiguiente la menor velocidad de aire al ingresar al cilindro, se puede usar turbocargadores que usan los gases de escape o supercargadores que utilizan la energía mecánica del motor a un compresor volumétrico, para sobrealimentar de aire al motor (Pulkrabek 2007).



**Ilustración 15 - 2:** Generador a biogás.

Fuente: Aqualimpia Engineering e.K. 2022

## **2.7 Marco legal.**

### **2.7.1 Constitución de la Republica del Ecuador**

Art3. Deberes primordiales del Estado, numeral 7.- “Proteger el patrimonio natural y cultural del país” (Constituyente 2008).

Art.14. “Se reconoce el derecho de la población a vivir en un ambiente sano y ecológicamente equilibrado que garantice la sostenibilidad y el buen vivir, “sumak kawsay” (Constituyente 2008).

### **2.7.2 *Derechos de la naturaleza***

Art. 71.- La naturaleza o Pacha Mama, donde se reproduce y realiza la vida, tiene derecho a que se respete integralmente su existencia y el mantenimiento y regeneración de sus ciclos vitales, estructura, funciones y procesos evolutivos. Toda persona, comunidad, pueblo o nacionalidad podrá exigir a la autoridad el cumplimiento de los derechos de la naturaleza. Para aplicar e interpretar estos derechos se observarán los principios establecidos en la Constitución, en lo que proceda. El Estado incentivará a las personas naturales y jurídicas, y a los colectivos, para que protejan la naturaleza, y promoverá el respeto a todos los elementos que forman un ecosistema (Constituyente 2008).

Art. 72.- La naturaleza tiene derecho a la restauración. Esta restauración será independiente de la obligación que tienen el Estado y las personas naturales o jurídicas de indemnizar a los individuos y colectivos que dependan de los sistemas naturales afectados. En los casos de impacto ambiental grave o permanente, incluidos los ocasionados por la explotación de los recursos naturales no renovables, el Estado establecerá los mecanismos más eficaces para alcanzar la restauración, y adoptará las medidas adecuadas para eliminar o mitigar las consecuencias ambientales nocivas (Constituyente 2008).

Art. 73.- El Estado aplicará medidas de precaución y restricción para las actividades que puedan conducir a la extinción de especies, la destrucción de ecosistemas o la alteración permanente de los ciclos naturales. Se prohíbe la introducción de organismos y material orgánico e inorgánico que puedan alterar de manera definitiva el patrimonio genético nacional (Constituyente 2008).

Art. 313.- El Estado se reserva el derecho de administrar, regular, controlar y gestionar los sectores estratégicos, de conformidad con los principios de sostenibilidad ambiental, precaución, prevención y eficiencia. Los sectores estratégicos, de decisión y control exclusivo del Estado, son aquellos que por su trascendencia y magnitud tienen decisiva influencia económica, social, política o ambiental, y deberán orientarse al pleno desarrollo de los derechos y al interés social. Se consideran sectores estratégicos la energía en todas sus formas, las telecomunicaciones, los recursos naturales no renovables, el transporte y la refinación de hidrocarburos, la biodiversidad y el patrimonio genético, el espectro radioeléctrico, el agua, y los demás que determine la ley (Constituyente 2008).

Art. 317.- Los recursos naturales no renovables pertenecen al patrimonio inalienable e imprescriptible del Estado. En su gestión, el estado priorizará la responsabilidad intergeneracional, la conservación de la naturaleza, el cobro de regalías u otras contribuciones no tributarias y de participaciones empresariales; y minimizará los impactos negativos de carácter ambiental, cultural, social y económico (Constituyente 2008).

## **CAPITULO III**

### **3. Marco metodológico**

#### **3.1 Perspectiva metodológica y tipo de investigación**

La orientación del presente trabajo es hacer una propuesta tecnológica para mejorar la producción de ganado porcino de la granja de cerdos disminuyendo la mortalidad por temperatura baja, específicamente en el cantón Chambo, con interés en aumentar las ganancias por esta actividad y a su vez aprovechar la energía proveniente de un biodigestor para cocción de alimentos para el ganado porcino y actividades de la vida diaria de las personas que habitan la granja.

Debido a que es una investigación específica, se puede medir datos observados, y está enfocada en la Granja de producción de ganado porcino, es una investigación cuantitativa.

En cuanto al tipo de investigación, por el nivel de abstracción es el tipo de aplicada debido a que los resultados de la investigación realizada se pueden aplicar directamente. Por su alcance, es un estudio descriptivo, ya que corresponde al registro y presentación de una propuesta técnica para mejorar la producción de ganado porcino en la granja.

#### **3.2 Límites de la investigación**

La presente propuesta tecnológica se desarrolla en el año 2022, con una duración de 16 semanas, se realizará en el cantón Chambo. Además, la información de campo requerida para la selección del biodigestor para la granja se obtendrá por observación directa en el lugar de estudio.

Como la investigación está centrada en un lugar determinado, el costo del desarrollo resulta bastante accesible, entonces es factible económicamente y no hay impedimento de este tipo, ni legal o reglamento, que pueda limitar el desarrollo de la propuesta.

#### **3.3 Contexto y unidad de análisis: Población y muestra**

##### **3.3.1 Población y muestra**

La población son todas las cabezas de ganado porcino, para la capacidad instalada de la granja: 50 machos para carne, 30 madres, las cuales producen 50 lechones/mes, la cantidad de lechones se mantiene en este número debido a que estos son vendidos y se hace una rotación de las madres en proceso de gestación, procurando mantener la granja a plena capacidad en todo momento.

La muestra por ser manejable serán las 50 machos, 30 madres y 50 lechones.

En este caso, la población y muestra son los mismos, la investigación tomara todas las áreas requeridas para el análisis integral de la propuesta de biodigestor para la granja de producción de ganado porcino.

### **3.4 Métodos y recursos empleados**

#### **3.4.1 Métodos**

- **Observación**

Es totalmente necesaria para reconocer las características del lugar de estudio.

- **Recolección de datos**

Se realizará mediante mediciones de campo, fichas y datos tabulados de trabajos similares.

- **Procesamiento y análisis de información**

Posterior a obtener los datos serán procesados y analizados con base en un modelo matemático que ha sido comprobado en países con tecnologías y mejores avances en biodigestores, además de contrastar los resultados con datos de fabricantes de países cercanos.

#### **3.4.2 Recursos empleados**

- **Equipos**

Laptop

Cronometro

Calculadora científica

Cámara fotográfica

- **Materiales**

Útiles de escritorio

Otros materiales necesarios para la investigación

Catálogo de capacidades y dimensiones de biodigestores prefabricados disponibles en el mercado.

- **Herramientas**

Instrumentos de medición de longitud

Demás utensilios para medir volumen

- **Otros recursos**



Transporte

Matlab y Simulink

### **3.5 Procedimiento de recolección y análisis de datos**

#### **3.5.1 *Recolección de datos***

- **Datos de campo**

Los datos fueron recolectados directamente en la granja objeto de investigación, haciendo uso de:

Observación de la zona de investigación.

Levantamiento del área de la zona de investigación.

Toma de cantidades de excretas por unidad de tiempo ( $m^3/d$ ).

Recolección de las características del clima de la zona de estudio con base en el diálogo con los pobladores cercanos, y datos históricos de trabajos anteriores relacionados.

- **Datos estadísticos**

Estos fueron obtenidos a partir de fuentes informativas existentes (bibliográfica y documental), como manuales, proyectos de construcción, datos tabulados y demás.

También fueron tomados en cuenta los datos históricos de consumos de energía eléctrica y datos de gastos en energía térmica (GLP y eléctrico).

#### **3.5.2 *Procesamiento de información***

Para este proceso se agrupó, analizó y simuló los datos, haciendo uso de programas computacionales como:

- AutoCAD
- Paquete office, especialmente Excel
- Matlab Simulink

En este apartado se tuvo especial cuidado en las mediciones para la correcta selección del biodigestor y posterior evaluación de los beneficios derivados su uso.

#### **3.5.3 *Análisis e interpretación de la información.***

Los datos, una vez procesados, y simulados, fueron analizados y son parte fundamental para la selección del biodigestor adecuado para la capacidad de la granja, y posterior cálculo del beneficio económico y social derivado del aprovechamiento de los productos finales del biodigestor, esto contrastado con los gastos energéticos para la producción de ganado porcino.

### 3.6 Implementación del modelo


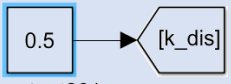
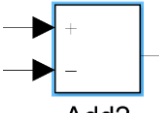
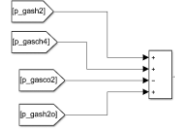
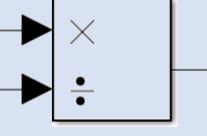
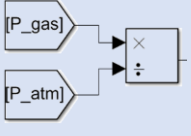

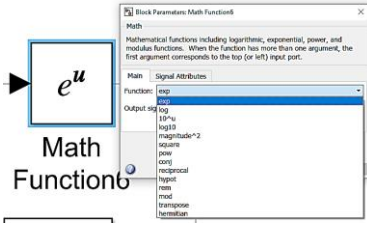
El modelo matemático fue implementado en la interfaz de MATLAB/Simulink®, por medio de bloques S functions que permiten usar las ecuaciones diferenciales del modelo, teniendo disponible el sistema resuelto para cada instante de tiempo de la simulación. Para las variables de entrada, parámetros, y condiciones iniciales se creó una máscara que facilite ingresar los datos y la visualización de los resultados.

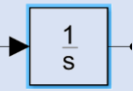
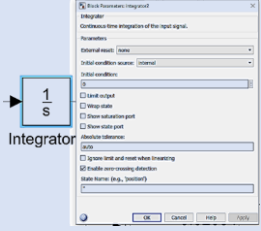
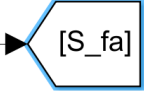
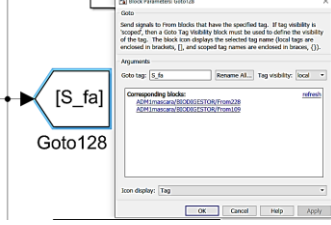
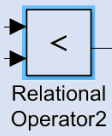
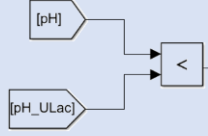
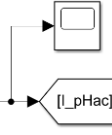
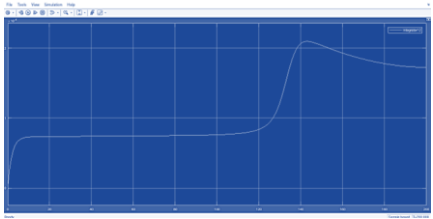
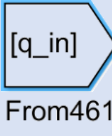
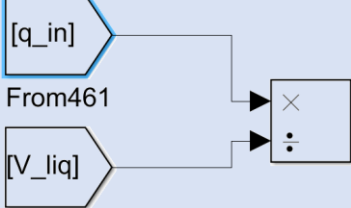
Debido al número de variables, fueron necesarios bastos recursos computacionales, debido a que, para este proceso en particular, las reacciones bioquímicas se desarrollan en el rango de días, mientras que las fisicoquímicas en el rango de los segundos, que provocan una restricción numérica a la cual se la conoce como rigidez. El solucionador elegido para esta particularidad fue el ODE23tb, debido a que se ajusta a este tipo de problemas de elevada rigidez y baja tolerancia.

#### 3.6.1 Diagramas de bloques en Simulink ®

El modelo se desarrolló esencialmente haciendo uso de bloques de Simulink ®, los que fueron conectados y ordenados para representar cada una de las ecuaciones diferenciales presentes en el modelo ADM1. A continuación se mostrará una breve descripción de su funcionamiento. Para modificar o cambiar opciones de cada uno de estos bloques, basta con hacer doble clic sobre ellos, además para llamarlo o utilizarlo se escribe directamente el nombre sobre el área en blanco del programa. En la Tabla 1-3: se describen las funciones de los bloques utilizados para implementar el modelo matemático.

**Tabla 1-3:** Variables de entrada.

Símbolo	Función	Ejemplo
 Constant265	Declara una constante	 Constant261
 Add2	Realiza suma algebraica entre varias entradas	
	Realiza el producto o división entre varias entradas	
 Math Function6	Realiza la operación matemática designada	 Math Function6

 <p>Integrator2</p>	<p>Devuelve la integral de la señal de entrada en cada instante de tiempo.</p>	
 <p>Goto128</p>	<p>Almacena un valor con el nombre designado.</p>	
 <p>Relational Operator2</p>	<p>Relaciona dos entradas y devuelve un valor de unidad si se cumple la relación, y un valor de cero si no se cumple.</p>	
 <p>[I_pHac]</p>	<p>Grafica el comportamiento de la entrada en función del tiempo</p>	
 <p>From461</p>	<p>Utiliza un valor almacenado en un Goto</p>	

Fuente: Centro de ayuda Simulink®, 2022

Realizado por: Allauca D, 2022.

### 3.6.2 Subsistemas

Para representar adecuadamente cada una de las ecuaciones y parámetros, se desarrollaron fácilmente como se muestra a continuación, cada una de las ecuaciones y el diseño de parámetros se detallan de manera grafica para su mejor entendimiento, en estructuras similares, solamente se grafica una forma tipo.

### 3.6.2.1 Parámetros.

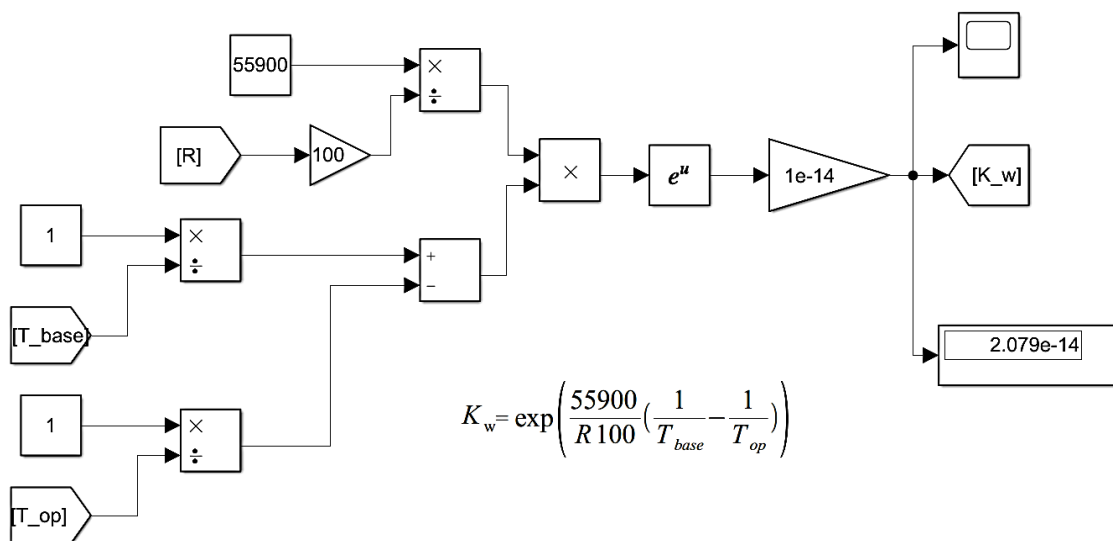
Todos y cada uno de los parámetros necesarios fueron designados como se muestra en la Ilustración 1 - 3:.



**Ilustración 1 - 3:** Asignación de parámetros en Simulink ®.

**Realizado por:** Allauca D, 2022.

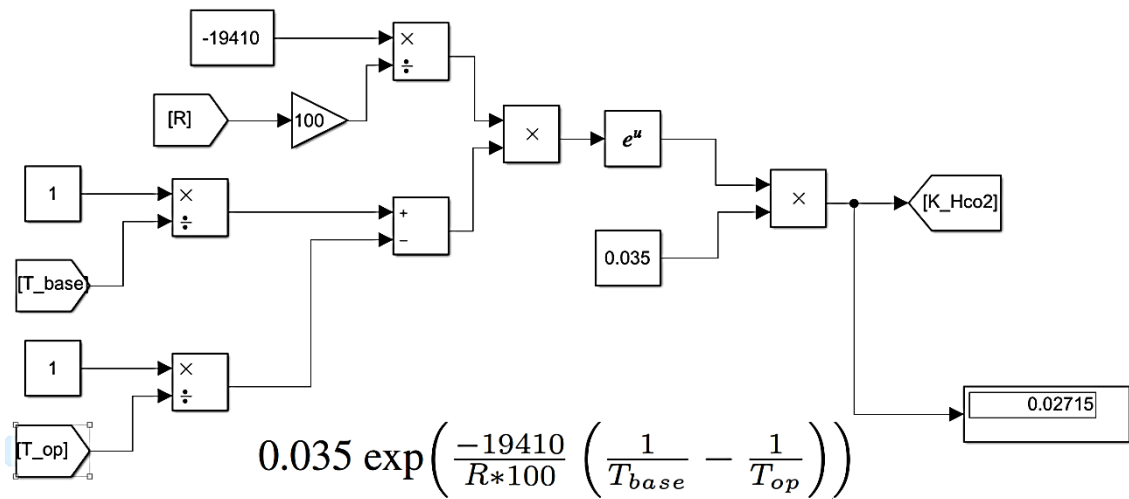
En el caso de los parámetros  $K_w$ ,  $K_{H,i}$  y  $p_{\text{gas.H}_2\text{O}}$ , requieren un cálculo atado a la temperatura de entrada, se hace necesario representarlo de la siguiente forma:



**Ilustración 2 - 3:** Representación del parámetro  $K_w$  en Simulink ®.

**Realizado por:** Allauca D, 2022.

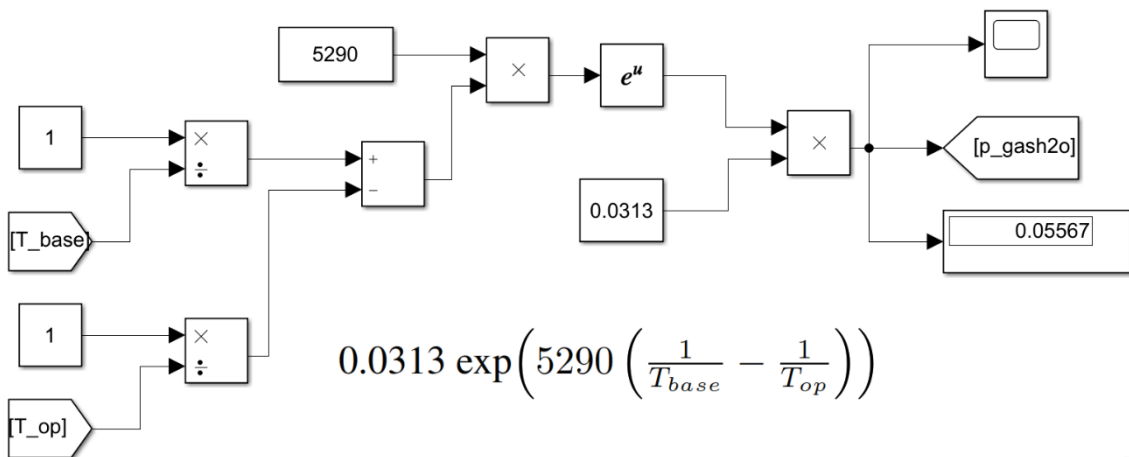
En el caso de los parámetros de la forma  $K_{H,i}$  :  $K_{H,CH_4}$   $K_{H,h_2}$  son similares en su forma, la representación a continuación:



**Ilustración 3 - 3:** Representación del parámetro de la forma  $K_{H,i}$  en Simulink ®.

**Realizado por:** Allauca D, 2022.

La ecuación algebraica de  $p_{gas,H2O}$  a continuación:



**Ilustración 4 - 3:** Representación del parámetro  $p_{gas,H2O}$  en Simulink ®.

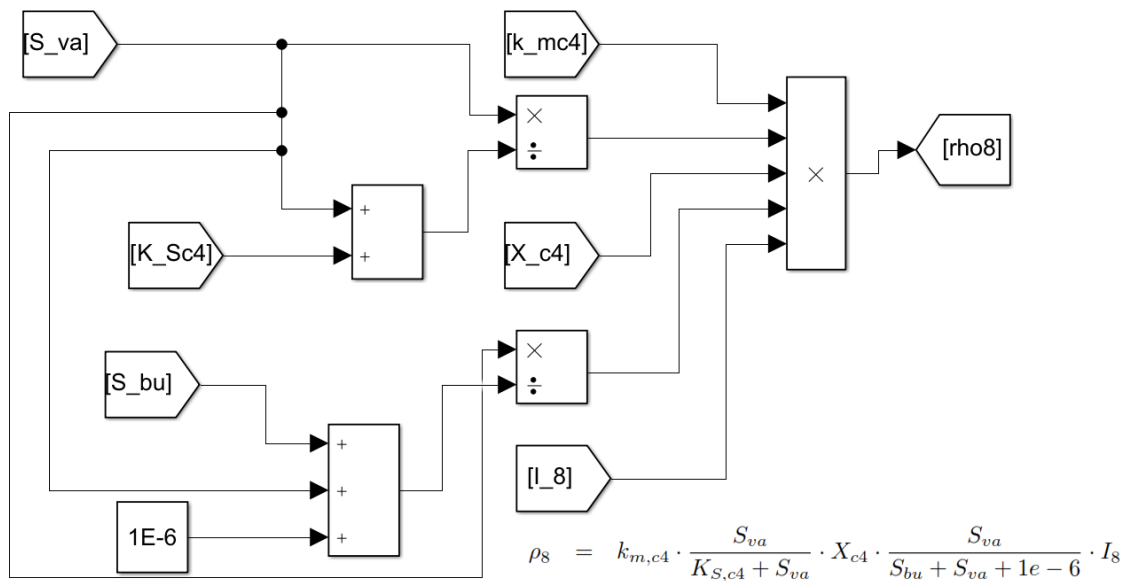
**Realizado por:** Allauca D, 2022.

### 3.6.2.2 Parámetros de composición del efluente

Para designar estos parámetros, fueron utilizadas variables tabuladas, y se fueron designadas haciendo uso del bloque constant hacia Goto, como ya se pudo observar en la Ilustración 1 - 3.

### 3.6.2.3 Tasas de procesos bioquímicos

Para estas variables se hace necesario el uso de la Tabla 17-2: que contiene cada una de las ecuaciones necesarias, a continuación, se desarrolla una de las formas más complejas:

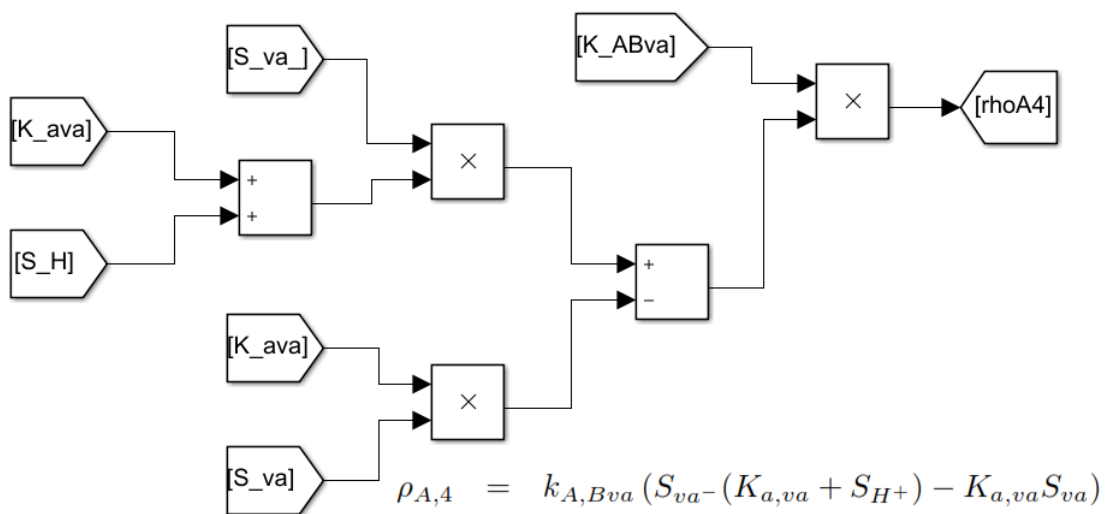


**Ilustración 5 - 3:** Representación del parámetro  $\rho_8$  en Simulink®.

Realizado por: Allauca D, 2022.

### 3.6.2.4 Tasa para los procesos acido-base.

Según la Tabla 23-2: A continuación, se representa una de las ecuaciones para la tasa de transformación acido-base.

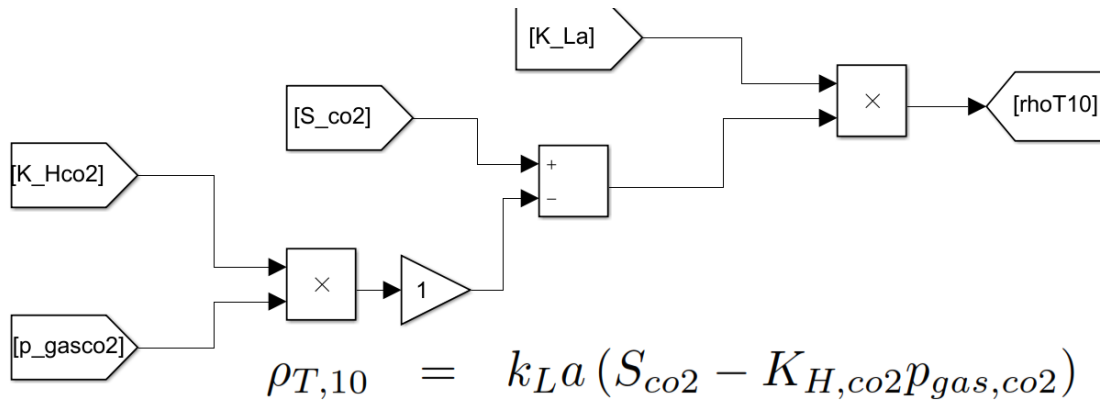


**Ilustración 6 - 3:** Representación del parámetro  $\rho_{A,4}$  en Simulink®.

Realizado por: Allauca D, 2022.

### 3.6.2.5 Tasa de transferencia de gas

Para estas ecuaciones según la Tabla 24-2: a continuación, se representa una de ellas.

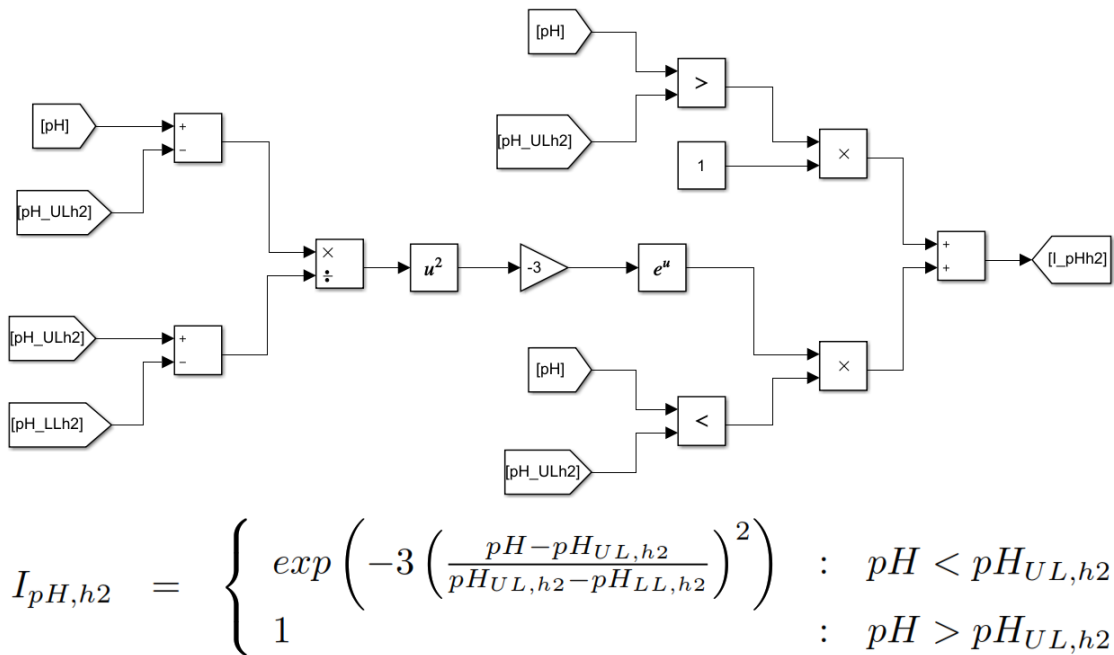


**Ilustración 7 - 3:** Representación del parámetro  $\rho_{T,10}$  en Simulink ®.

Realizado por: Allauca D, 2022.

### 3.6.2.6 Inhibidores.

El conjunto de ecuaciones que lo representan lo conforman 16 ecuaciones, se representa a continuación el más complejo. Todas las ecuaciones respectivas se encuentran en las tablas: Tabla 18-2:inhibidores por amoniaco o H, Tabla 19-2: por N limitado, Tabla 20-2: por pH, y Tabla 21-2: Inhibidores agrupados.



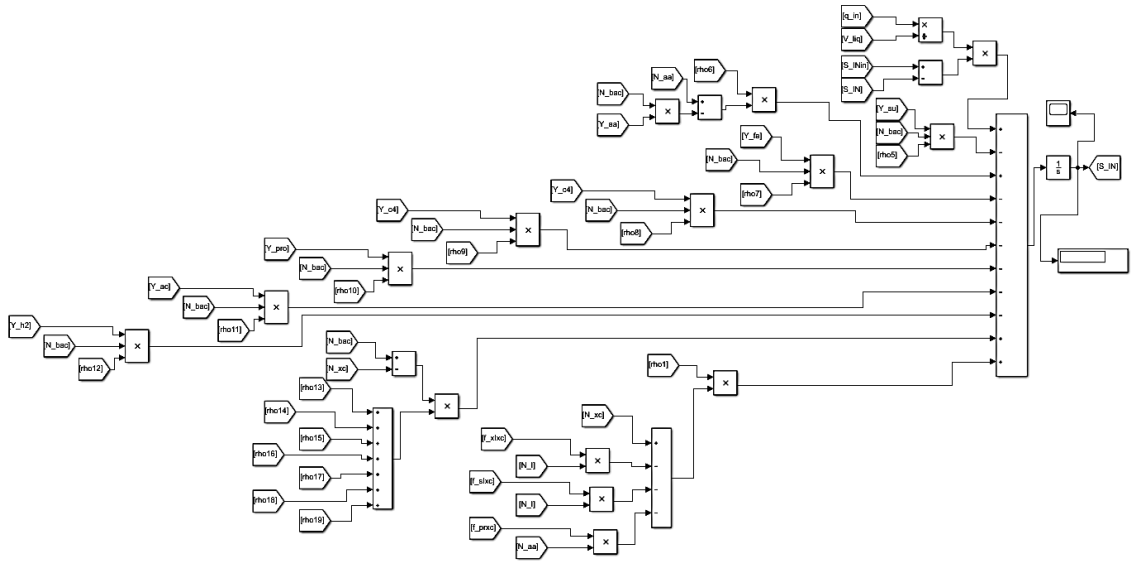
**Ilustración 8 - 3:** Representación del Inhibidor  $I_{pH,h2}$  en Simulink ®.

Realizado por: Allauca D, 2022.

### 3.6.2.7 Ecuaciones diferenciales para las variables de estado.

En esta sección se describen todas las ecuaciones de concentración, para la materia soluble y sólidos.

Las ecuaciones desde la (1) a (12) corresponden a la materia soluble, se presentan a continuación la más compleja en Simulink ®



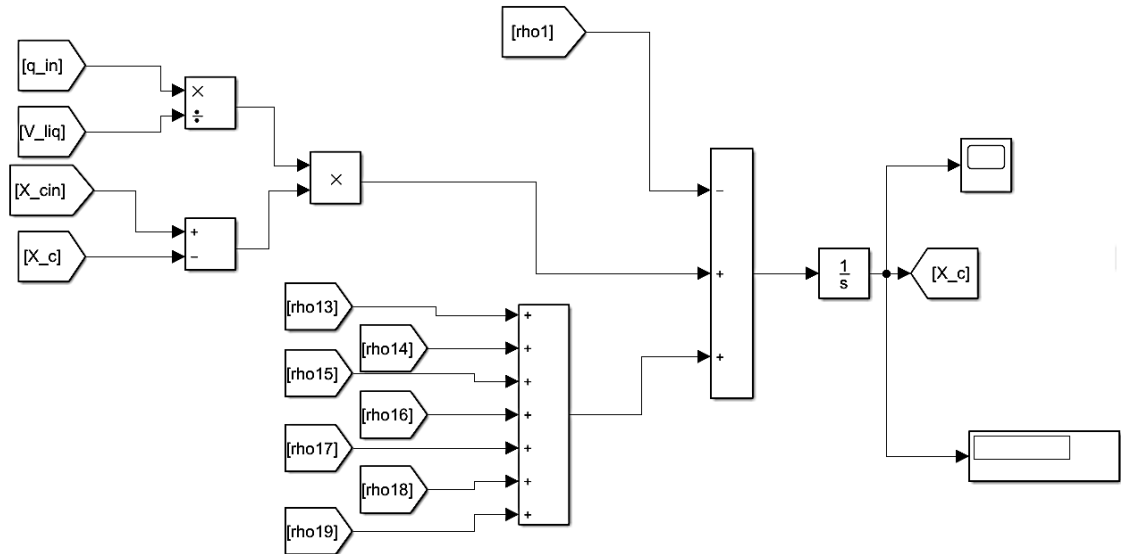
$$\frac{dS_{IN}}{dt} = \frac{q_{in}}{V_{iiq}} (S_{IN,in} - S_{IN}) - Y_{su}N_{bac}\rho_5 + (N_{aa} - Y_{aa}N_{bac})\rho_6 - Y_{fa}N_{bac}\rho_7 - Y_{c4}N_{bac}\rho_8 - Y_{c4}N_{bac}\rho_9 - Y_{pro}N_{bac}\rho_{10} - Y_{ac}N_{bac}\rho_{11} - Y_{h2}N_{bac}\rho_{12} + (N_{bac} - N_{xc}) \sum_{i=13}^{19} \rho_i + (N_{xc} - f_{xI,xc}N_I - f_{sI,xc}N_I - f_{pr,xc}N_{aa})\rho_{19}$$

**Ilustración 9 - 3:** Representación de la variable  $S_{IN}$  en Simulink ®.

**Realizado por:** Allauca D, 2022.

Las ecuaciones desde la (13) a (24) corresponden a las partículas, se presentan a continuación las más extensa en Simulink ®



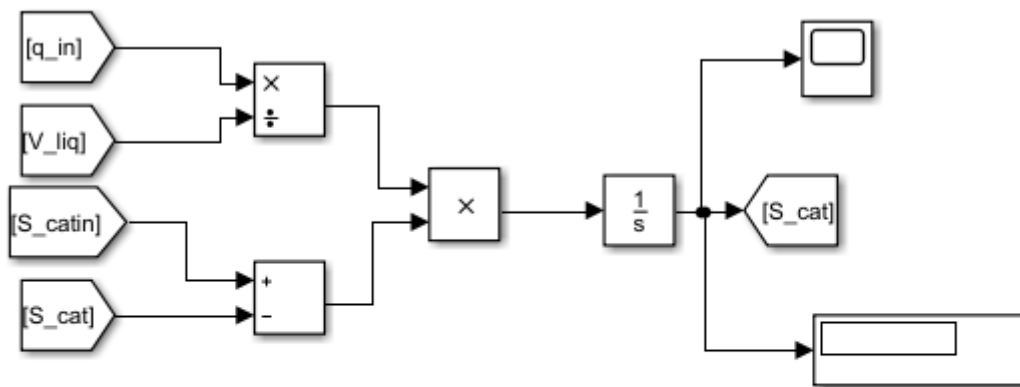


$$\frac{dX_c}{dt} = \frac{q_{in}}{V_{liq}} (X_{c,in} - X_c) - \rho_1 + \sum_{i=13}^{19} \rho_i$$

**Ilustración 10 - 3:** Representación de la variable  $X_c$  en Simulink ®.

**Realizado por:** Allauca D, 2022.

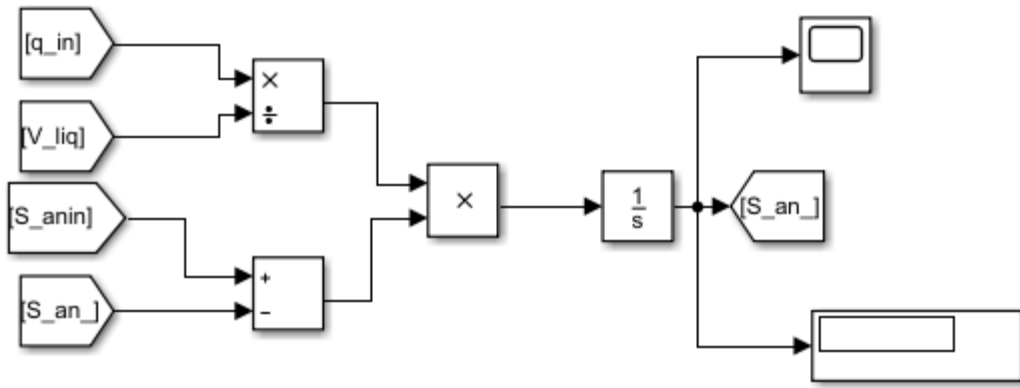
Las ecuaciones (25) y (26) para aniones y cationes, representadas en bloques de Simulink ®.



$$\frac{dS_{cat+}}{dt} = \frac{q_{in}}{V_{liq}} (S_{cat+,in} - S_{cat+})$$

**Ilustración 11 - 3:** Representación de la variable  $S_{cat+}$  en Simulink ®.

**Realizado por:** Allauca D, 2022.

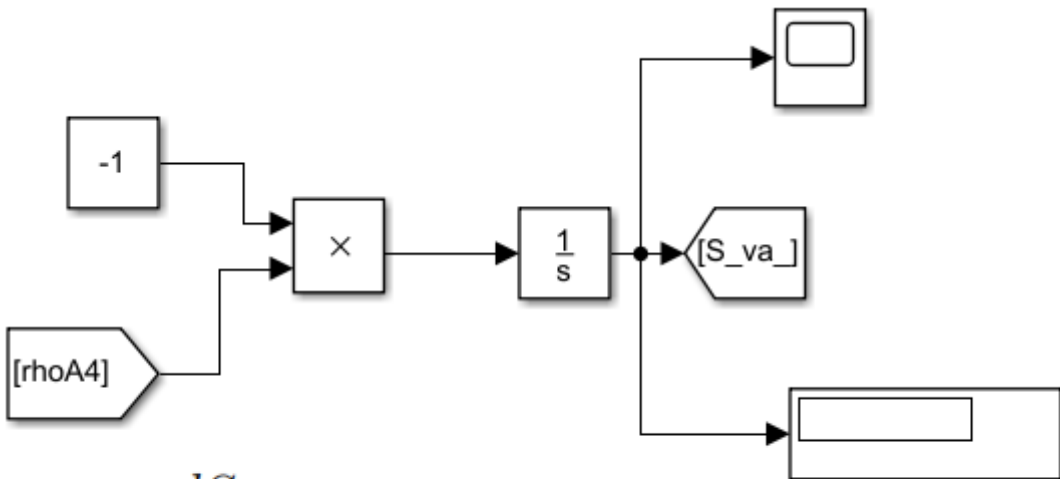


$$\frac{dS_{an^-}}{dt} = \frac{q_{in}}{V_{liq}} (S_{an^-,in} - S_{an^-})$$

**Ilustración 12 - 3:** Representación de la variable  $S_{an^-}$  en Simulink ®.

Realizado por: Allauca D, 2022.

En las ecuaciones (27) a (32) las ecuaciones respectivas a los estados del ion.



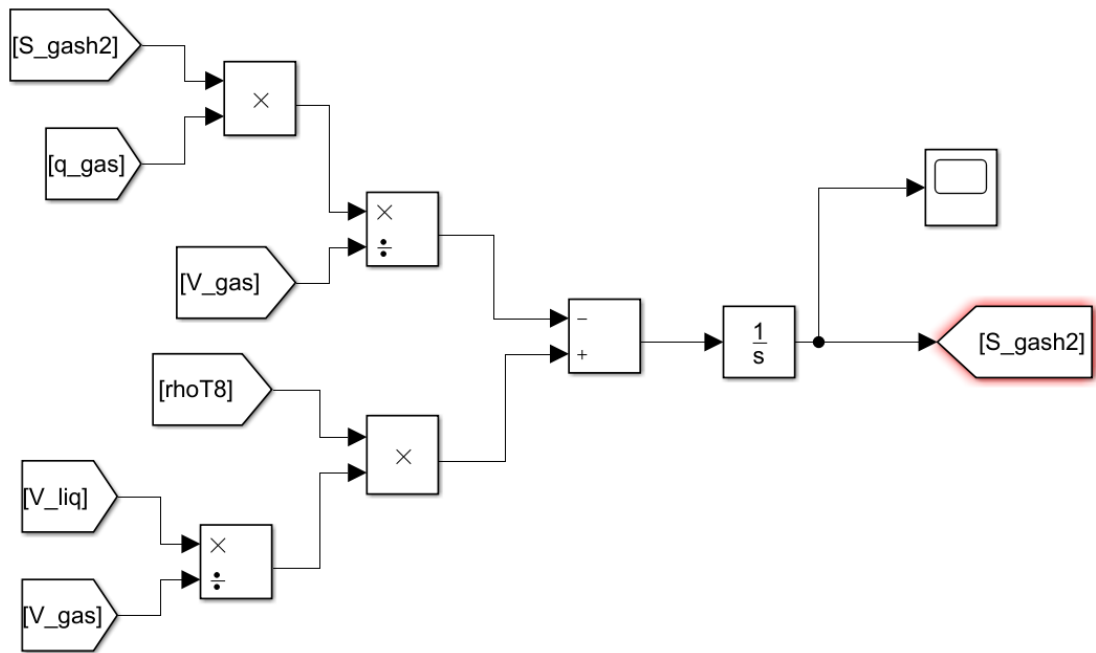
$$\frac{dS_{va^-}}{dt} = -\rho_{A,4}$$

**Ilustración 13 - 3:** Representación de la variable  $S_{va^-}$  en Simulink ®.

Realizado por: Allauca D, 2022.

### 3.6.2.8 Ecuaciones para la transferencia liquido-gas.

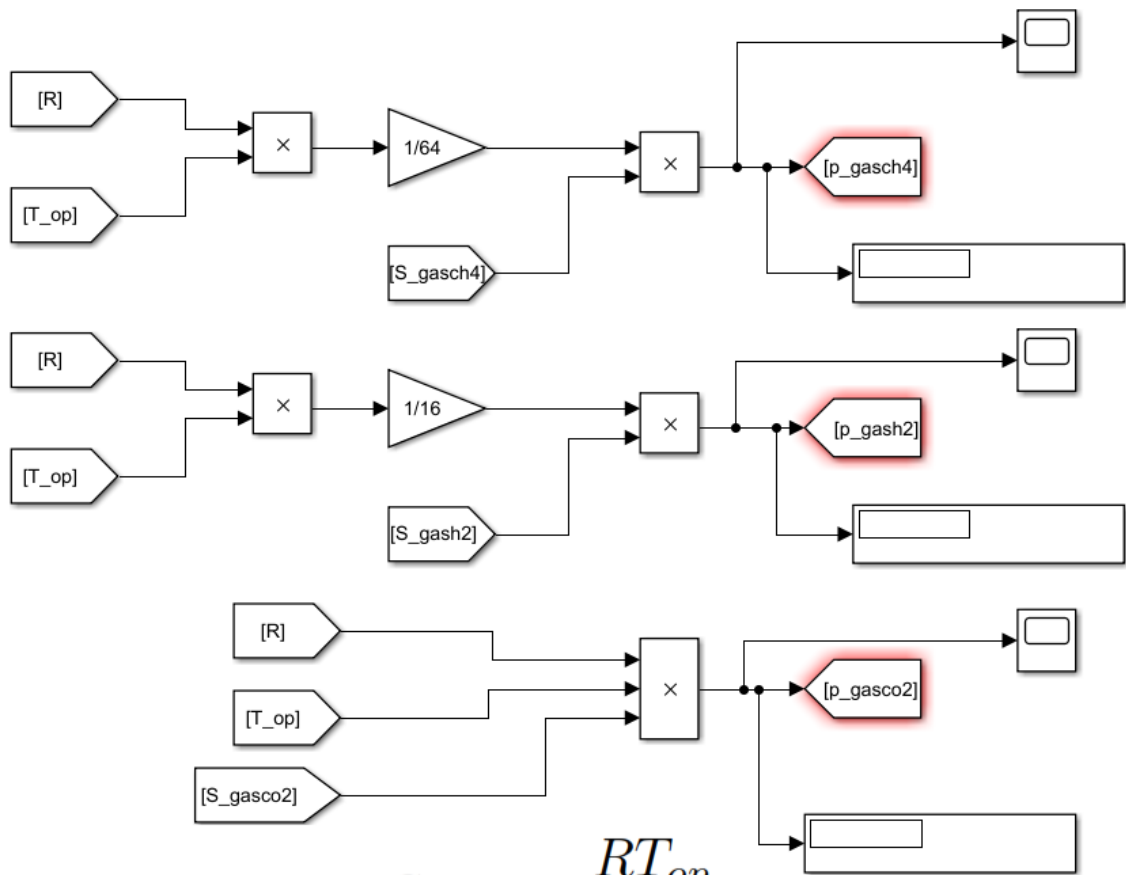
Las ecuaciones (33) a (35) representan las concentraciones de gas de Hidrogeno, Metano y CO<sub>2</sub>.



$$\frac{dS_{gas,h2}}{dt} = -\frac{S_{gas,h2}q_{gas}}{V_{gas}} + \rho_{T,8} \cdot \frac{V_{liq}}{V_{gas}}$$

**Ilustración 14 - 3:** Representación de la variable  $S_{gas,h2}$  en Simulink ®.

**Realizado por:** Allauca D, 2022.



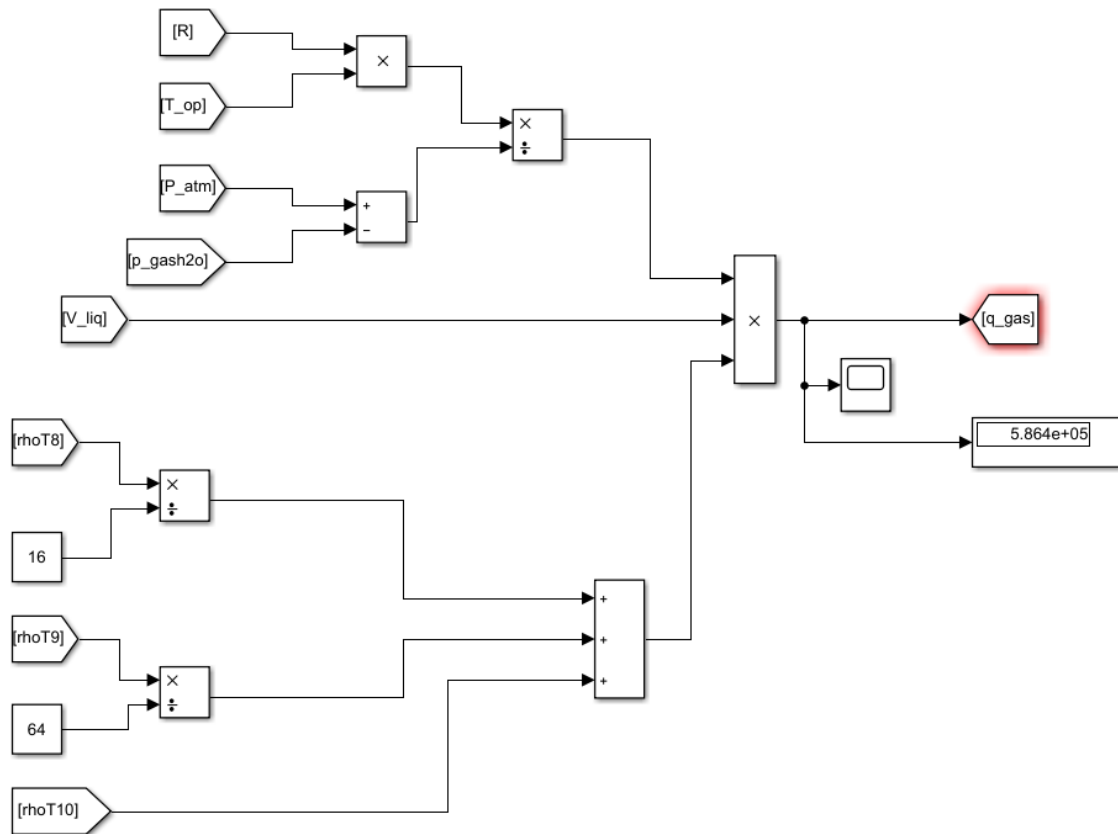
$$p_{gas,h2} = S_{gas,h2} \cdot \frac{RT_{op}}{16}$$

$$p_{gas,ch4} = S_{gas,ch4} \cdot \frac{RT_{op}}{64}$$

$$p_{gas,co2} = S_{gas,co2} \cdot RT_{op}$$

**Ilustración 15 - 3:** Representación de las variables  $p_{gas,h2}$ ,  $p_{gas,ch4}$ ,  $p_{gas,co2}$  en Simulink®.

Realizado por: Allauca D, 2022.



$$q_{gas} = \frac{RT_{Op}}{P_{atm} - p_{gas,H_2O}} \cdot V_{liq} \left( \frac{\rho_{T,8}}{16} + \frac{\rho_{T,9}}{64} + \rho_{T,10} \right)$$

**Ilustración 16 - 3:** Representación de las variables  $q_{gas}$ , en Simulink ®.

**Realizado por:** Allauca D, 2022.

### 3.7 Validación del modelo.

Por el tiempo destinado para este proyecto, no se realizaron mediciones de laboratorio, se hizo la validación por medio de investigaciones realizadas anteriormente, para este caso la realizada por (Rosén & Jeppsson 2006) , titulada “Aspects on ADM1 Implementation within the BSM2 Framework”, con los parámetros de entrada presentados en las tablas Tabla 30-2: Parámetros estequiométricos, Tabla 31-2: Parámetros bioquímicos y la Tabla 32-2: Parámetros fisicoquímicos, los cuales son específicos para aguas residuales urbanas, estos datos están presentes en la investigación de (Batstone et al. 2002) con un tiempo de simulación de 200 días, siendo estos los más acertados, pues la obtención de datos confiables de otros ensayos es prácticamente inexistente debido a que trabajos similares contienen los mismos datos, y estos resultados no estaban en unidades apropiadas para poder estimar su potencial energético, las ecuaciones de transformación fueron sumamente complicadas de encontrar. Otro dato importante es el uso adecuado del sistema de resolución de las ecuaciones diferenciales para evitar soluciones erróneas. Los resultados de la simulación y su comparación con la investigación se presentan en Tabla 2-3:.

**Tabla 2-3:** Resultados obtenidos vs Modelo implementado.

Descripción	Unidad	Valor real	Valor obtenido	error
$S_{gas,h2}$	kgCOD/m <sup>3</sup>	0,00001024103560	0,00001023313763	0,08%
$S_{gas,ch4}$	kgCOD/m <sup>3</sup>	1,625607209	1,618890519	0,41%
$S_{gas,co2}$	kmole C/m <sup>3</sup>	0,01415053	0,01415497	0,03%
$p_{gas}$	bar	1,069016000	1,066441216	0,24%
$q_{gas}$	bar	2955,703450	2813,026413	4,83%
$pH$	bar	7,465537769	7,462511374	0,04%

Realizado por: Allauca D, 2022.

Los datos obtenidos es la simulación se mantienen dentro del margen del error del 5%, lo que implica que los resultados del modelo de simulación implementado son aceptables y se puede comprobar con los datos requeridos para la producción de biogás en la granja.

### 3.8 Aplicación del modelo a los datos específicos de ganado porcino.

Para poder obtener los datos específicos de la granja en cuanto a producción de biogás y porcentajes de metano, se hará uso de las tablas Tabla 33-2: para los valores iniciales y Tabla 34-2: para los parámetros específicos de entrada al modelo ADM1.

En cuanto a la temperatura se tomarán varios valores de temperatura para obtener la cantidad de biogás y concentración de Metano óptimos energéticamente.

### 3.9 Análisis económico.

Se obtuvieron los datos de gastos implicados directamente a la producción de cada animal, diferenciándolos si son fijos o variables.

Con base en costos reales de materiales y equipos provenientes de catálogos de proveedores y fabricantes disponibles en el país, se procederá a obtener el costo de implementar la tecnología del biodigestor aplicado a la granja.

Contrastando los costos de la tecnología del biodigestor y los gastos energéticos derivados de la actividad de producción de ganado porcino, en un rango de tiempo, se proyectará el tiempo de amortización de la inversión inicial, y los futuros ingresos económicos adicionales para la granja.

### 3.10 Propuesta tecnológica.

Finalmente, con base en los resultados obtenidos se realiza la propuesta tecnológica, la cual consiste en proponer el volumen de biodigestor y por consiguiente la energía teórica disponible, además de la cantidad de biol que estaría disponible para un ingreso económico adicional, que minimice los gastos analizados, para posteriormente convertirse en un ingreso adicional para la granja.

## **CAPÍTULO IV**

### **4. MARCO DE ANÁLISIS E INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS**

#### **4.1 Características del lugar**

##### **4.1.1 Ubicación**

Granja de producción de ganado porcino “El chanchito”

##### **4.1.2 Ubicación Política:**

Provincia: Chimborazo

Cantón: Chambo

##### **4.1.3 Temperatura.**

El cantón presenta varios tipos de clima, así la zona más baja tiene un clima mesotérmico seco, en la parte media mesotérmico semihúmedo hasta llegar al páramo y nival en la parte más alta del cantón, la presencia de lluvias anuales no alcanza los 900 mm y la sequía es más marcada entre los meses de julio y agosto, mientras que la temperatura media anual oscila entre los 14 y 21 grados centígrados (del ESTADO 2017, p. 4-5)

##### **4.1.4 Ubicación Geográfica**

(1°45.9094'S 78°34.7182'W) 3km

Altitud: 2600 msnm

Precipitación media: 714mm (del ESTADO 2017, p. 4-5)

#### **4.2 Resultados de simulación.**

La granja posee una capacidad instalada de 50 cabezas de ganado porcino adultos para carne, 30 madres y 50 crías, el tiempo de simulación es de 200 días.

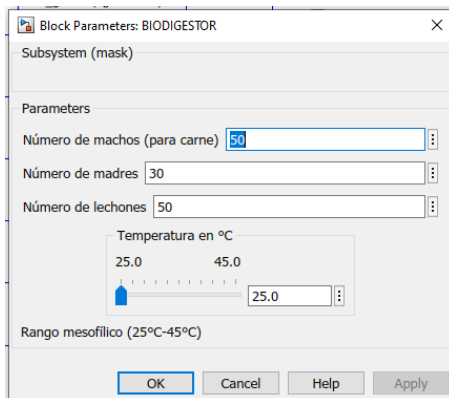
Se utiliza la temperatura comprendida entre 25°C a 40°C debido a que los parámetros obtenidos obedecen al rango mesofílico de temperaturas.

**Tabla 1-4:** Datos de entrada para el módulo BIODIGESTOR.

Descripción	Valor	Unidad
Peso macho	100,0	kg
Peso hembra	100,0	kg
Peso lechón	15,0	kg
Numero de machos	50,0	unidad
Numero de hembras	30,0	unidad
lechones	50,0	unidad
Temperatura	25-35-40	°C
Rango de tiempo	200	día

**Realizado por:** Allauca D, 2022.

Se realizaron 3 corridas del simulador con temperaturas de 25°C, 35°C y 40°C, teniendo en cuenta que el PCI es dependiente de la concentración de Metano.

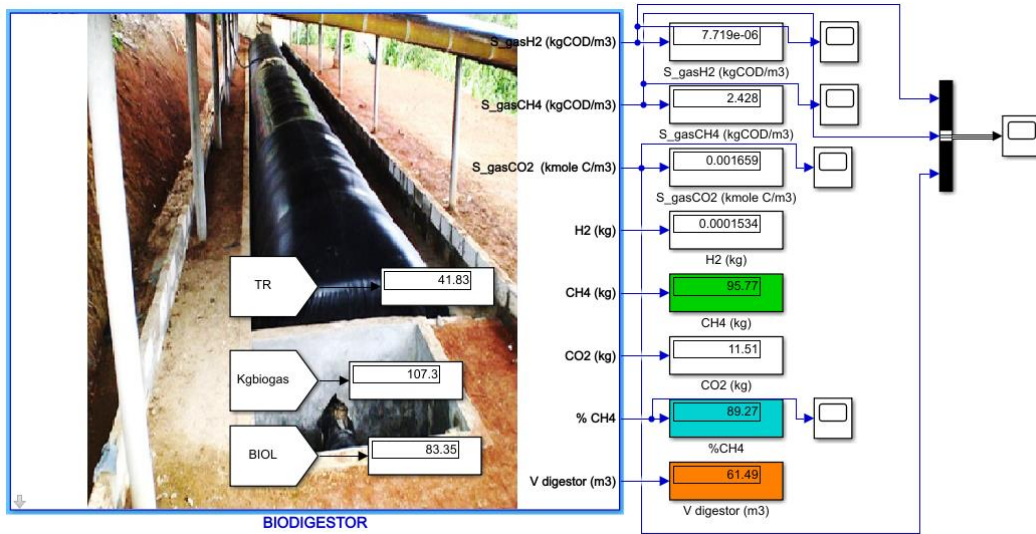


**Ilustración 1 - 4:** Datos de entrada para modelo matemático.

**Realizado por:** Allauca D, 2022.

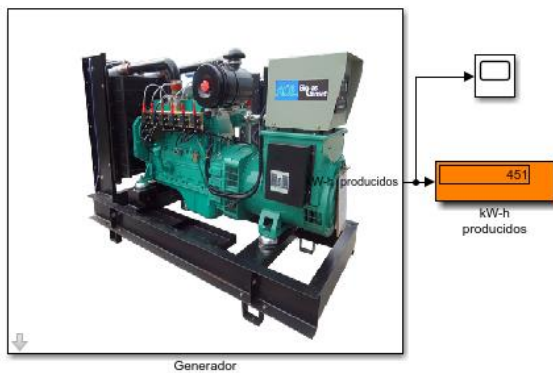


Para la temperatura de 25°C, haciendo uso del simulador se obtuvieron los siguientes resultados:



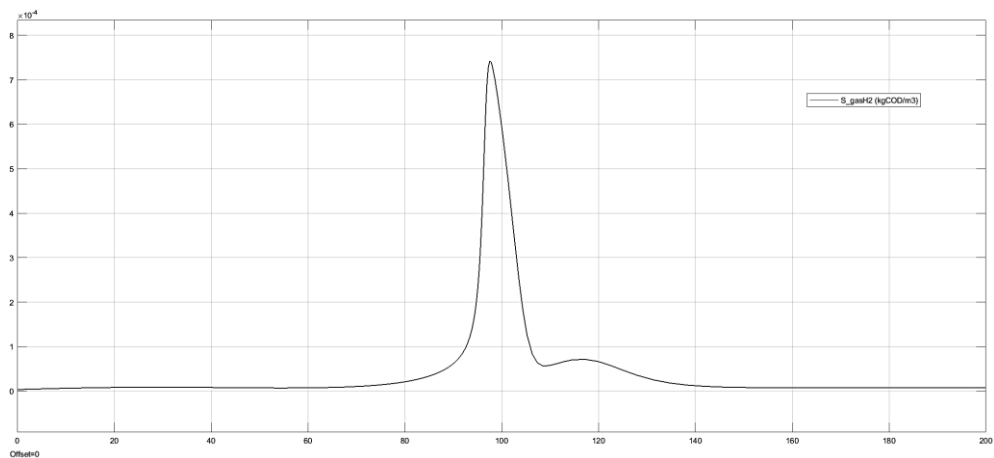
**Ilustración 2 - 4:** Resultados utilizando el módulo BIODIGESTOR, con T=25°C

Realizado por: Allauca D, 2022.



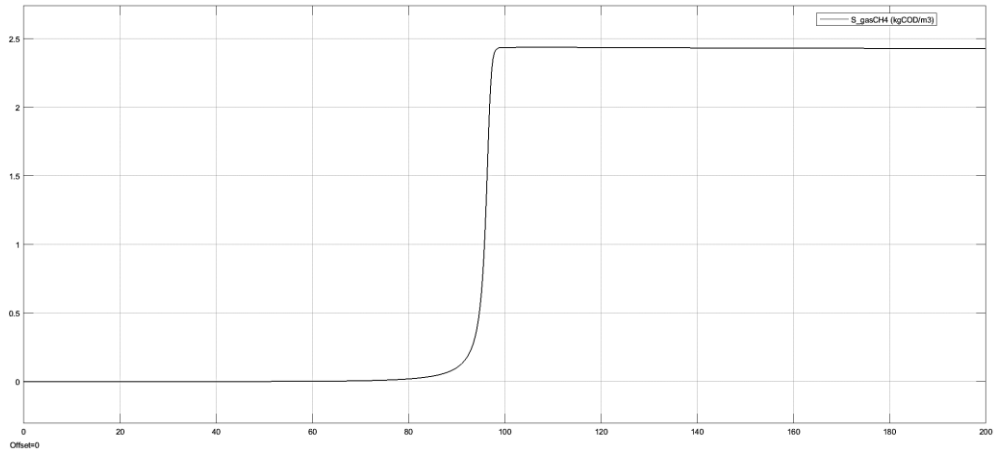
**Ilustración 3 - 4:** Resultados utilizando el módulo GENERADOR, con T=25°C

Realizado por: Allauca D, 2022.



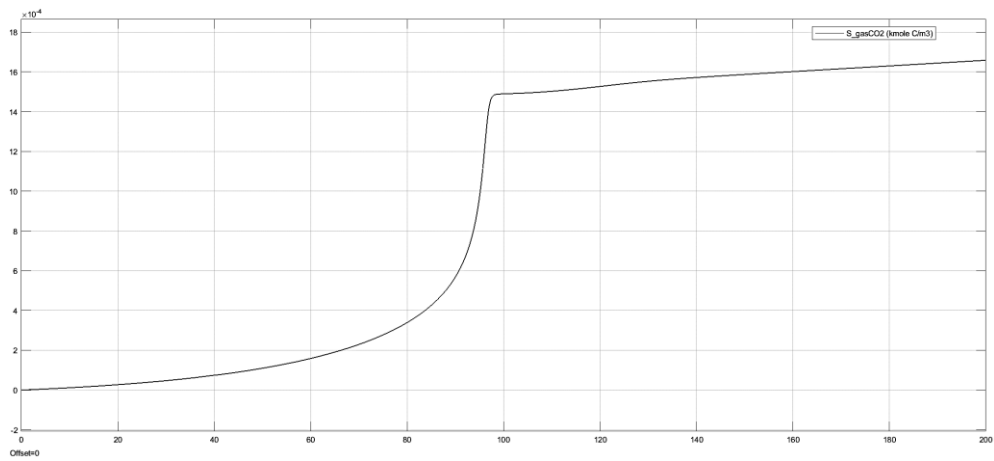
**Ilustración 4 - 4:** Curva de concentración de gas H<sub>2</sub>, con T=25°C

Realizado por: Allauca D, 2022.



**Ilustración 5 - 4:** Curva de concentración de gas CH<sub>4</sub>, con T=25°C

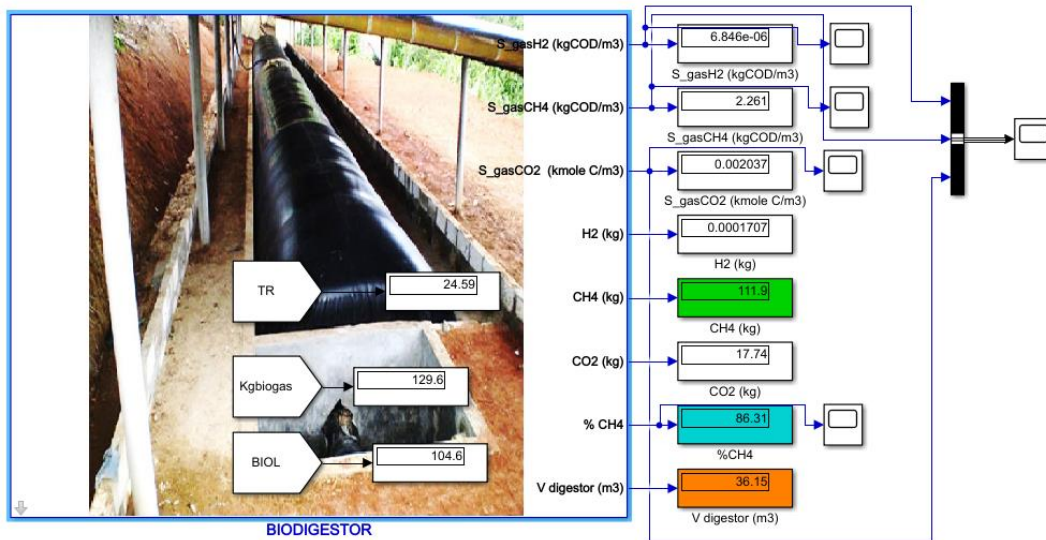
Realizado por: Allauca D, 2022.



**Ilustración 6 - 4:** Curva de concentración de gas CO<sub>2</sub>, con T=25°C

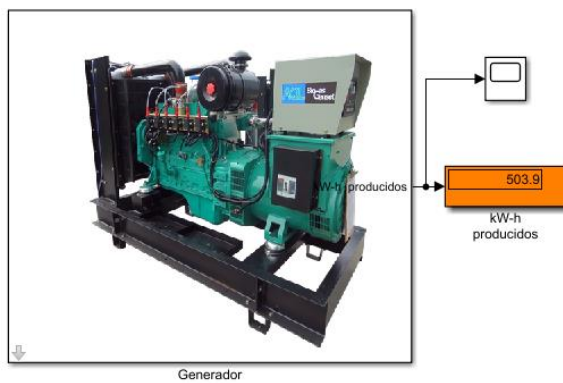
Realizado por: Allauca D, 2022.

En cuanto a la temperatura de 35°C se obtuvieron los siguientes resultados:



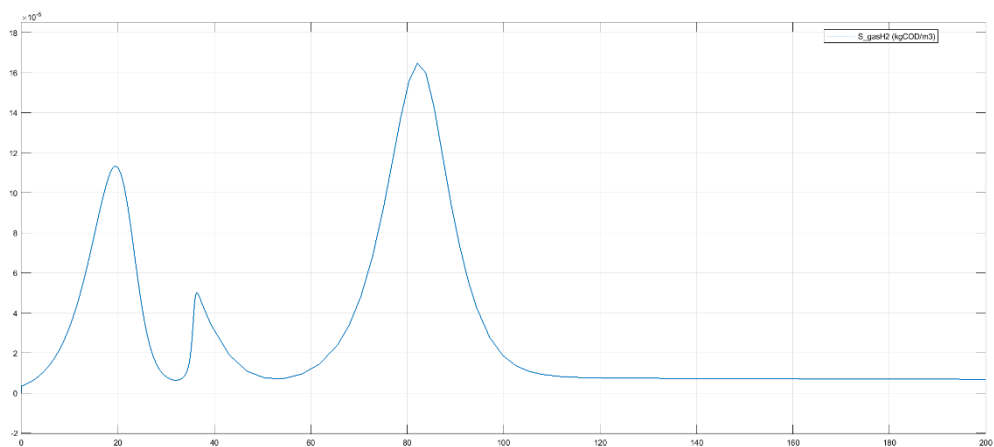
**Ilustración 7 - 4:** Resultados utilizando el módulo BIODIGESTOR, con T=35°C

Realizado por: Allauca D, 2022.



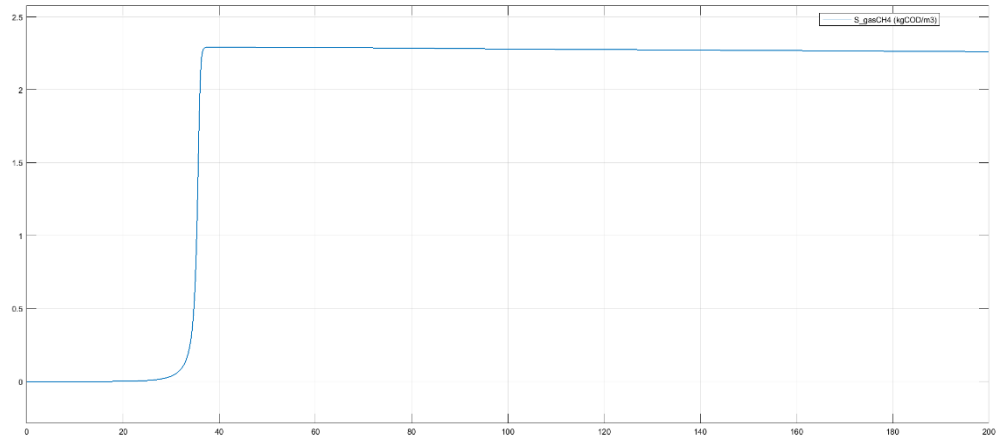
**Ilustración 8 - 4:** Resultados utilizando el módulo GENERADOR, con T=35°C

Realizado por: Allauca D, 2022.



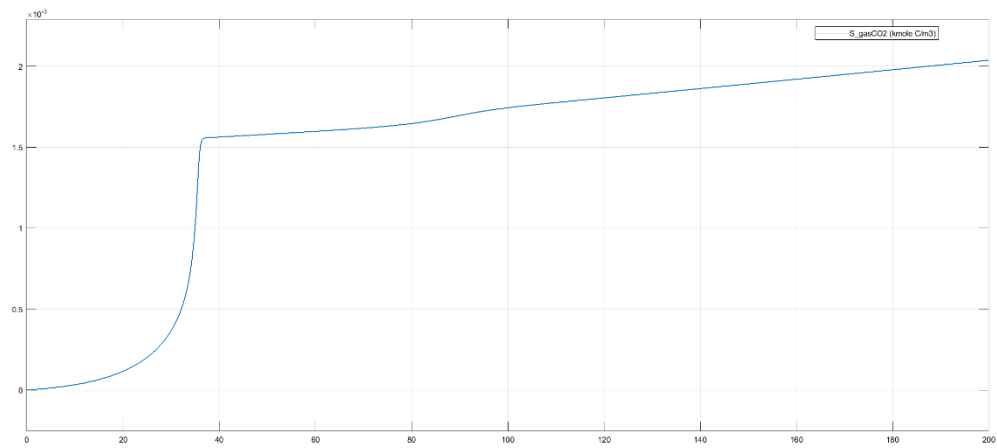
**Ilustración 9 - 4:** Curva de concentración de gas H<sub>2</sub>, con T=35°C

Realizado por: Allauca D, 2022.



**Ilustración 10 - 4:** Curva de concentración de gas CH<sub>4</sub>, con T=35°C

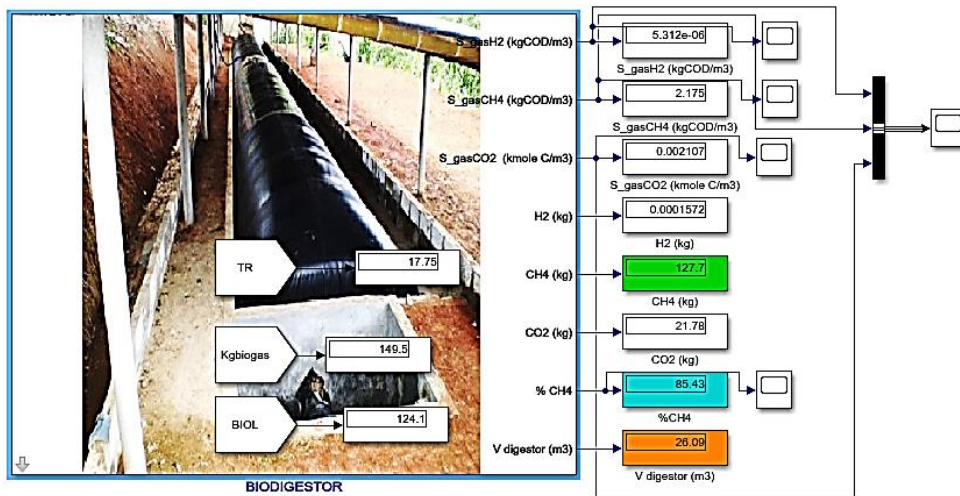
**Realizado por:** Allauca D, 2022.



**Ilustración 11 - 4:** Curva de concentración de gas CO<sub>2</sub>, con T=35°C

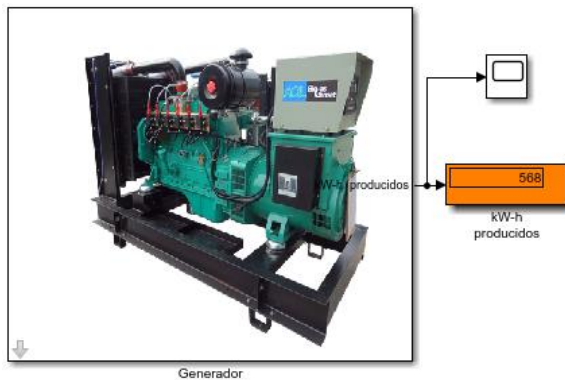
**Realizado por:** Allauca D, 2022.

Para la temperatura de 40°C se obtuvieron los siguientes resultados:



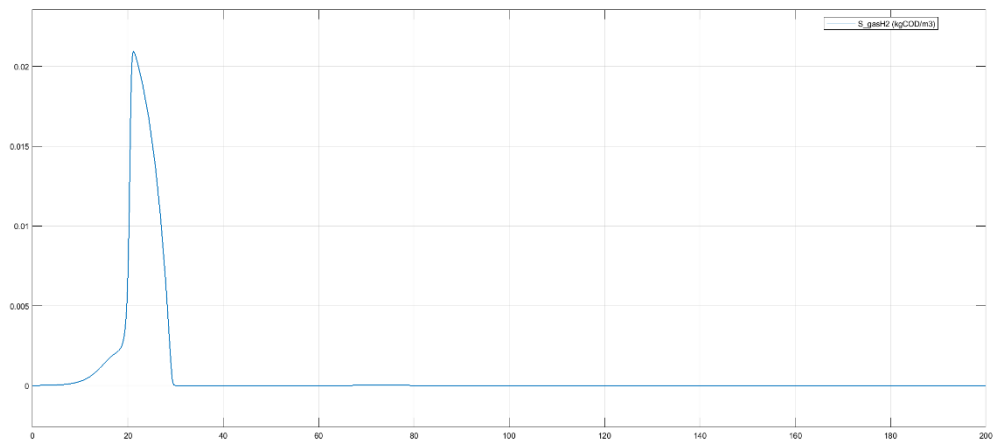
**Ilustración 12 - 4:** Resultados utilizando el módulo BIODIGESTOR, con T=40°C

Realizado por: Allauca D, 2022.



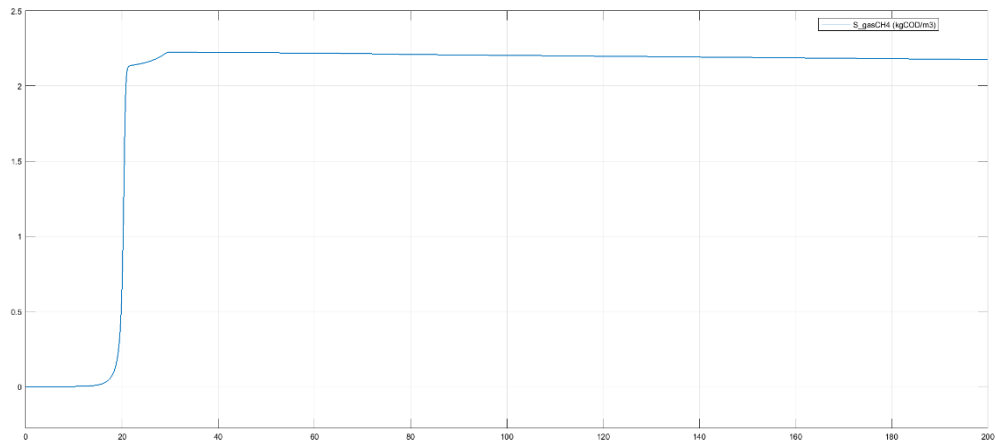
**Ilustración 13 - 4:** Resultados utilizando el módulo GENERADOR, con T=40°C

Realizado por: Allauca D, 2022.



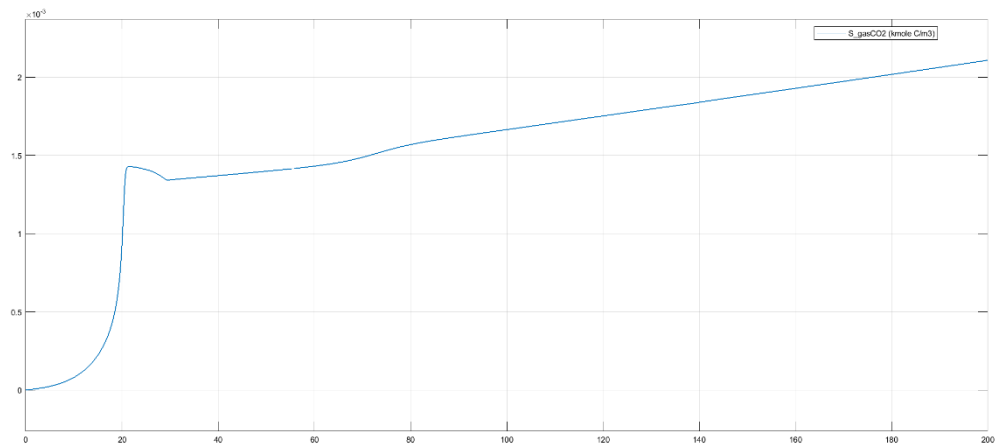
**Ilustración 14 - 4:** Curva de concentración de gas H<sub>2</sub>, con T=40°C

Realizado por: Allauca D, 2022.



**Ilustración 15 - 4:** Curva de concentración de gas CH<sub>4</sub>, con T=40°C

**Realizado por:** Allauca D, 2022.



**Ilustración 16 - 4:** Curva de concentración de gas CO<sub>2</sub>, con T=40°C

**Realizado por:** Allauca D, 2022.

**Tabla 2-4:** Valores obtenidos del simulador ADM1.

Descripción	T=25°C	T=35°C	T=40°C	Unidad
H <sub>2</sub>	0,0001534	0,0001707	0,0001572	kg
CH <sub>4</sub>	95,77	111,90	127,7	kg
CO <sub>2</sub>	11,51	17,74	21,78	kg
%CH <sub>4</sub>	89,27	86,31	85,43	%
TR	41,83	24,59	17,75	día
Biogás	107,30	129,60	149,5	kg
Vol. digester	61,49	36,15	26,09	m <sup>3</sup>
Biol	83,35	104,60	124,1	Caneca 5gal
Energía	451,00	503,90	568,00	kW-h

**Realizado por:** Allauca D, 2022.

### 4.3 Datos de producción del biodigestor en dólares.

Con ayuda de los resultados obtenidos en la 0 procedemos a convertirlos en dólares, en función de los precios actuales de mercado. Los valores que nos interesan son el del biogás, biol, energía eléctrica generada y el biodigestor.

**Tabla 3-4:** Producción y costo en dólares de biodigestor, para diferentes temperaturas.

Descripción	T=25°C	Unidad	Precio unitario	Subtotales	INGRESO	COSTO
Vol. digestor	61,49	m3	\$ 5.390,00	\$ 5.390,00		\$ 5.390,00
Biol	83,35	Caneca 5gal	\$ 10,00	\$ 833,50	\$ 833,50	
Energía	451	kW-h	\$ 0,12	\$ 54,12	\$ 54,12	
Temperatura a SUBIR: 0°C (kW-h requeridos: 0)				<b>TOTAL</b>	\$ 887,62	\$ 5.390,00

Descripción	T=35°C	Unidad	Precio unitario	Subtotales	INGRESO	COSTO
Vol. digestor	36,15	m3	\$4.890,00	\$4.890,00		\$4.890,00
Biol	104,6	Caneca 5gal	\$10,00	\$1.046,00	\$1.046,00	
Energía	503,9	kW-h	\$0,12	\$60,47	\$60,47	
Temperatura a SUBIR: 10°C (kW-h requeridos: 419)				<b>TOTAL</b>	\$1.106,47	\$4.890,00

Descripción	T=40°C	Unidad	Precio unitario	Subtotales	INGRESO	COSTO
Vol. digestor	26,09	m3	\$2.000,00	\$2.000,00		\$2.000,00
Biol	124,1	Caneca 5gal	\$10,00	\$1.241,00	\$1.241,00	
Energía	568	kW-h	\$0,12	\$68,16	\$68,16	
Temperatura a SUBIR: 15°C (kW-h requeridos: 453)				<b>TOTAL</b>	\$1.309,16	\$3.890,00

**Realizado por:** Allauca D, 2022.

De los valores obtenidos, contrastando el porcentaje de Metano que a los 25°C es mayor, por los costos de purificación, y la temperatura a la que se debe mantener el proceso, costos derivados del mantenimiento de equipos adicionales para elevar la temperatura, la ausencia de agitadores, se elige el proceso con temperatura de 25°C.

#### 4.4 Datos históricos de consumo energético y pérdidas de crías de la granja.

**Tabla 4-4:** Valores de energía consumida proyectada a 200 días.

Tipo de energía	Unidad	Cantidad en 30 días	Cantidad en 200 días	Valor unitario (\$)	Valor total en 200 días (\$)
Energía Eléctrica	kW-h	300	2000	\$ 0,12	\$ 240,00
Energía térmica (madera)	carga	15	100	\$ 1,00	\$ 100,00
Horas-hombre para traer agua	h	60	400	\$ 3,00	\$ 1.200,00
Crías muertas por baja temperatura.	unidad	1,5	10	\$ 70,00	\$ 700,00
				<b>TOTAL</b>	<b>\$ 2.240,00</b>

**Realizado por:** Allauca D, 2022.

#### 4.5 Análisis económico

Los datos de consumo energético relacionado a la producción de ganado porcino están detallados en la Tabla 4-4: para el lapso de 200 días. En contraste con la producción de energía y biol del biodigestor obtenemos una diferencia en dólares, lo cual esta detallado en la Tabla 5-4:

**Tabla 5-4:** Contraste entre producción del biodigestor y gastos energéticos.

	Descripción	Cantidad	Unidad	Precio unitario	Subtotales	INGRESO	COSTO
Producción biodigestor	Biol	83,35	Caneca 5gal	\$ 10,00	\$ 833,50	\$ 833,50	
	Energía	451	kW-h	\$ 0,12	\$ 54,12	\$ 54,12	
Gasto energético	Energía eléctrica	2000	kW-h	\$ 0,12	\$ 240,00		\$ 240,00
	Energía térmica (madera)	100	carga	\$ 1,00	\$ 100,00		\$ 100,00
	Horas-hombre	400	h	\$ 3,00	\$1.200,00		\$1.200,00
	Crías muertas	10	unidad	\$ 70,00	\$ 700,00		\$ 700,00
<b>TOTAL</b>						<b>\$ 887,62</b>	<b>\$2.240,00</b>
<b>DIFERENCIA</b>						<b>\$</b>	<b>1.352,38</b>

**Realizado por:** Allauca D, 2022.

El ahorro energético por cada 200 días es de \$ 887,62.

El nuevo valor para pagar por conceptos energéticos ajustando a 200 días es de \$ 1.352,38

Los costos relacionados con la implementación del biodigestor se detallan en la Tabla 6-4:

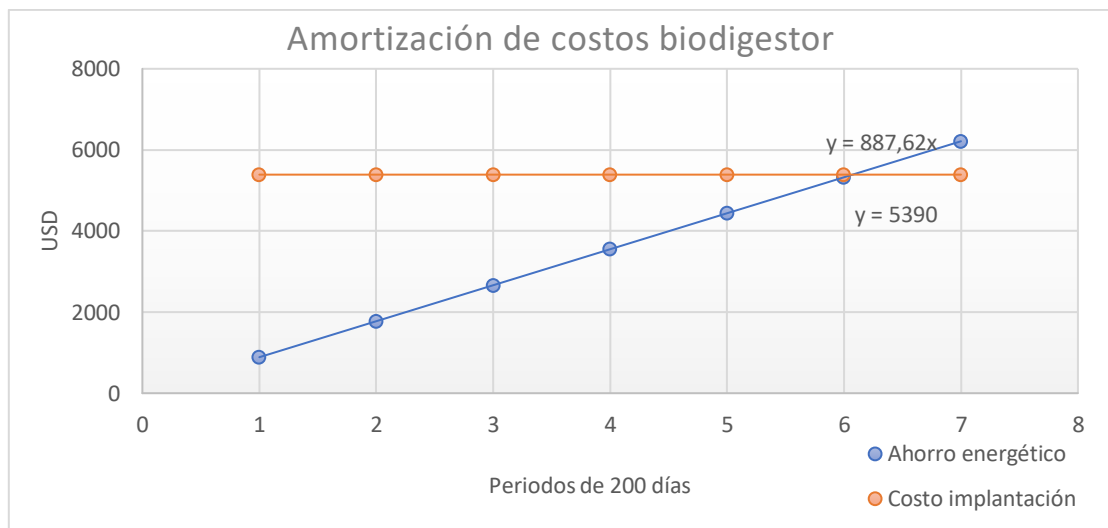


**Tabla 6-4:** Costos de implantación de biodigestor.

Descripción	Unidad	Cantidad	Valor unitario	Valor total
Biodigestor 60	unidad	1	\$ 3.500,00	\$3.500,00
Excavación	m <sup>3</sup>	24	\$ 2,50	\$ 60,00
Geomembrana	m <sup>2</sup>	60	\$ 3,00	\$ 180,00
Poliestireno expandido	m <sup>2</sup>	70	\$ 1,00	\$ 70,00
Ruteo PVC 100mm	m	30	\$ 6,00	\$ 180,00
Cubierta	m <sup>2</sup>	35	\$ 20,00	\$ 700,00
tanque de desalojo	unidad	1	\$ 50,00	\$ 50,00
tanque de ingreso de biomasa	unidad	1	\$ 50,00	\$ 50,00
Calefactor	unidad	10	\$ 15,00	\$ 150,00
Generador 6KVA	unidad	1	\$ 450,00	\$ 450,00
			<b>TOTAL</b>	<b>\$5.390,00</b>

**Realizado por:** Allauca D, 2022.

A continuación, se presenta la gráfica de amortización de los costos relacionados a implantar el biodigestor.



**Ilustración 17 - 4:** Amortización de equipos para biodigestor, con T=25°C

**Realizado por:** Allauca D, 2022.

Como se puede observar, la intersección de las rectas que representan el ahorro producido por el biodigestor y el costo de implantar el mismo, se provoca la amortización de estos en el periodo 6, de 200 días, lo que significa 1214 días aproximadamente o sea 3 años 4 meses.

De ahí en adelante existe un nuevo ingreso para la granja de \$ 887,62 cada 200 días.

## CAPITULO V

### 5. PROPUESTA TECNOLÓGICA (GESTIÓN DEL PROYECTO)

#### 5.1 Capacidad y características del biodigestor.

Se propone un biodigestor horizontal flexible prefabricado (Taiwanés), de capacidad 60m<sup>3</sup>, que se detalla en la Ilustración 1 - 5: donde constan los principales componentes para su funcionamiento. Este detalle es conforme al proveedor SISTEMA.bio, su modelo disponible es el Sistema 60 (60m<sup>3</sup>), que cumple con lo requerido.

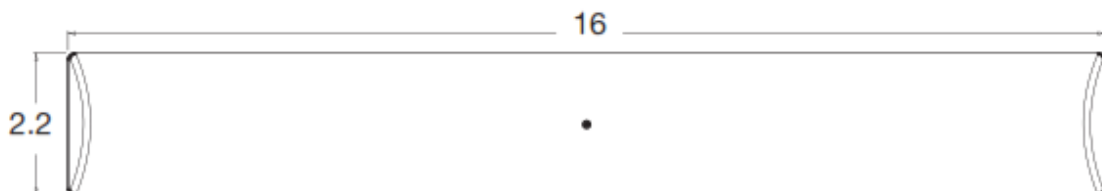
#### COMPONENTES



**Ilustración 1 - 5:** Detalle de partes del biodigestor.

Realizado por: Allauca D, 2022.

#### 5.2 Obra civil.



**Ilustración 2 - 5:** Área de excavación para biodigestor.

Realizado por: Allauca D, 2022.

Para la instalación del biodigestor se debe realizar una excavación de 24m<sup>3</sup> aproximadamente, con las medidas sobre la superficie del terreno según se detalla en la Ilustración 2 - 5:

Posteriormente se debe recubrir con geomembrana para que cumpla las funciones de aislante térmico.

Alejado del perímetro de la excavación del biodigestor se construirá una cubierta de al menos 2m de altura contados a partir de la parte superior del biodigestor, esto para conservar más tiempo el material de construcción del biodigestor.

En las partes inicial y final del biodigestor se deberá construir un pozo de acceso y salida de la materia respectivamente, el acceso deberá estar conectado con la salida de excretas del galpón de crianza de ganado porcino por medio de la tubería de PVC de 100mm

### 5.3 Cronograma de implementación generalizado

Conforme a lo propuesto, y en función de una posible aceptación del administrador de la granja esta podría ser una propuesta del cronograma de actividades para la implantación del biodigestor.

**Tabla 1-5:** Cronograma de actividades para la implementación del biodigestor.

Actividad	Fecha de inicio	Fecha fin																		
			1/1/2023	2/1/2023	3/1/2023	4/1/2023	5/1/2023	6/1/2023	7/1/2023	8/1/2023	9/1/2023	10/1/2023	11/1/2023	12/1/2023	13/1/2023	14/1/2023	15/1/2023			
Pedido de biodigestor	1/1/2023	2/1/2023	■																	
Entrega de biodigestor	4/1/2023	5/1/2023				■	■													
Obras preliminares	1/1/2023	2/1/2023	■	■																
instalación geomembrana	2/1/2023	6/1/2023		■	■	■	■	■												
Cubierta	6/1/2023	9/1/2023					■	■	■	■										
Pozo entrada	9/1/2023	10/1/2023								■	■									
Pozo salida	10/1/2023	11/1/2023									■	■								
Ruteo PVC	13/1/2023	13/1/2023															■			
instalación de accesorios biodigestor	14/1/2023	14/1/2023																■		
Pruebas iniciales de presión	15/1/2023	15/1/2023																	■	

Realizado por: Allauca D, 2022.

## CONCLUSIONES

Al evaluar técnica y económicamente la utilización de biomasa residual en generación de energía para la granja “El chanchito” se encontró que es apropiada para producir 451 kW-h a 25°C de energía eléctrica, y un ahorro de \$ 887,62 cada 200 días.

La disponibilidad de biomasa en la granja es de 0,44 m<sup>3</sup>/día aproximadamente, proveniente de excretas de ganado porcino, y para su caracterización se utilizaron datos tabulados de investigaciones relacionadas.

El potencial energético de la biomasa disponible en la granja obtenido con ayuda del modelo matemático ADM1 es de 4059 MJ (1128kW-h).

Al valorar la capacidad de conversión de la biomasa disponible en biogás, se encontró que es adecuada, mediante digestión anaerobia, dando un porcentaje de Metano del 89,27%, el cual es bastante aceptable.

El biodigestor propuesto para poder convertir la biomasa residual proveniente de la granja según el cálculo realizado mediante el simulador del modelo matemático ADM1, es de 60 m<sup>3</sup>, se pueden encontrar varias opciones prefabricadas con proveedores en el país, que brindan al menos 15 años de garantía.

Al realizar la estimación económica de implementar el biodigestor, se encontró que el uso de la biomasa residual puede ser autosustentable después de amortizar su costo en aproximadamente 3 años, para posteriormente generar un ingreso para la granja de \$887,00 además de solucionar problemas de contaminación y sociales, derivados del desecho inadecuado de excretas de ganado porcino, dentro de los beneficios económicos adicionales, se encontró que el BIOL puede llegar a precios de venta de hasta \$ 35,00.

## **RECOMENDACIONES**

Se recomienda realizar investigaciones posteriores para encontrar parámetros de composición al agregar hojas secas o cascara de frutas, que sean más cercanos a la realidad local, para así brindar más precisión en las simulaciones y por consiguiente optimizar los procesos de producción de biogás.

Se debería utilizar el calor remanente del generador eléctrico en la elevación de la temperatura de trabajo del biodigestor para mejorar cantidades y tiempos de generación del biogás.

Por la generación de biogás permanentemente se podría realizar investigaciones posteriores para el uso en energía proveniente del vapor en calderas.

Se recomienda ampliar la capacidad del biodigestor, e implementar equipos de purificación del biogás, para evitar el deterioro de los sistemas de generación eléctrica, al menos posterior a la amortización del costo de implementación. Para este fin se podría aprovechar los llamados créditos verdes para financiar energías renovables, eficiencia energética, construcción y vivienda sostenible, presentes para cumplir las metas trazadas en el acuerdo de Paris firmado por el Ecuador en 2016, estos créditos son otorgados por los bancos Pichincha, Produbanco, Banco de Guayaquil, Bolivariano y Procredit.

## GLOSARIO

**Acuerdo de París:** es un tratado en el marco de las Naciones Unidas sobre el cambio climático, el cual dicta medidas para la reducción de emisiones de gases de efecto invernadero, mediante la mitigación adaptación y resiliencia de ecosistemas, modificación de procesos y adopción de tecnologías de producción energética sustentable. (Ministerio del Ambiente 2016)

**Adiabático:** se dice del proceso que no intercambia calor con su entorno. (Borgnakke & Sonntag 2018)

**Demanda química de oxígeno (DQO o COD):** describe el contenido orgánico e inorgánico susceptible de ser oxidada, presente en la materia de un biorreactor. (Núñez Pintado 2017, p. 24)

**Fermentación:** La fermentación o metabolismo fermentativo es un proceso catabólico de oxidación incompleta, que no requiere oxígeno, y cuyo producto final es un compuesto orgánico. (Tortora, Funke & Case 2007)

**Gasómetro:** en el estudio de la digestión anaerobia, se dice de la cúpula que almacena biogás generado de un biodigestor, separada de este. (Varnero Moreno 2011)

**Poder calorífico inferior (PCI):** cantidad de calor liberada durante la combustión de un determinado volumen, en este caso en fase gas. (Cengel & Boles 2011)

**Riesgos ergonómicos:** son aquellos que pueden dar lugar a trastornos musculoesqueléticos (TME) en la persona trabajadora y se derivan de posturas forzadas, aplicación continua de fuerzas, movimientos repetitivos y manipulación manual de cargas en el puesto de trabajo. Pueden estar presentes, por ejemplo, en empresas de paquetería y reparto, empresas de mudanzas, servicios de limpieza en oficinas u operaciones de estiba en puertos marítimos comerciales. (Gabinete de Salud Laboral de USO 2019, p. 1)

**Sustrato:** es la materia prima necesaria para alimento para el proceso de digestión anaerobia. (Tortora, Funke & Case 2007)

**Tiempo de retención hidráulica (TRH):** se dice del tiempo mínimo para que ocurran las reacciones de la digestión anaerobia.

## BIBLIOGRAFÍA

- ANDRADE, A., TIBAQUIRÁ, J.E. & RESTREPO, A.** Estimación de biogás de relleno sanitario, caso de estudio: Colombia. *Entre ciencia e ingeniería*, 2018, vol. 12, no. 23, pp. 40. ISSN 1909-8367. DOI 10.31908/19098367.3701.
- ANDREWS, J.F.** Dynamic Model of the Anaerobic Digestion Process 2. 1969, [en línea], pp. 95-116. Disponible en: Dynamic Model of the Anaerobic Digestion Process.
- ÁNGEL SILES LÓPEZ, J., LI, Q. & THOMPSON, I.P.** Biorefinery of waste orange peel. *Critical reviews in biotechnology*, 2010, vol. 30, no. 1, pp. 63-69. ISSN 0738-8551.
- AQUALIMPIA ENGINEERING E.K.** Generadores para biodigestores - Biodigestores - plantas de biogas - generadores - energia. [en línea]. 2022, [Consulta: 11 octubre 2022]. Disponible en: <https://www.aqualimpia.com/generadores-biogas/>.
- ARMANDO, O. & ROMERO, H.** *Formulacion De Un Programa Basico De Normalizacion Para Aplicaciones De Energias Alternativas Y Difusion*. 2013. S.l.: Upme.
- BASU, P.** *Biomass gasification, pyrolysis and torrefaction: practical design and theory*. S.l.: Academic press. 2018. ISBN 0128130407.
- BATSTONE, et al.** The IWA anaerobic digestion model no 1 (ADM1). *Water Science and technology*, 2002.vol. 45, no. 10, pp. 65-73. ISSN 0273-1223.
- BLANCO, G., SANTALLA, E., CÓRDOBA, V. & LEVY, A.** Generación de Electricidad a Partir de Biogás Capturado de Residuos Sólidos Urbanos: Un Análisis Teórico-Práctico. *División de Energía* [en línea], 2017. pp. 52. Disponible en: <https://publications.iadb.org/publications/spanish/document/Generación-de-electricidad-a-partir-de-biogás-capturado-de-residuos-sólidos-urbanos-Un-análisis-teórico-práctico.pdf>.
- BORGNAKKE, C. & SONNTAG, R.E.** *Fundamentos da termodinâmica*. S.l.: Editora Blucher. 2018. ISBN 852120793X.
- (BUN-CA), U.N.**, *Manuales sobre energía renovable: Biomasa* [en línea]. 1. Costa Rica: s.n. 2002. ISBN 9968-904-02-3. Disponible en: <https://www.bun-ca.org/wp-content/uploads/2019/02/BIOMASA.pdf>.
- CENGEL, Y.A. & BOLES, M.A.** *Termodinámica*. 7°. México: McGraw-Hill Book Co. 2011. ISBN 978-970-10-7286-8.
- CONSTITUYENTE, A.** *Constitución de la República del Ecuador*. 2008. S.l.: Montecristi.

- DEL ESTADO, P.D.E.Á.N.** Proyecto generación de geoinformación para la gestión del territorio a nivel nacional. 2017.
- DONG, H., MANGINO, J., MCALLISTER, T.A., HATFIELD, J.L., JOHNSON, D.E. & LASSEY, K.R.**, Chapter 10—Emissions From Livestock and Manure Management [Internet]. 2006. *Forestry*,
- FEIZ, R.** *Systems analysis for eco-industrial development: applied on cement and biogas production systems*. 2016. S.l.: Linköping University Electronic Press.
- FORGET, A.** Manual de diseño y de difusión de biodigestores familiares, con enfoque en biodigestores tubulares. 2011. *Lima, Peru. Obtenido de Technologies appropriées—mon expérience péruvienne*,
- GABINETE DE SALUD LABORAL DE USO.** ¿Qué son los riesgos ergonómicos y cómo evitarlos en nuestro trabajo? | Sindicato USO. [en línea]. 2019. [Consulta: 3 agosto 2022]. Disponible en: <https://www.uso.es/que-son-riesgos-ergonomicos-y-como-evitarlos-en-nuestro-trabajo/>.
- GARCÍA, R., ALAMO, M. & MARCELO, M.**, Diseño de un biodigestor tubular para zonas rurales de la región Piura. 2017. *XXIV Simposio Peruano de Energía Solar y del Ambiente (XXIV-SPES)*. S.l.: s.n.,
- GÓMEZ, J.E.A., VARGAS, F.E.S. & LEAL, V.S.** An exploratory analysis of existing research on internal combustion engines operating with biogas. *Tecnura: Tecnología y Cultura Afirmando el Conocimiento*, 2014. vol. 18, no. 39, pp. 152-164. ISSN 0123-921X.
- GRUPO BANCO MUNDIAL.** Consumo de energía procedente de combustibles fósiles (% del total) | Data. [en línea]. 2015. [Consulta: 27 octubre 2022]. Disponible en: <https://datos.bancomundial.org/indicador/EG.USE.COMM.FO.ZS>.
- GRUPO EL COMERCIO.** Ecuador tiene un plan para cumplir el acuerdo de París - El Comercio. [en línea]. 15 junio 2019. [Consulta: 28 abril 2022]. Disponible en: <https://www.elcomercio.com/tendencias/ecuador-plan-cumplir-acuerdo-paris.html>.
- GUEVARA VERA, A.** Fundamentos básicos para el diseño de biodigestores anaeróbicos rurales. *Producción de gas y saneamiento de efluentes. Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria y Ciencias del Ambiente*. 1996. *Lima, Perú*,
- HERNÁNDEZ, L.A.** Technologies for the utilization of gas derived from anaerobic digestion of organic matter. *Agronomía Colombiana*, 1996.vol. 13, no. 1, pp. 76-90.



- HILBERT, J.A.** *Manual para la producción de biogás. Instituto de Ingeniería Rural* [en línea]. 1992. S.l.: INTA–Castelar. Disponible en: [https://inta.gob.ar/sites/default/files/script-tmp-manual\\_para\\_la\\_produccion\\_de\\_biogs\\_del\\_iir.pdf](https://inta.gob.ar/sites/default/files/script-tmp-manual_para_la_produccion_de_biogs_del_iir.pdf).
- JAIN, S., LALA, A.K., BHATIA, S.K. & KUDCHADKER, A.P.**, Modelling of hydrolysis controlled anaerobic digestion. *Journal of Chemical Technology & Biotechnology*, 1992. vol. 53, no. 4, pp. 337-344. ISSN 0268-2575.
- JEPSSON, U.** Investigation of anaerobic digestion alternatives for Henriksdal's WWTP. *Lund, Sweden*, 2007. vol. 274, pp. 275.
- JURADO, E. et al.** Continuous anaerobic digestion of swine manure: ADM1-based modelling and effect of addition of swine manure fibers pretreated with aqueous ammonia soaking. *Applied Energy*, 2016. vol. 172, pp. 190-198. ISSN 0306-2619.
- LANDEROS GUTIÉRREZ, C.S. & ODILÓN, S.** De los fuegos fatuos al biogás - Volumen XXV - Número 1 - Revista: La ciencia y el hombre - Universidad Veracruzana. [en línea], 2012. [Consulta: 26 abril 2022]. Disponible en: <https://www.uv.mx/cienciahombre/revistae/vol25num1/articulos/fuegos/>.
- LAY, J.-J., LEE, Y.-J. & NOIKE, T.** Feasibility of biological hydrogen production from organic fraction of municipal solid waste. *Water research*, 1999 vol. 33, no. 11, pp. 2579-2586. ISSN 0043-1354.
- MADIGAN, M.T., MARTINKO, J.M. & PARKER, J.B.** *Biología de los Microorganismos*. 1999. S.l.: Prentice Hall Iberia. Madrid.
- MANTILLA GONZALEZ, J.M., et al.**, Evaluación experimental de un motor encendido por chispa que utiliza biogás como combustible. *Ingeniería e Investigación*, 2008. vol. 28, no. 2, pp. 131-141. ISSN 0120-5609.
- MARTIN, S.A.**, Nutrient transport by ruminal bacteria: a review. *Journal of animal science*, 1994. vol. 72, no. 11, pp. 3019-3031. ISSN 0021-8812.
- MCCARTY, P.L.** Anaerobic waste treatment fundamentals. *Public works*, 1964. vol. 95, no. 9, pp. 107-112.
- MCINERNEY, M.J., BRYANT, M.P. & STAFFORD, D.A.** Metabolic stages and energetics of microbial anaerobic digestion. *Anaerobic digestion: [proceedings of the first International Symposium on Anaerobic Digestion, held at University College, Cardiff, Wales, September 1979]/edited by DA Stafford, BI Wheatley and DE Hughes*. S.l.: London, Applied Science Publishers, [1980].

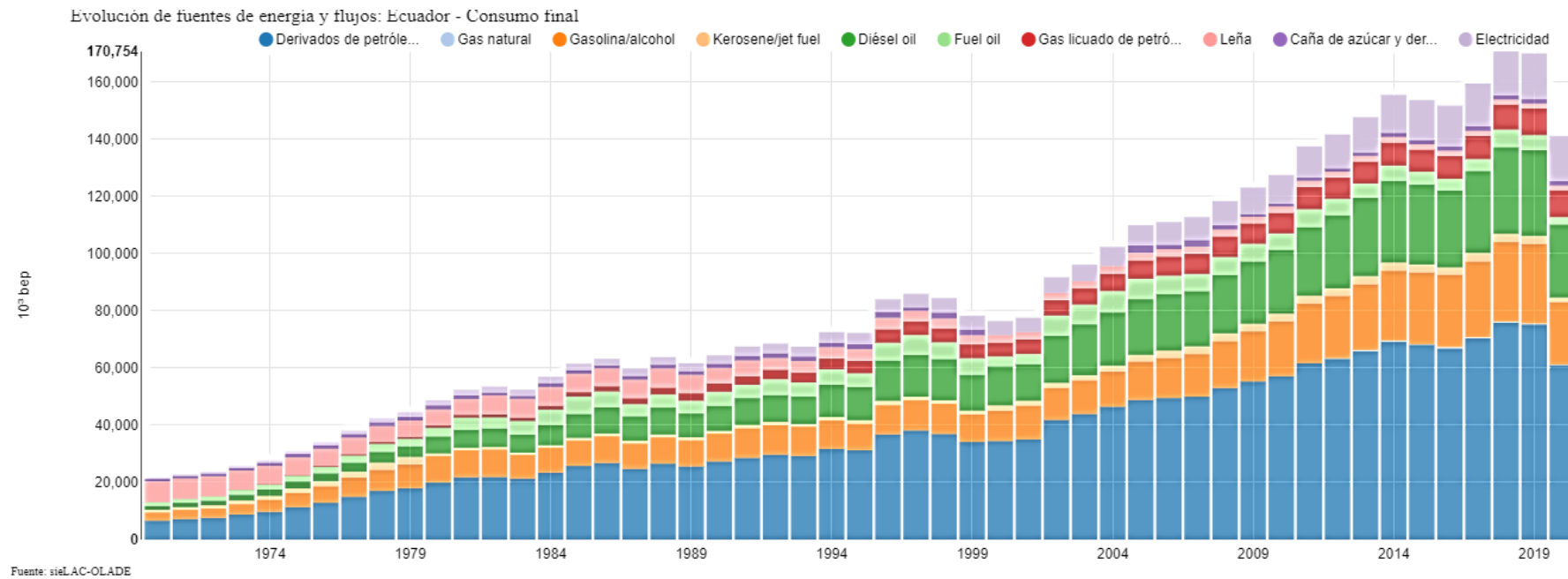
- MINISTERIO DEL AMBIENTE, A. y T.E.** Acuerdo de París sobre cambio climático – Ministerio del Ambiente, Agua y Transición Ecológica. 2016. [en línea]. [Consulta: 30 octubre 2022]. Disponible en: <https://www.ambiente.gob.ec/ecuador-suscribe-acuerdo-de-paris-sobre-cambio-climatico/>.
- MONCAYO ROMERO, G.** *Dimensionamiento y diseño de biodigestores y plantas de biogás, manual de usuario 3.0*. 2009. S.l.: Aqualimpia Beratende Ingenierure.
- MONGABAY**, El biogás hecho a partir de restos de comida y estiércol gana terreno. [en línea], 2022. [Consulta: 28 abril 2022]. Disponible en: <https://es.mongabay.com/2022/02/el-biogas-hecho-a-partir-de-restos-de-comida-y-estiercol-gana-terreno/>.
- NOGUÉS, F.S.** *Ciclo energías renovables. Jornadas de biomasa. (En línea), Abril 2002, (Fecha de consulta: 13 de enero de 2014)* [en línea]. 2002. S.l.: s.n. Disponible en: [http://www.agenergia.org/wp-content/uploads/2018/05/1234281334\\_Gralidades\\_biomasa.pdf](http://www.agenergia.org/wp-content/uploads/2018/05/1234281334_Gralidades_biomasa.pdf).
- NÚÑEZ PINTADO, L.F.** Modelamiento y control de proceso de digestión anaerobia para la producción de biogás a partir de residuos orgánicos y/o aguas residuales. 2017.
- OLADE, sieLAC.** Evolución de fuentes de energía y flujos: Ecuador-Producción. [en línea]. 2020a [Consulta: 28 abril 2022]. Disponible en: <https://sielac.olade.org/WebForms/Reportes/InfogramaEvolucionEnergeticosFlujos.aspx?or=605&ss=2&v=3>.
- OLADE, sieLAC.** Evolución de fuentes de energía y flujos: Ecuador-Producción. *Producción de Otras fuentes primarias de energía: Biogás, solar, eólica, residuos vegetales*. [en línea]. 2020b [Consulta: 28 abril 2022]. Disponible en: <https://sielac.olade.org/WebForms/Reportes/InfogramaEvolucionEnergeticosFlujos.aspx?or=605&ss=2&v=3>.
- OROZCO CANTOS, L.S.** *Levantamiento y análisis del potencial energético aprovechable de la biomasa forestal en el cantón Riobamba y su viabilidad a través de gasificación tipo Downdraft* [en línea]. 2017. S.l.: s.n. Disponible en: <http://bibdigital.epn.edu.ec/handle/15000/18894>.
- PALMOWSKI, L.M. & MÜLLER, J.A.** Influence of the size reduction of organic waste on their anaerobic digestion. *Water science and technology*, 2000.vol. 41, no. 3, pp. 155-162. ISSN 0273-1223.
- PAVLOSTATHIS, S.G. & GIRALDO-GOMEZ, E.** Kinetics of anaerobic treatment. *Water science and Technology*, 1991. vol. 24, no. 8, pp. 35-59. ISSN 0273-1223.

- PAZMIÑO MACAS, K.I.** *Biodigestores una solución energética para la población rural. Uso del biogás en un caso de estudio.* 2016. S.l.: Quito, Ecuador: Flacso Ecuador.
- PULKRABEK, W.W.**, *Engineering fundamentals of the internal combustion engine.* S.l.: Prentice Hall 2007.
- RAFAELA, I.**, Tabla de Composición Química de Alimentos. *Mundo Lácteo-Súper Campo, Buenos Aires* 1996.
- ROMÁN GÍA, R.A.**, *Diseño y simulación de un biodigestor para generar biogás y abono a partir de vísceras animales.* [en línea]. 2016. S.l.: s.n. Disponible en: <http://bibdigital.epn.edu.ec/handle/15000/16720>.
- ROSÉN, C. & JEPPSSON, U.**, Aspects on ADM1 Implementation within the BSM2 Framework. *Department of Industrial Electrical Engineering and Automation, Lund University, Lund, Sweden, 2006.* pp. 1-35.
- SISTEMA.BIO**, Acerca de Sistema.bio : Sistema.bio. [en línea]. 2022. [Consulta: 9 agosto 2022]. Disponible en: <https://sistema.bio/co/acerca-de-sistema-bio/>.
- STAMS, A.J.M.** Metabolic interactions between anaerobic bacteria in methanogenic environments. *Antonie van Leeuwenhoek*, 1994.vol. 66, no. 1, pp. 271-294. ISSN 1572-9699.
- SUÁREZ-CHERNOV, V.D., LÓPEZ-DÍAZ, I. & ÁLVAREZ-GONZÁLEZ, M.** Estimación De La Producción De Biogás a Partir De Un Modelo De Simulación De Procesos. *Centro Azúcar*, 2019.vol. 46, no. 1, pp. 73-85. ISSN 2223-4861.
- SUÁREZ-HERNÁNDEZ, J., SOSA-CÁCERES, R., MARTÍNEZ-LABRADA, Y., CURBELO-ALONSO, A., FIGUEREDO-RODRÍGUEZ, T. & CEPERO-CASAS, L.** Análisis y Comentario evaluación del potencial de producción del biogás en Cuba evaluation of the biogas production potential in Cuba. *Pastos y Forrajes*, 2018. vol. 41, no. 2, pp. 85-92.
- TORTORA, G.J., FUNKE, B.R. & CASE, C.L.**, *Introducción a la microbiología.* S.l.: Ed. Médica Panamericana. 2007. ISBN 9500607409.
- VALLADARES CARNERO, F.** Modelamiento del proceso de digestión anaeróbica de estiércol vacuno y cáscara de cacao. [en línea], 2017. Disponible en: [https://pirhua.udep.edu.pe/bitstream/handle/11042/3069/IME\\_225.pdf?sequence=1&isAllowed=y](https://pirhua.udep.edu.pe/bitstream/handle/11042/3069/IME_225.pdf?sequence=1&isAllowed=y).

- VARNERO MORENO, M.T.** *Manual de biogás*. Santiago de Chile: FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION OS THE UNITED NATIONS. 2011. ISBN 978-95-306892-0.
- VENEGAS VENEGAS, J.A.** Biogás, la energía renovable para el desarrollo de granjas porcícolas en el estado de Chiapas. *Análisis Económico*, 2019. vol. 34, no. 85, pp. 169-187. ISSN 0185-3937. DOI 10.24275/uam/azc/dcsh/ae/2019v34n85/venegas.
- VILLAFUERTE LÓPEZ, M.I. & RAZO ACHIG, E.R.** *Diseño, construcción y pruebas de un biodigestor experimental para fines didácticos*. 2007. S.l.: QUITO/EPN/2007.
- WARD, A.J., HOBBS, P.J., HOLLIMAN, P.J. & JONES, D.L.** Optimisation of the anaerobic digestion of agricultural resources. *Bioresource technology*, 2008.vol. 99, no. 17, pp. 7928-7940. ISSN 0960-8524.

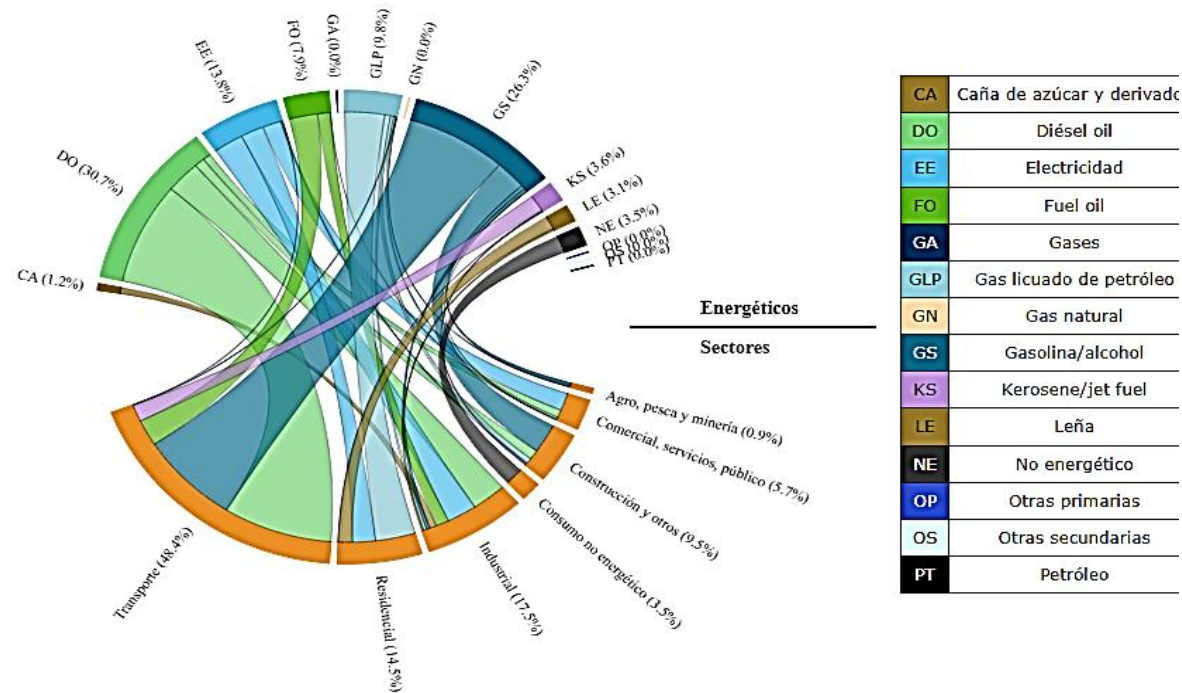
## ANEXOS

### ANEXO A: EVOLUCIÓN DE FUENTES DE ENERGÍA Y FLUJOS: ECUADOR – CONSUMO FINAL.



**ANEXO B: PARTICIPACIÓN DEL CONSUMO FINAL POR ENERGÉTICO Y SECTORES: ECUADOR - 2010 | CONSUMO FINAL: 72930,34 [10<sup>3</sup> bep].**

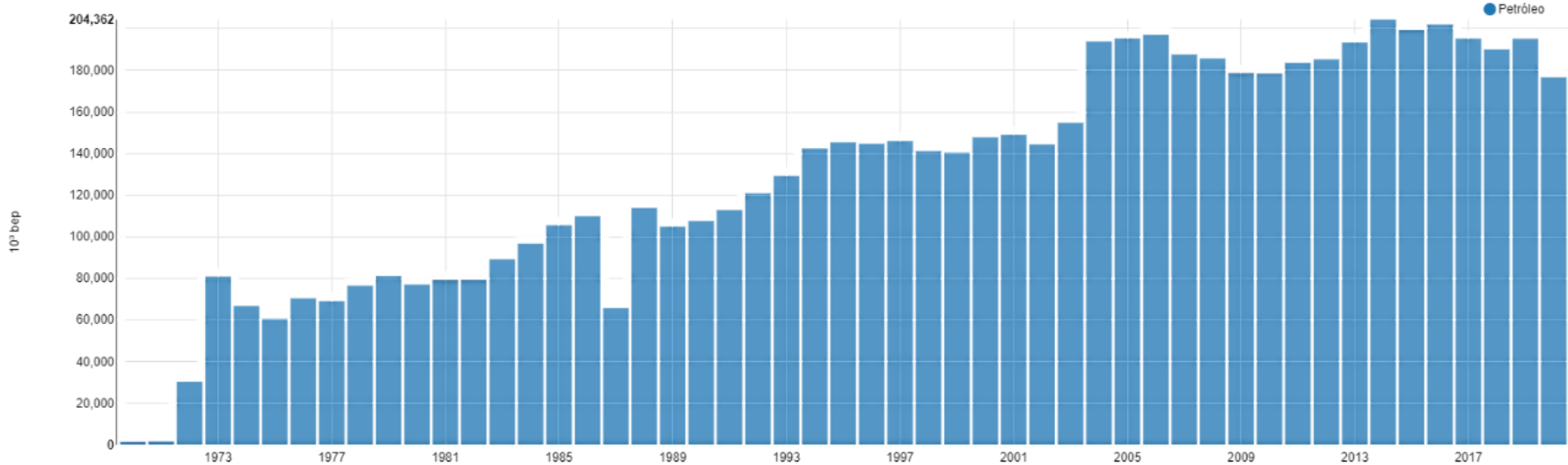
Participación del consumo final por energético y sectores: Ecuador - 2010 | Consumo Final: 72930,34 [10<sup>3</sup> bep]



Fuente: sielAC-OLADE

### ANEXO C: EVOLUCIÓN DE FUENTES DE ENERGÍA Y FLUJOS: ECUADOR – PRODUCCIÓN.

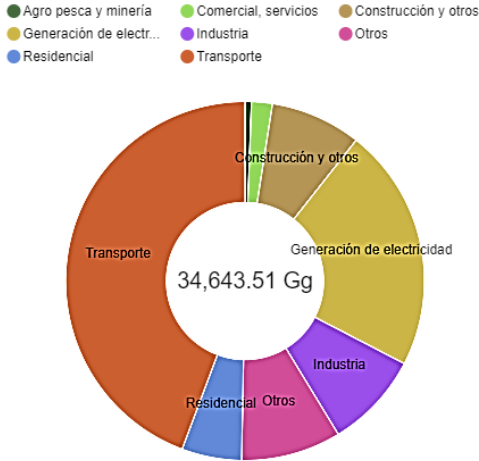
Evolución de fuentes de energía y flujos: Ecuador - Producción



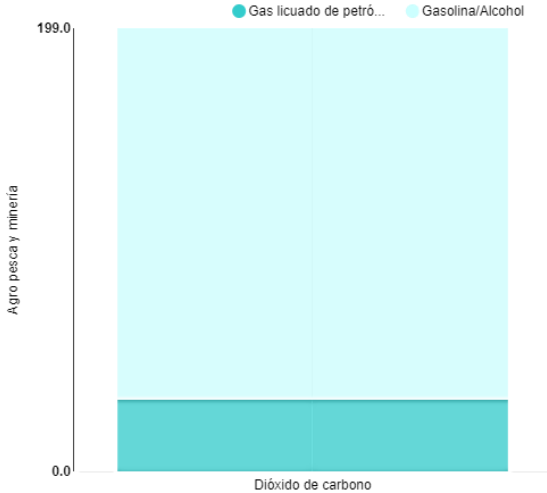
Fuente: s/eLAC-OLADE  
 Otras primarias incluye: Biogás, solar, eólica, residuos vegetales.

**ANEXO D: EMISIONES DE CO2: ECUADOR – 2010 | EMISIONES TOTALES:34 643,51 Gg.**

Emisiones de co2: Ecuador - 2010 | Emisiones totales: 34,643.51 Gg



Fuente: IIA/LAC-OLADE





**ANEXO E: GRAFICA DEL DESARROLLO DE LAS CONCENTRACIONES EN EL BIOGÁS.**

