

UNIVERSIDAD SAN FRANCISCO DE QUITO

Colegio de Ciencias e Ingeniería

**Puesta en marcha de la planta semi-industrial de digestión
anaeróbica en Latinoamericana de Jugos S.A.**

Ana Carolina Araujo Lascano

Tesis de grado presentada como requisito
para la obtención del título de Ingeniera Química

Quito, junio de 2014

Universidad San Francisco de Quito

Colegio de Ciencias e Ingeniería, El Politécnico

HOJA DE APROBACIÓN DE TESIS

**Puesta en marcha de la planta semi – industrial de digestión anaeróbica en
Latinoamericana de Jugos S.A.**

Ana Carolina Araujo Lascano

Dr.- Ing. Daniela Gertrud Almeida Streitwieser
Directora de la tesis

Ing. César Octavio León Orellana
Miembro del Comité de Tesis

Ph.D. Gustavo Muñoz Rivadeneira
Miembro del Comité de Tesis

Ph.D. Ximena Córdova
Decana del Colegio de Ingeniería

Quito, Junio del 2014

© DERECHOS DE AUTOR

Por medio del presente documento certifico que he leído la Política de Propiedad Intelectual de la Universidad San Francisco de Quito y estoy de acuerdo con su contenido, por lo que los derechos de propiedad intelectual del presente trabajo de investigación quedan sujetos a lo dispuesto en la Política.

Asimismo, autorizo a la USFQ para que realice la digitalización y publicación de este trabajo de investigación en el repositorio virtual, de conformidad a lo dispuesto en el Art. 144 de la Ley Orgánica de Educación Superior.

Firma:

Nombre: Ana Carolina Araujo Lascano

C. I.: 1717175325

Fecha: Junio de 2014

DEDICATORIA

Esta investigación de tesis la dedico a las tres personas que me han ayudado y guiado a lo largo de mi carrera y durante la realización de este proyecto. A mis padres por siempre darme su amor, apoyo y la determinación de conseguir mis metas propuestas. A Sergio Charpentier por estar siempre a mi lado, por su ayuda y tiempo brindado, por alentarme y creer en mí siempre.

AGRADECIMIENTO

A mis padres, José y Nelly, por su amor, apoyo y todas las enseñanzas y valores impartidos desde niña para ayudarme a ser quien soy ahora, además de financiar mis estudios e incentivar me a que los culmine con éxito. Un agradecimiento especial a mi mami, por toda su paciencia durante mis estudios.

A mi esposo Sergio, por toda su comprensión y estar junto a mí a lo largo de mi carrera universitaria, por ayudarme y brindarme siempre una sonrisa. También, por darme la fuerza y los ánimos necesarios en cada momento de mi vida sabiendo que con el apoyo mutuo todo es posible.

A mi ahijada Leti, por ser una niña muy dulce que con su cariño siempre me supo alegrar mis días incluso en los momentos difíciles.

A mi hermana Vale, por su ejemplo, sus consejos a lo largo de mi vida, su cariño y por siempre estar pendiente de mí. A mi hermana Mishel por siempre apoyarme y aconsejarme en mis decisiones. A mis sobrinitos, Dani y Josué por alegrarme los días al ver sus caritas.

A mi abuelita Rosita, mi tía Elisita y mi prima Gracecita, por quererme y siempre festejar mis triunfos y apoyarme en mis derrotas.

A Daniela Almeida por sus exigencias buscando que demos lo mejor de nosotros en cada proyecto. Por su apoyo dirigido en la realización de mi tesis y ayudarme a que logre culminar este sueño.

A Carlos Fabara, por estar pendiente de sus estudiantes y sacar adelante el departamento de Ingeniería Química. A los miembros de mi comité, Gustavo y César, por el tiempo prestado en leer mi trabajo. A todos los profesores por todos sus conocimientos impartidos. Un agradecimiento para Lourdes Orejuela por aceptarme como asistente y brindarme su amistad y confianza.

A mis amigos con los que compartí valiosos momentos durante la carrera. En especial a Pablo Rueda por su amistad sincera y ayuda incondicional.

RESUMEN

En este proyecto de tesis se realiza la puesta en marcha de una planta semi - industrial de digestión anaeróbica ubicada en la Industria Latinoamericana de Jugos S.A. (La Jugosa) para asegurar un arranque exitoso de la misma. Se inició con la verificación del cumplimiento del proyecto, mediante visitas a la fábrica del proveedor Inoxking para constatar la correcta construcción de los equipos principales según contrato. Se realiza la puesta en marcha en frío de la planta en la que se utilizó agua como materia para garantizar que todos los equipos y las unidades de control funcionen correctamente. Posteriormente, se efectúa la puesta en marcha en caliente con el uso de desecho de fruta, estiércol y agua, con el objetivo de hacer los ajustes necesarios para que el proceso de digestión anaerobia se ejecute óptimamente. A lo largo de estas pruebas se hizo la calibración de los equipos para adecuar los parámetros de operación según requiere el proceso de digestión anaeróbica. Durante la realización de todas las pruebas se tomaron acciones correctivas y preventivas para que la planta opere eficientemente y sin riesgo para los futuros operadores encargados de la planta.

Adicionalmente, se realizan experimentos a escala laboratorio en el Laboratorio de Desarrollo de Energías Alternativas (LaDEA) para comprobar si el agua de lavado de frutas de Latinoamericana de Jugos S.A. puede ser utilizada en el proceso de digestión anaerobia sin inhibir la degradación de la materia orgánica por la presencia de detergente. Se obtuvo resultados favorables durante los experimentos con una producción de biogás que contenía un alto porcentaje de metano. La carga orgánica óptima para la alimentación fue de $0.5 \text{ [kg}_{\text{DQO}}/\text{m}^3 \cdot \text{d}]$ que a pesar de tener la producción de biogás más pobre, era la que contenía el mayor porcentaje de metano, teniendo una producción máxima de biogás de 800 [mL/d] y de 560 [mL/d] de metano.

ABSTRACT

In this thesis project, the startup of the semi – industrial anaerobic digestion plant in the agribusiness Latinoamericana de Jugos S.A. (La Jugosa) is executed to assure the success of its operation. The project begins with the verification of the accomplishment of the project, through visits to the provider Inoxking, in order to assure the correct construction and assembly of the main equipment according to the contract. Cold commissioning is set forth in the plant on which water was used as material to guarantee that all the equipment and control units work properly. Afterwards, warm commissioning is set forth with the use of fruit waste, manure and water, to assure the right adjustments and operation of the anaerobic digestion process. Throughout these tests the equipment was calibrated in order to adjust the operation parameters according to the requirements of the anaerobic digestion process. During the realization of all the execution of the commissioning, corrective and preventive actions plant can operate effectively and without risk.

Additionally, experiments are set forth at laboratory scale in the “Laboratorio de Desarrollo de Energías Alternativas (LaDEA)”, in order to assure that the fruit washing water from “Latinoamericana de Jugos” can be used in the anaerobic digestion process without leading to inhibitions in the degradation of the organic material due to the presence of detergents. Favorable results were obtained during the experiments with the production of biogas which contained a high percentage of methane. The optimal organic charge for the alimentation was of 0.5 [$\text{kg}_{\text{DQO}}/\text{m}^3 \cdot \text{d}$] which although having a much lower production of biogas, contained the highest percentage of methane, with a biogas production of the 800[mL/d] and 560 [mL/d] of methane.

TABLA DE CONTENIDOS

1. INTRODUCCIÓN	1
1.1 ANTECEDENTES	1
1.2 JUSTIFICACIÓN.....	2
1.3 OBJETIVOS.....	3
1.3.1 <i>Objetivo general</i>	3
1.3.2 <i>Objetivos específicos</i>	3
2. FUNDAMENTO TEÓRICO	4
2.1 PROBLEMÁTICA DE LOS DESECHOS AGROINDUSTRIALES	4
2.2 POSIBLES SOLUCIONES A LOS DESECHOS INDUSTRIALES.....	5
2.3 PROBLEMÁTICA EN LA FÁBRICA LATINOAMERICANA DE JUGOS S.A.....	7
2.4 PROGRAMA INNOVAECUADOR	8
2.5 DIGESTIÓN ANAERÓBICA.....	8
2.5.1 <i>Características del proceso de digestión anaeróbica</i>	9
2.5.2 <i>Fases de la digestión anaerobia</i>	9
2.5.2.1 Hidrólisis.....	9
2.5.2.2 Acidogénesis	10
2.5.2.3 Acetogénesis	10
2.5.2.4 Metanogénesis.....	11
2.5.3 <i>Factores que afectan al proceso anaerobio</i>	12
2.5.3.1 Temperatura	13
2.5.3.2 pH.....	13
2.5.3.3 Toxicidad	14
2.5.3.4 Composición de la alimentación	16
2.5.3.5 Velocidad de carga volumétrica	17
2.5.3.6 Tiempo de residencia	17
2.5.3.7 Agitación	18
2.5.4 <i>Productos de la digestión anaeróbica</i>	18
2.5.4.1 Biogás.....	19
2.5.4.2 Biol	21
2.6 DISEÑO DE BIODIGESTORES	22
2.6.1 <i>Materiales de construcción de los biodigestores</i>	23
2.6.2 <i>Operación de biodigestores</i>	24
2.6.2.1 Operación discontinua	24
2.6.2.2 Operación continua.....	25
2.7 CARACTERIZACIÓN DE LA MATERIA PRIMA Y MEZCLA REACTIVA	26
2.7.1 <i>Sólidos totales</i>	27
2.7.2 <i>Sólidos totales volátiles</i>	27

2.7.3	<i>Demanda química de oxígeno</i>	27
3.	MÉTODOS EXPERIMENTALES	29
3.1	MATERIALES Y EQUIPOS	29
3.2	DISEÑO DE EXPERIMENTOS.....	30
3.3	PUESTA EN MARCHA DEL BIORREACTOR DE LABORATORIO	31
3.3.1	<i>Preparación de la alimentación para el biodigestor escala laboratorio</i>	32
3.3.1.1	Desecho de fruta.....	32
3.3.1.2	Estiércol.....	34
3.3.1.3	Agua de lavado.....	35
3.3.1.4	Volumen de alimentación de las materias primas	35
3.3.2	<i>Parámetros de operación para el funcionamiento del biodigestor</i>	36
3.3.2.1	pH.....	36
3.3.2.2	Temperatura	38
3.3.2.3	Producción de gas	38
3.3.3	<i>Caracterización de la alimentación y de la mezcla reactiva de los experimentos del agua de lavado</i>	38
3.3.3.1	DQO.....	39
3.3.3.2	Sólidos totales.....	40
3.3.3.3	Sólidos totales orgánicos.....	41
3.3.4	<i>Caracterización biogás</i>	42
3.3.4.1	Prueba cualitativa de quemado	42
3.3.4.2	Prueba cuantitativa	42
3.4	CÁLCULOS PARA LA PRODUCCIÓN Y DEGRADACIÓN ESPECÍFICA	42
4.	RESULTADOS	44
4.1	CARACTERIZACIÓN DE LA MATERIA PRIMA DE LOS EXPERIMENTOS DEL AGUA DE LAVADO	44
4.1.1	<i>Desecho de fruta</i>	44
4.1.2	<i>Estiércol bovino</i>	45
4.1.3	<i>Agua de lavado de frutas</i>	45
4.2	ALIMENTACIÓN DEL BIODIGESTOR	46
4.3	PARÁMETROS DE OPERACIÓN DEL BIODIGESTOR	47
4.3.1	pH.....	47
4.3.2	Temperatura	49
4.4	CARACTERIZACIÓN DE LA MEZCLA REACTIVA Y ALIMENTACIÓN DE LOS EXPERIMENTOS DEL AGUA DE LAVADO.....	49
4.4.1	<i>Demanda química de oxígeno (DQO)</i>	50
4.4.2	<i>Sólidos totales (TS)</i>	51
4.4.3	<i>Sólidos totales orgánicos (OTS)</i>	52
4.5	CARACTERIZACIÓN DE BIOGÁS.....	53

4.5.1	<i>Prueba cualitativa de combustión</i>	54
4.5.2	<i>Prueba cuantitativa</i>	55
4.6	EVALUACIÓN DE RESULTADOS.....	55

5. DESCRIPCIÓN DE LA PLANTA DE DIGESTIÓN ANAERÓBICA EN LATINOAMERICANA DE JUGOS S.A. 59

5.1	DESCRIPCIÓN DEL PROCESO.....	59
5.1.1	<i>Recepción de la materia prima</i>	59
5.1.2	<i>Pretratamiento de la materia prima para el digestor</i>	60
5.1.2.1	<i>Triturado y picado</i>	60
5.1.2.2	<i>Homogenización de la mezcla reactiva</i>	60
5.1.2.3	<i>Tamizado</i>	61
5.1.3	<i>Biodigestión anaerobia</i>	61
5.1.4	<i>Purificación y almacenamiento del biogás</i>	62
5.1.5	<i>Proceso de estabilización y almacenamiento del biol</i>	62
5.1.6	<i>Circuito de agua en los intercambiadores de calor</i>	62
5.2	CAPACIDAD DE LA PLANTA.....	63
5.3	EQUIPOS DE LA PLANTA DE DIGESTIÓN ANAERÓBICA.....	66
5.3.1	<i>Tanque de almacenamiento de estiércol M-1</i>	66
5.3.2	<i>Tanque de almacenamiento de fruta M-2</i>	68
5.3.3	<i>Picadora/ Triturador F-1</i>	69
5.3.4	<i>Tanque de Homogenización A-1</i>	71
5.3.5	<i>Tamiz vibratorio con tanque F-2</i>	72
5.3.6	<i>Biodigestor D-1</i>	73
5.3.7	<i>Desulfurizador biogás G-1</i>	75
5.3.8	<i>Deshumidificador G-2</i>	76
5.3.9	<i>Tanque de almacenamiento de biogás C-2</i>	77
5.3.10	<i>Tanque de almacenamiento de biogás comprimido C-3</i>	78
5.3.11	<i>Tanque de almacenamiento de biol C-4</i>	79
5.3.12	<i>Intercambiador de calor tubo en carcasa U-3</i>	80
5.3.13	<i>Estabilizador biol U-5</i>	81
5.4	BOMBAS DE LA PLANTA DE DIGESTIÓN ANAERÓBICA.....	82
5.5	OPERACIÓN MANUAL Y AUTOMÁTICA DE LA PLANTA DE DIGESTIÓN ANAERÓBICA EN LATINOAMERICANA DE JUGOS S.A.	84
5.5.1	<i>Operación manual</i>	85
5.5.2	<i>Operación automática</i>	86

6. PUESTA EN MARCHA DE LA PLANTA DE DIGESTIÓN ANAERÓBICA 88

6.1	PUESTA EN MARCHA EN FRÍO DE LA PLANTA DE DIGESTIÓN ANAERÓBICA.....	88
6.1.1	Tanque de almacenamiento de estiércol M-1.....	88
6.1.2	Tanque de almacenamiento de fruta M-2	88
6.1.3	Picador / triturador F-1	88
6.1.4	Tanque de homogenización A-1.....	89
6.1.5	Tamiz vibratorio con tanque F-2	90
6.1.6	Biodigestor D-1.....	90
6.1.7	Intercambiador de calor tubo en carcasa U-3.....	92
6.1.8	Estabilizador de biol U-5.....	93
6.1.9	Tanque de almacenamiento de biogás C-2.....	93
6.1.10	Compresor E-1	95
6.1.11	Tanque de almacenamiento de biogás comprimido C-3	95
6.1.12	Línea de biogás.....	96
6.1.13	Tanque de almacenamiento de biol C-4.....	96
6.1.14	Bomba de agua para el proceso B-1.....	97
6.1.15	Bomba sumergible B-2	97
6.1.16	Bomba sumergible B-3	97
6.1.17	Bomba de diafragma B-4	97
6.1.18	Bomba de diafragma B-5	98
6.1.19	Bomba B-6.....	98
6.1.20	Bomba agua caliente B-7	99
6.1.21	Bomba dosificadora alcalina B-8.....	99
6.1.22	Bomba dosificadora ácida B-9.....	99
6.1.23	Bomba agua caliente B-10	99
6.2	PUESTA EN MARCHA EN CALIENTE DE LA PLANTA DE LA PLANTA DE DIGESTIÓN ANAERÓBICA	99
6.2.1	Tanque de almacenamiento de estiércol M-1.....	100
6.2.2	Tanque de almacenamiento de fruta M-2	100
6.2.3	Picador /Triturador F-1.....	100
6.2.4	Tanque de homogenización A-1.....	101
6.2.5	Tamiz vibratorio con tanque F-2	101
6.2.6	Biodigestor D-1.....	102
6.2.6.1	Pruebas con aire.....	102
6.2.6.2	Pruebas con fruta, estiércol y agua	104
6.2.7	Intercambiador de calor tubo en carcasa U-3.....	105
6.2.8	Estabilizador biol U-5	105
6.2.9	Tanque de almacenamiento de biogás C-2.....	105
6.2.10	Compresor E-1	106
6.2.11	Tanque de almacenamiento de biogás comprimido C-3	106

6.2.12	<i>Línea de biogás</i>	107
6.2.13	<i>Tanque de almacenamiento de biol C-4</i>	108
6.2.14	<i>Bomba de agua para el proceso B-1</i>	108
6.2.15	<i>Bomba sumergible B-2</i>	109
6.2.16	<i>Bomba sumergible B-3</i>	110
6.2.17	<i>Bomba de diafragma B-4</i>	110
6.2.18	<i>Bomba diafragma B-5</i>	111
6.2.19	<i>Bomba B-6</i>	111
6.2.20	<i>Bomba agua caliente B-7</i>	112
6.2.21	<i>Bombas dosificadoras alcalina B-8 y ácida B-9</i>	112
6.2.22	<i>Bomba de agua caliente B-10</i>	112
7.	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	113
8.	BIBLIOGRAFÍA	116
9.	ANEXOS	121

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1 Variación del manejo de desechos en el transcurso de los años [10]	7
Figura 2.2 Fases de la digestión anaerobia [18]	12
Figura 2.3 Periodo de digestión de lodos [9]	18
Figura 3.1 Biorreactor escala laboratorio	30
Figura 3.2 Cribas de la trituradora Cremasco [49].....	33
Figura 3.3 Triturador Cremasco [49]	34
Figura 3.4 Medidor de pH.....	37
Figura 3.5 a) Reactor HACH DRB 200, b) Colorímetro HACH DR/890	39
Figura 4.1 pH en la alimentación y la mezcla reactiva	48
Figura 4.2 Consumo de hidróxido de sodio	49
Figura 4.3 DQO en la alimentación y mezcla reactiva	50
Figura 4.4 Sólidos totales en la alimentación y mezcla reactiva.....	51
Figura 4.5 Sólidos totales orgánicos en la alimentación y mezcla reactiva	52
Figura 4.6 Producción de gas	53
Figura 4.7 Prueba cualitativa de biogás	54
Figura 4.8 Porcentaje de metano en el biogás.....	55
Figura 4.9 Degradación específica	57
Figura 4.10 Producción específica del biogás y el metano	57
Figura 5.1 Diagrama de flujo del proceso.....	59
Figura 5.2 Tanque de almacenamiento de estiércol	67
Figura 5.3 Tornillo sin fin T-1	68
Figura 5.4 Tanque de almacenamiento de fruta	69
Figura 5.5 a) Vista frontal Picadora / Triturador, b) Vista Lateral Picadora / Triturador	70
Figura 5.6 a) Vista frontal del Tanque de Homogenización A-1, b) Vista en el interior del Tanque de Homogenización A-1.....	71
Figura 5.7 Tamiz vibratorio	73
Figura 5.8 Biodigestor.....	74
Figura 5.9 Relleno para el biodigestor	75
Figura 5.10 Desulfurizador de biogás G-1 y Deshumidificador de biogás G-2....	76
Figura 5.11 Tanque de almacenamiento de biogás C-2.....	78
Figura 5.12 Tanque de almacenamiento de biogás comprimido C-3.....	79

Figura 5.13 Tanque de almacenamiento de biol C-4	80
Figura 5.14 Intercambiador de calor tubo en carcasa U-3	81
Figura 5.15 Estabilizador biol U-5	82
Figura 5.16 Panel de control	84
Figura 6.1 Pruebas de calentamiento en intercambiadores de calor	92
Figura 6.2 Contador de gas	95
Figura 6.3 Manómetro del tanque C-3	96
Figura 6.4 Bomba B-4 con su sistema de amortiguamiento	98
Figura 6.5 Fuga alrededor del anillo perimetral	103
Figura 6.6 Fuga en el manhole del biodigestor	104
Figura 6.7 Fuga en la tapa del filtro	107
Figura 6.8 Válvula de mariposa a la salida del tanque homogenizador A-1	109

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2.1 Costos de recolección, transporte y disposición final de los desechos en el DMQ 2008 [8]	4
Tabla 2.2 Ingresos mensuales de residuos sólidos al relleno sanitario de El Inga [8]	5
Tabla 2.3 Composición de los desechos sólidos en el DMQ en el año 2007 [9]	5
Tabla 2.4 Valores de concentración de ciertos inhibidores comunes [17].....	16
Tabla 2.5 Propiedades físico- químicas del biogás [19]	19
Tabla 2.6 Composición química del biol [30].....	22
Tabla 3.1 Experimentos a escala laboratorio	31
Tabla 4.1 Características de la fibra de piña [49].....	44
Tabla 4.2 Características del estiércol bovino [49]	45
Tabla 4.3 Características del agua de lavado de frutas	46
Tabla 4.4 Porcentajes totales de la alimentación	47
Tabla 4.5 Porcentaje de oTS con respecto a TS en la alimentación	53
Tabla 4.6 Concentraciones de DQO del afluente, efluente y en el interior del reactor.....	56
Tabla 4.7 Balance de masa del reactor	56
Tabla 5.1 Generación de desechos de fruta de junio a diciembre de 2010	64
Tabla 5.2 Proyección de desechos de frutas para los próximos años.....	65
Tabla 5.3 Equipos principales de la planta de digestión anaeróbica.....	66
Tabla 5.4 Dimensiones tanque de almacenamiento de estiércol M-1	67
Tabla 5.5 Dimensiones tornillo sin fin T-1	68
Tabla 5.6 Dimensiones tanque de almacenamiento de fruta M-2	69
Tabla 5.7 Dimensiones picadora/ triturador F-1	70
Tabla 5.8 Dimensiones tanque de homogenización A-1	72
Tabla 5.9 Dimensiones tamiz vibratorio con tanque F-2	73
Tabla 5.10 Dimensiones biodigestor D-1.....	74
Tabla 5.11 Dimensiones Relleno Bioreactor	75
Tabla 5.12 Características filtro desulfurizador de biogás G-1.....	76
Tabla 5.13 Características filtro deshumidificador de biogás G-2.....	77
Tabla 5.14 Dimensiones tanque de almacenamiento de biogás C-2.....	78
Tabla 5.15 Dimensiones tanque de almacenamiento de biogás comprimido C-3	79

Tabla 5.16 Dimensiones tanque de almacenamiento de biol C-4	80
Tabla 5.17 Dimensiones intercambiador de calor tubo en carcasa U-3	81
Tabla 5.18 Dimensiones estabilizador de biol U-5	82
Tabla 5.19 Bombas del proceso	83
Tabla 5.20 Panel de control.....	85
Tabla 5.21 Encendido manual de los equipos	85
Tabla 5.22 Proceso lógico programable de la operación automática.....	86
Tabla 6.1 Calibración de nivel A-1	89
Tabla 6.2 Calibración de nivel F-2.....	90
Tabla 6.3 Calibración de nivel D-1	91
Tabla 6.4 Calibración de nivel C-4	96
Tabla 6.5 Calibración bomba B-1	108
Tabla 6.6 Calibración válvula de alimentación de agua en A-1	109
Tabla 6.7 Calibración bomba B-2	110
Tabla 6.8 Calibración bomba B-3	110
Tabla 6.9 Calibración bomba B-4	111
Tabla 6.10 Calibración bomba B-5	111
Tabla 6.11 Calibración bomba B-7	112
Tabla 6.12 Calibración bomba B-10	112

NOMENCLATURA

A_R	Acumulación	[kg _{DQO}]
$C.O.$	Carga orgánica	[kg _{DQO} /m ³ ·d]
\dot{V}_{Agua}	Caudal de agua	[m ³ /d]
\dot{V}_{Total}	Caudal de alimentación	[m ³ /d]
\dot{B}_G	Caudal de biogás producido	[m ³ /d]
$\dot{V}_{M.O.}$	Caudal de materia orgánica	[m ³ /d]
TS	Concentración de sólidos totales	[mg/mL]
oTS	Concentración de sólidos totales orgánicos	[mg/mL]
D_R	Degradación	[kg _{DQO}]
$C_{DQO\ M.O.}$	DQO experimental de la materia orgánica	[kg _{DQO} /m ³]
E_R	Entrada	[kg _{DQO}]
\dot{m}_{DQO}	Flujo másico de DQO	[kg _{DQO} /d]
m_3	Masa de la muestra calcinada y crisol	[mg]
m_2	Masa de la muestra seca y el crisol	[mg]
m_1	Masa de la muestra y el crisol	[mg]
m_0	Masa del crisol	[mg]
$P.E.f$	Producción específica de alimentación	[m ³ /kg _{DQO} alim]
$R.E.$	Remoción específica	[kg _{DQO} /m ³]
S_R	Salida	[kg _{DQO}]
τ	Tiempo de residencia	[d]
$V_{Reactor}$	Volumen de operación en el reactor	[m ³]
V	Volumen inicial de la muestra	[mL]

1. Introducción

1.1 Antecedentes

Ecuador se ha caracterizado por ser un país de alta producción agrícola. Con el objetivo de promover la economía del país los empresarios han buscado vías alternas para convertir la materia prima en productos con valor agregado. Estos procesos de industrialización generan desechos orgánicos biodegradables que representan un problema para la empresa y la comunidad a su alrededor, la acumulación de los desechos ocasiona la presencia de moscas y roedores, ocasionando la proliferación de enfermedades. Por otro lado, el mal manejo de los desechos ocasiona un impacto ambiental en los recursos hídricos, en la atmósfera y en el suelo. La contaminación de aguas por materia orgánica ocasiona que se altere el pH del medio, se elimina el oxígeno vital para las especies acuáticas y se contaminan las aguas de uso humano haciendo más costosos los tratamientos de purificación. El aire se ve afectado por la generación de gases y malos olores en la etapa de descomposición de la materia orgánica, incrementando el efecto invernadero en el planeta debido a la presencia de gases tóxicos como el metano y el dióxido de carbono. El suelo se contamina por la manifestación de lixiviados que se filtran a través de él, afectando la productividad y acabando con la microfauna existente [1, 2].

A escala industrial y semi-industrial no se ha encontrado una solución eficiente a este problema, tan sólo la recolección temprana de los desechos y traslado a botaderos de basura, que generan costos adicionales a la empresa y a los municipios encargados [1]. Las empresas delegadas de esta labor en el Distrito Metropolitano de Quito son: la Empresa Pública Metropolitana de Aseo en Quito (EMASEO EP) responsable de la recolección de los residuos sólidos domiciliarios e industriales no peligrosos y la Empresa Pública Metropolitana de Gestión Integral de los Residuos Sólidos (EMGIRS EP) que se encarga de la disposición final de los desechos, brindando el tratamiento adecuado en los rellenos sanitarios para evitar que causen un peligro para la salud o la seguridad pública, cuidando el medio ambiente durante y después de la operación [3, 4]. En el cantón Rumiñahui la Empresa Pública Municipal de Residuos Sólidos Rumiñahui-Aseo (EPM) está a cargo de las actividades de recolección, transporte, barrido, disposición final, almacenamiento, tratamiento y comercialización de los residuos sólidos [5].

Actualmente, no existe en el país a nivel industrial, un proyecto que utilice la biomasa residual del material orgánico húmedo para transformarlo en biol y biogás. En el Laboratorio de Desarrollo de Energías Alternativas (LaDEA) se vienen realizando desde el año 2008 una serie de investigaciones a nivel de laboratorio y planta piloto en este tema. Por lo tanto, la USFQ propuso el proyecto “Diseño, construcción y puesta en marcha de una planta semi-industrial de alta tecnología de digestión anaerobia para el tratamiento integral de desechos orgánicos y su transformación en energía renovable (biogás) y fertilizante orgánico (biol)” en el programa InnovaEcuador, que está promovido por el Ministerio de Coordinación de la Producción, Empleo y Competitividad. Este proyecto fue uno de los 19 proyectos ganadores de la primera convocatoria InnovaEcuador. Latinoamericana de Jugos S.A., al ser una empresa competitiva e innovadora en el Ecuador, ha decidido colaborar con las investigaciones realizadas por la USFQ en planta piloto de los procesos de digestión anaeróbica, para que pueda implementarse este proyecto en la fábrica.

El proyecto de tesis contempla la puesta en marcha de la planta semi – industrial de digestión anaerobia en Latinoamericana de Jugos S.A. para asegurar un arranque exitoso que permita garantizar la operatividad de la planta a largo plazo, para lo cual además se tuvieron que realizar experimentos de laboratorio de digestión anaeróbica con desecho de fruta, estiércol y agua de lavado de las frutas.

1.2 Justificación

Debido al progresivo aumento de desechos orgánicos generados en la planta de Latinoamericana de Jugos S.A. “La Jugosa” y los constantes gastos que implica la recolección diaria de los mismos, se ha visto la necesidad de su aprovechamiento, mediante la reutilización del residuo de fruta en un biodigestor. Este proceso se lo conoce como la biodigestión anaerobia y trae consigo diversas ventajas que se enunciarán a continuación:

- Reducir los desechos de fruta, con el fin de aminorar la recolección diaria de basura.
- Disminuir el impacto ambiental, al reducir la cantidad de desechos orgánicos almacenados para evitar la presencia de roedores y vectores.
- Proveer biogás como una fuente de energía renovable.

- Obtener fertilizante orgánico conocido como biol, para abonar los cultivos agrícolas de una forma natural, libre de químicos sintéticos, lo cual genere un producto de valor agregado a la planta al poder comercializar el mismo.
- Ilustrar con esta propuesta, un modelo a seguir para futuros proyectos en empresas de Ecuador.

1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivo general

El objetivo de este trabajo de tesis es asegurar un arranque coordinado y exitoso del sistema de digestión anaeróbica en la planta de digestión anaerobia en Latinoamericana de Jugos S.A.

1.3.2 Objetivos específicos

- Verificar la planificación, construcción y puesta en marcha del proyecto para asegurar el cumplimiento según el contrato.
- Realizar la puesta en marcha en frío para comprobar el funcionamiento mecánico y eléctrico de los equipos con la utilización de agua.
- Realizar la puesta en marcha en caliente para asegurar que el proceso sea óptimo para la digestión anaerobia, usando desecho de fruta y estiércol.
- Realizar la calibración de los equipos en la planta de digestión anaerobia en Latinoamericana de Jugos S.A.
- Investigar si las aguas grises de Latinoamericana de Jugos S.A. sirven para ser alimentadas en el biodigestor, con la finalidad de evitar la implementación de una planta de tratamiento de aguas.

2. Fundamento teórico

2.1 Problemática de los desechos agroindustriales

Desde tiempos remotos la humanidad ha buscado la forma de suplir sus necesidades básicas, mediante los recursos que la naturaleza le ha brindado. Con el paso de los años, el planeta se fue poblando con un mayor número de personas y para mantener un buen nivel de vida y superarse, el hombre tomó dominio de la naturaleza, explotando e industrializando los recursos naturales, sin tener conciencia ambiental sobre el daño que estaba causando [6].

En todas las actividades del hombre se generan desechos, desde sus funciones metabólicas hasta la generación de bienes y servicios a nivel doméstico o en las grandes industrias. Debido a que en el pasado se acostumbraba tirar los desechos en depósitos sin tratamientos previos, ocasionando que deambulen roedores, perros, insectos y otros animales semi-domésticos, provocando un peligro para la salud y el medio ambiente; y al observar que la cantidad de desechos iba incrementando de manera desmedida, se comenzó a investigar soluciones alternativas que ayuden en esta problemática [6, 7].

Sin embargo, el costo que implica la recolección, el transporte y la disposición final de los desechos para las empresas y los municipios encargados es muy alto. Según información proporcionada por la Empresa Pública Metropolitana de Aseo en Quito (EMASEO EP) y la Empresa Pública Metropolitana de Gestión Integral de los Residuos Sólidos (EMGIRS EP) los rubros que implicaban la recolección de basura en el año 2008 en el en el Distrito Metropolitano de Quito se presentan en la tabla 2.1.

Tabla 2.1 Costos de recolección, transporte y disposición final de los desechos en el DMQ 2008 [8]

Proceso	Costos
Recolección	\$ 24/ton
Transporte y transferencia	\$ 0.12 /ton/Km
Transporte adicional de recolección	\$ 12/ton
Disposición final	\$ 6.22/ton

Según el informe técnico realizado por la empresa EMGIRS EP sobre la operación de relleno sanitario de Quito, se obtienen las siguientes cantidades de desechos recolectados y dispuestos en los rellenos sanitarios de El Inga durante los meses de enero a marzo de 2014 presentados en la tabla 2.2.

Tabla 2.2 Ingresos mensuales de residuos sólidos al relleno sanitario de El Inga [8]

Mes	Cantidad de desechos recolectados [ton]
Enero	60840.06
Febrero	52496.68
Marzo	58825.85
Total	172162.59
Promedio	57387.53

En esta tabla se observa que la cantidad de desechos sólidos recolectados en el DMQ es de 57387.53 toneladas por mes, lo que equivale a 1913 toneladas por día. Considerando que la cantidad de habitantes en Quito es de 2239191, se obtiene un promedio de 0.03 toneladas de desechos sólidos per cápita por mes.

La composición promedio de los desechos sólidos urbanos del DMQ se presenta en la tabla 2.3.

Tabla 2.3 Composición de los desechos sólidos en el DMQ en el año 2007 [9]

Tipo de desecho	Composición [%]
Materia orgánica	61.00
Plásticos	13.80
Papel	8.60
Residuos de baño	8.00
Vidrios	3.20
Textiles	2.00
Metales	1.20
Caucho	1.00
Escombros	0.70
Madera	0.50

En esta tabla se observa que la cantidad de desechos provenientes de la materia orgánica es del 61%, lo cual constituye el valor más alto entre todos los desechos sólidos. Por este motivo, es importante considerar nuevas soluciones o tecnologías de valorización de la materia orgánica en el país.

2.2 Posibles soluciones a los desechos industriales

Hoy en día, se ha tomado conciencia ambiental y social de los problemas ambientales que está sufriendo el planeta Tierra. Debido a esto la humanidad se

preocupa por la conservación y protección del medio ambiente, así como la explotación excesiva de los recursos naturales [6, 10]. Para lograr una mejor conservación se plantean diferentes métodos para el tratamiento de residuos.

- **Minimización:** Consiste en reducir la generación de residuos, mediante cambios en las etapas de producción, en las materias primas, o en los hábitos de fabricación; siempre y cuando no altere el producto final [10].
- **Valorización:** A pesar de tratar de reducir la cantidad de desechos, todo proceso producirá desperdicios; es por esto que se debe recurrir a una serie de técnicas para su revalorización. A esto se lo conoce como la vía de las tres “R” (recuperación, reciclaje y reutilización). La recuperación consiste en separar las materias que puedan volver a usarse, el reciclaje es aplicar las diferentes técnicas existentes para separar los materiales de los que está hecho el producto para convertirlo en algo útil. Y reutilizar es emplear al mismo producto en el proceso o con otros fines [10].
- **Tratamiento:** Es cuando los residuos ya no pueden ser valorizados para otro proceso y su fin serán los vertederos o rellenos sanitarios. El objetivo de estos tratamientos físicos o químicos es reducir el volumen de los desechos y recuperar la energía a partir de los gases, líquidos y sólidos que se generan [10].

En la agroindustria existen diferentes alternativas para la recuperación de la materia orgánica. El compostaje que consiste en la descomposición biológica de materia orgánica en condiciones anaeróbicas controladas y de humedad y temperatura para obtener el compost. El compost es utilizado como abono para mejorar los suelos. La lombricultura es una técnica en la que se aplican lombrices roja californiana a la materia orgánica para que se alimente de ella y produzca humus o abono natural y proteína animal. El biogás es el producto de la descomposición de la materia orgánica por acción bacteriana o de su combustión en un medio anaerobio; su uso es para la producción de energía eléctrica y térmica [11].

Adicionalmente, se puede utilizar tratamientos térmicos de los desechos. El primero consiste en la incineración el cual es un método sencillo y rápido, que tiene como ventaja la reducción de un 60 a 70% del volumen de desechos que se va hacia los depósitos, además permite recuperar la energía usando el principio de transferencia de calor a partir de los gases calientes que se generan en la combustión. Sin embargo,

desalienta el aprovechamiento de materiales de reciclaje, liberan emisiones gaseosas muy contaminantes tal como dioxinas y furanos, tiene problemas de corrosión en las tuberías. El segundo es la pirolisis que consiste en la descomposición de la materia orgánica por calentamiento (400 a 800°C) en un sistema ausente de oxígeno y a presión controlada. Tiene la ventaja que reduce los residuos hasta un 95% del volumen. La desventaja es que los compuestos generados pueden ocasionar problemas ambientales por la emisión de gases que contribuyen al efecto invernadero [10, 12].

En la figura 2.1 se observa cómo ha mejorado el manejo de los desechos con el transcurso de los años, lo cual indica que se ha ido fomentando una conciencia ambiental de generación a generación.

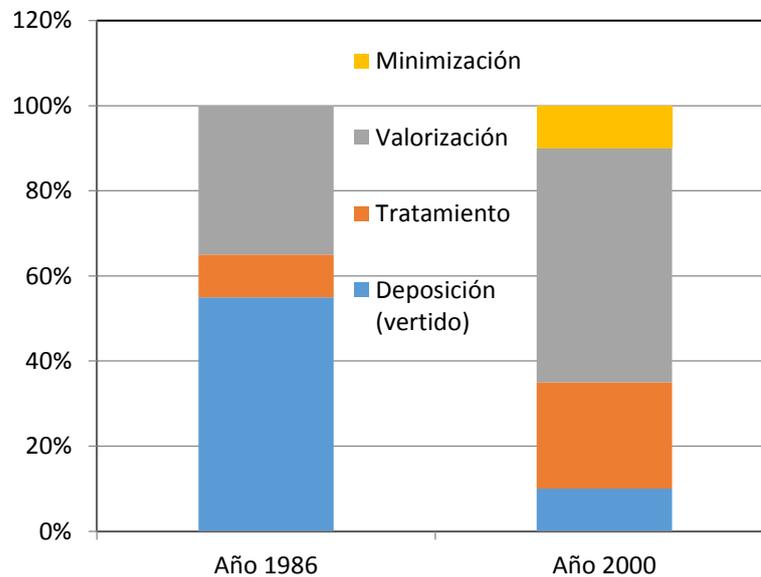


Figura 2.1 Variación del manejo de desechos en el transcurso de los años [10]

2.3 Problemática en la fábrica Latinoamericana de Jugos S.A

Latinoamericana de Jugos S.A., es una empresa que industrializa y comercializa pulpas de fruta a nivel nacional y ocasionalmente al mercado internacional. Los productos fabricados por la industria, han tenido gran aceptación en el país, debido a que los alimentos prefabricados se han convertido en una gran ayuda para las familias modernas que carecen de tiempo para realizar sus labores culinarias. Por esta razón, Latinoamericana de Jugos S.A. ha ido creciendo paulatinamente desde 1984, generando una mayor cantidad de desechos como son las cáscaras, semillas y el agua de lavado de

frutas. Para poder reutilizar los desperdicios, el LaDEA plantea la creación de una planta de digestión anaeróbica en la que se utilizarán como materia prima los desperdicios de fruta, el estiércol bovino y el agua de lavado, para obtener como productos: biogás como una fuente de energía renovable y fertilizante agrícola orgánico conocido como biol. De esta manera se reducen los contaminantes sólidos, líquidos y gaseosos que se liberan al medio ambiente [13].

2.4 Programa InnovaEcuador

El Ministerio de Coordinación de la Producción, Empleo y Competitividad ha desarrollado un programa llamado InnovaEcuador dirigido hacia los empresarios emprendedores ecuatorianos para apoyar la diversificación de los sectores productivos a través de la innovación empresarial y sectorial, incentivando un desarrollo equilibrado en todas las regiones del Ecuador. InnovaEcuador brinda su aporte económico para la implementación de tecnologías o productos nuevos, a mejorar un bien, servicio o proceso productivo [14].

La Universidad San Francisco de Quito propuso el presente proyecto en el programa InnovaEcuador, debido a que los beneficios económicos de implementar una planta de alta tecnología de digestión anaerobia, no se ven claramente justificados, si se compara con la alta inversión necesaria en la construcción, puesta en marcha y funcionamiento de la planta. Para la realización de este proyecto, se considera los estudios a escala laboratorio y piloto realizados en el LaDEA desde el año 2008.

2.5 Digestión anaeróbica

La digestión anaerobia se define como una fermentación microbiana en un medio ausente de oxígeno en la que se obtiene como productos a una mezcla de gases conocido como biogás y a una suspensión acuosa o lodo llamada biol. El biogás está compuesto principalmente por metano y dióxido de carbono; y contiene pequeñas proporciones de otros componentes como nitrógeno, oxígeno, hidrógeno y sulfuro de hidrógeno. El biol es un fertilizante orgánico que contiene micro y macro nutrientes necesarios para mejorar las propiedades del suelo. La materia prima utilizada para este proceso forma parte de cualquier biomasa residual que posea un alto contenido de humedad como restos de comida, residuos ganaderos, restos de hojas y hierbas, lodos de

plantas depuradoras de aguas residuales urbanas, y aguas residuales domésticas e industriales. Este proceso se caracteriza por su sensibilidad a los cambios ambientales, por lo que es necesario controlar algunos parámetros de operación [15, 16, 17].

2.5.1 Características del proceso de digestión anaeróbica

Este proceso consiste en la degradación de la materia orgánica en biogás y biol. El principal componente en el biogás es el metano con una concentración superior al 50% y teniendo un poder calorífico alrededor de 23000 kJ/m^3 [18]. Mientras, que el biol es un fertilizante natural que está compuesto de ciertos nutrientes como N, P, K y materia orgánica, que enriquecen las propiedades del suelo para su posterior siembra [19].

La materia orgánica que se utiliza para el proceso de digestión anaerobia puede provenir de residuos de los sectores agrícolas, ganaderos, fangos biológicos, residuos industriales orgánicos, aguas residuales municipales e industriales, o desechos orgánicos de residuos sólidos urbanos [18]. Para esta planta de digestión anaerobia se utilizó como materia prima para el proceso desecho de fruta, aguas grises provenientes de la concentración de pulpa y jugos de fruta de la fábrica Latinoamericana de Jugos S.A., y estiércol bovino de haciendas aledañas del sector Amaguaña.

2.5.2 Fases de la digestión anaerobia

La digestión anaerobia está caracterizada por la existencia de cuatro etapas para degradar al sustrato. Como sustrato se entiende en general el alimento de los microorganismos. Dentro de estas cuatro etapas se identifican a cinco poblaciones bacterianas que actúan como catalizadores del sustrato. A continuación se explican las distintas etapas de la digestión anaerobia.

2.5.2.1 Hidrólisis

La hidrólisis es la primera etapa en el proceso de degradación de la materia orgánica y está constituida por compuestos orgánicos complejos, como lípidos, proteínas e hidratos de carbono. Estos compuestos son despolimerizados por acción de bacterias hidrolíticas en moléculas solubles y que se caracterizan por ser fácilmente

degradables, tales como azúcares, ácidos grasos de cadena larga, aminoácidos, alcoholes, entre otros. [18].

La hidrólisis condiciona las siguientes etapas, ya que los microorganismos realizan su proceso a partir de los productos de la primera etapa. La velocidad de las siguientes etapas está determinada, entre otros factores, por el tamaño de los sólidos en suspensión y de la naturaleza de la materia orgánica [20].

2.5.2.2 Acidogénesis

La segunda etapa es la acidogénesis. Durante esta etapa los productos generados en la fase anterior son transformados en CO₂, H₂ y una mezcla de ácidos grasos volátiles. Los principales ácidos grasos volátiles generados son: acético, propiónico, butírico y valérico. En esta fase de la digestión no hay una reducción importante de DQO [20].

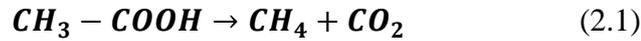
Esta etapa es llevada a cabo por microorganismos de rápido crecimiento, muy resistentes al medio, desarrollando su máxima actividad a valores de pH ligeramente ácidos [20]. Las especies de bacterias acidogénicas que intervienen en el proceso pueden ser: *Butyrivibrio*, *Propionibacterium*, *Clostridium*, *Bacteroides*, *Ruminococos*, *Bifidobacterium*, *Lactobacillus*, *Streptococos* y *Enterobacterias* [18].

2.5.2.3 Acetogénesis

La tercera etapa es la acetogénesis en la cual se produce ácido acético por acción de bacterias especializadas a partir de los productos obtenidos en la etapa anterior [20]. Las bacterias acetogénicas son: *Syntrophobacter* (descompone al ácido propiónico), y *Syntrophomonas* (descompone al ácido butírico y valérico). En esta etapa también se encuentran bacterias homoacetogénicas, las cuales se encargan de producir ácido acético a partir de hidrógeno y dióxido de carbono, y pertenecen a los géneros: *Acetobacterium*, *Acetoanacrobium*, *Acetogenium*, *Clostridium* o *Eubacterium* [18]. Este proceso puede inhibirse cuando existe una acumulación de hidrógeno molecular, lo cual puede evitarse con la presencia de bacterias metanogénicas que transformen el hidrógeno en metano [21].

2.5.2.4 *Metanogénesis*

La etapa de la metanogénesis es la encargada de obtener metano a partir del ácido acético obtenido en la fase anterior, o bien por reacción del hidrógeno con el dióxido de carbono obtenido en la segunda y tercera etapa. Las reacciones que suceden en esta parte del proceso son:



Dentro de esta etapa existen dos maneras de producción de metano. La primera consiste en formar metano a partir de ácido acético, utilizando las bacterias metanogénicas acetoclásticas, perteneciente a los géneros: *Methanosarcina* y *Methanotherix*. La reacción que ocurre en esta etapa es la mencionada en la ecuación 2.1. A pesar de que en este proceso solamente intervienen dos géneros de bacterias, se obtiene el 70% de metano a partir de ácido acético [6, 18].

La segunda vía de obtención de metano es a partir del consumo de hidrógeno, utilizando microorganismos metanogénicos hidrogenófilos, pertenecientes a los géneros *Methanobacterium*, *Methanococos*, *Methanobrevibacter* o *Methanogenium* [18].

En la figura 2.2 se muestran las fases de la digestión anaerobia; en la cual también se enumeraron las diferentes poblaciones bacterianas que intervienen en el proceso.

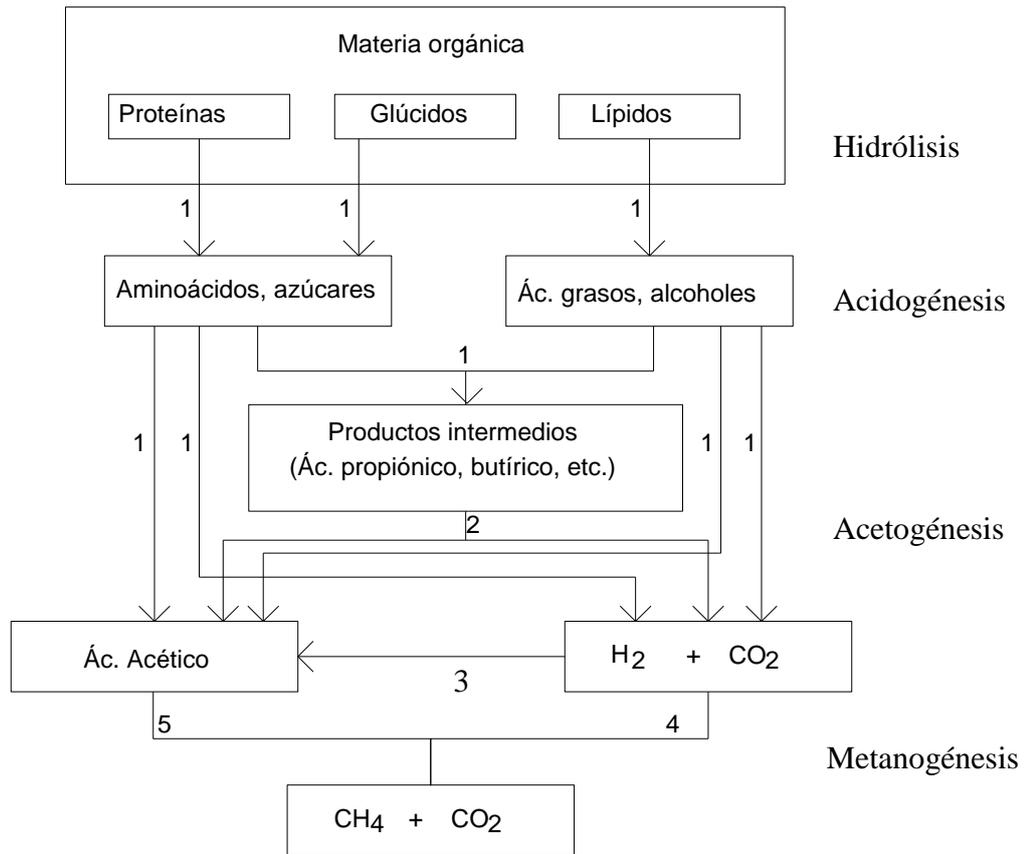


Figura 2.2 Fases de la digestión anaerobia [18]

- 1) Bacterias hidrolíticas- acidogénicas
- 2) Bacterias acetogénicas
- 3) Bacterias homoacetogénicas
- 4) Bacterias metanogénicas hidrogenófilas
- 5) Bacterias metanogénicas acetoclásticas

2.5.3 Factores que afectan al proceso anaerobio

Las bacterias que intervienen en el proceso de biodigestión anaerobia son muy sensibles a cualquier cambio que exista en el proceso. Por esta razón se deben controlar ciertos parámetros para tener una operación óptima y eficiente con respecto a la producción de biogás. A continuación se detalla cada uno de los parámetros a considerar.

2.5.3.1 Temperatura

Los procesos anaerobios se caracterizan por tener una velocidad de reacción muy baja, lo que implica tiempos de retención muy elevados y, en consecuencia, volúmenes de equipos mayores [20]. Por esta razón la temperatura es considerada un factor muy importante en el proceso. En general, las reacciones químicas y biológicas se aceleran con el aumento de temperatura, es decir la velocidad de reacción es función de la temperatura. En el caso de los digestores de biogás esto es cierto dentro de un rango de temperatura bien definido; debido a que los microorganismos tienen un nivel óptimo de crecimiento y metabolismo. Si se tiene temperaturas extremadamente altas o bajas, se tiene el riesgo de que exista la muerte celular o inhibición del proceso [22].

Existen tres rangos de temperatura en los que pueden trabajar los microorganismos anaerobios: la psicofílica que es por debajo de 25°C, la mesofílica que es entre 25 y 45°C y la termofílica que es entre 45 y 65°C. El rango psicofílico ha sido poco estudiado debido al gran tamaño que debe tener el reactor para su utilización; sin embargo presenta menores problemas de estabilidad que en los otros dos rangos [16]. Con respecto a la zona de digestión termofílica se tiene la ventaja que la producción de biogás es aproximadamente el doble que la mesofílica, debido a que disminuye el tiempo de retención del afluente, por lo que se reduce el volumen de los biodigestores a la mitad. Además debido a que tiene temperaturas más elevadas se asegura una mayor eliminación de organismos patógenos. Sin embargo, se requiere considerables cantidades de energía para operar en este rango de temperatura, se tiene problemas de inestabilidad a cualquier cambio de las condiciones de operación y presenta mayores problemas de inhibición del proceso por la mayor toxicidad de determinados compuestos a altas temperaturas. Por estas razones, en los procesos anaerobios se utiliza más el régimen mesofílico [20,22].

2.5.3.2 pH

Los diversos grupos bacterianos presentan niveles de actividad óptima en el mismo rango de pH. Para las bacterias hidrolíticas su rango es de 7.2 a 7.4, para las acetogénicas es entre 7.0 a 7.2, los acidogénicos es entorno a 6 y los metanogénicos es entre 6.5 a 7.5. Por lo tanto, para que el proceso se desarrolle satisfactoriamente el pH debe mantenerse entre 6.0 y 8.0 [23].

Una de las consecuencias de tener un pH menor a 6, es obtener biogás que sea muy pobre en metano y, por lo tanto, tiene menores cualidades energéticas. Además, el pH afecta a los diferentes equilibrios químicos existentes en el medio, pudiendo desplazarlos hacia la formación de un determinado componente que tenga influencia en el proceso. Al aumentar el pH se favorece la formación de amoníaco que en elevadas concentraciones es inhibidor del crecimiento microbiano y a pH bajos se genera mayoritariamente la forma no ionizada del ácido acético, que inhibe el mecanismo de degradación del propionato [16].

En los biodigestores es común que haya un descenso en el pH, debido a que puede existir un desequilibrio en el consumo y la producción de los ácidos grasos volátiles, por lo que el medio se empieza a acidificar. Se presentan dos alternativas para corregir los niveles bajos de pH. La primera consiste en dejar que las bacterias metanogénicas asimilen los ácidos grasos volátiles, de esta forma aumentará el pH hasta un nivel aceptable. Deteniendo la alimentación disminuye la actividad de las bacterias hidrolíticas y se reduce la producción de ácidos grasos volátiles. Una vez que se haya restablecido el pH se puede continuar con la alimentación del digestor, pero en pocas cantidades. El segundo método consiste en adicionar sustancias buffer para aumentar el pH, como el agua con cal o las cenizas de soda siendo la última una alternativa más costosa [22]. Se estima que una alcalinidad comprendida entre 2 y 3 g de CaCO_3/L es suficiente para la regulación del pH en el reactor [18].

En el caso de tener pH mayores a 8, se controla mediante la adición de ácido acético para reducir la formación de amoníaco y favorecer a la formación del ión amonio [24].

2.5.3.3 Toxicidad

Para un buen desempeño de la actividad bacteriana, se debe tener en cuenta que algunos compuestos pueden resultar tóxicos incluso a bajas concentraciones para el proceso, reduciendo la degradación bacteriana y, por lo tanto, disminuyendo la eficiencia de la producción de biogás. A continuación se enumeran algunos compuestos comunes que pueden causar toxicidad.

- Ácidos grasos volátiles:

Los ácidos grasos volátiles (AGV) constituyen un producto intermedio mayoritario del proceso anaerobio, su acumulación ocasiona una desestabilización del proceso y en consecuencia una disminución en la producción de biogás. El factor que ocasiona una acumulación de AGV en el sistema, se origina en la reducción de velocidad de degradación de éstos por parte de las bacterias metanogénicas por alguna causa adversa [16].

- Hidrógeno:

El hidrógeno es también un compuesto intermedio importante de la digestión anaerobia. Su acumulación en el medio provoca la inhibición de la fase acetogénica y, consecuentemente, la acumulación de ácidos grasos volátiles con más de dos átomos de carbono [16].

- Nitrógeno Amoniacal:

El nitrógeno orgánico es hidrolizado dando lugar a formas amoniacaes. Este compuesto constituye un nutriente importante en la producción bacteriana, pero en concentraciones excesivas puede limitar el crecimiento [16]. El nitrógeno amoniacal corresponde a la suma del ión amonio y del amoniaco, como se muestra en la siguiente reacción:



De las dos especies, la que inhibe el proceso es el amoniaco libre, debido a que se ha comprobado experimentalmente que el efecto inhibitor por amonio aumenta a pH alcalino [16].

- Sulfatos y Sulfuros:

La presencia de elevadas concentraciones de sulfatos y sulfuros en el sustrato ocasiona la inhibición del proceso anaerobio especialmente en la fase metanogénica. En general, las bacterias metanogénicas son más sensibles que las acidogénicas y acetogénicas, siendo afectadas tóxicamente a una concentración de 50 ppm de H₂S. La inhibición se favorece a pH y temperaturas bajas [16].

- Cationes y metales pesados:

Los cationes de metales alcalinos y alcalino-térreos son necesarios para el proceso de digestión anaerobia en bajas concentraciones. Pero a partir de cierta concentración pueden provocar toxicidad provocando una disminución de la velocidad de crecimiento.

La toxicidad de los cationes es directamente proporcional al peso molecular. Se debe considerar que si se introduce al catión de forma gradual en el reactor, los microorganismos pueden adaptarse evitando un efecto tóxico mayor [16].

- Otros inhibidores:

Debido a que el proceso metanogénico es estrictamente anaerobio, el oxígeno también se considera un tóxico en el proceso. Concentraciones superiores a $1\mu\text{g/L}$ pueden inhibir el proceso de producción de biogás [16].

También se puede señalar como inhibidores del proceso: el pH, determinadas sustancias orgánicas como ácidos grasos de cadena larga y alcoholes en elevadas concentraciones, o la presencia de desinfectantes y antibióticos [16].

En la tabla 2.4 se muestran las concentraciones a las que determinadas sustancias resultan tóxicas para el proceso anaerobio

Tabla 2.4 Valores de concentración de ciertos inhibidores comunes [17]

Inhibidores	Concentración inhibidora [ppm]
SO_4^{-2}	5
NaCl	40
Nitrato	5
H_2S	50
Detergente sintético	20-40
Cu^{+2}	100
Cr^{+3}	200
Ni^{+2}	200-500
Na^+	3.5-5.5
K^+	2.5-4.5
Ca^{+2}	2.5-4.5

2.5.3.4 Composición de la alimentación

Existe una amplia gama de posibles materias primas para la producción de biogás, como: excretas animales y humanas, aguas orgánicas residuales o, industriales, restos de cosechas y los efluentes de determinadas industrias químicas. Es necesario considerar

que la mezcla que se va a alimentar tenga una dilución adecuada para evitar un contenido excesivo de sólidos, y obtener una buena producción de biogás [17].

En el medio a digerir debe haber una relación adecuada entre nutrientes para el crecimiento bacteriano. La relación C/N en peso debe estar comprendida entre 15:1 y 45:1, con un valor óptimo de 30:1. Valores muy inferiores disminuyen la velocidad de reacción y valores muy superiores crean problemas de inhibición. Para el fósforo la relación recomendable es $C/P = 150:1$. Valores inferiores no crean problemas de inhibición [25].

Es importante considerar que el proceso microbiológico no solo requiere de fuentes de carbono, nitrógeno y fósforo, sino también deben estar presentes sales minerales en equilibrio como: azufre, potasio, calcio, magnesio, hierro, manganeso, molibdeno, zinc, cobalto, selenio, tungsteno, níquel y otros en menores cantidades [17].

2.5.3.5 Velocidad de carga volumétrica

Para la alimentación adecuada del digestor se designa un volumen adecuado de sustrato orgánico el cual se lo carga diariamente al digestor para asegurar que la producción de biogás sea óptima, y no exista un exceso de materia que pueda superar la capacidad máxima de las bacterias metanogénicas y así evitar un desequilibrio en el sistema. Este valor tiene una relación inversa con el tiempo de residencia, dado que a medida que se incrementa la carga volumétrica disminuye el tiempo de residencia necesario [22,26].

2.5.3.6 Tiempo de residencia

El tiempo de residencia se lo conoce también como tiempo de retención y es el tiempo que permanece el sustrato dentro del reactor; se lo puede calcular dividiendo el volumen de reacción para el caudal volumétrico diario de alimentación. Este parámetro solo puede ser definido en sistemas que sean semi-continuos y continuos. El tiempo de residencia depende de dos factores como el tipo de sustrato y la temperatura. Los materiales con mayor proporción de carbono retenido en moléculas resistente como es la celulosa, requieren mayores tiempos de residencia para ser totalmente digeridos [27]. La relación del tiempo de residencia con la temperatura es inversamente proporcional. En la figura 2.3 demuestra la dependencia de la temperatura con el tiempo de residencia.

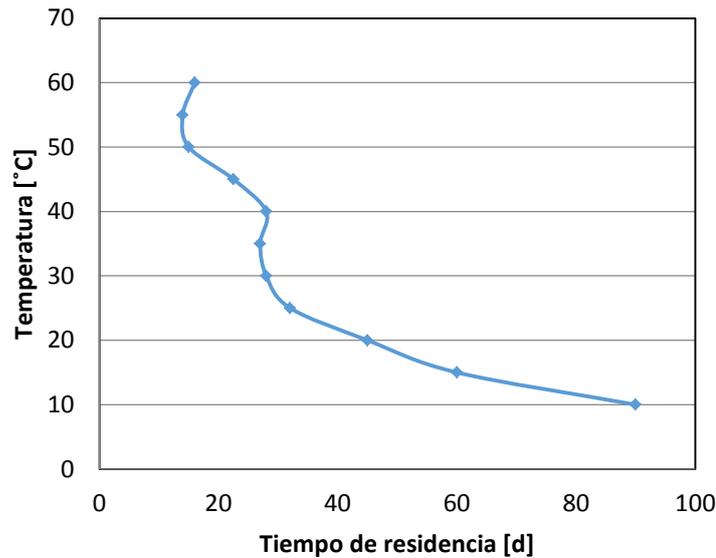


Figura 2.3 Periodo de digestión de lodos [9]

2.5.3.7 Agitación

La agitación es un factor importante para el funcionamiento óptimo del digestor, la velocidad de agitación debe ser fuerte para tener una buena homogenización del medio, pero se debe tener cuidado de no romper los agregados bacterianos. Al tener una mezcla adecuada del contenido del reactor se asegura que el sustrato fresco esté en contacto con los microorganismos; se eliminan los metabolitos producidos por los microorganismos metanogénicos debido a que favorece la salida de gases; se previene la formación de espuma, sedimentos y espacios muertos dentro del reactor; ayuda a mantener una temperatura uniforme; y proporciona una densidad uniforme de la población bacteriana. Los sistemas de agitación pueden ser mecánicos, hidráulicos o neumáticos [16, 28].

2.5.4 Productos de la digestión anaeróbica

La ventaja de la digestión anaeróbica, es que genera productos de beneficio para la industria y el medio ambiente, partiendo de desechos industriales y agropecuarios como materia prima. Los productos mencionados son: biogás y biol.

2.5.4.1 Biogás

El biogás es una mezcla de gases considerada como una fuente de energía renovable que se obtiene como un producto de la digestión anaeróbica de los desechos orgánicos de origen animal o vegetal. En la actualidad existe una disminución de las fuentes de energía convencionales, como los provenientes de combustibles fósiles, y a su vez un aumento progresivo de la demanda energética a nivel mundial. Por esta razón se ha incentivado la investigación y el desarrollo de nuevas fuentes energéticas, que permitan suplantar la dependencia actual que la humanidad tiene con los combustibles fósiles, y también proteger al medio ambiente [19, 29].

Las propiedades físico – químicas del biogás se presentan en la tabla 2.5 y se observa que está compuesto principalmente de metano (CH₄) y dióxido de carbono (CO₂) [19]. Su composición depende de la biomasa residual utilizada y del proceso de digestión [30].

Tabla 2.5 Propiedades físico- químicas del biogás [19]

Componentes	Nomenclatura	Porcentaje [%]	Peso molecular [g/mol]	Densidad [g/L]	Poder calorífico [kWh/m ³]
Metano	CH ₄	50-70	16.00	0.66	10.00
Dióxido de Carbono	CO ₂	30-50	44.00	1.84	0
Sulfuro de Hidrógeno	H ₂ S	0.1-1	34.00	1.36	3.00
Nitrógeno	N ₂	0.5-3	14.00	1.25	0
Vapor de Agua	H ₂ O	0.1-0.2	18.00	1.00	0
Promedio	-	-	25.80	1.22	6.50

El nivel de pureza y calidad de biogás dependen de la cantidad de metano que se obtenga, debido a que este componente es el que le da las características de combustible; es decir, a mayor porcentaje de metano, mejor es el biogás obtenido. Por lo tanto, el valor energético del biogás dependerá de la concentración de metano, el cual puede variar entre 5.5 kWh/m³ a 6.9 kWh/m³ [19, 30]. Para realizar los cálculos se consideró una proporción de 60% de metano, 35.8% de dióxido de carbono, 1% de sulfuro de hidrógeno, 3% de nitrógeno y 0.2% de vapor de agua.

El biogás es muy importante debido a que constituye una fuente de energía que puede utilizarse principalmente para el aprovechamiento eléctrico y térmico. También, se lo puede usar como combustible, pero se lo debe purificar previamente para obtener un biogás con una mayor concentración de metano; el cual puede ser utilizado para fines domésticos o industriales. El biogás puede emplearse para la cocción de alimentos, iluminación, calefacción, refrigeración, combustible en motores de combustión interna, entre otras. En la actualidad, estos insumos vienen instalados para ser usados con fuentes de energía que provienen principalmente de los combustibles fósiles, por esta razón deben ser adecuados para que estas maquinarias pueden trabajar con un combustible de menor valor energético [19, 31].

Para la utilización del biogás se necesita purificarlo de ciertas impurezas, partículas y condensados. Es necesario remover el CO_2 para aumentar el valor energético del combustible equivalente a un porcentaje mayor de metano presente en el biogás. El procedimiento químico más simple de eliminación de CO_2 es su absorción en agua de cal. Sin embargo, tiene la desventaja que la solución de cal se agota cada cierto tiempo y es necesario removerlo, lo que implica tener que preparar la solución constantemente si no se obtiene comercialmente. La reacción química en este proceso es [32]:



Otro método es mediante la absorción del CO_2 en una solución acuosa de etanolamina, el cual tiene la ventaja de también absorber al H_2S . El absorbedor usado en este proceso se llena de la solución de etanolamina y, a través de ella, se burbujea el gas. Posteriormente, la etanolamina se alimenta a una torre de reactivación donde la solución se calienta para desprender los compuestos adheridos. Este proceso es caro para hacerlo rutinariamente, debido a que se debe calentar periódicamente para la regeneración de la solución [33].

Existe otro método de absorción de CO_2 de bajo costo debido a que utiliza agua como agente absorbedor. Se le hace burbujear al biogás en el líquido, el CO_2 es atrapado en la misma, debido a que a condiciones ambientales de presión y temperatura el CO_2 es soluble, mientras que el CH_4 no lo es. Este método también sirve para eliminar impurezas [34].

El H₂S debe ser eliminado del biogás para evitar problemas de corrosión, debido a que éste último compuesto es muy corrosivo cuando reacciona con agua y se forma ácido sulfúrico (H₂SO₄). Para la desulfurización del biogás se utiliza un filtro con limadura de hierro (óxido de hierro III). Las reacciones químicas de oxidación y reducción que ocurren en este proceso son [32]:



También se puede utilizar ciertos tipos de tierras como hematita parda o limonita, además existe un método basado en la adición de aire al 1.5% del volumen de biogás producido. Otro método sencillo y económico para la eliminación del H₂S es la utilización del carbón activado. Las partículas del ácido se adsorben al carbón. Sin embargo, tiene la desventaja de que la cantidad adsorbida es muy baja debido a que solo se retendrán partículas con una concentración menor a 0.3mg/L [31].

El carbón activado también puede ser utilizado para eliminar la humedad presente en el biogás, asimismo atrapa los malos olores. Debido a que el vapor se adhiere al carbón y posteriormente se condensa. Otros compuestos para retener la humedad pueden ser sílica gel o cloruro de calcio [35].

2.5.4.2 Biol

El biol constituye el efluente que sale del digestor una vez que se ha producido todo el biogás, que posee diversas características que lo hacen apto para su utilización como fertilizante o como alimento para peces y otros animales. Tiene un pH alrededor de 7.5 y su composición es rica en minerales y cenizas que promueven el crecimiento óptimo de los cultivos. En la tabla 2.6 se detalla composición química promedio del biol [19, 36].

Tabla 2.6 Composición química del biol [30]

Componentes	Porcentajes
Materia orgánica	85%
Nitrógeno	2- 3 %
Fósforo	1-2%
Potasio	1%

Las aplicaciones más comunes del biol son:

- **Aplicación al suelo:** Mejora la estructura del suelo, fomentando el desarrollo radicular y mejora la actividad microbiana [30].
- **Aplicación al follaje:** Es aplicado en las hojas con una dilución del 25 al 75% con la adición de un adherente o surfactante para evitar pérdidas por evaporación o lavado [30].
- **Aplicación a la semilla:** Debido a que el biol contiene purinas, auxinas y tiaminas promueve la germinación en forma rápida y el desarrollo de raíces. Se debe remojar las semillas en una solución del 10 a 20% de 2 a 6 horas [30].
- **Aplicación a las plántulas:** Se debe sumergir las plántulas en una solución al 12.5% por un periodo de 10 minutos; posteriormente, se le deja escurrir en un paño húmedo antes de ser transplantadas [30].
- **Aplicación como alimento:** Se puede utilizar como alimento de animales como peces, ganado bovino, entre otros; debido a su alta concentración de aminoácidos especiales que tiene características similares al grano de soya. Para emplearlo como alimento se lo debe mezclar con granos o hierbas [30, 37].

2.6 Diseño de biodigestores

Un biodigestor es un tanque cerrado herméticamente e impermeable, también conocido como reactor. En el interior de este contenedor se deposita material orgánico a fermentar que pueden ser excrementos, desechos vegetales u otro material orgánico residual. Se debe realizar una dilución adecuada de la materia orgánica para que pueda ser degradada por los microorganismos y poder obtener como productos finales biogás,

como fuente de energía renovable, y fertilizantes orgánicos, ricos en nitrógeno, fósforo y potasio lo cual es benéfico para los cultivos y suelos [28, 38].

La implementación de biodigestores tiene ventajas económicas y ambientales. Las ventajas económicas son: reduce el costo de recolección y disposición final de los desechos orgánicos para transformarlos en productos con valor agregado; proporciona combustibles naturales para suplir las necesidades energéticas convirtiendo al biogás en fuente de calor y electricidad; y utiliza el biol producido como fertilizante para mejorar la calidad nutricional de las plantas, por consiguiente una mayor densidad en los cultivos, además que evita el uso de fertilizantes químicos los cuales tienen un costo superior al abono natural. Las ventajas ambientales consisten en: mitigación al cambio climático por reducción de emisiones de gases de efecto invernadero como el CH₄ y CO₂ que existen en la etapa de descomposición de la materia orgánica, disminución de la contaminación ambiental al reducir la cantidad de desechos que contaminan suelo y agua; limita el uso de fertilizantes químicos los cuales ocasionan un impacto para el ecosistema y los seres humanos; se reduce el riesgo de transmisión de enfermedades gastrointestinales debido a que en el biodigestor se eliminan hasta un 95% de los patógenos causantes de estos problemas de salud, mejora las condiciones higiénicas al recolectar el material fecal o material residual en descomposición, aminorando los malos olores, moscas y vectores [38].

Por otro lado, una de las desventajas de la implementación de los biodigestores es el costo de inversión. Adicionalmente, si se compara los costos de mano de obra, construcción y funcionamiento con el nivel de producción de biogás y fertilizante obtenido por cada unidad de materia orgánica utilizada en los biodigestores tradicionales, podría convertirse en un egreso más que un ingreso. Por eso es recomendable realizar un análisis y estudio previo a su construcción [35]. También se debe tener precaución durante la operación de plantas de digestión anaeróbica, debido a que se trabaja con gases volátiles, lo cual siempre conlleva un riesgo de explosión, si no se toman las medidas de seguridad adecuadas [38].

2.6.1 Materiales de construcción de los biodigestores

Los digestores anaerobios son fabricados con diferentes materiales dependiendo del diseño del biodigestor que se va a construir, de la disponibilidad local de los

materiales y de los recursos disponibles. Entre los materiales más utilizados se encuentran [39]:

- Acero inoxidable
- Cemento
- Materiales flexibles: geomembrana, nylon, neopreno y PVC.

2.6.2 Operación de biodigestores.

La forma de operación del biodigestor se define de acuerdo al tipo de sustrato que se desea digerir. Los tipos de sustratos se pueden categorizar según la humedad de los residuos a tratar [40]:

- Residuos sólidos: con una alta concentración de sólidos superior a $200\frac{g}{L}$ (>20%).
- Residuos semisólidos: tiene una concentración de sólidos entre $10\frac{g}{L}$ y $200\frac{g}{L}$ (1-20%).
- Residuos líquidos: con concentración inferior a $10\frac{g}{L}$ (<1%).

Para tratar los diferentes tipos de sustratos mencionados, se considera dos modos de operación, conocidos como: continuo y discontinuo. A continuación se explican las características de cada uno de ellos.

2.6.2.1 Operación discontinua

La operación discontinua o también conocida como operación Batch o por lote, se caracteriza por no tener flujo de entrada ni flujo de salida de productos. La biomasa necesaria para el proceso es cargada al principio de la operación, y el sistema se cierra a continuación herméticamente para evitar la entrada de aire, el cual inhibe la degradación anaeróbica y la producción de biogás. Transcurrido el tiempo necesario para que la digestión se complete se procede al vaciado [40, 41]. Esta operación se caracteriza por tener una alta concentración de sólidos en el material de carga. Es decir el afluente tiene más del 20% de materia seca. La carga del volumen total útil de digestor se realiza una sola vez por lote y cuando el nivel de producción de gas decae, después del periodo de fermentación necesario, se vacía el digestor por completo y se repite el ciclo [40, 42].

El proceso discontinuo se puede realizar en una única etapa o a su vez se pueden utilizar dos digestores para aumentar la eficiencia del proceso. Esto consiste en utilizar un digestor para efectuar el desarrollo de los microorganismos, que van a servir como inóculo para la siguiente etapa y en el segundo reactor se obtienen los productos. Las principales ventajas de trabajar con dos digestores son que se tiene un mayor control de las condiciones ambientales de etapa en etapa, y el volumen necesario del digestor es menor [40, 43]. Es un proceso sumamente sencillo de tecnología simple, que tiene un fácil diseño y bajo costo de inversión, además que una vez iniciado el proceso culmina sin contratiempos, necesitando solamente mano de obra al momento de carga y descarga del mismo [40, 42]. La desventaja del proceso Batch es que tiene una producción de biogás discontinua lo que dificulta su utilización.

2.6.2.2 Operación continua

En la operación continua la alimentación y la salida de productos se realizan de forma continua en el proceso, al menos una vez por día o en ciclos de pocas horas. Por lo que es necesario añadir dispositivos como bombas y tanques para la alimentación y descarga [40]. Los reactores de flujo continuo casi siempre operan en estado estacionario; es decir se mantienen las variables constantes con el tiempo. Las variables a las que se hace referencia son la concentración de los componentes del medio en el interior del fermentador y el tiempo de retención hidráulico de los microorganismos [41]. Para alcanzar el estado estacionario, el reactor puede operarse sobre principios quimiostáticos o turbidostáticos. La quimiostática implica ajustar el caudal de la alimentación a un valor constante, permitiendo de esta manera que la concentración de los microorganismos, del sustrato y de los productos bioquímicos alcancen sus niveles adecuados. Por otro lado, el turbidostático necesita un análisis experimental de la turbidez, es decir, una medida indirecta de la concentración microbiana; esto se usa entonces para controlar el caudal. Los dos métodos son muy útiles, sin embargo el primero por ser más simple es el más utilizado en las operaciones que son realizadas a escala industrial [44]. Existen dos tipos de reactores de operación continua que son muy utilizados en la industria; el reactor de flujo continuo de mezcla perfecta y el reactor de flujo en pistón.

Al primero se lo conoce como reactor continuo de mezcla perfecta (CSTR) o reactor de retromezcla (backmix); el cual opera en estado estacionario. Son reactores

sencillos que se utilizan para residuos semisólidos de alta concentración y se caracterizan por tener una mezcla perfecta, es decir, que todas las variables son iguales en todos los puntos del interior del reactor, evitando de esta manera la dependencia del tiempo o de la posición dentro del digester. Para alcanzar ésta mezcla íntima entre el sustrato y los microorganismos se utiliza un agitador que puede ser neumático, hidráulico o mecánico. Por lo tanto, la concentración del efluente es igual a aquellas en el interior del reactor. El tiempo de residencia suele ser de 10 a 30 días. Existe la posibilidad de trabajar en dos fases, uno para la acidogénica y otro para la metanogénica con las condiciones respectivas de operación [40, 41]. La ventaja de esta operación es que se puede tecnificar y automatizar ciertas partes del proceso para mejorar la eficiencia de la digestión anaerobia, con el uso de intercambiadores de calor, aislamientos, bombas, etc [40].

Los reactores de flujo en pistón son digestores tubulares que normalmente operan en estado estacionario. El ingreso de la alimentación se realiza por un extremo longitudinal del digester y la salida por el otro extremo. El movimiento del sustrato en el interior del conducto se realiza por la simple presión del afluente y la presión que ocasiona el efluente en el reactor [40, 42]. Por lo general, el movimiento de la masa por digerir suele ser horizontal sin agitación; también se puede lograr un movimiento ascendente y descendente mediante la instalación de láminas, pantallas o paredes verticales sobre un recipiente circular o prismático. Estos digestores son útiles cuando se van a tratar residuos con alta concentración en sólidos (17%-20%) [40]. La ventaja de este reactor es que se pueden realizar cada una de las etapas microbianas en un segmento del reactor, haciendo de esta manera que la concentración y la composición varíen según el recorrido del reactor. Las desventajas de este digester se derivan de las dificultades de controlar las condiciones específicas para operar el reactor, asimismo en la aparición de costras en la superficie [44].

2.7 Caracterización de la materia prima y mezcla reactiva

La materia prima necesaria para realizar la digestión anaeróbica consiste principalmente de residuos orgánicos como: basura de cocina, restos vegetales y animales, excrementos, entre otros [18]. En este proyecto se utilizaron fruta, estiércol y aguas grises provenientes del lavado de las frutas para la extracción de las pulpas y jugos de la misma planta Latinoamericana de Jugos S.A.

Con el objetivo de comprobar que el uso de aguas de lavado no altere el proceso de degradación de la materia orgánica, se realizaron experimentos a escala laboratorio en el Laboratorio de Desarrollo de Energías Alternativas de la Universidad San Francisco de Quito. Para esta investigación fue necesario realizar los siguientes análisis tanto de la materia prima como de la mezcla reactiva dentro del digestor.

2.7.1 Sólidos totales

Para el análisis del proceso de digestión anaeróbica es importante considerar el porcentaje de sólidos totales dentro del digestor. Se considera un rango óptimo entre el 4 y el 12% de sólidos totales. Valores superiores al límite permisible pueden ocasionar que se inhiba el proceso debido a la inmovilidad de las bacterias metanogénicas y que exista un taponamiento de tuberías y bombas [45].

Los sólidos totales constituyen el material sobrante luego de la evaporación y secado de la muestra en una estufa a 103 - 105 °C en un periodo de 24 horas. Los sólidos totales se clasifican en volátiles y fijos [46]. La abreviación utilizada para sólidos totales es TS.

2.7.2 Sólidos totales volátiles

Los sólidos totales volátiles son también conocidos como sólidos totales orgánicos (oTS), y corresponde a la materia orgánica presente en la muestra que puede ser degradada en el proceso anaerobio. El porcentaje óptimo de sólidos totales volátiles se encuentra en el rango mayor al 60 % de sólidos totales. Para obtener dicho porcentaje se lleva a la muestra a un proceso de calcinación durante un periodo de 8 horas y a una temperatura constante a 550°C [46].

2.7.3 Demanda química de oxígeno

La demanda química de oxígeno (DQO) se refiere a la cantidad de oxígeno expresada en [mg/L] requerida para oxidar a la fracción orgánica de la muestra dentro del biodigestor o en la alimentación. La medida de la DQO permitirá conocer la cantidad de materia orgánica existente, la cual puede o no ser degradada [47].

Para realizar este análisis se utilizó el método colorimétrico con los siguientes equipos: un digestor HACH DRB 200 y sirve para digerir la muestra; y un colorímetro espectrómetro HACH DR 890, que permite leer la concentración en [mg/L].

3. Métodos experimentales

Con la finalidad de analizar la factibilidad en el proceso de digestión anaerobia del uso de las aguas de lavado de fruta para la industrialización de pulpas de frutas de Latinoamericana de Jugos S.A.; se realizaron experimentos a escala laboratorio en el LaDEA mediante un sistema de biodigestión descrito a continuación.

3.1 Materiales y equipos

El biorreactor utilizado es un equipo marca Cole Parmer Fermentation Systems modelo KH – 29207 – 00 110 VAC de 3L de capacidad. El volumen de trabajo es de 2.7L, siendo el volumen de operación de 1.5 L. El sistema opera de forma continua y consta de un controlador automático para mantener estable la temperatura, el pH y la agitación dentro del equipo. [48]. El biogás producido se mide por medio de una trampa que funciona con el principio de desplazamiento de agua. Para el desplazamiento del biogás se utilizó ácido sulfúrico al 0.1N en dos matraces de 1L cada uno y una probeta de 2L.

En los experimentos del proceso de digestión anaeróbica se trabaja a una temperatura de 35°C (95°F). Para mantener constante este parámetro, se utiliza un controlador del tipo ON/OFF que consta con un sensor de temperatura que se encuentra en una vaina en el interior del digestor. El biorreactor se encuentra en baño maría que sirve para calentar al mismo mediante una hornilla eléctrica que se va a prender cuando el sistema descienda del set - point establecido y se apagará cuando supere dicho valor.

Para evitar que el pH descienda a un valor inferior de 6.5, se utiliza un controlador que está conectado a un sensor de pH que se encuentra dentro del reactor. El set - point que se establece es de 6.5, y se utiliza una solución de hidróxido de sodio 0.1 M para adicionar al reactor mediante una bomba peristáltica en caso de un descenso de pH. Es primordial que la probeta de hidróxido de sodio siempre permanezca llena, debido a que puede ingresar aire al sistema en caso de estar vacía dañando las condiciones anaerobias del proceso.

La agitación del sistema es importante para evitar la generación de espuma y acumulación de sedimentos dentro del equipo. Se utiliza un motor de agitación junto con un regulador de frecuencia conectado en lazo abierto. En esta investigación se

trabajó a 200 RPM. En la figura 3.1 se presenta una foto del equipo con sus respectivos sistemas de control.

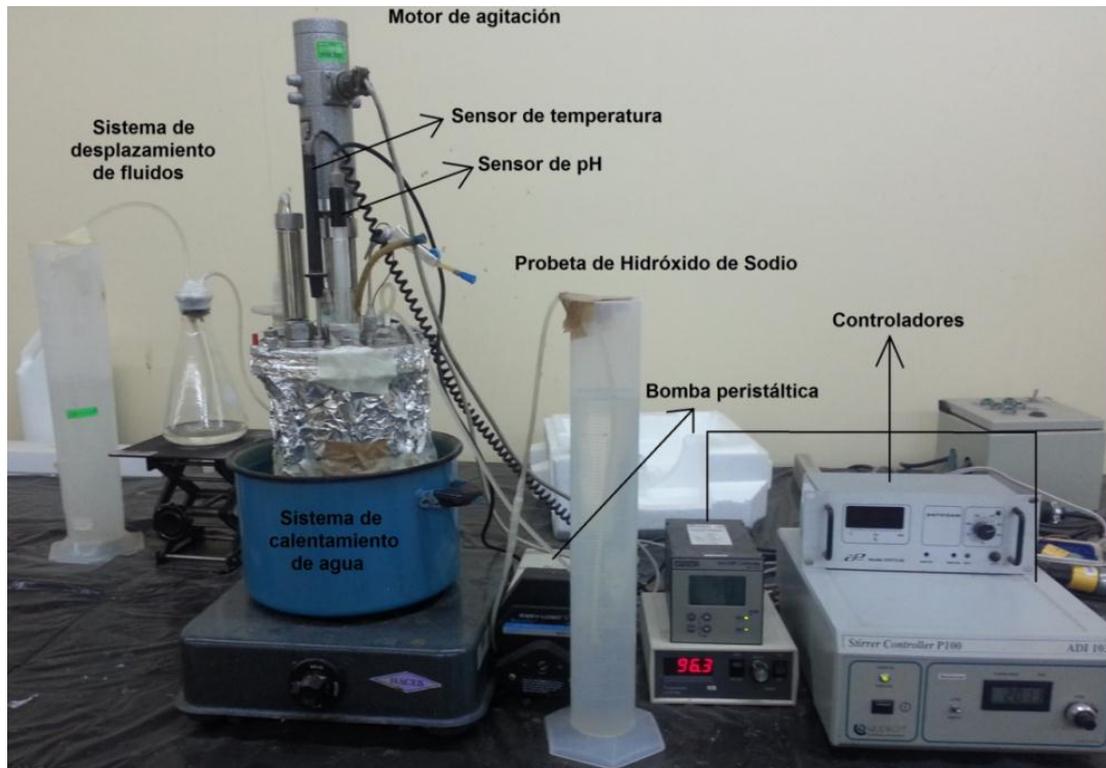


Figura 3.1 Biorreactor escala laboratorio

3.2 Diseño de experimentos

Los experimentos en el biodigestor de laboratorio iniciaron el 01 de Noviembre de 2012 con el fin de verificar que el agua de lavado de frutas, no afectará al proceso de degradación de la materia orgánica por la presencia de detergentes en su contenido. Se propone realizar cuatro experimentos variando la carga orgánica de alimentación con el tiempo de retención hidráulico, los mismos que están especificados en la tabla 3.1.

Tabla 3.1 Experimentos a escala laboratorio

Experimentos	Carga orgánica [$kg_{DQO}/m^3 \cdot d$]	Tiempo de residencia [d]	Caudal de alimentación [mL/d]	Tiempo de duración del experimento [d]
1	0.5	20	75	11
2	1	20	75	13
3	1.5	15	100	12
4	2	15	100	13

3.3 Puesta en marcha del biorreactor de laboratorio

Antes de iniciar con la investigación se preparó el equipo lavándolo con agua, y se esterilizó rociando con alcohol etílico sobre el biorreactor y usando gasas para limpiar. Después, se cerró al equipo y se lo cubrió con papel aluminio debido a que los microorganismos son sensibles a la luz solar.

Antes de ingresar la alimentación, se realizó pruebas hidrostáticas para asegurar la hermeticidad en el digestor y todas las conexiones con sus respectivas mangueras, con la finalidad de tener un ambiente anaerobio en el proceso.

Para iniciar la operación, se añadió 1.5 L de inóculo al biodigestor con la ayuda de una jeringa que va a traspasar el material al biodigestor mediante la manguera de alimentación. La misma jeringa se utilizó cuando se alimentaba al equipo. El inóculo fue obtenido de la planta piloto de digestión anaerobia del LaDEA.

A continuación se prenden los mecanismos de control automático del proceso de pH, agitación y de temperatura. Para el pH se establece el set – point de 6.5, con el fin de controlar la acidez dentro del sistema por la producción de ácidos grasos, la bomba peristáltica succiona el hidróxido de sodio para equilibrar el pH nuevamente en el proceso. Se prepara una solución de hidróxido de sodio 0.1 M, y se lo añade en la probeta hasta alcanzar el límite de volumen permitido. Es importante, llenar a la probeta todos los días que se consume hidróxido de sodio para evitar que se vacíe la probeta e ingrese aire al sistema. Con respecto a la temperatura, se llena la olla con agua, se

enciende la hornilla eléctrica y se la conecta al controlador de temperatura, para que se active cuando la temperatura del proceso descienda del valor establecido en el controlador (35°C o 95°F). Asimismo la hornilla se apagará automáticamente cuando supere este valor. Finalmente con el controlador de agitación se establece que las revoluciones por minuto a la que deben girar las aspas para evitar la formación de espumas y sedimentos es de 200 RPM.

Con el objetivo de mantener el volumen constante dentro del biorreactor, diariamente se registra la cantidad de hidróxido de sodio ingresado al equipo, la cual deberá ser retirada de la mezcla reactiva al día siguiente antes de proceder a alimentarlo. De la misma manera, se debe considerar el volumen de alimentación que va a entrar al reactor, para ser sacado junto con el volumen antes mencionado, los cuales servirán para análisis de la mezcla reactiva.

En cada cambio de carga orgánica, se recogía una muestra fresca de la alimentación para poder hacer experimentos de DQO y sólidos, con el objetivo de comparar con los resultados de la mezcla reactiva, y comprobar la degradación de la materia orgánica dentro del biodigestor.

3.3.1 Preparación de la alimentación para el biodigestor escala laboratorio

Como se ha dicho anteriormente, la materia prima utilizada para esta investigación, constituyen los desechos de fruta de Latinoamericana de Jugos S.A., estiércol bovino y agua de lavado de frutas. En las siguientes secciones, se indicará el tratamiento realizado a cada materia prima previo al proceso de digestión anaerobia.

3.3.1.1 Desecho de fruta

Para los experimentos se escogió trabajar con fibra de piña, debido a que a escala de laboratorio las tuberías de alimentación y descarga son sumamente pequeñas, y se puede tener problemas de taponamiento por semillas o cáscaras que no fueron correctamente trituradas y filtradas. Para asegurar que los resultados sean lo más estables posible, en los experimentos se utilizó únicamente desecho de fibra de piña, debido a que las propiedades físicas y químicas entre los diferentes desechos de fruta pueden variar ocasionando una alteración en los resultados.

El desecho de piña fue trasladado en contenedores desde la planta industrial Latinoamericana de Jugos S.A. al Laboratorio de Desarrollo de Energías Alternativas LaDEA, con el objetivo de recibir los tratamientos de triturado y filtrado antes de ingresar al biodigestor escala laboratorio ubicado en el mismo lugar. Se realiza la trituración, para reducir el tamaño de partícula y obtener una mayor área de contacto entre sustrato y bacterias, asegurando una óptima degradación de la materia orgánica. El objetivo de la filtración es tener una mezcla homogénea y con una correcta dilución para obtener una mezcla fluidizable para el proceso.

Para realizar estos procesos físicos se utilizó un equipo triturador de marca Cremasco cuyo modelo es DPF-Mini, el cual consta con un motor que entrega 3500 RPM a dos cuchillas que giran en su propio eje. Para la primera fase que es la trituración, se procede a ingresar el material a través de una tolva ubicada en la parte superior del equipo, se utiliza una criba ciega que no posee orificios de salida, con la finalidad de recoger el producto por la salida superior del equipo. Posteriormente, para el proceso de filtración se hace ingresar nuevamente a la mezcla con una dilución 1:1 en peso de fruta: agua, pero se cambia el tipo de criba cuyos orificios de salida son de 1mm de diámetro. El material que supere este diámetro quedará retenido sobre la criba y saldrá por la salida superior; mientras el material ya filtrado se recolectará por la parte inferior del equipo. En la figura 3.2 y 3.3 se presenta una imagen de las cribas y la trituradora.



Figura 3.2 Cribas de la trituradora Cremasco [49]



Figura 3.3 Triturador Cremasco [49]

3.3.1.2 Estiércol

Para el biodigestor escala laboratorio del LaDEA se decidió utilizar estiércol bovino, el cual fue obtenido de haciendas del sector Amaguaña en el Valle de los Chillos. Se procuró que esta materia prima recolectada sea lo más fresca posible, para evitar que pierda sus características naturales por evaporación de los componentes, provocando la muerte de bacterias benéficas para el proceso de digestión anaerobia. También, se constató que el estiércol recogido no posea tratamiento con antibióticos debido a que puede alterar la degradación de la materia orgánica. Se recolectó en recipientes desde el lugar, y fue transportado hacia el laboratorio donde recibió tratamiento de filtración previo al ingreso en el biodigestor.

El objetivo de la filtración es eliminar palos, piedras, hierbas, entre otros materiales no deseados que llegaron adheridos al estiércol. Se utilizó una dilución 1:1 de estiércol: agua en peso, y con la ayuda de un tamiz se realizó la filtración de la mezcla. El filtrado fue almacenado en contenedores para su uso en los experimentos.

3.3.1.3 Agua de lavado

El agua de lavado fue obtenida de la planta Latinoamericana de Jugos S.A., la cual fue llevada en un recipiente hacia el LaDEA. Esta materia prima fue almacenada por una semana dentro de un refrigerador para conservar sus propiedades iniciales durante todos los siete días de alimentación; pasada la semana, se recogía una nueva muestra de agua de lavado de la misma planta, y se realizaba el mismo procedimiento. Esta materia prima no recibía tratamientos previos de filtración y trituración.

3.3.1.4 Volumen de alimentación de las materias primas

Para determinar el volumen de alimentación del estiércol, desecho de fruta y agua, se realiza un experimento para obtener la demanda química de oxígeno de la mezcla. Conjuntamente, con este valor y las condiciones de operación de carga orgánica y tiempo de residencia determinados previamente, se puede determinar las cantidades a alimentar de cada materia prima a partir de las siguientes ecuaciones.

$$\dot{V}_{Total} = \dot{V}_{Agua} + \dot{V}_{M.O.} \quad (3.1)$$

Donde

$$\dot{V}_{Total} = \text{Caudal de alimentación [m}^3/\text{d]}$$

$$\dot{V}_{Agua} = \text{Caudal de agua [m}^3/\text{d]}$$

$$\dot{V}_{M.O.} = \text{Caudal de materia orgánica [m}^3/\text{d]}$$

Para obtener los caudales, se conoce que el caudal diario de la alimentación es:

$$\dot{V}_{Total} = \frac{V_{Reactor}}{\tau} \quad (3.2)$$

Donde:

$$V_{Reactor} = \text{Volumen de operación en el reactor [m}^3\text{]}$$

$$\tau = \text{Tiempo de residencia [d]}$$

Para el caudal diario de la materia orgánica se tiene:

$$\dot{V}_{M.O.} = \frac{\dot{m}_{DQO}}{C_{DQO M.O.}} \quad (3.3)$$

Donde:

\dot{m}_{DQO} = Flujo másico de DQO [kg_{DQO}/d]

$C_{DQO M.O.}$ = DQO experimental de la materia orgánica [kg_{DQO}/m³]

Para determinar el flujo másico:

$$\dot{m}_{DQO} = C.O.* V_{Reactor} \quad (3.4)$$

Donde:

$C.O.$ = Carga orgánica [kg_{DQO}/m³·d]

Finalmente, para obtener el caudal de agua, se despeja de la ecuación 3.1

La cantidad de fruta: estiércol alimentada por día, se obtiene a partir del resultado de la ecuación 3.1 considerando una relación 4:1 respectivamente de cada materia prima.

3.3.2 Parámetros de operación para el funcionamiento del biodigestor

Para que el proceso de biodigestión se lleve a cabo de una forma eficiente, logrando una óptima producción de biogás, se necesita controlar diversos parámetros del proceso de digestión dentro del sistema.

3.3.2.1 pH

Un pH adecuado en el proceso de digestión anaerobia se encuentra en el rango entre 6.5 y 7.5. Para comprobar que el pH esté estable dentro de esos límites se lleva un control tanto en la alimentación como en la mezcla reactiva extraída del biodigestor.

Es normal que el pH de la alimentación se encuentre entre los valores de 3.5 a 5.5 por el alto contenido de ácidos en la fruta de la alimentación. Se lleva un registro diario de la mezcla que ingresa al biodigestor, para constatar que la misma esté preparada dentro de las proporciones correctas. Conociendo que los valores de pH en la alimentación son ácidos, se podría suponer que el proceso de digestión anaerobia va a ser afectado. Sin embargo, se estabilizó al pH con la adición de hidróxido de sodio 0.1M para reducir los iones hidronio en la solución. El hidróxido de sodio fue impulsado hacia el equipo mediante una bomba peristáltica que está programada automáticamente para que succione la cantidad necesaria cuando el pH sea menor a 6.5.

El pH de la mezcla reactiva, se lo mide al recoger la muestra diaria que sale del biodigestor, con la finalidad de verificar que el proceso de digestión anaerobia esté operando correctamente en sus cuatro fases. En caso de tener un pH menor a 6, indicaría una generación excesiva de ácidos grasos, por una sobre alimentación de materia orgánica ocasionando que las bacterias metanógenicas no puedan digerir todo el sustrato.

Para medir el pH de la alimentación y de la mezcla reactiva sacada diariamente del biodigestor, se utilizó un medidor de pH de marca Hanna cuyo modelo es HI 8424. En la figura 3.4 se presenta una imagen del equipo.



Figura 3.4 Medidor de pH

3.3.2.2 Temperatura

Como se mencionó en el apartado 2.5.3.1, existen tres rangos de temperatura para la operación del proceso anaerobio, siendo la mejor categoría la mesofílica la cual va de 25 a 45°C. Para esta investigación se escogió operar a 35°C, utilizando un controlador automático que permite fijar dicho valor, el cual trabaja conjuntamente con un sensor de temperatura que es introducido en una vaina dentro del digester. Como sistema de calentamiento, se utiliza una hornilla eléctrica que se prende en caso de descender del set-point establecido, para calentar a baño maría una olla que contiene agua en donde está ubicado el reactor. Cuando alcance la temperatura establecida, se apaga la hornilla.

3.3.2.3 Producción de gas

Es importante controlar este parámetro, debido a que permite conocer cuándo se ha estabilizado el sistema con determinada carga orgánica y tiempo de residencia. El biogás fue recolectado en las trampas de ácido sulfúrico 0.1 N, que funcionan bajo el principio de desplazamientos de fluidos; este sistema cuenta con dos matraces de 1L y una probeta de 2L.

Una vez finalizada la alimentación en el biodigester y retirado la muestra diaria de mezcla reactiva, se procede a succionar biogás por un catéter ubicado en la parte superior del equipo, hasta llegar a 200mL en la probeta de ácido sulfúrico; con el objetivo de conocer el volumen que va a ser producido diariamente. Al día siguiente antes de alimentar y sacar las muestras de biol, se mide a la misma hora la cantidad en [mL] que ha incrementado el nivel en la probeta, y se calculaba mediante diferencia entre el valor final con el inicial la producción de biogás. Fue necesario que se repitan 3 valores por días consecutivos, para concluir que dicha carga orgánica había llegado al estado estacionario, para poder continuar con el siguiente experimento.

3.3.3 Caracterización de la alimentación y de la mezcla reactiva de los experimentos del agua de lavado

Para comprobar la degradación de la materia orgánica se realizan experimentos a las muestras de la alimentación y de la mezcla reactiva para cada carga orgánica que permiten comparar los resultados. En las siguientes secciones, se explica el procedimiento respectivo de cada experimento.

3.3.3.1 DQO

La demanda química de oxígeno permite medir en [mg/L] la porción de la materia orgánica que puede ser oxidada mediante un oxidante fuerte y en condiciones de oxidación energéticas [50]; es decir permite conocer la cantidad de materia orgánica que puede ser degradada. Para este procedimiento, como agente oxidante se utiliza al dicromato de potasio, el cual se añade y va a ser transformado al ion crómico, partiendo de un color amarillo hasta convertirse en verde, la reacción es la siguiente [51]:



Mediante el método colorimétrico se determina el ión cromo producido, el cual indica la cantidad de materia orgánica presente en la muestra. Para digerir a la muestra, se utiliza un reactor de marca HACH modelo DRB 200 y para leer la DQO se usa un colorímetro de marca HACH cuyo modelo es DR/890. El rango de medidas en el colorímetro es de 0 a 1500mg/L, siendo necesario para la alimentación una dilución de 1:20 y para la mezcla reactiva de 1:10. En el análisis de la alimentación, se espera obtener valores de DQO superior que a los de la mezcla extraída del biodigestor, debido a que en la alimentación la materia orgánica no ha sido degradada aun. Las imágenes del reactor y colorímetro HACH se presentan en la figura 3.5.

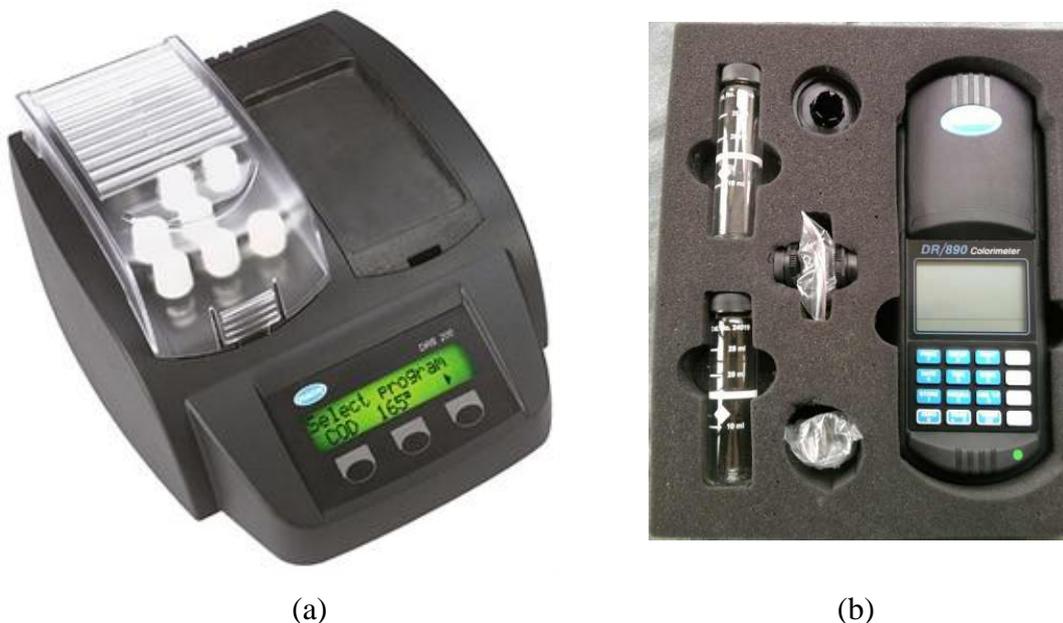


Figura 3.5 a) Reactor HACH DRB 200, b) Colorímetro HACH DR/890

El procedimiento realizado para este análisis es el siguiente.

Se centrifuga a las muestras de alimentación y mezcla reactiva, para utilizar el sobrenadante en el proceso. Se realiza una dilución de la muestra de alimentación o mezcla reactiva con agua destilada de 1:20 o 1:10, respectivamente. Se utiliza una probeta para agregar 3.5mL de ácido sulfúrico, 1.5mL de solución digestora de dicromato de potasio y 2.5 mL de la muestra en un tubo de ensayo. Se agita a la muestra y se le inserta en el reactor HACH, el cual fue previamente calentado hasta alcanzar los 150°C. Se deja digerir a la muestra por un transcurso de dos horas, tras cual automáticamente comenzará a descender la temperatura hasta llegar a los 120°C. Una vez alcanzada dicha temperatura, se retira los viales y se deja enfriar hasta temperatura ambiente.

Para poder leer los resultados de DQO, se necesita preparar un blanco el cual va a servir como referencia para los valores obtenidos. El blanco se lo preparó con las mismas cantidades de ácido sulfúrico y solución digestora, con la diferencia de que se coloca agua destilada en vez de muestra. Se siguen los demás procedimientos con normalidad. Al blanco se lo puede almacenar en la refrigeradora, recubriéndolo con papel aluminio para posteriores análisis.

Se enciende el colorímetro y se presiona la opción respectiva para la lectura de DQO. Se coloca al blanco y se presiona “Zero”, dando como resultado en la pantalla una lectura de 0mg/L. Posteriormente, se ingresa al tubo de ensayo con la muestra que se desee determinar la DQO, se presiona la tecla “Read” dando como resultado en la pantalla el valor en [mg/L]. Hay que recordar que al resultado obtenido se lo debe multiplicar por el factor de dilución.

3.3.3.2 Sólidos totales

El análisis de sólidos totales permite determinar el porcentaje de sólidos que contiene una muestra, siendo su rango óptimo de 4 al 12%. En la alimentación se determina para conocer si la dilución realizada a la materia prima (fruta, estiércol) es apropiada, para que no haya problemas en el proceso de digestión anaerobia por un alto contenido en sólidos que ocasione taponamiento de tuberías y bombas o por inhibición del proceso. El porcentaje de la mezcla reactiva se determina para conocer si la materia sólida orgánica fue degradada, con lo que se debería obtener un resultado menor de sólidos con respecto a la alimentación.

El experimento realizado consistió en tomar 10mL de la muestra (alimentación y mezcla reactiva) y colocarlo en un crisol, se toma el peso inicial del crisol y de la muestra con el crisol. Seguidamente, se introdujo las muestras por 24 horas al horno, previamente calentado a 105°C. Pasado este tiempo, se retira las muestras del horno, se las deja enfriar a temperatura ambiente y se procede a pesarles nuevamente. La fórmula para determinar los sólidos totales es:

$$TS = \frac{m_2 - m_0}{V} \quad (3.6)$$

Donde:

TS= Concentración de sólidos totales [mg/mL]

m_0 = Masa del crisol [mg]

m_1 = Masa de la muestra y el crisol [mg]

m_2 = Masa de la muestra seca y el crisol [mg]

V= Volumen inicial de la muestra [mL]

3.3.3.3 Sólidos totales orgánicos

Los sólidos totales orgánicos corresponden al porcentaje de materia orgánica que contienen los sólidos totales. Por esta razón, es conveniente tener un porcentaje mayor al 60% de oTS con relación a los TS. El experimento consistió en llevar a la mufla las muestras obtenidas en el apartado anterior. La temperatura a la cual las muestras fueron calcinadas fue de 550°C por un periodo de 6 horas. Finalizado este proceso, se retiran las muestras de la mufla y se espera que se enfríen hasta alcanzar la temperatura ambiente. Por último, se pesan los crisoles y se registra dicho valor. La fórmula utilizada es:

$$oTS = \frac{m_2 - m_3}{V}$$

Donde:

m_3 = Masa de la muestra calcinada y crisol [mg]

3.3.4 Caracterización biogás

Previamente se indicó el procedimiento para determinar el volumen de biogás producido para cada carga orgánica con su tiempo de retención hidráulico. Sin embargo una alta producción de biogás no indica un alto contenido en metano. Este compuesto es el más importante del biogás debido a que es el que le da las características de combustible, el rango de metano es del 50 al 70%. Se le considera al biogás de buena calidad cuando se obtiene un porcentaje de metano mayor al 60%. Por esta razón, se realizó dos análisis para definir la presencia y el porcentaje del gas.

3.3.4.1 Prueba cualitativa de quemado

El metano se caracteriza por tener una llama de color azul al combustionarse. Este análisis consiste en observar la coloración azul del biogás al quemarlo cerca de una fuente de ignición. Para este procedimiento se extrae biogás del digestor con una jeringuilla mediante una tubería ubicada en la parte superior del equipo, se tiene que tomar la preocupación de no dejar escapar al biogás al ambiente. Se enciende una vela y se expulsa el biogás de la jeringuilla apuntando a la llama. Finalmente, si existe metano en el biogás se observa la coloración antes mencionada.

3.3.4.2 Prueba cuantitativa

En la prueba anterior se determinó la presencia de metano. Sin embargo, es necesario conocer el porcentaje exacto de metano en el biogás. Para esto se extrae el biogás del biodigestor con una jeringuilla y se lo hace burbujear en una solución de hidróxido de sodio al 4% en peso. Mediante el principio de desplazamiento de líquido se obtiene el contenido de metano; debido a que el segundo compuesto (CO_2) que existe mayoritariamente en el biogás es atrapado en la solución de NaOH, el cual se transformará en NaHCO_3 . Se mide el volumen inicial de la probeta, y el volumen final del experimento.

3.4 Cálculos para la producción y degradación específica

Se inicia obteniendo el balance de masa en el reactor, calculado a partir de la siguiente ecuación.

$$E_R - S_R - A_R = D_R \quad (3.7)$$

Donde:

E_R = Entrada [kg_{DQO}]

S_R = Salida [kg_{DQO}]

A_R = Acumulación [kg_{DQO}]

D_R = Degradación [kg_{DQO}]

Para el cálculo de la producción específica se aplicó la siguiente ecuación.

$$P.E.f = \frac{\dot{B}_G}{\dot{m}_0} \quad (3.8)$$

Donde:

$P.E.f$ = Producción específica de alimentación [m³/kg_{DQO} alim]

\dot{B}_G = Caudal de biogás producido [m³/d]

\dot{m}_{DQO} = Flujo másico de DQO [kg_{DQO}/d]

El cálculo de la remoción específica se realizó a partir de la siguiente ecuación.

$$R.E. = \frac{D_R}{V_{Reactor}} \quad (3.9)$$

Donde:

$R.E.$ = Remoción específica [kg_{DQO}/m³]

D_R = Degradación [kg_{DQO}]

$V_{Reactor}$ = Volumen de operación reactor [m³]

4. RESULTADOS

4.1 Caracterización de la materia prima de los experimentos del agua de lavado

Con el objetivo de conocer si el agua de lavado alteraría el proceso de digestión anaerobia, se utilizó como materia prima a los desechos de fruta proveniente de Latinoamericana de Jugos S.A., estiércol de ganado bovino y la adición del agua de lavado de frutas. Para los experimentos se inició con la caracterización de la materia prima.

4.1.1 Desecho de fruta

Los desechos de frutas resultantes de la industrialización de pulpas, son muy diversos debido a que presentan diferentes características físicas y químicas. Con el objetivo de tener resultados precisos, se utilizó en todos los experimentos el mismo desecho de fruta, en este caso fue la fibra de piña. Los experimentos de esta materia prima fueron extraídos de la tesis de Pedro Puente, debido a que compartimos el tiempo de experimentación en el LaDEA y se presentan en la tabla 4.1.

Tabla 4.1 Características de la fibra de piña [49]

Materia prima	Experimentos			
	pH [-]	TS [%]	oTS [%]	DQO [mg/L]
Fibra de piña	3.24	6.77	6.18	127300

Según estos datos, se observa que la cantidad de sólidos totales se encuentran dentro de los rangos permisibles para el proceso de digestión anaerobia. Por este motivo, no se tuvo problemas de taponamiento de tuberías durante todo el periodo de investigación. Con respecto a los sólidos totales orgánicos, el valor obtenido representa el 91% de los sólidos totales, que corresponden a la cantidad de sólidos que pueden ser degradados en el proceso anaerobio.

Considerando que el rango de pH óptimo para que las bacterias metanogénicas actúen con normalidad es de 6.5 a 7.5, el pH de la fibra de piña es bajo para el proceso. Sin embargo, se debe tomar en cuenta, que el desecho de fruta se mezclará con el estiércol que tiene un pH ligeramente básico. Además el rango de pH de la alimentación puede encontrarse entre 3.5 a 5.5, lo cual se consiguió sin problema debido a la adición de las otras materias primas.

Mediante el valor de DQO obtenido, se comprueba que la muestra contiene elevadas cantidades de materia orgánica por degradar, lo cual favorece al proceso anaerobio debido a que la fruta es la principal materia prima de la alimentación.

4.1.2 Estiércol bovino

El estiércol bovino es muy importante para el proceso anaerobio, debido a que posee las poblaciones bacterianas necesarias para que la digestión se lleve a cabo. La materia prima utilizada a lo largo de los experimentos fue recolectado en la parroquia de Amaguaña en el Valle de los Chillos. Los análisis de DQO, pH, TS y oTS obtenidos se presentan en la tabla 4.2.

Tabla 4.2 Características del estiércol bovino [49]

Materia prima	Experimentos			
	pH [-]	TS [%]	oTS [%]	DQO [mg/L]
Estiércol bovino	7.87	13.53	10.24	10433

Según estos datos, se observa que el pH tiene una tendencia básica, lo cual favorece a la alimentación, para neutralizar la acidez de la fibra de piña y llegar a un valor de la alimentación que se encuentre dentro de los rangos de 3.5 a 5.5.

De la misma manera, se analiza el porcentaje de sólidos totales obtenidos, el cual supera levemente el límite permisible de 12%; en este caso, se necesita hacer dilución hasta encontrarse el rango de 4 a 12%. Los sólidos totales orgánicos corresponden al 75.7% de sólidos totales, lo cual es un valor aceptable de materia orgánica degradable para la alimentación.

Al analizar los valores de DQO obtenidos para el estiércol bovino, se tiene un valor bajo en comparación con la DQO de la fruta anteriormente mencionada.

4.1.3 Agua de lavado de frutas

La adición de agua en el proceso anaerobio, es muy importante debido a que evita tener una alimentación muy espesa acarreado problemas dentro de la planta por taponamiento de tuberías o bombas. Se caracterizó al agua de lavado

proveniente de la industrialización de frutas de Latinoamericana de Jugos S.A., con la finalidad de poder incorporarlo en la planta de digestión anaerobia que fue creada en la misma empresa. El objetivo de utilizar el agua de lavado es para aprovechar este residuo en la digestión anaerobia y evitar costos extras para Latinoamericana de Jugos S.A. por la creación de una planta de tratamiento de aguas grises. Los resultados obtenidos se presentan en la tabla 4.3.

Tabla 4.3 Características del agua de lavado de frutas

Materia prima	Experimentos			
	pH [-]	TS [%]	oTS [%]	DQO [mg/L]
Agua de lavado	3.9	1.47	1.21	3545

Según los análisis realizados de agua de lavado, el pH obtenido presenta un valor ácido. Sin embargo, no afecta a la alimentación en el proceso anaerobio porque se encuentra dentro de los límites indicados de 3.5 a 5.5 para la mezcla diaria que ingresará al digestor.

Observando el resultado de TS de 1.47%, y conociendo que los rangos permisibles son de 4 a 12 %, se distingue que este valor está alejado del límite inferior. No obstante, este valor es coherente, sabiendo que el agua de lavado en su gran mayoría es líquida; y no va a afectar al proceso anaerobio puesto que la cantidad añadida a la alimentación no es en grandes proporciones con respecto a la fruta. El oTS corresponde al 82.31 % de los sólidos totales de lo cual se concluye que tiene un correcto porcentaje de sólidos orgánicos para degradar.

El valor de DQO es bajo comparándolo con la fibra de piña, debido a que en su gran mayoría corresponde a agua.

4.2 Alimentación del biodigestor

El biodigestor de laboratorio se alimentó inicialmente con 1.5L de inóculo obtenido de la planta piloto del LaDEA, para poder empezar el proceso con una elevada población bacteriana se esperó una semana sin alimentar al bioreactor para que se estabilice y se consuma todo el oxígeno presente en el sistema.

Al día siguiente, se inició con la alimentación diaria al biodigestor y para conocer los volúmenes de estiércol, fruta y agua que se debe alimentar diariamente en el biorreactor según la carga orgánica y tiempo de residencia, se utilizan las fórmulas enunciadas en el apartado 3.3.1.4.

Es necesario determinar la DQO de la alimentación para poder aplicar las ecuaciones, por esta razón se obtuvo experimentalmente la DQO del desecho de fruta y estiércol y se realizó un promedio ponderado entre los dos valores considerando una relación de 4:1 de fruta: estiércol. Se debe recalcar que previo a realizar los análisis, las materias primas pasaron por los procesos de trituración y filtración. Con la trituración se logró reducir el tamaño de partícula de los residuos para facilitar la degradación orgánica dentro del reactor. En esta fase no se utiliza ninguna dilución. Mientras que para la filtración se usó una dilución de 1 a 1 con agua, con el propósito de tener un material fluidizable para el proceso. La filtración se realiza con el objetivo de eliminar las impurezas que contenía la materia prima. Los porcentajes totales de la alimentación se presentan en la tabla 4.4.

Tabla 4.4 Porcentajes totales de la alimentación

Componentes	Porcentaje [%]
Desecho de fruta	80
Estiércol bovino	20

4.3 Parámetros de operación del biodigestor

Para asegurar que el biodigestor esté operando en las condiciones óptimas, se controla diariamente los distintos factores que podrían afectar al desempeño de la digestión anaerobia. Algunos de los valores fueron medidos diariamente para tener un registro del funcionamiento del equipo, como pH y temperatura.

4.3.1 pH

Con el objetivo de conocer si el pH con el que ingresaba la mezcla al reactor afectaba el desempeño del proceso, se midió diariamente el pH de la alimentación junto con el pH del digestor para todas las cargas orgánicas. En la figura 4.1 se detalla el pH

de la mezcla reactiva al ser extraída del biodigestor diariamente y la alimentación para cada uno de los experimentos.

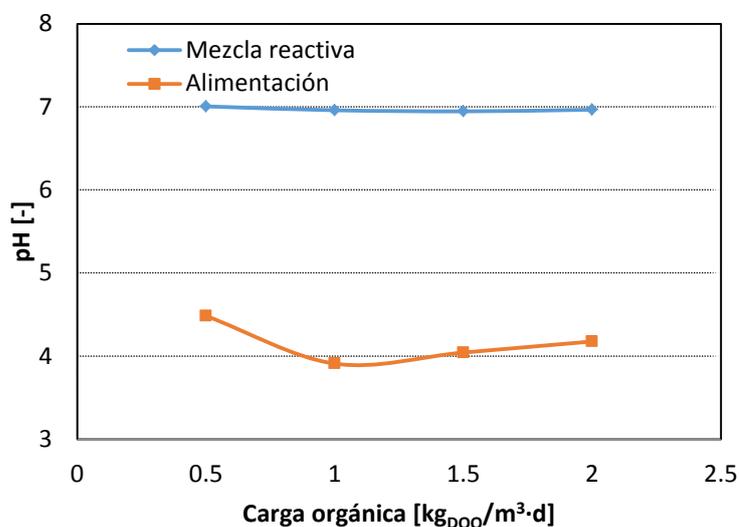


Figura 4.1 pH en la alimentación y la mezcla reactiva

En esta figura se observa que la alimentación ingresa al equipo dentro de sus límites permisibles de 3.5 a 5.5. Obteniendo el valor más bajo de 3.91 para una carga orgánica de 1 [kg/m³·día], y el más alto de 4.48 para una carga orgánica de 0.5 [kg/m³·día]. Estos valores están relacionados directamente con la cantidad de fruta en la alimentación, debido a que esta materia prima es la responsable de la acidez en la misma. Todos los resultados de pH obtenidos para cada carga orgánica, son muy similares, debido a que se mantiene la misma proporción de fruta, estiércol y agua alimentadas al proceso.

A pesar de tener un pH ácido en la alimentación, no se ve afectado el proceso dentro del digestor el cual se mantiene en un rango entre 6.95 y 7.00, debido a que se regula el pH con la adición de hidróxido de sodio 0.1M con la ayuda de la bomba peristáltica, encargada de transportar la solución. En la figura 4.1, se advierten valores de pH neutros para la mezcla reactiva, que aseguran el correcto funcionamiento del proceso.

Como se puede observar en la figura 4.2 el consumo de hidróxido de sodio es directamente proporcional a la carga orgánica alimentada, debido a que se incrementa la cantidad de fruta añadida diariamente al digestor y se genera mayor cantidad de ácido

en el sistema. Relacionando las figuras de pH y del consumo de hidróxido de sodio, se concluye que se logró mantener un pH neutro alcanzando el equilibrio en el sistema, es decir que los ácidos que no fueron convertidos en la metanogénesis, se neutralizaron con la solución básica.

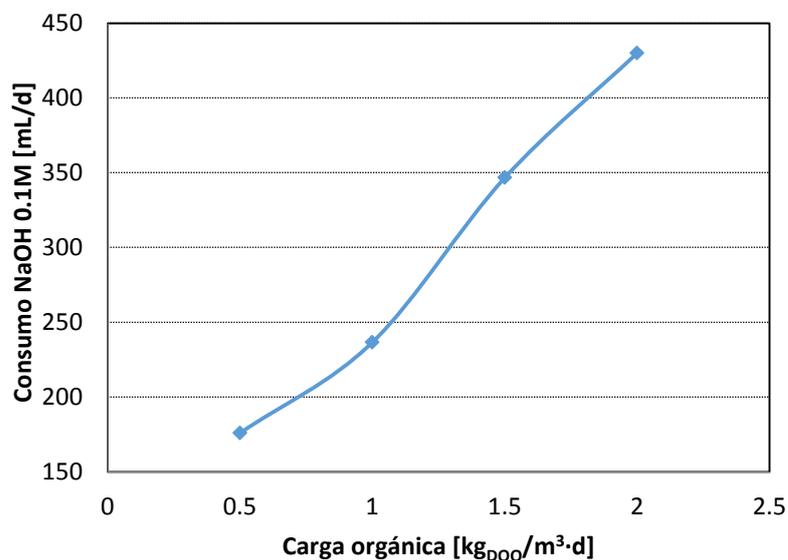


Figura 4.2 Consumo de hidróxido de sodio

4.3.2 Temperatura

Para el correcto funcionamiento del proceso de digestión anaerobia es primordial mantener constante la temperatura, la misma que fue fijada a 35°C (95°F) durante todos los experimentos. Debido a que este parámetro, fue controlado con un controlador automático, no existieron variaciones significativas. En ocasiones, se tenía alteraciones de $\pm 1^{\circ}\text{F}$, lo cual se resolvía volviendo a fijar al controlador a la temperatura deseada. Las precauciones que se debía tener, es llenar el agua de la olla diariamente, la cual era utilizada como fuente de calentamiento, para tener una temperatura homogénea dentro del digestor.

4.4 Caracterización de la mezcla reactiva y alimentación de los experimentos del agua de lavado

Para saber si se puede incorporar el agua de lavado de fruta en la digestión anaerobia, se comparó los resultados de la alimentación y la mezcla reactiva con la

finalidad de observar si la materia orgánica estaba siendo degradada. Los experimentos realizados se detallan en las secciones siguientes.

4.4.1 Demanda química de oxígeno (DQO)

El análisis de la demanda química de oxígeno en la alimentación permite determinar la cantidad de materia orgánica que va a ser degradada en el digestor. Por otro lado, la DQO en la mezcla reactiva indica la materia orgánica sobrante después de ocurrir la digestión anaerobia dentro del reactor. Consecuentemente, la demanda química de oxígeno debe ser mayor en la alimentación que en la mezcla reactiva. En la figura 4.3 se observan los resultados obtenidos para cada experimento.

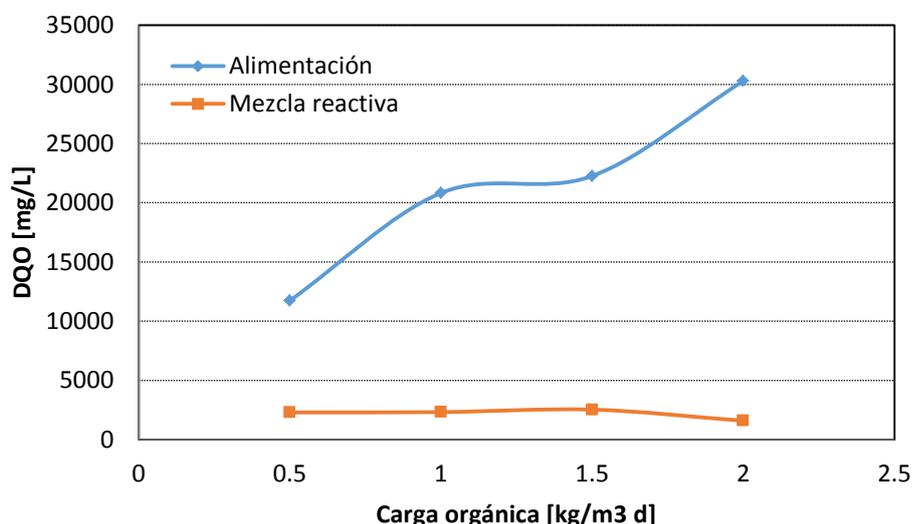


Figura 4.3 DQO en la alimentación y mezcla reactiva

En esta figura se visualiza que la DQO de la alimentación incrementa a medida que aumenta la carga orgánica en cada experimento, empezando desde un valor de 11746 [mg/L] para la carga orgánica de 0.5 [kg/m³·día], hasta los 30296 [mg/L] para la carga orgánica de 2 [kg/m³·día]. En los experimentos 2 y 3 que corresponden a la carga orgánica de 1 y 1.5 [kg/m³·día], respectivamente, se observa un leve ascenso de DQO, a pesar de que la carga orgánica es mayor.

Con respecto a la DQO de la mezcla reactiva, se tiene valores bajos del mismo, oscilando entre los valores de 1591 [mg/L] para el experimento 4 y 2528 [mg/L] para el grupo 3. Estos resultados demuestran que hubo una significativa disminución de la DQO

comparando los valores de la alimentación con los de la mezcla reactiva, lo que implica una buena degradación de la materia orgánica.

4.4.2 Sólidos totales (TS)

Los sólidos totales en la alimentación, determinan la cantidad de sólidos que ingresan directamente al digestor. Se recomienda un valor menor al 12% para evitar un taponamiento de tuberías y bombas en el proceso. Se analizan los sólidos totales en la mezcla reactiva para ver si el proceso de digestión sucedió con normalidad, y las bacterias degradaron la materia sólida. Se debe considerar que siempre va a existir un residuo.

La figura 4.4 indica el porcentaje de sólidos totales en la alimentación, el cual tiene un valor mayor en el cuarto experimento y un valor menor en el primer experimento lo cual es la tendencia esperada ya que en las cargas orgánicas bajas hay mayor dilución de la materia orgánica. Sin embargo, el porcentaje en que se mantienen las muestras es el óptimo debido a que no superan el 12%, teniendo su pico máximo en 6.24% correspondiente a la carga orgánica de 2 [kg/m³·día]. La razón de tener un porcentaje de sólidos totales bajos, es debido a que la fruta utilizada no tenía mucha cantidad de semillas o cáscaras, que contribuyen a aumentar la cantidad de la misma y que la dilución realizada al estiércol fue la correcta.

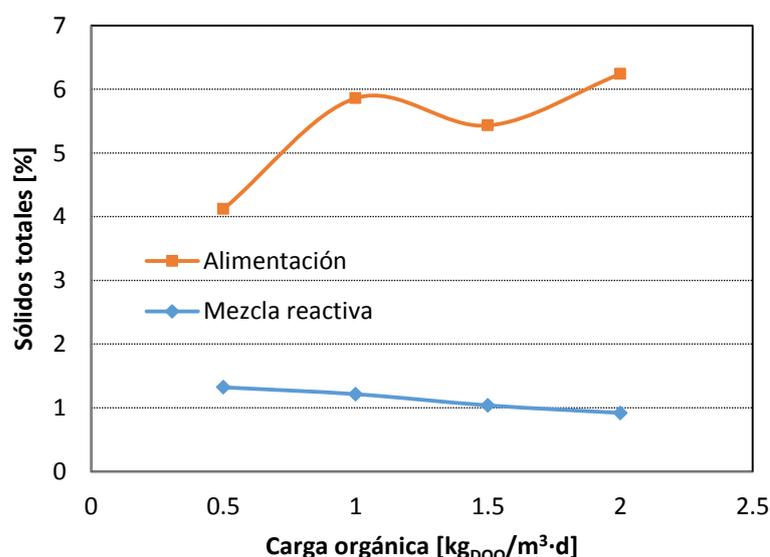


Figura 4.4 Sólidos totales en la alimentación y mezcla reactiva

Con respecto a los sólidos totales obtenidos de la mezcla reactiva, se puede apreciar que se tiene un porcentaje bajo y relativamente constante, que están alrededor del 1%. Lo cual demuestra que hubo una óptima degradación de la materia sólida, quedando un pequeño porcentaje de remanente.

4.4.3 Sólidos totales orgánicos (oTS)

Los sólidos totales orgánicos constituyen una parte de los sólidos totales e indican la cantidad de sólidos que pueden ser degradados en el proceso anaerobio, es aconsejable que el porcentaje de oTS en la alimentación con respecto a TS sea mayor al 60%. En la figura 4.5 se presentan los sólidos totales orgánicos en la alimentación y mezcla reactiva para cada carga orgánica.

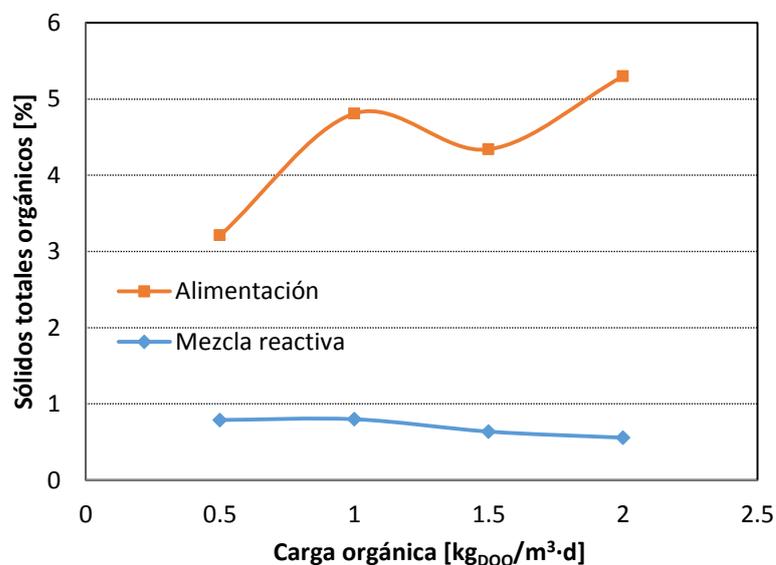


Figura 4.5 Sólidos totales orgánicos en la alimentación y mezcla reactiva

Los sólidos totales orgánicos en la mezcla reactiva son visiblemente menores que los de la alimentación, obteniendo porcentajes inferiores al 1% de oTS en la mezcla reactiva lo cual indica que existió una buena conversión de la materia orgánica a biogás.

Comparando las figuras 4.4 y figura 4.5, se observa que en éste experimento se obtuvo porcentajes menores de oTS con relación a TS en la alimentación, se calcula el porcentaje de oTS con respecto a TS para conocer la cantidad de materia orgánica que puede ser degradada en la muestra de alimentación, obteniendo los siguientes valores.

Tabla 4.5 Porcentaje de oTS con respecto a TS en la alimentación

C.O [kg/m ³ ·d]	Porcentaje de oTS con respecto a TS [%]
0.5	77.91
1	82.08
1.5	79.93
2	84.94

Se observa que los porcentajes obtenidos están alrededor del 80% de oTS con respecto a TS, lo cual constituye un resultado favorable para la digestión anaerobia.

4.5 Caracterización de biogás

Es importante controlar la producción diaria de biogás, debido a que este factor permite saber cuándo se ha estabilizado el reactor con determinada carga orgánica. El criterio de estabilidad utilizado es cuando se alcanza una producción constante de biogás por tres días consecutivos. Alcanzada la estabilidad se continúa con el siguiente experimento. En la figura 4.6 se indica la producción constante de biogás para cada carga orgánica con su tiempo de residencia.

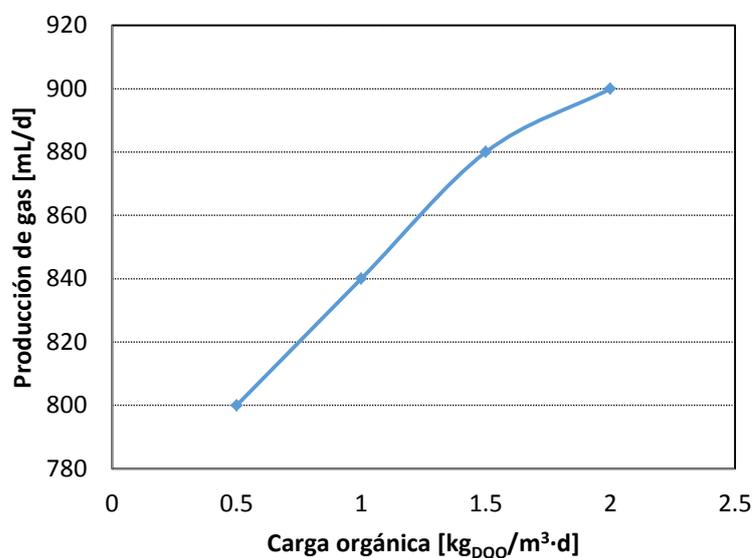


Figura 4.6 Producción de gas

Se observa que a medida que aumenta la carga orgánica también incrementa la producción de biogás. Para las cargas orgánicas de 0.5, 1 y 1.5 [kg/m³·d] se tiene un

crecimiento lineal de la producción de biogás. Mientras que para la carga orgánica de 2 [kg/m³·d] se observa que la producción de biogás creció pero con una pendiente más baja.

El biogás es una mezcla de gases que está compuesto principalmente por metano y dióxido de carbono. El porcentaje de metano puede variar entre el 50 y el 70%, y mientras mayor sea su contenido, se obtendrá un biogás de mejor calidad, debido a que este compuesto es el que le da las características de combustible. En la figura 4.6 se indicó la producción de gas existente para cada carga orgánica en mL/d; sin embargo una mayor producción no necesariamente indica un alto contenido de éste hidrocarburo. Para conocer el nivel de pureza y calidad del biogás se realizó pruebas cualitativas y cuantitativas. A continuación se detallan los resultados de cada análisis.

4.5.1 Prueba cualitativa de combustión

Esta prueba consiste en observar la calidad del biogás mediante la combustión con una fuente de ignición, la llama tomará una coloración azul en caso de contener altos porcentajes de metano.



Figura 4.7 Prueba cualitativa de biogás

Según la figura 4.7 se observa la presencia de metano en el biogás debido a su coloración azul que es característica de este compuesto.

4.5.2 Prueba cuantitativa

En el análisis anterior se constató la presencia de metano. Sin embargo, no se conoce el porcentaje existente del mismo en el biogás, para cada carga orgánica y tiempo de residencia lo cual se presenta en la figura 4.8.

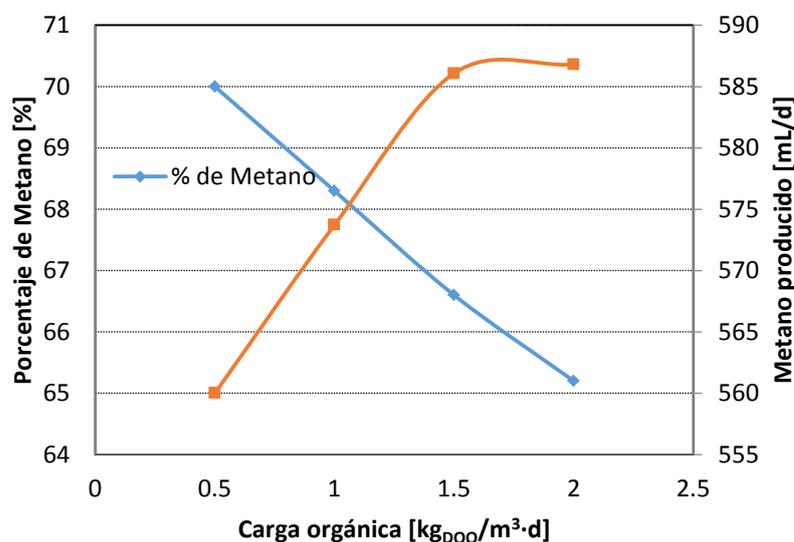


Figura 4.8 Porcentaje de metano en el biogás

Se observa que el porcentaje de metano, disminuye proporcionalmente con cada experimento; obteniendo su pico máximo para la carga orgánica de 0.5 [kg/m³·d]. No obstante, la producción de metano es mayor para los experimentos 3 y 4 con 586 mL/d y 587 mL/d, que corresponden a las cargas de 1.5 y 2 [kg/m³·d]. Esto se debe a que el volumen diario de producción de biogás es mayor para dichos experimentos. También se puede visualizar en este análisis que todos los porcentajes obtenidos de metano se encuentran dentro del rango óptimo del 50 al 70% del biogás.

4.6 Evaluación de resultados

Para evaluar los resultados se realizan las figuras de producción específica de biogás y degradación específica con respecto a las cargas alimentadas en cada experimento. Se inicia presentando los valores de concentración de afluente y efluente, y la concentración inicial y final para cada experimento dentro del digestor. Los datos obtenidos se presentan en la tabla 4.6.

Tabla 4.6 Concentraciones de DQO del afluente, efluente y en el interior del reactor

Carga orgánica [kg _{DQO} /m ³ ·d]	Concentración entrada [mg _{DQO} /L]	Concentración salida [mg _{DQO} /L]	Concentración inicial reactor [mg _{DQO} /L]	Concentración final reactor [mg _{DQO} /L]
0.5	11746.67	2293.33	4833.33	2033.33
1	20836.67	2320.00	2033.33	2400.00
1.5	22271.11	2528.89	2400.00	2146.67
2	30296.67	1591.11	2146.67	1720.00

En la tabla 4.7 se realiza el balance de masa en función de los gramos de DQO que entran, salen, se acumulan y se degradan en cada experimento.

Tabla 4.7 Balance de masa del reactor

Carga orgánica [kg _{DQO} /m ³ ·d]	Entrada [g _{DQO}]	Salida [g _{DQO}]	Acumulación [g _{DQO}]	Degradación [g _{DQO}]	Porcentaje degradación [%]
0.5	17.62	3.44	-4.20	18.38	57.93
1	31.26	3.48	0.55	27.23	0.00
1.5	33.41	3.79	-0.38	29.99	10.56
2	45.45	2.39	-0.64	43.70	19.88

Según el balance de masa se observa que existe una mayor degradación en [g_{DQO}] para la carga orgánica de 2 [kg/m³·d], debido a que la concentración de entrada es mayor. En la figura 4.9 se presenta la degradación específica de los kg_{DQO} removido en el reactor para cada carga orgánica.

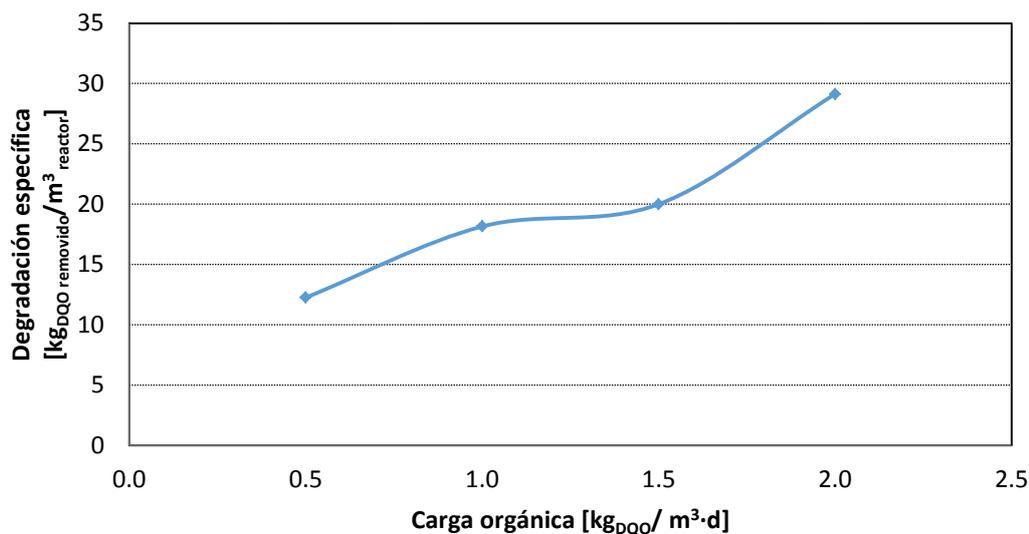


Figura 4.9 Degradación específica

Se observa que existe una tendencia lineal en la degradación con respecto a las cargas orgánicas. No obstante, para las cargas orgánicas de 1 y 1.5 [kg/m³·d] no existe una variación significativa en el sistema. El valor para la degradación específica más alto se obtiene para la carga orgánica de 2 [kg/m³·d].

La figura 4.10 muestra la producción específica del biogás y de metano por cada kg de DQO alimentado con respecto a cada carga orgánica de los experimentos.

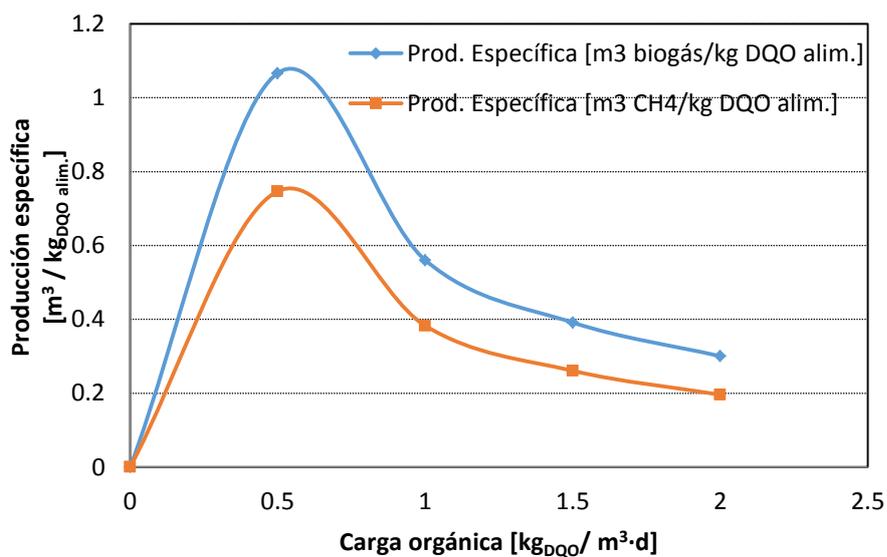


Figura 4.10 Producción específica del biogás y el metano

La mayor producción específica de biogás y metano se obtiene para la carga orgánica de $0.5 \text{ [kg/m}^3\cdot\text{d]}$ con un valor de $1.07 \text{ [m}^3_{\text{biogás}}/\text{kg}_{\text{DQO alim.}}]$ y de $0.75 \text{ [m}^3_{\text{CH}_4}/\text{kg}_{\text{DQO alim.}}]$. Por lo que la carga orgánica óptima para trabajar es de $0.5 \text{ [kg/m}^3\cdot\text{d]}$.

5. Descripción de la planta de digestión anaeróbica en Latinoamericana de Jugos S.A.

5.1 Descripción del proceso

El proceso de digestión anaerobia se divide en seis partes, desde el ingreso de la materia prima hasta la producción de biol y biogás. En las siguientes secciones se detallan cada una de las partes a consideración. En la figura 5.1 se presenta un diagrama de bloque del proceso en donde se puede visualizar cada etapa.

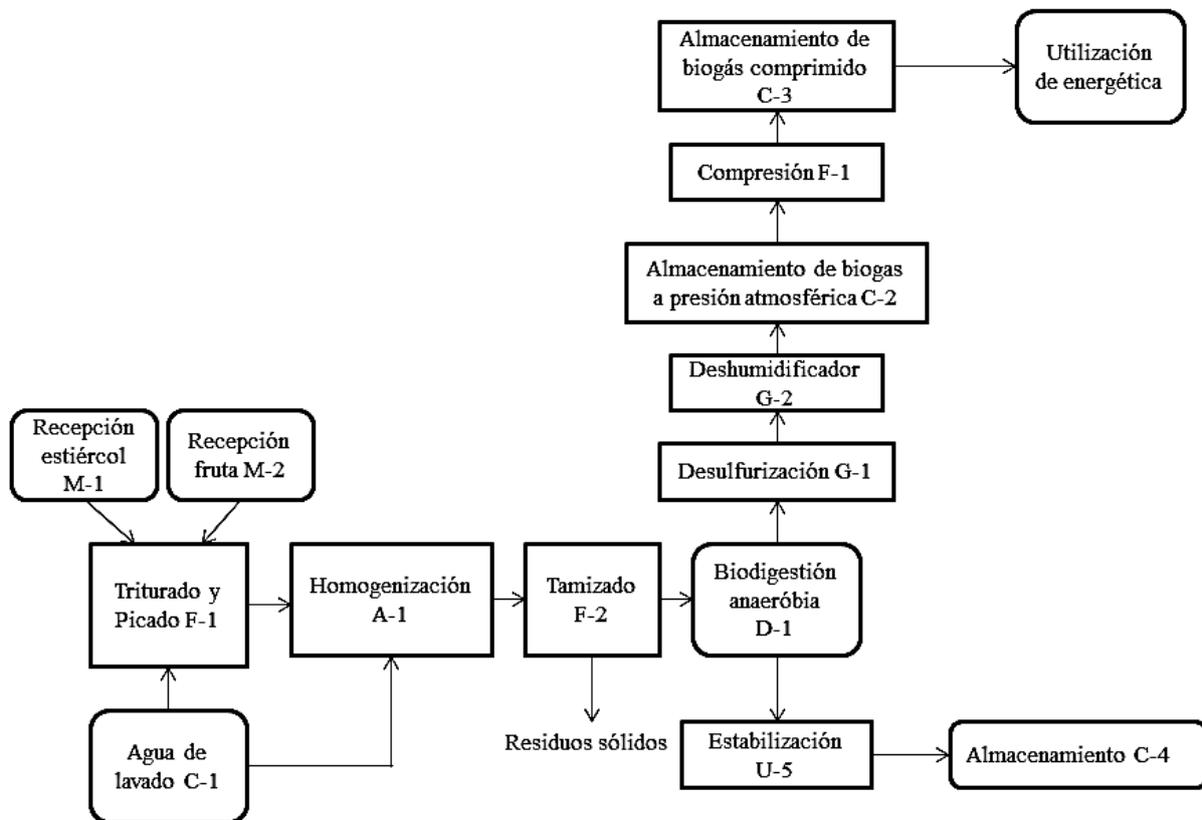


Figura 5.1 Diagrama de bloque del proceso

5.1.1 Recepción de la materia prima

Las materias primas que se utilizan para el proceso son desecho de fruta, estiércol bovino, y agua. Los desechos de fruta provienen de la fábrica Latinoamericana de Jugos S.A., debido a que es una empresa que se dedica a la producción de pulpas de frutas para su distribución a nivel nacional y ocasionalmente internacional en supermercados, restaurante, catering y operadores turísticos, entre otros. El desperdicio de la extracción

de fruta es la principal materia prima en el proceso, y se receipta en el tanque M-2 para iniciar el proceso.

El estiércol que se usa en este proceso es bovino, y se obtendrá de haciendas aledañas del sector Amaguaña. El estiércol debe ser lo más fresco posible y no debe provenir de animales con tratamiento de antibióticos, debido a que puede inhibir el proceso de degradación. En la planta el estiércol se almacena en el tanque M-1. Para iniciar el proceso, se debe considerar una relación 4:1 de fruta: estiércol.

El agua representa la tercera materia prima para el proceso, y se utiliza para diluir la alimentación. Para hacer más eficiente al proceso se utilizarán aguas grises provenientes del lavado de frutas de la fábrica Latinoamericana de Jugos S.A. Es decir, se evitarán los costes de crear una planta de tratamiento de agua, debido a que el agua con la que lavan las frutas se dirigirá directamente al tanque C-1, para posteriormente ingresar al proceso mediante la bomba B-1.

5.1.2 Pretratamiento de la materia prima para el digestor

La materia prima debe someterse a un pretratamiento para alcanzar las características y propiedades necesarias para ingresar al proceso anaerobio. Los pasos necesarios para el pretratamiento son triturado y picado, homogenización y tamizado.

5.1.2.1 Triturado y picado

Después de almacenar la materia prima en los tanques M-1 y M-2, se los transporta a la trituradora / picadora (F-1) mediante los tornillos sin fin T-1 y T-2, respectivamente. En el equipo F-1, se mezclará también con el agua que se almacena en el equipo C-1. La cantidad de agua que debe ingresar corresponde al 21% de la materia introducida en el equipo. De esta manera se asegura que la mezcla esté diluida. Una vez triturada y picada la mezcla seguirá a la siguiente fase del proceso.

5.1.2.2 Homogenización de la mezcla reactiva

La materia prima triturada y picada cae al tanque de homogenización (A-1) por gravedad desde el tanque F-1. El objetivo de esta etapa es conseguir que la mezcla esté lo más uniforme y homogénea posible para lo cual se utiliza un agitador que funciona a

base de un motor eléctrico y además se realiza una recirculación de la alimentación en el mismo tanque. Posteriormente, se transporta a la mezcla reactiva a la siguiente unidad mediante la bomba B-2.

5.1.2.3 Tamizado

En esta unidad se separan los sólidos en la mezcla según el tamaño de partícula requerido. Las partículas de menor tamaño a 1 cm pasan por los poros del tamiz y se almacenan en la parte inferior de este equipo denominado tamiz vibratorio F-2. Para hacer más eficiente al proceso se utiliza vibración. La mezcla filtrada es la alimentación que posteriormente va a ser dirigida hacia el biodigestor por acción de la bomba B-3.

La malla se ubica con cierta inclinación, lo cual ayudará a que las partículas retenidas en la misma caigan por gravedad a un tanque de plástico que está ubicado junto al tamiz o puedan ser retiradas manualmente. Este material consiste principalmente de pepas y cáscaras de fruta que no fueron trituradas adecuadamente y corresponde al 20% del total de materia orgánica que ingresa al tamiz y el 5% del total de agua que ingresa a esta etapa del proceso; lo cual constituye el 17.3% de la alimentación total [13]. La retorta va ser desechado o enviada a una unidad de compostaje.

5.1.3 Biodigestión anaerobia

Al biodigestor D-1 ingresa el filtrado proveniente del tamiz vibratorio. También puede ingresar agua en la parte superior en caso de generación de espuma; la cantidad de agua que entra en esta parte del proceso es despreciable para cálculos. Se debe asegurar que el biodigestor esté herméticamente cerrado, para poder tener un medio libre de oxígeno. Se utiliza relleno para ayudar a la generación de colonias bacterianas dentro del equipo.

El biodigestor tiene 3 salidas; la primera está en la parte superior del equipo por donde se libera el biogás producido. La segunda salida se encuentra lateralmente a una altura de 4 m para se recircular la mezcla reactiva impulsada por la bomba B-4 y se dirige hacia el intercambiador de calor U-3, y posteriormente reingresará al biodigestor. Y la tercera salida se encuentra en la parte inferior del biodigestor y se utiliza para

descargar el biol del biodigestor impulsado por la bomba B-5 hacia el tanque C-4 atravesando el intercambiador de calor U-5.

5.1.4 Purificación y almacenamiento del biogás

El biogás proveniente del biodigestor pasa por el filtro G-1 para su desulfurización. Este filtro retiene las partículas de H_2S y puede reducir mediante el uso de limalla de hierro en un 50% su concentración. El porcentaje de retención es el 1.5% con respecto a todo el biogás ingresado [13].

Posteriormente se dirige al filtro deshumidificador G-2, para disminuir la humedad, trazas de sulfuro de hidrógeno y los olores remanentes del biogás mediante el uso de carbón activado. Se retiene un 50% de vapor de agua en ésta unidad, con respecto a la cantidad de vapor de agua total que tiene el biogás [13].

A continuación el biogás se dirige hacia el tanque C-2, en donde se almacena a presión atmosférica en un gasómetro. El equipo tiene sensor de nivel con la finalidad que una vez llena la unidad, se vacíe por accionamiento del compresor E-1, en donde se comprime hacia el tanque C-3. Finalmente, al biogás se lo puede utilizar como fuente de energía eléctrica o térmica, es decir a su salida se puede dirigir hacia el generador U-4 que es para generar energía eléctrica, o hacia el caldero K-1 para calentar el agua que se usa en los intercambiadores de calor.

5.1.5 Proceso de estabilización y almacenamiento del biol

El efluente inferior del biodigestor es bombeado por la bomba B-5 hacia el intercambiador de calor U-5, para alcanzar una temperatura de $70^{\circ}C$ con el objetivo de reducir la cantidad de microorganismos patógenos del biol. Posteriormente ser almacenado en el tanque C-4, y está listo para su envasado y venta como fertilizante orgánico.

5.1.6 Circuito de agua en los intercambiadores de calor

El agua para los intercambiadores de calor, proviene del agua potable y se almacena en el tanque T-01, en donde se eleva un poco su temperatura debido al calefón. Para llevar el agua hacia el intercambiador de calor U-3, se bombea con la

bomba B-10; para este circuito no se requiere temperaturas muy elevadas, debido a que por esta unidad pasa la recirculación del digestor, y solo se necesita alcanzar una temperatura de 35°C. Finalmente, regresa el agua al tanque T-01.

El agua para el intercambiador de calor U-5, después de ser recolectado en el tanque T-01, se dirige hacia el caldero K-1 para elevar su temperatura debido a que requiere que el biol que pasa por ese intercambiador de calor alcance los 70°C. El agua es impulsada por la bomba B-7 hacia el intercambiador de calor. Por último, el agua retorna al tanque T-01.

5.2 Capacidad de la planta

Para definir la capacidad de la planta, se partirá del tamaño diseñado previamente del digestor, considerando el material que ingresará a esta unidad. El biodigestor será el punto de referencia debido a que en esta parte del proceso es en donde se produce biogás y biol, por esta razón se lo considera como el equipo principal de la planta de digestión anaeróbica.

Para determinar la cantidad que se alimentará al biodigestor, se analizan los desechos generados por Latinoamericana de Jugos S.A. en el año 2010 desde los meses de junio a diciembre, año en el que se realizaron el diseño y dimensionamiento de la planta de digestión anaeróbica.

En la tabla 5.1 se observa la producción mensual de los desechos de frutas, como: babaco, durazno, frutilla, guanábana, limón, mango, manzana, maracuyá, melón, mora, naranja, naranjilla, papaya, piña, tamarindo, taxo, tomate de árbol y toronja. No se consideró a los desechos del coco debido a sus características de alto contenido de fibra.

Tabla 5.1 Generación de desechos de fruta de junio a diciembre de 2010

Meses	Desecho Disponible [kg]
Junio	16639.66
Julio	13313.80
Agosto	17355.02
Septiembre	14832.59
Octubre	18954.67
Noviembre	14721.13
Diciembre	19491.03
PROMEDIO	16472.56

Una vez obtenido el promedio de la producción mensual de desechos en el año 2010 en Latinoamericana de Jugos S.A., se puede elaborar un pronóstico para los siguientes años. Según el gerente de Latinoamericana de Jugos S.A. se estima un aumento del 8% anual en los próximos 5 años y de 5% anual posteriormente. En la tabla 5.2 se tiene una estimación de los desechos de fruta para la producción de Latinoamericana de Jugos S.A. en los próximos 10 años. Para la alimentación diaria al digestor se considera el 80% del desecho diario, debido a que existen pérdidas en las etapas anteriores como en el tamizado.

Tabla 5.2 Proyección de desechos de frutas para los próximos años

Año	Desecho mensual [kg]	Desecho diario [kg/d]	Desechos diarios que pueden ingresar al digestor [kg/d]
2010	16472.56	549.09	439.27
2011	17790.36	593.01	474.41
2012	19213.59	640.45	512.36
2013	20750.68	691.69	553.35
2014	22410.74	747.02	597.62
2015	24203.59	806.79	645.43
2016	25413.77	847.13	677.70
2017	26684.46	889.48	711.59
2018	28018.69	933.96	747.16
2019	29419.62	980.65	784.52
2020	30890.60	1029.69	823.75

Según datos proporcionados por el Laboratorio de Desarrollo de Energías Alternativas (LaDEA), la densidad de la mezcla reactiva corresponde a 1086 kg/m^3 . Por lo tanto, la alimentación diaria de los desechos de fruta en volumen será de $0.55 \text{ m}^3/\text{d}$ en el 2014 y $0.76 \text{ m}^3/\text{d}$ en el 2020.

Considerando que la relación entre las materias primas es de 4:1 con respecto a fruta: estiércol, y que aproximadamente el 21% de la mezcla reactiva es agua, cantidad que será función de la carga orgánica, se asumirá 1 m^3 de alimentación diaria al digestor.

Según investigaciones del LaDEA, se asume que se necesita de 20 a 25 días de residencia para que la materia orgánica se degrade. Por tanto, se necesitaría que el digestor tenga una capacidad de 20 a 25 m^3 , pero asumiendo que esta materia solo va a ocupar el 80% del espacio en el digestor, se tendría que el tamaño del digestor es de 30 m^3 .

Según estos valores, el tamaño del digestor abastecería para la producción de los desechos de frutas hasta el año 2017; sin embargo se deberían hacer pequeñas

modificaciones para seguir empleando todos los desechos en la planta anaeróbica en los años posteriores.

5.3 Equipos de la planta de digestión anaeróbica

Los equipos de la planta de digestión anaeróbica en Latinoamericana de Jugos S.A. son los tanques elaborados para realizar cada una de las etapas del proceso. En la tabla 5.3 se resumen cada uno de estas unidades, los mismos que fueron construidos por la empresa contratista Inoxking dirigida por el Ing. Saúl Tobón. También se detalla la cantidad requerida de cada uno de ellos en la planta. En el anexo 1 se encontrarán los planos mecánicos de cada uno de los equipos.

Tabla 5.3 Equipos principales de la planta de digestión anaeróbica

Nomenclatura	Equipo	Cantidad
M-1	Tanque de almacenamiento de estiércol	1
M-2	Tanque de almacenamiento de fruta	1
F-1	Picadora/ Triturador	1
A-1	Tanque de homogenización	1
F-2	Tamiz vibratorio con tanque	1
D-1	Biodigestor	1
G-1	Desulfurizador biogas	2
G-2	Deshumidificador	2
C-2	Tanque de almacenamiento de biogás	1
C-3	Tanque de almacenamiento de biogás comprimido	1
C-4	Tanque de almacenamiento de biol	1
U-3	Intercambiador de calor tubo en carcasa	1
U-5	Estabilizador boil	1

5.3.1 Tanque de almacenamiento de estiércol M-1

En la figura 5.2 se observa el tanque de almacenamiento de estiércol, el cual fue construido en acero inoxidable y tiene una forma rectangular en la parte superior, y en la parte inferior tiene una inclinación de todos los lados hacia un extremo del equipo. Consta de una tapa en la parte superior, la cual evita malos olores y contaminación dentro de Latinoamericana de Jugos S.A., la tapa se abrirá en tres secciones según el

requerimiento. En el extremo inferior del equipo, se junta con el tornillo sin fin T-1 para transportar el estiércol hacia la trituradora. La capacidad del equipo es de 3.5m^3 .



Figura 5.2 Tanque de almacenamiento de estiércol

Las dimensiones del equipo se encuentran descritas en la tabla 5.4.

Tabla 5.4 Dimensiones tanque de almacenamiento de estiércol M-1

Característica	Valor	Unidades
Largo	2.45	m
Ancho	1.22	m
Altura parte plana	0.9	m
Altura parte inclinada	0.5	m
Altura total del equipo	1.7	m

El tornillo sin fin utilizado para llevar el estiércol hacia la trituradora, constituye un tornillo sin cabeza que transmite el movimiento entre ejes, los mismos que forman un ángulo de 90° . El material de construcción es acero inoxidable y para su funcionamiento usa un motor de 1HP con variador de frecuencia. A continuación se observa al tornillo sin fin en la figura 5.3 con sus dimensiones en la tabla 5.5.



Figura 5.3 Tornillo sin fin T-1

Tabla 5.5 Dimensiones tornillo sin fin T-1

Característica	Valor	Unidades
Largo	3.50	m
Diámetro	0.10	m

5.3.2 Tanque de almacenamiento de fruta M-2

En la figura 5.4 está el tanque de almacenamiento de fruta, el cual fue construido de manera similar al de estiércol, es decir considerando la misma forma pero aumentando la capacidad del equipo, debido a que se alimenta una cantidad mayor de fruta con respecto al estiércol para el proceso; la capacidad de ésta unidad es de 4.2m^2 . El material de construcción es acero inoxidable. Asimismo, se utilizará una tapa que se divide en tres secciones para evitar malos olores y contaminación dentro de la planta. En el extremo inferior del equipo, también se une al tornillo sin fin T-2 para transportar el material hacia la trituradora.



Figura 5.4 Tanque de almacenamiento de fruta

Las dimensiones del equipo se presentan en la tabla 5.6.

Tabla 5.6 Dimensiones tanque de almacenamiento de fruta M-2

Característica	Valor	Unidades
Largo	2.45	m
Ancho	1.22	m
Altura parte plana	1.20	m
Altura parte inclinada	0.5	m
Altura total del equipo	2.00	m

El tornillo sin fin empleado para trasladar la fruta hacia la trituradora, tiene el mismo mecanismo diseño y dimensiones que el tornillo T-1 mencionado en la sección anterior. El material es acero inoxidable y funciona a base de un motor de 1 HP con variador de frecuencia.

5.3.3 Picadora/ Triturador F-1

En la parte superior del equipo, ingresa la materia prima proveniente de los tornillos sin fin y de la tubería de agua y caen sobre las muelas del triturador, que posee 47 muelas en total y giran sobre dos ejes de rotación horizontal. Después la mezcla pasa hacia el picador que tiene cuatro cuchillas con separación de 2 mm y que gira sobre

el eje de rotación vertical. Se instaló un visor en el equipo, con el objetivo de detectar con facilidad cualquier problema de taponamiento. Como medida de seguridad, la trituradora / picador tiene bordes de acero inoxidable, para evitar el contacto de las muelas y las cuchillas directamente con el personal. Esta unidad funciona por medio de dos motores eléctricos que entregan 1 HP de potencia cada uno. El producto debe dirigirse hacia el tanque homogenizador A-1, por esta razón la picadora/ trituradora se encuentra ubicada a una altura mayor y junto al equipo A-1, para que pueda descender la mezcla por gravedad a través de una rampa de acero inoxidable. En las figuras siguientes, se tiene una vista frontal y lateral de la picadora/ triturador, la misma que tiene forma de pirámide trunca invertida y fue construida con acero inoxidable.



(a)



(b)

Figura 5.5 a) Vista frontal Picadora / Triturador, b) Vista Lateral Picadora / Triturador

Las dimensiones se presentan en la tabla 5.7.

Tabla 5.7 Dimensiones picadora/ triturador F-1

Característica	Valor	Unidades
Largo	0.50	m
Ancho	0.50	m
*Altura sin soporte	1.50	m
Altura total del equipo	3.25	m

* La altura sin soporte, hace referencia al receptor, triturador, picadora y motor de la picadora.

5.3.4 Tanque de Homogenización A-1

Al tanque de homogenización A-1 ingresan el estiércol, la fruta y el agua por la parte superior del equipo al caer desde la trituradora /picador F-2. Con el objetivo de tener a la mezcla lo más homogénea posible y evitar sedimentos durante el desalojo del producto se realizan tres mecanismos de agitación. Primero se utiliza un agitador que funciona con un motor eléctrico a 900 RPM. Segundo se realiza una recirculación del material, es decir que la mezcla sale del tanque por la parte inferior e ingresa por la parte superior nuevamente; y finalmente, se utilizan paletas o “baffles” que tendrán un ángulo que permita que la mezcla reactiva tienda a subir por los extremos y descienda por el centro generando un efecto embudo.

En la figura 5.6 se observa al tanque de homogenización con su diseño cilíndrico y una inclinación del 2 % en el fondo para fácil desalojo de la mezcla reactiva homogenizada.



(a)



(b)

Figura 5.6 a) Vista frontal del Tanque de Homogenización A-1, b) Vista en el interior del Tanque de Homogenización A-1

Asimismo en el fondo tiene un espacio de igual forma cilíndrico de menor diámetro en donde se ubica a la bomba sumergible B-2, que tiene una potencia de 1 HP y será la encargada de impulsar la mezcla reactiva hacia el siguiente unidad. Este equipo consta de una tapa para ayudar a prevenir la contaminación del aire y malos olores en la planta. Es construido de acero inoxidable y tiene una capacidad de 2.8m³. Las dimensiones del equipo se presentan en la tabla 5.8.

Tabla 5.8 Dimensiones tanque de homogenización A-1

Característica	Valor	Unidades
Diámetro	1.8	m
Altura sin patas ni motor	1.18-1.24 centro/exterior	m

5.3.5 Tamiz vibratorio con tanque F-2

El tamiz vibratorio consta de una malla de 1.35m de diámetro, cuyos orificios son de 2 x 2 cm que servirán para retener a las partículas de mayor tamaño, las cuales serán retiradas por acción de la vibración del equipo debido a que la malla tiene una pendiente que ayudará a que el desecho se deposite en un tanque anexo, en caso de no salir el material, se puede retirar manualmente. El material que atraviesa la malla se deposita en el tanque que se observa en la figura 5.7, el cual tiene una forma cilíndrica; en el fondo del equipo se tiene una base cónica para evitar asentamientos de sedimentos, asimismo en el fondo hay un espacio cilíndrico de menor diámetro para ubicar a la bomba sumergible B-3, que tiene como objetivo impulsar a la mezcla reactiva hacia el biodigestor, trabaja con una potencia de 2 HP.

La mezcla reactiva que ingresa a esta etapa del proceso desde el tanque de homogenización A-1, atraviesa a una tubería de dosificación que se divide en siete compartimientos para esparcir al material en la malla, se utiliza también una ducha de agua para evitar el taponamiento del tamiz. La cantidad de agua que ingresa, va a ser en las proporciones adecuadas según se requiera para el proceso anaeróbico. El equipo es de acero inoxidable y tiene una capacidad de 2.1 m³.



Figura 5.7 Tamiz vibratorio

Las dimensiones del equipo se presentan en la tabla 5.9.

Tabla 5.9 Dimensiones tamiz vibratorio con tanque F-2

Característica	Valor	Unidades
Diámetro	1.50	m
Altura plana	1.22	m
Altura inclinada	0.3	m

5.3.6 Biodigestor D-1

El biodigestor es un equipo hermético, de acero inoxidable con aislamiento térmico de poliuretano para mantener un control de temperatura, que tiene forma cilíndrica con base y tapa cónica. El equipo consta de tres mallas, en la malla intermedia se colocó material inerte que ayuda a la generación y asentamiento de colonias bacterianas. La mezcla reactiva y el biol ingresan al biodigestor mediante un anillo perimetral que está alrededor del biodigestor y tiene 6 entradas. Como se observa en la figura 5.8 las entradas están en la parte inferior del biodigestor para asegurar una correcta homogenización del material que está en el interior del reactor. La salida de la mezcla reactiva se realizará lateralmente por la malla superior, para asegurar que

siempre exista un nivel mínimo de operación dentro del digestor. La salida inferior es para sacar el biol de D-1 por acción de B-5 y dirigirlo hacia el estabilizador U-5 para su posterior almacenamiento. Por la parte superior del equipo, sale el biogás hacia el tratamiento y purificación del mismo. También, se podrá encontrar una ducha que tendrá el objetivo de eliminar la espuma en caso de generación. El reactor consta de dos manholes que sirven para mantenimiento del equipo, uno está ubicado en la parte superior y otro en la parte inferior. La capacidad del equipo es de 30.3 m³.



Figura 5.8 Biodigestor.

Las dimensiones del equipo se presentan en la tabla 5.10.

Tabla 5.10 Dimensiones biodigestor D-1

Característica	Valor	Unidades
Diámetro	2.78	m
Altura de cilindro	4.30	m
Altura cada cono	0.50	m
Altura total sin patas	5.30	m

El material inerte o relleno que se colocó en la malla intermedia del bioreactor, son tubos cilíndricos perforados de plástico, que permiten incrementar el área de contacto entre el sustrato y las bacterias para que exista una mejor degradación de la

materia orgánica; también tiene la finalidad de brindar un soporte para las bacterias. En la figura 5.9 se observa el relleno utilizado.



Figura 5.9 Relleno para el biodigestor

Las dimensiones de los dos modelos de relleno se presentan en la tabla 5.11.

Tabla 5.11 Dimensiones Relleno Bioreactor

Relleno	Característica	Valor	Unidades
Rojo	Diámetro	7.50	cm
	Altura	22.50	cm
Plomo	Diámetro	7.50	cm
	Altura	28.70	cm

5.3.7 Desulfurizador biogás G-1

El equipo es de acero inoxidable con forma cilíndrica y una capacidad de 0.02m^3 , en su interior tiene viruta de hierro para la eliminación del ácido sulfhídrico. El biogás ingresa al filtro desulfurizador G-1 por la parte superior del equipo, y atraviesa con flujo descendente, saliendo por la parte inferior. Se construyeron dos filtros desulfurizadores para continuar en operación mientras se da mantenimiento a uno de los equipos. En la figura 5.10 se observa los filtros G-1.



Figura 5.10 Desulfurizador de biogás G-1 y Deshumidificador de biogás G-2

Las dimensiones del equipo y la cantidad de vitra de hierro utilizado se presentan en la tabla 5.12.

Tabla 5.12 Características filtro desulfurizador de biogás G-1

Característica	Valor	Unidades
Diámetro equipo	0.20	m
Altura equipo	0.60	m
Volumen limalla de hierro	0.01	m ³

5.3.8 Deshumidificador G-2

El filtro G-2 es de acero inoxidable con forma cilíndrica de una capacidad de 0.02m³. En su interior tiene carbón activado para disminuir la humedad y los olores remanentes del biogás. Está conectado en serie posterior al filtro G-1, e ingresa el biogás por la parte inferior del equipo, se dirige hacia la parte superior con flujo ascendente y, posteriormente, abandona el filtro. Se construyeron dos filtros deshumidificadores, con la finalidad de continuar operando la planta mientras uno de los filtros está en mantenimiento o regeneración. Los filtros G-2 se encuentran en la figura 5.10.

Las dimensiones del equipo y el volumen del carbón activado utilizado son:

Tabla 5.13 Características filtro deshumidificador de biogás G-2

Característica	Valor	Unidades
Diámetro equipo	0.20	m
Altura equipo	0.50	m
Volumen carbón activado	0.01	m ³

5.3.9 Tanque de almacenamiento de biogás C-2

Al tanque de almacenamiento de biogás también se lo conoce como tanque pulmón, sirve para almacenar al biogás purificado a presión atmosférica dentro del equipo, mediante el uso de una membrana o gasómetro de PVC que tiene una capacidad de 10m³. El equipo es de acero inoxidable, de forma vertical para que la membrana pueda inflarse y desinflarse con facilidad y uniformemente al ingresar y salir el biogás, respectivamente. Tiene una base plana a nivel del piso, mientras que en la parte superior tiene una tapa redondeada con un manhole para mantenimiento.

Para controlar el llenado de biogás se utilizan tres sensores de nivel: mínimo, máximo y máximo-máximo. El máximo se utiliza cuando la membrana alcance casi la totalidad de su capacidad, liberando al biogás mediante la succión del compresor, hasta que llegue al nivel mínimo del gasómetro, cerrando la electroválvula y apagando el compresor para evitar deformaciones por la generación de vacío en el biodigestor. El mínimo se utiliza cuando la membrana este vacía y se requiera un nuevo ingreso del biogás, accionando la electroválvula ubicada junto a los filtros para su almacenamiento. El máximo- máximo es cuando existe una sobrepresión dentro de la membrana y funciona con una válvula de alivio, liberando el biogás en exceso hacia el arrasa llamas. En la figura 5.11 se observa el tanque de almacenamiento de biogás a presión atmosférica y en la tabla 5.14 se detallan las dimensiones del equipo.



Figura 5.11 Tanque de almacenamiento de biogás C-2

Las dimensiones del equipo se presentan en la tabla 5.14.

Tabla 5.14 Dimensiones tanque de almacenamiento de biogás C-2

Característica	Valor	Unidades
Diámetro equipo	1.83	m
Altura sin tapa	3.84	m
Altura total del equipo	4.00	m
Diámetro manhole	0.48	m

5.3.10 Tanque de almacenamiento de biogás comprimido C-3

Este equipo sirve para almacenar al biogás comprimido, debido a que se necesita que el biogás ingrese a presión para su uso en el generador eléctrico. El material de construcción es acero inoxidable y tiene una capacidad de almacenamiento de 8.3 m³. Su forma es cilíndrica horizontal y con tapas en forma de semiesférica. El tanque de almacenamiento de biogás comprimido se observa en la figura 5.12 con sus respectivas dimensiones en la tabla 5.15.



Figura 5.12 Tanque de almacenamiento de biogás comprimido C-3

Tabla 5.15 Dimensiones tanque de almacenamiento de biogás comprimido C-3

Característica	Valor	Unidades
Diámetro	1.38	m
Largo	5.57	m
Altura con patas	1.66	m

5.3.11 Tanque de almacenamiento de biol C-4

El tanque de almacenamiento de biol C-4 es de acero inoxidable con forma cilíndrica vertical y 6.9 m³ de capacidad real de almacenamiento. Incorporado en la parte superior del equipo se colocó un medidor de nivel. El ingreso del biol es por la parte superior del recipiente y la salida para su venta es por la parte inferior. Esta unidad se encuentra montado un nivel más alto que el resto de los equipos, con la finalidad de facilitar el envasado del biol. En la figura 5.13 se observa el tanque de almacenamiento de biol C-4 y en la tabla 5.16 se presentan las dimensiones del mismo.



Figura 5.13 Tanque de almacenamiento de biol C-4

Tabla 5.16 Dimensiones tanque de almacenamiento de biol C-4

Característica	Valor	Unidades
Diámetro	1.83	m
Altura equipo sin patas	2.64	m
Altura total	3.60	m

5.3.12 Intercambiador de calor tubo en carcasa U-3

El intercambiador de calor U-3 es de acero inoxidable, está constituido de 14 tubos distribuidos en 2 filas de 7 tubos cada una, su función es mantener la temperatura constante dentro del digester, mediante el uso de agua como fuente de calentamiento. Se caracteriza por ser de doble tubo que funciona en contraflujo para aumentar su eficiencia. En la tubería interior circula el biol de recirculación y la mezcla reactiva, mientras que el agua pasa por la tubería exterior.

El biol se junta con la mezcla reactiva e ingresan por un extremo en la parte superior del intercambiador de calor y salen por el extremo inferior contrario al de entrada para dirigirse hacia el biodigester. Para el agua ocurre lo contrario, es decir ingresa por el extremo inferior y sale por la parte superior. El diámetro de la tubería de biol es de 5.08 cm y de la tubería de agua es de 10.16 cm. La figura 5.14 muestra al intercambiador de calor U-3. Las dimensiones del equipo se presentan en la tabla 5.17.



Figura 5.14 Intercambiador de calor tubo en carcasa U-3

Tabla 5.17 Dimensiones intercambiador de calor tubo en carcasa U-3

Característica	Valor	Unidades
Largo	3.27	m
Ancho	1.00	m
Altura sin patas	1.10	m

5.3.13 Estabilizador biol U-5

El intercambiador de calor U-5 es de acero inoxidable, y consta de 10 tubos distribuidos en 2 filas de 5 tubos cada una. Este equipo sirve para reducir los patógenos presentes en el biol mediante la elevación de la temperatura, se usa agua como fuente de calentamiento. Se caracteriza por ser de doble tubo que funciona en contraflujo para aumentar la eficiencia del proceso, en la tubería interior pasa el biol y en la tubería exterior circula agua.

El biol ingresa por el extremo superior del intercambiador de calor y sale por el extremo inferior contrario al de la entrada para dirigirse hacia el tanque C-4, por otro lado el agua ingresa por el extremo inferior adyacente a la salida de biol, y sale por la parte superior adyacente a la entrada de biol. El diámetro de la tubería de biol es de 5.08 cm y de la tubería de agua es de 10.16 cm. En la figura 5.15 se presenta al intercambiador de calor U-5.



Figura 5.15 Estabilizador biol U-5

Las dimensiones del equipo se presentan en la tabla 5.18.

Tabla 5.18 Dimensiones estabilizador de biol U-5

Característica	Valor	Unidades
Largo	3.27	m
Ancho	1.00	m
Altura sin patas	0.60	m

5.4 Bombas de la planta de digestión anaeróbica

Las bombas en la planta de digestión anaeróbica en Latinoamericana de Jugos S.A., ayudan a impulsar los fluidos desde una unidad a otra, permitiendo que las etapas sucedan de una forma controlada y efectiva. Se adquirieron 10 bombas para todo el proceso, las cuales se enumeran en la tabla 5.19.

Tabla 5.19 Bombas del proceso

Nomenclatura	Nombre	Descripción	Característica
B-1	Bomba de agua para el proceso	Impulsar el agua de lavado desde C-1 hacia F-1 y A-1.	Centrífuga, 1 HP, entrada 2", salida 2".
B-2	Bomba para mezcla reactiva (Tanque A-1)	Recircular a la mezcla en A-1 e impulsar hacia F-2.	Sumergible, 1 HP, entrada 2", salida 2".
B-3	Bomba para mezcla reactiva (Tamiz F-2)	Impulsar la mezcla hacia U-3.	Sumergible, 2 HP, entrada 2", salida 2".
B-4	Bomba para recirculación	Recircula la mezcla reactiva desde D-1 hacia U-3 retornando a D-1 para estabilizar la temperatura.	Diafragma, 1 HP, entrada 2", salida 2".
B-5	Bomba para biol	Impulsa el biol desde D-1 hacia U-5 hasta llegar a C-4.	Diafragma, 1 HP, entrada 2", salida 2".
B-6	Bomba agua	Se guardó como bomba de repuesto para el proceso.	Centrífuga, 2 HP
B-7	Bomba agua circuito intercambiador U-3	Impulsa el agua desde el calderín hacia U-3.	Centrífuga, 2 HP, entrada 1", salida 1".
B-8	Bomba para base	Impulsa el hidróxido de sodio hacia la tubería de la mezcla reactiva que sale desde U-3.	Dosificadora, resistente a pH>7.
B-9	Bomba para ácido	Impulsa el ácido acético hacia la tubería de la mezcla reactiva que sale desde U-3.	Dosificadora, resistente a pH<7.
B-10	Bomba agua circuito intercambiador U-5	Impulsa el agua desde el calderín hacia U-5.	Centrífuga, 2 HP, entrada 1", salida 1".

5.5 Operación manual y automática de la planta de digestión anaeróbica en Latinoamericana de Jugos S.A.

La planta funciona en dos modalidades manual y automática. Para ambas modalidades se debe trabajar con el panel de control el cual se presenta en la figura 5.16 con sus respectivos mandos, a la derecha de los botones se encuentra instalada la pantalla touch.

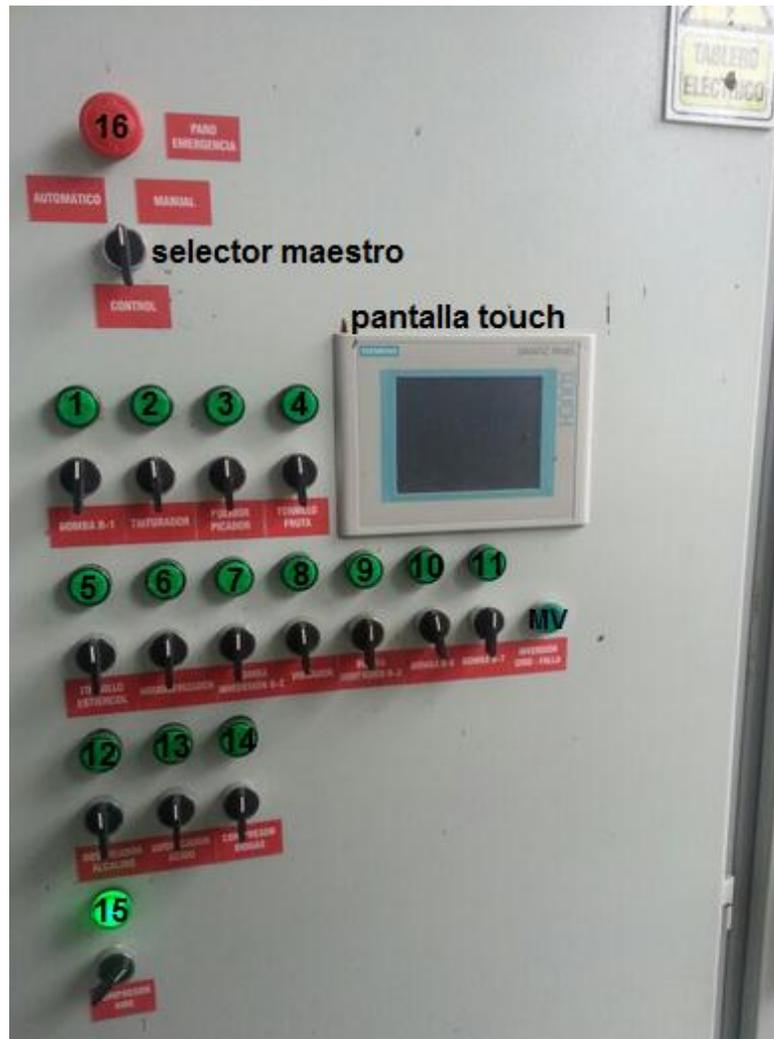


Figura 5.16 Panel de control

Se presenta la tabla 5.20 en la cual se especifica los nombres de cada uno de los botones según el equipo.

Tabla 5.20 Panel de control

Item	Control de equipos
1	Bomba de agua B-1
2	Triturador
3	Pulidor/Picador
4	Tornillo fruta
5	Tornillo estiércol
6	Motor del homogenizador A-1
7	Bomba inmersión homogenizador B-2
8	Motor del Vibrador/Tamiz F-2
9	Bomba inmersión Vibrador/Tamiz B-3
10	Bomba agua caliente B-7
11	Bomba agua caliente B-10
12	Dosificador alcalino
13	Dosificador ácido
14	Compresor biogás
15	Compresor aire
16	Parada de emergencia
MV	Movimiento de giro

5.5.1 Operación manual

Para proceder con la operación manual se deben encender los equipos desde el panel de control. El orden de encendido se presenta en la tabla 5.21.

Tabla 5.21 Encendido manual de los equipos

Orden de encendido	Equipos
1	Colocar en la posición manual el selector de control maestro.
2	Encender bomba de agua B-1
3	Encender Pulidor/Picador
4	Encender Triturador
5	Encender tornillo estiércol
6	Encender tornillo desecho de fruta
7	Encender motor del homogenizador A-1
8	Encender bomba inmersión de homogenizador B-2
9	Encender motor del Vibrador/Tamiz F-2
10	Encender bomba inmersión Vibrador/Tamiz B-3
11	Encender dosificador ácido
12	Encender dosificador alcalino

5.5.2 Operación automática

Para iniciar con la modalidad automática desde el panel de control se ubica el selector de control maestro en la posición de automático. El Programmable Logic Controller o PLC es un dispositivo electrónico que se encarga de automatizar y proteger el funcionamiento adecuado de los diferentes equipos, motores y bombas de la planta de digestión anaeróbica. Esta modalidad automática se utiliza normalmente en la operación de la planta; en caso de hacer modificaciones en el proceso o realizar mantenimiento de equipos, el operario es el encargado de abrir o cerrar manualmente válvulas de mariposa, bola, entre otros. El proceso lógico operacional del funcionamiento automático se divide en tres partes descritas en las tablas 5.22, 5.23 y 5.24.

Tabla 5.22 Proceso lógico programable de la alimentación

Proceso	Automatización
Ingreso de pesos en M-1 y M-2	Verificar que el peso de M-1 y M-2 sea mayor al ingreso programado.
Dosificación	Emprezar dosificación cuando la mezcla de A-1 está en el nivel mínimo. Se enciende el tornillo T-1 y T-2, el motor del triturador, el motor del picador y solenoide de agua.
	La dosificación se para cuando la mezcla de A-1 está en el nivel máximo.
	En caso de trabamiento de T-1 o T-2 se detiene toda la dosificación, se presiona el botón MV para invertir el giro y exista un acomodamiento de la semilla y regresar a su sentido original automáticamente.
Homogenización A-1	El operador debe abrir la válvula de recirculación antes del proceso.
	En el tanque A-1 la bomba B-2 y el agitador están prendidos cuando el nivel está entre el mínimo y máximo programados. La bomba se apaga cuando la mezcla llega al nivel mínimo.
	Cuando el operador visualiza que la mezcla homogénea está lista presiona el botón (homo listo).
Tamizado de la mezcla	El operador abre la válvula de mariposa que permite el paso de la mezcla desde A-1 hacia F-2.
	Cuando el operador presiona el botón (homo listo) en la etapa anterior, el motor de la vibración del tamiz se activa automáticamente.
	La dosificación se para cuando la mezcla de F-2 está en nivel máximo y continúa cuando el nivel de F-2 está en mínimo.
	Al llegar al nivel mínimo se apaga la bomba B-3.
Alimentación del biodigestor	Presionar el botón (mezcla lista) para enviar la mezcla desde F-2 a D-1 y se encienda la bomba B-3. Este proceso se activa siempre y cuando el nivel esté entre el mínimo y máximo fijados.

Tabla 5.23 Proceso lógico programable del sistema de control

Proceso	Automatización
Biodigestor D-1	Se controla la temperatura mediante una RTD por estabilidad.
	Se controla la presión mediante un sensor.
Almacenamiento de biogás a presión atmosférica C-2	Cuando el gasómetro está en el nivel mínimo, se abre EV1 permitiendo el ingreso del biogás en C-2 y se cierran las electroválvulas de salida EV2 y EV3.
	Cuando el gasómetro alcanza el nivel máximo, se cierra la electroválvula de ingreso EV1 y se abre EV2 permitiendo la salida de biogás hacia E-1. Simultáneamente se prende el compresor E-1 hasta llegar nuevamente al nivel mínimo con lo cual E-1 se apaga, se abre EV1 y se cierra EV2.
	Cuando el gasómetro alcanza el máximo - máximo, se abre EV3 que conecta la válvula de alivio y expulsa el biogás hacia el arrasa llama.
Almacenamiento de biogás comprimido C-3	El ingreso de biogás a este tanque se da cuando el sensor marca máximo o cuando el tanque C-2 está lleno, el compresor es encendido automáticamente.

Tabla 5.24 Proceso lógico programable recirculación del proceso

Proceso	Automatización
Intercambiador de calor U-3	Cuando la temperatura del biodigestor es inferior a 35°C, se activa automáticamente la bomba B-7 para impulsar el agua de calentamiento desde K-1 hacia U-3.
	Cuando la temperatura del biodigestor es superior a 42°C, se activa una señal de alarma en el panel de control.
Intercambiador de calor U-5	Cuando la temperatura del biodigestor es inferior a 70°C, se activa automáticamente la bomba B-10 para impulsar el agua de calentamiento desde K-1 hacia U-5.

6. Puesta en marcha de la planta de digestión anaeróbica

6.1 Puesta en marcha en frío de la planta de digestión anaeróbica

La puesta en marcha en frío de la planta de digestión anaeróbica de Latinoamericana de Jugos S.A. se realizó el 15 de noviembre de 2012, con el objetivo de comprobar el correcto funcionamiento de todas las unidades del proceso. A continuación se detalla cada uno de los equipos con sus pruebas realizadas.

6.1.1 Tanque de almacenamiento de estiércol M-1

Para el tanque de almacenamiento de estiércol se activó el tornillo sin fin T-1, mediante el tablero de control y se comprobó que gire con el ángulo y la dirección adecuada para que en la puesta en marcha en caliente pueda transportar el estiércol hacia la siguiente unidad. También se verificó que el tornillo sin fin gire en la dirección contraria pulsando manualmente el botón de MV (movimiento de giro) en el panel de control (PLC); para que el operador lo presione en caso de taponamiento del tornillo sin fin.

Para controlar el material que ingresa al proceso, se instalaron cuatro celdas de carga una en cada pata debajo del equipo M-1, se las encendió tomando en consideración el peso del equipo junto con su respectivo tornillo sin fin. Mediante la pantalla del tablero de control se verificó que estos valores estén encendidos.

6.1.2 Tanque de almacenamiento de fruta M-2

En el tanque de almacenamiento de fruta, se consideraron los mismos parámetros de control que M-1, para asegurar su funcionamiento óptimo para iniciar el proceso. Es decir, se constató que las celdas de cargas enciendan el peso del tanque con el tornillo T-2, y que el tornillo se prenda y gire de forma adecuada.

6.1.3 Picador / triturador F-1

El picador/ triturador se calibró para que se encienda mientras el homogenizador está funcionando. En este equipo se observó que las muelas giren sobre su eje y que estén próximas unas a otras para tener un producto con partículas reducidas. De igual manera, las cuchillas del picador empezaron a rotar sobre su eje vertical. Se hizo

ingresar agua a esta unidad por la tubería de alimentación de agua, para asegurarse que durante la operación de la planta, no salpique líquido hacia afuera del equipo. Sin embargo el agua proveniente de la bomba B-1 comenzó a regarse, y se tuvo que colocar la tubería más cerca al centro de esta unidad.

6.1.4 Tanque de homogenización A-1

Para comprobar la correcta operatividad del tanque de homogenización, se cierra la válvula que permite el flujo hacia la siguiente unidad, permitiendo la recirculación del líquido en A-1. Se llena con agua al equipo proveniente del triturador y una tubería de agua de lavado conectada sobre el equipo. Se observa que esté instalado el sensor de nivel y que marque los niveles máximo y mínimo programados en la pantalla conectada al PLC. El sensor utilizado es de tipo ultrasónico y de marca flowline. Se verifica el funcionamiento del agitador, mediante la activación automática del mismo, cuando el líquido se encuentra entre el nivel mínimo y máximo. También se observa, que haya movimiento del agua en todo el tanque por acción del agitador.

La bomba sumergible B-2 también está prendida dentro de esos rangos de nivel. Posteriormente, para que el operador pueda impulsar el agua hacia la siguiente etapa del proceso, se abrió la válvula que permite el flujo hacia F-2 y se presionó “homo listo” en el panel de control para activar la bomba B-2 y encender la vibración en el tamiz. Cuando el líquido llegó al nivel mínimo, se apagó la bomba B-2 para evitar el succionamiento de aire. En caso de llegar al nivel máximo programado se detiene la dosificación de las unidades previas para impedir derramamiento del material. Los niveles mínimo y máximo programados se encuentran en la tabla 6.1:

Tabla 6.1 Calibración de nivel A-1

Equipo	Nivel máximo [m]	Volumen máximo [m ³]	Nivel mínimo [m]	Volumen mínimo [m ³]
A-1	0.12	2.59	1.22	0.12

La altura máxima fue medida desde el borde superior del tanque hacia abajo, de la misma manera se realizó con la altura mínima. Los volúmenes indicados son el volumen que ocupará el material si llega hasta dicha altura.

6.1.5 Tamiz vibratorio con tanque F-2

Para el tamiz vibratorio con tanque F-2 se abrió la válvula de mariposa manualmente, y se presiona “homo listo” para empezar a llenar esta unidad por acción de la bomba B-2; a la vez se activó automáticamente el motor del tamiz con la finalidad de encender la vibración y facilitar el tamizado del material. En este caso, se usó agua y no hubo inconvenientes con el tamizado.

Cuando se llenó el tanque F-2, el operador presionó el botón “mezcla lista”, para impulsar el líquido hacia la siguiente unidad. Este equipo consta con un sensor de nivel de tipo ultrasónico y de marca flowline, se registró los niveles mínimo y máximo del tanque. En caso de llegar al nivel máximo, se encenderá automáticamente la bomba B-3, para transportar la mezcla, y detener la dosificación. Cuando el líquido llegó al nivel mínimo se apagó la bomba sumergible B-3 para evitar que se dañe por succión de aire. El nivel máximo y mínimo programado se detalla a continuación:

Tabla 6.2 Calibración de nivel F-2

Equipo	Nivel máximo [m]	Volumen máximo [m³]	Nivel mínimo [m]	Volumen mínimo [m³]
F-2	0.19	1.82	1.3	0.08

La altura máxima y mínima fue medida desde el borde superior del tanque hacia abajo. Los volúmenes indicados son el volumen que ocupará el material si llega hasta dicha altura.

6.1.6 Biodigestor D-1

En el biodigestor se controlan diferentes parámetros para que el proceso de digestión anaerobia suceda con normalidad. Se hizo ingresar agua desde el tamiz vibratorio F-2 para realizar la puesta en marcha en frío de este equipo.

Para controlar que la temperatura dentro del biodigestor se mantenga entre 35 y 42°C, se verificó la instalación de una RTD (dispositivo termo resistivo) por estabilidad de tipo PT 100, la cual estaba colocada en la mitad del equipo. A lo que ingresó el agua desde la unidad anterior, se detectó la temperatura mediante este transmisor TT y pasó una señal hacia el controlador indicador de temperatura TIC. Cuando el líquido

contenido en D-1 tiene un valor inferior a los 35°C, se activa el circuito de agua caliente, mientras que si supera los 42°C, el PLC proporcionará una señal de alarma. En este caso, en la pantalla del PLC se observó que la temperatura del agua de D-1 estaba a 17°C; por lo que se activó el caldero K-1 para que utilice agua potable como fuente de calentamiento, y transmita la temperatura por transferencia de calor en el intercambiador U-3. Sin embargo, no se llegó a alcanzar los 35°C en el agua proveniente del biodigestor, porque hubo pérdidas de calor por falta de aislamiento térmico en la tubería de agua caliente y en el equipo U-3. El agua retornó a D-1 mediante el anillo perimetral ubicado alrededor del digestor.

Para estabilizar el pH en el proceso, se verificó la instalación de las bombas dosificadoras de material alcalino (bomba B-8) o ácido (bomba B-9). Si el pH desciende de 6.5 empieza a dosificar la bomba B-8 que contiene hidróxido de sodio, y si supera el límite de 7.5, se encenderá la bomba B-9 entregando ácido cítrico o acético. Debido a que para la puesta en marcha en frío se utilizó agua, el pH fue neutro y no se activó ninguna de las bombas dosificadoras.

Se instaló un sensor ultrasónico de marca flowline y se programó el nivel mínimo y máximo en el biodigestor, para tener a la mezcla dentro de los límites permisibles del equipo. Cuando la mezcla llegó al nivel mínimo se activará automáticamente la bomba B-3, asimismo cuando alcance el nivel máximo la bomba dejará de alimentar al equipo. Los niveles programados se presentan en la tabla 6.3.

Tabla 6.3 Calibración de nivel D-1

Equipo	Nivel máximo [m]	Volumen máximo [m ³]	Nivel mínimo [m]	Volumen mínimo [m ³]
D-1	0.08	29.77	2.88	13.74

La altura máxima y mínima fueron medidas desde el borde superior del tanque hacia abajo. Los volúmenes indicados son el volumen que ocupará el material si llega hasta dicha altura. El volumen mínimo se consideró de acuerdo a la salida lateral de mezcla reactiva.

El proceso de digestión anaeróbica trabaja a presión atmosférica, sin embargo se instaló una válvula de seguridad en la parte superior del equipo para que en caso de que

exista un taponamiento de tuberías y se genere una sobrepresión en el biodigestor se libere el biogás hacia la llama piloto. En la puesta en marcha en frío se hizo ingresar agua al equipo, por lo que no hubo un aumento de presión en D-1 y se lo constató mediante el manómetro instalado en el equipo, que marcaba 15 psi.

Finalmente, se verificó que D-1 se encuentren en óptimas condiciones para su operatividad. Entre los criterios que se consideraron fueron que exista la ducha antiespumante en la parte superior del equipo, para que actúe en caso de generación de espuma; también se chequearon todas las tuberías que conectan a este equipo, que estén correctamente instaladas según el diseño del proceso.

6.1.7 Intercambiador de calor tubo en carcasa U-3

El objetivo de esta unidad, es calentar a la mezcla que se encuentra en el equipo D-1 mediante el concepto de transferencia de calor, usando agua como fuente de calentamiento, la cual alcanza altas temperaturas por acción del calefón y el calderín, y es impulsada hasta este equipo por medio de la bomba B-7. Para comprobar la efectividad del equipo U-3 se realizaron pruebas de calentamiento de agua. El objetivo del experimento es evidenciar que el agua alcanza temperaturas elevadas, para poder transferir posteriormente a la mezcla. Se tomó muestras cada hora a la salida de la unidad en un transcurso de cuatro horas, con el uso de un termómetro análogo. Los resultados obtenidos se presentan en la figura 6.1.

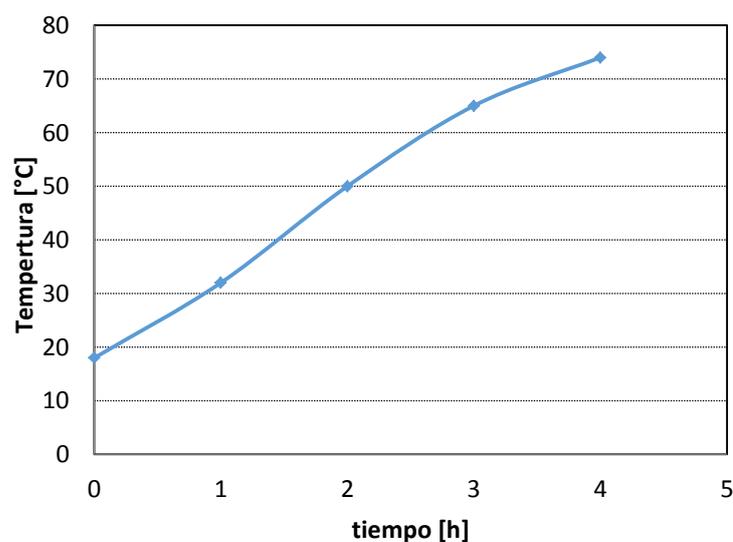


Figura 6.1 Pruebas de calentamiento en intercambiadores de calor

En esta figura se observa que la temperatura dentro de U-3 iba incrementando gradualmente cada hora. Se logró alcanzar la temperatura de 35°C para el agua en un intervalo de una hora a la salida del intercambiador de calor. Se detuvo el experimento cuando se llegó a los 74°C.

6.1.8 Estabilizador de biol U-5

Previo a que el biol sea almacenado en el tanque C-4 para su distribución, es necesario transportarlo con ayuda de la bomba B-5, desde el biodigestor hacia el intercambiador de calor U-5, para que alcance una temperatura de 70°C y reduzca la cantidad de microorganismos patógenos. En el equipo U-5 se utilizó agua como fuente de calor, la cual era calentada con el calefón y el calderín K-1, y llegaba a este equipo por acción de la bomba B-10. La finalidad de la prueba, es verificar que el agua alcance temperaturas elevadas, para que posteriormente en la puesta en marcha en caliente, exista una buena transferencia de calor con la mezcla.

El experimento se realizó en un transcurso de 4 horas y se registró la temperatura cada hora a la salida del intercambiador de calor con la ayuda de un termómetro análogo. La figura 6.1 mostrada en la sección 6.1.7 es el resultado obtenido para este experimento. Se puede observar que se alcanza una temperatura de 74°C en el transcurso de 4 horas, instante en el cual se detuvo el experimento.

6.1.9 Tanque de almacenamiento de biogás C-2

El biogás sale del biodigestor y se dirige hacia los filtros G-1 y G-2. Posteriormente, se almacena al biogás purificado a presión atmosférica dentro del equipo C-2, mediante el uso de una membrana o gasómetro de PVC. Se realizó pruebas de volumen en esta unidad, también se comprobó el montaje de los sensores de nivel y de las electroválvulas.

Se verificó la instalación de los tres sensores ópticos de nivel de marca Telemecanique y de las tres electroválvulas. Para determinar la distancia a la que se van a colocar los sensores se consideró los siguientes parámetros: para el sensor de nivel mínimo, se observó la altura a la cual el gasómetro estaba replegado y se instaló 10 cm más arriba de dicha altura siendo su valor de 0.80m. Para el sensor máximo, se lo ubicó a 2.80m con la finalidad de que el gasómetro se encuentre a un 70% de su capacidad

total; y para el máximo – máximo se fijó a 3.50m de altura, teniendo un máximo de llenado de 90 % de la membrana.

Se utilizaron tres electroválvulas para que su activación sea programada en conjunto con los sensores de nivel. La primera electroválvula se ubicó a la entrada del equipo C-2, la segunda a la salida de C-2 hacia el compresor E-1 y la tercera a la salida de C-2 hacia la llama piloto. La automatización del proceso consiste que cuando el gasómetro está vacío y no es detectado por el nivel mínimo, se abre la electroválvula ubicada al ingreso de C-2 y se cierran las demás, para permitir el ingreso de biogás. A lo que llega al nivel máximo se cierra la primera electroválvula EV1, y se abre EV2 que permite el paso hacia el compresor E-1. Simultáneamente se prende el compresor E-1 hasta alcanzar nuevamente el nivel mínimo con lo cual E-1 se apaga, se abre EV1 y EV2 se cierra. Finalmente, en caso de existir una sobrepresión, se abre la tercera electroválvula EV3 para liberar el biogás hacia la llama piloto. Es necesario recalcar que para la puesta en marcha en frío, no se evidenció el funcionamiento de esta parte del proceso; solamente se verificó la instalación de las mismas con su respectiva programación.

En la prueba de volumen, se trató de confirmar el volumen del gasómetro proporcionado por el fabricante que es de 10m^3 . Se hizo ingresar aire a esta unidad desde los filtros mediante un compresor, la membrana empezó a llenarse, y se contabilizó la cantidad de aire que ingresaba mediante el contador de gas, pero al sobrepasar la capacidad máxima se detuvo la prueba, debido a que se corría el riesgo que la misma llegara a explotar por una sobrepresión. Al abrir la unidad C-2 desde el manhole superior, se observó que la membrana no se llenó según la forma vertical del equipo, por lo que no llegó al nivel máximo, además se supuso la existencia de fugas, debido a que superó su capacidad permisible. Al día siguiente, la membrana se encontró vacía por lo que se comprobó lo anteriormente mencionado. El contador de gas utilizado se lo puede observar en la figura 6.2.



Figura 6.2 Contador de gas

6.1.10 Compresor E-1

Se comprobó el funcionamiento del compresor, mediante la activación desde el PLC, para encender al equipo y abrir la electroválvula que permite el paso desde C-2 hacia E-1 con el fin de enviar aire hacia la unidad C-3.

6.1.11 Tanque de almacenamiento de biogás comprimido C-3

Este equipo fue diseñado para soportar hasta una presión de 110 psi; en caso de que exista una sobrepresión se activará la válvula de alivio para liberar al biogás hacia la llama piloto. Por esta razón se verificó que exista la conexión de la válvula de seguridad con el arrasa llama.

En el tanque de almacenamiento de biogás comprimido, se hizo ingresar aire desde el compresor E-1 hasta alcanzar una presión de 44 psi detectada con el manómetro análogo del equipo. Al día siguiente, se verificó que el equipo se encuentre con la misma presión. Sin embargo, esta había descendido por presencia de fugas. En la puesta en marcha en caliente, se corrigieron estas fugas. En la figura 6.3 se muestra una imagen del manómetro, marcando la presión anteriormente mencionada:



Figura 6.3 Manómetro del tanque C-3

6.1.12 Línea de biogás

Para la puesta en marcha en frío de la línea de biogás se constató que estén instaladas las válvulas de seguridad, para que el biogás se dirija hacia la llama piloto en caso de existir una sobrepresión en los equipos D-1, C-2 y C-3 que son unidades en las que se encontrará almacenamiento de biogás. Las válvulas fueron ubicadas en la parte superior de los equipos, y se conecta con la llama piloto mediante tuberías.

6.1.13 Tanque de almacenamiento de biol C-4

Después de que el biol pase por el intercambiador de calor U-5, se dirigirá hacia el tanque de almacenamiento de biol C-4, para posteriormente distribuirlo a los agricultores aledaños.

En el tanque de almacenamiento de biol se dispondrá de un sensor de nivel de tipo ultrasónico de marca flowline. En la puesta en marcha en frío se programó los niveles mínimos y máximos del tanque, con la finalidad de conocer el nivel del líquido en el interior y evitar derramamientos o en su defecto que este vacío el equipo. Los niveles programados se presentan en la tabla 6.4.

Tabla 6.4 Calibración de nivel C-4

Equipo	Nivel máximo [m]	Volumen máximo [m ³]	Nivel mínimo [m]	Volumen mínimo [m ³]
D-1	0.10	6.68	2.50	0.53

La altura máxima y mínima fue medida desde el borde superior del tanque hacia abajo. Los volúmenes indicados son el volumen que ocupará el material si llega hasta dicha altura.

6.1.14 Bomba de agua para el proceso B-1

La bomba B-1 fue instalada junto a los tanques de almacenamiento de agua de lavado C-1, y es la encargada de impulsar esta materia prima hacia los equipos F-1 y A-1 para comenzar el proceso. Se comprobó su funcionamiento mediante la activación de la bomba desde el panel de control y observando su correcto trabajo.

6.1.15 Bomba sumergible B-2

Este equipo se ubicó dentro del tanque A-1 para bombear la alimentación. Su operatividad fue verificada mediante la recirculación del agua en la misma unidad, y el traslado del líquido desde A-1 hacia F-2.

6.1.16 Bomba sumergible B-3

Para probar el funcionamiento de la bomba B-3 colocada en el equipo F-2, se llenó esta unidad con agua, y se encendió a la bomba, la misma que empezó a succionar el líquido y enviarlo hacia el digestor D-1.

6.1.17 Bomba de diafragma B-4

Se llenó con agua al equipo D-1 hasta la mitad de su capacidad y se encendió a la bomba B-4, la misma que bombeó el líquido hacia el intercambiador de calor U-3.

Debido a que esta equipo generaba mucha vibración y ruido, se instaló una junta de expansión de caucho en la tubería de succión y descarga de esta unidad con la finalidad de que absorba el movimiento causado por la misma. En la figura 6.4 se muestra una imagen de la bomba con la junta de expansión de caucho en la tubería.



Figura 6.4 Bomba B-4 con su sistema de amortiguamiento

6.1.18 Bomba de diafragma B-5

Para confirmar el funcionamiento de la bomba B-5, se llenó al tanque D-1 hasta la mitad de su capacidad y se prendió la bomba; el líquido fue transportado desde D-1 a través de U-5 hacia C-4.

Se observó que en cada succión de la bomba, se generaba mucho ruido y vibración. Por este motivo, se instaló una junta de expansión de caucho a la entrada y salida del equipo B-5 al igual que en la bomba B-4, para que absorba el movimiento causado por la vibración mecánica de la misma.

6.1.19 Bomba B-6

Debido a que la bomba B-6 se dejó como repuesto para la fábrica, no se pudo realizar pruebas de funcionamiento. Simplemente se verificó que el equipo quede en el kit de repuestos dejado por Inoxking.

6.1.20 Bomba agua caliente B-7

Para encender a la bomba B-7, se hizo ingresar agua potable al calderín y se lo traspasó hacia el tanque T-01. Una vez llenó el equipo, se prendió a la bomba para que recircule el líquido a través del intercambiador de calor U-3.

6.1.21 Bomba dosificadora alcalina B-8

Para encender a la bomba B-8, se llenó con agua al tanque de hidróxido de sodio. Sin embargo, se observó que el equipo no funcionaba, debido a que la dosificación era casi nula. Se decidió llamar a los proveedores por dicha falla.

6.1.22 Bomba dosificadora ácida B-9

Se encendió a la bomba dosificadora B-9 cuando el tanque de la solución ácida estaba lleno con agua. Al momento de la descarga del líquido, se observó que la bomba no operaba de la manera adecuada, puesto que no dosificaba. Se decidió llamar a los proveedores por dicha falla.

6.1.23 Bomba agua caliente B-10

Se comprobó el funcionamiento de la bomba B-10, al encenderla y succionar el agua potable almacenada en el tanque T-01, y recircularlo por el intercambiador de calor U-5 teniendo los resultados deseados.

6.2 Puesta en marcha en caliente de la planta de la planta de digestión anaeróbica

La puesta en marcha en caliente de la planta de digestión anaeróbica de Latinoamericana de Jugos S.A. se realizó el 29 de noviembre de 2012, con el objetivo de comprobar la correcta operatividad de la planta con el uso de las materias primas del proceso. A continuación se detalla cada uno de los equipos con sus pruebas realizadas.

6.2.1 Tanque de almacenamiento de estiércol M-1

El tanque M-1 se llenó con estiércol bovino y se encendió el tornillo sin fin T-1. El estiércol fue transportado desde M-1 hacia F-1. La prueba fue realizada con éxito, debido a que no hubo ningún problema en su ejecución.

6.2.2 Tanque de almacenamiento de fruta M-2

El tanque M-2 se llenó con el desecho del proceso de la industrialización de pulpa de fruta, como semillas y cáscaras de naranjilla, mango, piña y maracuyá. Se encendió al tornillo sin fin T-2 desde el panel de control, empezando a trasladar la fruta hacia el picador / triturador F-1. Con los residuos de maracuyá, piña y naranjilla el proceso se realizó sin percance alguno, mientras que para las semillas de mango hubo un taponamiento del tornillo. Se solucionó presionando el botón de movimiento de giro invertido “MV” en el panel de control, para que el tornillo gire en dirección opuesta y exista un acomodamiento de la semilla y poder continuar eficientemente el proceso.

6.2.3 Picador /Triturador F-1

Se hizo ingresar las materias primas estiércol y fruta desde los tornillos sin fin T-1 y T-2, respectivamente, hacia la tolva, junto con el agua de lavado proveniente de la bomba B-1. Al iniciar el proceso, se observó que algunas partículas pasaban directamente al homogenizador sin haber reducido su tamaño, debido a que algunos desechos sólidos al momento de ser triturados, por acción física salpicaban hacia las paredes laterales del equipo, deslizándose sin ser triturados ni picados, cayendo por gravedad al siguiente módulo. Al obtener todo el producto en el tanque A-1, se percató que el tamaño obtenido por partícula debido a la unidad de picado y triturado, no era lo suficientemente pequeña para el proceso. Por estas razones, se tomaron medidas correctivas para solucionar los problemas de traspaso de los desechos sin reducir el tamaño de partícula.

Para evitar que el material se deslice por las paredes laterales, se juntaron 1.5 cm las placas hacia las muelas, sin dejar separación significativa entre las mismas. También, se aminoró la distancia entre muela y muela para obtener un mejor triturado; y se ajustó la inclinación de las aspas, debido a que se encontraban muy perpendiculares al eje.

En dos ocasiones se tuvieron problemas con el picador/ triturador debido al ingreso de materiales no deseados en el proceso de digestión anaerobia como tornillos y tuercas, lo cual ocasionó un bloqueo en el equipo lo que conllevó a que se active la alarma en el PLC. Se requirió desmontar el equipo para encontrar el problema. Por esta razón se decidió instalar un visor en la unidad que permite detectar problemas de una manera más rápida.

6.2.4 Tanque de homogenización A-1

La materia prima para este proceso, viene desde el triturador y desde la tubería de agua de lavado ubicada sobre el tanque. Se cierra la válvula que permite el flujo de la alimentación hacia el equipo F-2 para permitir la recirculación de la mezcla en A-1. Se comprobó que la bomba B-2 sea capaz de impulsar al material hacia la tubería de recirculación para que la misma caiga sobre la parte superior del equipo y ayude a la homogenización. Se llena el tanque hasta un 60 % de su capacidad, y se verifica que el medidor de nivel marque la altura a la que se encuentra la mezcla.

Se verificó que la automatización del proceso opere con estabilidad. Es decir, que el agitador y la bomba B-2 estén funcionando dentro de los niveles mínimos y máximos definidos. Al estar prendido el agitador simultáneamente con la recirculación, se obtuvo muy buenos resultados en cuanto a tener una mezcla homogénea.

Una vez que la mezcla estuvo lista se abrió la válvula que permite el flujo hacia la siguiente unidad y se presionó el botón “homo listo” en el PLC, el cual es el encargado de mantener prendida a la bomba B-2 y arrancar la vibración en el tamiz F-2. Cuando se alcanzó al nivel mínimo en el tanque A-1 se apagó automáticamente la bomba B-2 para evitar daños por succión de aire.

6.2.5 Tamiz vibratorio con tanque F-2

Cuando la mezcla homogenizada estuvo lista en A-1, se abrió la válvula de mariposa y se presionó el botón “homo listo” en el PLC, con la finalidad de encender la vibración en el tamiz y que continúe funcionando la bomba B-2. El material ingresó a esta etapa del proceso mediante una tubería de dosificación que se divide en siete compartimientos para poder esparcirlo en toda la malla. Para facilitar el tamizado fue

necesario ingresar un pequeño caudal de agua, el cual proviene desde la tubería de agua potable, ubicada por encima de la entrada de la mezcla homogenizada en F-2. No se considera sustancialmente importante la proporción de agua que entra en esta parte del proceso con respecto a la que viene desde B-1. El material retenido por la malla, fue recolectado mecánicamente en un recipiente anexo al tamiz, debido a la vibración proporcionada en F-2 y a la inclinación de la malla.

Las observaciones durante las pruebas del equipo consistieron en cambiar el tamaño de la malla y del recipiente de desechos. Se observó que los orificios de la malla con una dimensión de 2x2 mm eran muy pequeños, y quedaba la alimentación atrapada en la malla. Posteriormente, se colocó una malla de 20x20 mm permitiendo un óptimo tamizado de la mezcla. También se notó que los desechos retenidos en la malla salpicaban en el trayecto de salida de F-2 hasta el tanque recolector. Por lo tanto, se decidió colocar un tubo a lo largo de este recorrido.

Se observó que el sensor de nivel de tipo ultrasónico y marca flowline, marque el nivel de la mezcla dentro del tanque F-2. Cuando la mezcla estuvo totalmente tamizada, el operador presionó el botón “mezcla lista”, para impulsar el líquido hacia la siguiente etapa. En caso de llegar al nivel máximo, se encenderá automáticamente la bomba B-3, para transportar la mezcla, y detener la dosificación de A-1. Cuando el líquido llegó al nivel mínimo se apagó la bomba sumergible B-3 para evitar que se dañe por succión de aire.

6.2.6 Biodigestor D-1

Para realizar la puesta en marcha en caliente de D-1 se realizaron dos tipos de pruebas. La primera consistió en ingresar aire al equipo con la ayuda de un compresor, mientras que en la segunda se procedió a alimentar al biodigestor con estiércol, fruta y agua proveniente de los procesos anteriores.

6.2.6.1 Pruebas con aire

Con respecto al primer experimento, se hizo ingresar aire a D-1 con la ayuda de un compresor, y se realizó la prueba de presión. A medida que iba aumentando la presión en la unidad, éste se comenzó a deformar, y se tuvo que detener la prueba. El

proceso anaerobio trabaja a presión atmosférica, sin embargo se tomó dos medidas preventivas para evitar que existan accidentes en este equipo por taponamiento de tuberías causando una sobrepresión en el mismo. La primera radica en aumentar el diámetro de la tubería de salida de biogás de $\frac{1}{4}$ in a $\frac{1}{2}$ in hacia las siguientes unidades para ayudar que el biogás fluya con mayor facilidad, y la segunda consistió en construir un nuevo biodigestor diseñado para que soporte mayores presiones internas. El nuevo biodigestor tolerará presiones de hasta 75psi, medida en la cual se activará la válvula de seguridad. Las características que se modificaron en el nuevo biodigestor fueron: cambio del espesor de la lámina de acero inoxidable de 3mm a 3.5mm de las paredes del digestor, incremento del espesor de las tapas de 3mm a 4mm, y cambio del diseño de tapas planas en D-1 por tapas semiesféricas. El resto de experimentos, se realizaron con respecto al nuevo biodigestor.

En este proceso es importante mantener las condiciones anaeróbicas, por esta razón se realizaron pruebas de hermeticidad en el biodigestor. Se cerró herméticamente al equipo y se hizo ingresar aire al tanque alcanzando una presión de 35 psi medida por el manómetro análogo. Utilizando agua con jabón se roció alrededor de esta unidad y se encontraron tres fugas alrededor del anillo perimetral y fugas en cada manhole. Debido a las fugas existentes hubo una caída de presión muy rápida en el transcurso de una hora. En la figura 6.5 se muestra una imagen con una fuga del anillo y del manhole.



Figura 6.5 Fuga alrededor del anillo perimetral

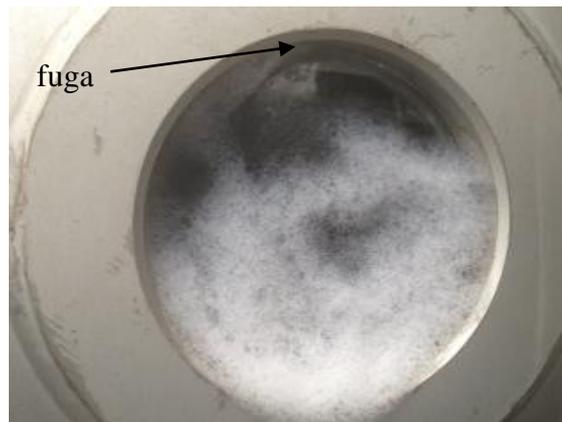


Figura 6.6 Fuga en el manhole del biodigestor

Las fugas del anillo perimetral se corrigieron con el uso de teflón y para las del manhole se retiró el vidrio y se soldaron placas de acero inoxidable. Una vez corregidos los problemas de hermeticidad se realizó nuevamente las pruebas indicadas anteriormente, y se encontró en condiciones óptimas el equipo sin caída de presión.

6.2.6.2 Pruebas con fruta, estiércol y agua

La mezcla ingresó desde F-2 hacia D-1 a temperatura ambiente, la cual se midió mediante la RTD por estabilidad de tipo PT 100, y se leyó mediante el controlador indicador de temperatura ubicado en la pantalla touch. Debido a que la temperatura de la mezcla no estaba dentro de los rangos permisibles, se activó el circuito de agua caliente, y se prendió simultáneamente la bomba B-4 para impulsarla hacia U-3. Posteriormente, retornó la alimentación hacia D-1, mediante las 6 entradas que contiene el anillo perimetral de D-1. Sin embargo, no se logró alcanzar la temperatura deseada para la operación, debido a que había pérdidas de calor por la falta de aislamiento térmico en las tuberías del circuito de agua caliente y en el intercambiador de calor U-3.

El pH en el proceso debe mantenerse, entre los rangos 6.5 y 7.5, para lo cual se utilizaron a las bombas dosificadoras ácida y básica en caso de ascenso y descenso de pH, respectivamente. Cuando ingresó la mezcla, se midió el pH con la ayuda de un medidor de pH. La mezcla se encontraba con un pH ácido. Sin embargo, se tuvo problemas con la bomba dosificadora B-8, y se tomó como solución alimentar cal directamente en el equipo A-1 para regular el pH.

Con respecto a la prueba de nivel, se verificó el funcionamiento del sensor y controlador- indicador de nivel, mediante la detección de la altura a la que se encontraba la mezcla. La misma se podía visualizar en la pantalla touch.

6.2.7 Intercambiador de calor tubo en carcasa U-3

Según el experimento realizado durante la puesta en marcha en frío, el agua de calentamiento alcanza temperaturas elevadas con el transcurso de las horas. Sin embargo, al hacer ingresar la alimentación, no se logró regular la temperatura para que se mantenga en 35°C en el biodigestor, debido a que no hubo suficiente transferencia de calor y hubo pérdidas por falta de aislamiento térmico. Posteriormente, el circuito de agua caliente fue recubierto por aislamiento, para conservar la temperatura. Sin embargo, no se logró llegar a dicha temperatura.

6.2.8 Estabilizador biol U-5

En la puesta en marcha en frío de este equipo, se observa que la fuente de calentamiento de agua, sí alcanza temperaturas elevadas. Pero al ingresar la mezcla reactiva a U-5 junto con la fuente de calentamiento, no se logró llegar a los 70°C necesarios para el proceso de estabilización. Debido al largo tiempo que requiere el intercambiador para alcanzar temperaturas elevadas, la falta de aislamiento térmico y la deficiencia en la transferencia de calor. Después del experimento, se decidió colocar aislamiento térmico en esta unidad. Sin embargo, no se consiguió llegar a dicha temperatura.

6.2.9 Tanque de almacenamiento de biogás C-2

Para realizar estos experimentos, se hizo ingresar aire desde el biodigestor, el mismo que fue transportado por la línea de gas hacia los filtros y posteriormente hacia el gasómetro. Se contabilizó la cantidad de aire que ingresó al equipo, mediante el contador de gas. Los experimentos que se realizaron fueron: funcionamiento de sensores de nivel simultáneamente con electroválvulas, pruebas de llenado y vaciado para evidenciar hermeticidad en el equipo.

Para comprobar la automatización de los sensores ópticos de nivel junto con las electroválvulas se procedió de la siguiente manera: al encontrarse la membrana desinflada el sensor de nivel mínimo no detectó ninguna señal, por lo que dio apertura a la primera electroválvula EV1 que permite el ingreso de biogás hacia el equipo, además permanecieron cerradas las otras electroválvulas EV2 y EV3 evitando que escape el biogás almacenado hacia las otras unidades. La membrana continuó inflándose con normalidad, pero al observar en el contador de gas que la capacidad de almacenamiento había superado los 10m³ (cifra proporcionada por el fabricante) se observó desde el manhole que la membrana se había atorado debido a que no subió verticalmente según el cuerpo cilíndrico del equipo que la contenía y no pudo ser detectada por los sensores máximo y máximo-máximo. Para realizar las pruebas de puesta en marcha en caliente hacia C-3 se lo realizó manualmente, para poder liberar el aire dentro de C-2.

Después de liberar el aire hacia C-3, se procedió a llenar nuevamente el gasómetro con el objetivo de constatar la presencia de fugas, conociendo que la misma había sobrepasado los límites permisibles de capacidad. Se la dejó llena por un periodo de 24 horas. Transcurriendo este tiempo se verificó que la membrana constaba con fugas de aire puesto que se encontraba vacía. Se sacó a la misma de C-2 para corregir dichas fugas. Se realizó el mismo procedimiento varias veces. Sin embargo, no se logró tener una membrana totalmente hermética. Una solución planteada por Inoxking fue cambiar de material de la membrana de PVC a Nylon, pero con la segunda membrana tampoco se obtuvieron resultados favorables por la misma causa.

6.2.10 Compresor E-1

Se comprobó el funcionamiento del compresor, mediante la activación desde la pantalla touch, para encender al equipo y abrir la electroválvula que permite el paso desde C-2 hacia E-1 con el fin de enviar el aire hacia la unidad C-3.

6.2.11 Tanque de almacenamiento de biogás comprimido C-3

En el tanque de almacenamiento de biogás comprimido, se realizaron pruebas de hermeticidad mediante el criterio de llenado y vaciado del equipo, lo cual consiste en llenar al equipo hasta cierta presión y observar que no existan caídas de presión en el

transcurso del tiempo. Esto se realizó con la finalidad que cuando ingrese biogás no exista escape del mismo.

Se hizo ingresar aire desde el compresor, hasta alcanzar una presión de 44 psi, detectada con el manómetro de C-3. Al día siguiente, se observó que la presión en el equipo, había descendido, lo que indicó la existencia de fugas en la unidad. Para corregir estas fugas, se soldó la tubería de entrada y salida de la bala. Posteriormente, se procedió a realizar nuevamente la prueba de hermeticidad y se dejó en 35 psi; en esta ocasión, se mantuvo en la misma presión pasada las 24 horas, lo que implica que el equipo se encuentra listo para el arranque de la planta. Se debe mencionar que la válvula de seguridad fue calibrada a 110 psi, es decir si existen presiones mayores se enviará el biogás hacia la llama piloto.

6.2.12 Línea de biogás

Es muy importante que la línea de biogás se encuentre hermética. Para comprobarlo se hizo ingresar aire desde el biodigestor D-1 hacia los filtros G-1 y G-2. En este tramo, se encontró la existencia de fugas a la entrada de los filtros. En la figura 6.7 se observa una imagen de las fugas:



Figura 6.7 Fuga en la tapa del filtro

Para corregir las fugas, se procedió a poner sellante y teflón en las juntas, obteniendo resultados favorables. Posteriormente, en el trayecto de G-1 y G-2 hacia C-2, no se encontraron fugas. Finalmente, desde C-2 hacia C-3, hubo problemas de hermeticidad a la entrada y salida de la bala, las cuales fueron corregidas mediante soldadas.

En todo el proceso de digestión anaerobia existen tres válvulas de seguridad, dispuesta en el biodigestor, en el tanque de almacenamiento de biogás a presión atmosférica y en el tanque de almacenamiento de biogás comprimido. Las que están ubicadas en D-1 y C-3 son válvulas de alivio mecánicas, las cuales fueron calibradas para que se activen si la presión interna de los equipos supera los 75 y 110 psi, respectivamente. Mientras que la válvula de C-2 tiene un funcionamiento electrónico el cual fue programado para que se active cuando la membrana llegué al sensor máximo-máximo.

6.2.13 Tanque de almacenamiento de biol C-4

La fruta, el estiércol y el agua almacenados en D-1, se hizo pasar hacia U-5, hasta llegar a C-4. Con el propósito de comprobar el funcionamiento del sensor de nivel instalado en el equipo. Cuando la mezcla ingresó a esta unidad, el sensor ultrasónico de marca flowline, detectó dicha altura, y se leyó en la pantalla touch.

6.2.14 Bomba de agua para el proceso B-1

Para comprobar el funcionamiento de la bomba B-1, se llenó los tanques de almacenamiento de agua de lavado de frutas C-1 con agua, y se le activó a la bomba. La misma comenzó a succionar y a enviar el agua hacia la trituradora. Se realizó pruebas de caudales, para conocer el caudal máximo que entrega la bomba B-1. Los resultados obtenidos se presentan en la tabla 6.5.

Tabla 6.5 Calibración bomba B-1

Equipo	Caudal máximo	Unidades
B-1	0.11	m ³ /min

El agua obtenida desde este tanque, no solamente se dirige hacia el triturador, también va a ser transportada hacia el tanque homogenizador A-1. Para conocer la relación de agua que ingresa hacia A-1 con respecto a F-1, se realizó las pruebas de caudal, obteniendo los siguientes resultados presentados en la tabla 6.6.

Tabla 6.6 Calibración válvula de alimentación de agua en A-1

Equipo	Caudal máximo	Unidades
Válvula de agua A-1	0.04	m ³ /min

La cantidad de agua que ingresa desde B-1 se dirige el 36% hacia A-1 y el 64% hacia F-1.

6.2.15 Bomba sumergible B-2

Como su nombre lo indica, esta bomba está sumergida en el líquido a bombear. Para realizar las pruebas de caudal, se llenó con agua al tanque A-1 y se abrió la válvula de mariposa, la cual tiene nueve niveles de apertura, para regular el caudal de descarga. En la figura 6.8 se muestra a la válvula de mariposa.



Figura 6.8 Válvula de mariposa a la salida del tanque homogenizador A-1

Los resultados obtenidos se presentan en la tabla 6.7.

Tabla 6.7 Calibración bomba B-2

Equipo	# de Apertura	Caudal máximo	Unidades
B-2	1	No aplica	
	2	No aplica	
	3	0.10	m ³ /min
	4	0.26	m ³ /min
	5	0.35	m ³ /min
	6	0.39	m ³ /min
	7	0.43	m ³ /min
	8	0.47	m ³ /min
	9	0.54	m ³ /min

Las aperturas van numeradas del 1 al 9, siendo la medida 9 la de mayor descarga de agua. Las dos primeras medidas de la tabla, no se tomaron en cuenta debido a que el caudal era muy pequeño y se le consideró depreciable para el caso.

6.2.16 Bomba sumergible B-3

Una vez comprobado el funcionamiento del equipo, mediante el encendido de la bomba, se realizó pruebas del caudal máximo de entrega del equipo, y se obtuvieron los resultados presentados en la tabla 6.8.

Tabla 6.8 Calibración bomba B-3

Equipo	Caudal máximo	Unidades
B-3	0.29	m ³ /min

6.2.17 Bomba de diafragma B-4

Previo al encendido de la bomba, se llenó el biodigestor hasta la mitad de su capacidad, para poder succionarlo mediante esta unidad y enviarlo hacia el intercambiador U-3. Para determinar el caudal máximo de B-4, se tomó muestras a la salida de U-3, con los siguientes resultados, los cuales se detallan en la tabla 6.9.

Tabla 6.9 Calibración bomba B-4

Equipo	Caudal máximo	Unidades
B-4	1.66	m ³ /min

6.2.18 Bomba diafragma B-5

El biodigestor fue llenado hasta la mitad de su capacidad, se activó la bomba B-5 para impulsar el líquido desde D-1 hasta U-5. Para determinar el caudal de descarga máximo de esta unidad, se abrió la válvula de mariposa ubicada a la entrada de U-5 y se midió en cada uno de sus niveles de apertura. La válvula utilizada fue similar a la indicada en la sección 6.2.15. Los resultados se presentan en la tabla 6.10.

Tabla 6.10 Calibración bomba B-5

Equipo	# de Apertura	Caudal máximo	Unidades
B-5	1	No aplica	
	2	No aplica	
	3	No aplica	
	4	1.42	m ³ /min
	5	1.47	m ³ /min
	6	1.55	m ³ /min
	7	1.60	m ³ /min
	8	1.67	m ³ /min
	9	1.71	m ³ /min

Las aperturas van numeradas del 1 al 9, siendo 1 la de menor caudal y la 9 la de mayor caudal. Las tres primeras medidas de la tabla, no se tomaron en cuenta debido a que la dosificación de agua era muy pequeña y se le consideró depreciable para el caso.

6.2.19 Bomba B-6

Debido a que la bomba B-6 se dejó como repuesto para la fábrica, no se pudo realizar pruebas de funcionamiento ni de caudal en la unidad. Simplemente se verificó que el equipo quede en el kit de repuestos dejado por Inoxking.

6.2.20 Bomba agua caliente B-7

Una vez que se tenía listo el agua potable en el tanque T-01, se encendió a la bomba B-7 para trasladar el agua hacia el intercambiador de calor U-3. Se midió el caudal de descarga, obteniendo el siguiente resultado presentado en la tabla 6.11.

Tabla 6.11 Calibración bomba B-7

Equipo	Caudal máximo	Unidades
B-7	0.54	m ³ /min

6.2.21 Bombas dosificadoras alcalina B-8 y ácida B-9

Debido a que en la puesta en marcha en frío, se observó que las bombas no estaban funcionando adecuadamente por la escasa dosificación; se procedió a hacerles revisar. Sin embargo, no se logró resultados favorables. Por lo que la solución alternativa fue alimentar manualmente al proceso de digestión anaerobia con cal en el equipo A-1 en caso de un pH ácido y con ácido acético o cítrico para pH básicos.

6.2.22 Bomba de agua caliente B-10

Al encender la bomba B-10 se observó que el agua de calentamiento fue impulsado desde el equipo T-01 hacia el intercambiador de calor U-5. Se midió el caudal de descarga a la salida de U-5, el cual está presentado en la tabla 6.12.

Tabla 6.12 Calibración bomba B-10

Equipo	Caudal máximo	Unidades
B-10	0.76	m ³ /min

7. Conclusiones y recomendaciones

En este trabajo de tesis se realizó la puesta en marcha de la planta de alta tecnología de digestión anaeróbica en Latinoamericana de Jugos S.A., para asegurar un arranque exitoso y coordinado que garantice la operación de la planta a largo plazo. Además se realizó experimentos a escala de laboratorio para asegurar que el agua de lavado de frutas que se utiliza en el proceso de industrialización, no inhiba la degradación microbiana.

Se aseguró el cumplimiento de la planificación, construcción y puesta en marcha de la planta de digestión anaerobia en Latinoamericana de Jugos S.A., mediante las visitas diarias realizadas en el periodo de planificación y construcción en la empresa Inoxking, posteriormente las visitas fueron realizadas en la fábrica Latinoamericana de Jugos S.A. para verificar que se estén instalando y adecuando los equipos según contrato. Finalmente, se realizaron las pruebas de puesta en marcha en frío y en caliente para asegurar el funcionamiento óptimo de los equipos y el proceso.

En las pruebas realizadas en puesta en marcha en frío se utilizó agua para comprobar el funcionamiento mecánico y eléctrico de los equipos. En el caso de la puesta en marcha en caliente se utilizaron fruta, estiércol y agua que constituyen la materia prima real en la digestión anaerobia con el objetivo de que el proceso se ejecute óptimamente en el arranque de la planta. A pesar de realizar algunas adecuaciones en los equipos en la puesta en marcha en frío, se tuvieron que realizar otras modificaciones en la puesta en marcha caliente, debido a que las propiedades físicas y químicas son distintas entre el agua y la mezcla reactiva.

Se realizaron las pruebas de calibración de caudal, nivel, celdas de carga, temperatura, volumen y hermeticidad, para asegurar que el proceso implementando en Latinoamericana de Jugos S.A. se ajuste a los parámetros requeridos para una planta de digestión anaerobia. Además proporciona datos exactos para el arranque de la planta.

Mediante la puesta en marcha en frío y en caliente se pudieron observar algunos problemas en la planta de digestión anaerobia en Latinoamericana de Jugos S.A., que tuvieron que ser corregidos para asegurar un arranque exitoso. Las acciones correctivas que se tomaron dependieron de cada equipo, debido a que en algunos casos se procedió a modificar a la unidad y en otros se hicieron adecuaciones en el proceso. Los casos específicos en los que se realizaron adecuaciones en el equipo fueron:

- Picadora/ triturador F-1: se instaló un visor para detectar con mayor facilidad el problema específico en el equipo en caso de que se encienda la alarma por trabamiento.
- Tamiz vibratorio F-2: se adecuó el tamaño de malla para retener las partículas, debido a que se tenía inicialmente orificios de 2x2 mm, que fueron reemplazadas por unas de 20x20 mm; además en esta unidad se acopló un tubo que une el tamiz vibratorio con el tanque recolector para evitar salpicaduras de la mezcla constituida por fruta, estiércol y agua.
- Cambió del biodigestor D-1: debido a que el primero fue diseñado solo para resistir presiones atmosféricas.
- Aumento del diámetro de las tuberías de biogás, para evitar taponamientos por material particulado.
- Los equipos D-1, C-2 y C-3 y en la línea de biogás se realizaron pruebas de hermeticidad debido a que estas unidades retenían biogás; todas las fugas fueron corregidas exitosamente, pero para C-2 no se logró tener una membrana hermética.
- Intercambiadores de calor U-3 y U-5: se revisteron las tuberías y el equipo con un material aislante para evitar pérdidas de calor.
- Se corrigieron las vibraciones y ruidos existentes en las bombas B-4 y B-5 mediante la implementación de las juntas expansivas en las tuberías de carga y descarga, para evitar riesgos de daño de tuberías por las altas vibraciones.
- Las adecuaciones correctivas efectuadas en el proceso se realizaron en las bombas dosificadoras, las cuales no funcionaron en las pruebas de puesta en marcha en frío y caliente, se decidió alimentar manualmente cal para estabilizar el pH en el tanque A-1.

Mediante los experimentos realizados del agua de lavado de frutas en el LaDEA, se concluye que si existe degradación de la materia orgánica al implementar esta materia prima sin afectar la presencia de detergente en el proceso. Logrando como beneficio el ahorro de la implementación de una planta de tratamiento de aguas grises para Latinoamericana de Jugos S.A. Los experimentos realizados fueron con cuatro cargas orgánicas, alcanzando una producción óptima al añadir una carga orgánica de 0.5 [kg_{DQO}/m³·d]

Debido a que no se logró corregir la fuga en el gasómetro del tanque C-2 lo que implica el escape continuo del biogás, el proyecto va a ser únicamente rentable por la comercialización del biol a agricultores aledaños a la zona de Amaguaña.

Para ejecutar el diseño de la planta de digestión anaerobia en Latinoamericana de Jugos S.A. se realizó a partir de la investigación obtenida a escala piloto en el LaDEA. Sin embargo, se tuvo que realizar adecuaciones, como es el caso de la membrana en C-2 que funcionó óptimamente a escala piloto. Por lo que se recomienda tener opciones alternativas para ejecutarlas en caso de no tener los resultados esperados a escala semi – industrial.

Es importante conocer el proceso de digestión anaeróbica cuando se van a adquirir nuevos productos, como bombas o sensores, para asegurar que se adapten a los parámetros necesarios de operación de la planta. Debido a que en el equipo C-2 se podía ocupar sensores de presión en vez de sensores ópticos de nivel. En este caso ya no sería necesario usar el gasómetro.

Es primordial comprar productos con garantía para que en caso de no funcionar adecuadamente los equipos, se cuente con el servicio técnico de la marca para su reparación o exista el cambio por un producto nuevo.

8. Bibliografía

- 1 Arosemena, G. (Marzo de 2010). Ecuador frente a sus competidores en mercado mundial. *Selected Works*, 1-2.
- 2 Enviaseo. (s.f.). *Contaminación ambiental causada por los residuos sólidos*. Colombia: Gobierno de Colombia.
- 3 (EMASEO), E. P. (s.f.). Recuperado el 04 de Mayo de 2014, de <http://www.emaseo.gob.ec/>
- 4 (EMGIRS EP), E. P. (s.f.). Recuperado el 04 de Mayo de 2014, de <http://www.emgirs.gob.ec/>
- 5 (EPM) (s.f.). Recuperado el 22 de Mayo de 2014, de <http://www.ruminahui-aseo.gob.ec/la-empresa/>
- 6 Mejía Sánchez, G. M. (1996). *Digestión anaerobia*. Mérida, Yucatán, México: Obras Científicas y Técnicas de la Universidad Autónoma de Yucatán.
- 7 Carcaga, J. A. (1993). *Manejo y reciclaje de los residuos de envases y embalajes*. México D.F.: Sedesol.
- 8 Zambrano, C., Núñez, J., Sinche, X., Ariza, D., & Villacís, P. (2014). *Informe técnico sobre la operación de relleno sanitario de Quito*. Quito: EMGIRS- EP.
- 9 Zambrano, C., Núñez, J., Sinche, X., Ariza, D., & Villacís, P. (2013). *Informe técnico sobre la operación de relleno sanitario de Quito*. Quito: EMGIRS- EP.
- 10 Castells, X. E. (2000). *Reciclaje de residuos industriales*. Madrid: Díaz de Santos.
- 11 Yepes, S., Montoya Naranjo, L. J., & Orozco Sánchez, F. (2008). Agroindustrial Waste Valorization – Fruits – in Medellín and the South of Valle de Aburrá, Colombia. *Facultad Nacional de Agronomía en Medellín*, 1 – 9.
- 12 Medina, M. (1997). *Manejo de desechos sólidos y desarrollo sustentable*. México: Comercio exterior.
- 13 Dispromaq. (2011). *Producto 1: Informe de investigación de las condiciones óptimas de la digestión anaeróbica de desechos de frutas*. Quito: Dispromaq S.A.

- 14 Ministerio de Coordinación de la Productividad, Empleo y Competitividad. *InnovaEcuador*. Recuperado el 21 de Marzo de 2014, de www.innovaecuador.gob.ec/
- 15 Lorenzo Acosta, Y., & Obaya Abreu, M. C. (2005) La digestión anaerobia. Aspectos teóricos. *Red de revistas científicas de América Latina, el Caribe, España y Portugal*, 35 - 48.
- 16 Ortega, N. (2006). *Phosphorus Precipitation in Anaerobic Digestion Process*. Boca Ratón, Florida, Estados Unidos: Dissertation.com.
- 17 Pineda Martínez, G. A. (Marzo de 2011). Caracterización de biogás proveniente de la fermentación de la mezcla de agua de lavado de café y glicerina residual de biodiesel por medio de cromatografía de gases. *Universidad San Carlos de Guatemala*, 2-18.
- 18 Elías Castells, X., Flotats Ripoll, X., & Campos Pozuelo, E. (2012). *Procesos biológicos. La digestión anaerobia y el compostaje: Tratamiento y valorización energética de residuos*. Madrid: Díaz de Santos.
- 19 Chaúr Bernal, J. (2002). El biogás. *Instituto colombiano agropecuario*, 9-35.
- 20 Sainz Sastre, J. A. (2007). *Tecnologías para sostenibilidad: procesos y operaciones unitarias en depuración de aguas residuales*. Madrid: Fundación EOI.
- 21 Chiriboga Novillo, O. G. (2010). Desarrollo del Proceso de Producción de Biogás y Fertilizante Orgánico a partir de Mezcla de Desechos de Procesadoras de Frutas. *Universidad San Francisco de Quito*, 4 – 21.
- 22 Sosa, R., Chao, R., & del Rfo, J. (1999). Aspectos bioquímicos y tecnológicos del tratamiento de residuales agrícolas con producción de biogás. *Revista computarizada de producción porcina*, 6(2), 6-16.
- 23 Marañón Maison, E., Sastre Andrés, H., Castrillón Peláez, L., González Prendes, J., Pertierra Menéndez, J., & Berrueta Jiménez, J. (s.f.). *Generación de residuos de ganadería vacuna (purines) en Asturias. Problemática y tratamiento*. Oviedo: Universidad de Oviedo.
- 24 Droste, R. (1997). *Anaerobic Water Treatment. Theory and Practice of Water and Wastewater Treatment*. Ottawa: Wiley and Sons.

- 25 Flotats, X., Campos, E., & Bonmatí, A. (1997). Aprovechamiento energético de residuos ganaderos. *Universidad de Lleida*, 1-20.
- 26 Yurrita Flores, A. (1982). Generación de biogás a partir de jugo de pulpa de café. *Universidad de San Carlos de Guatemala*, 5-18.
- 27 Sanchez, E., Borja, R., Weiland, P., & Martín, A. (Diciembre de 2001). Effect of substrate concentration and temperature on the anaerobic digestion of piggery waste in a tropical climate. *Process Biochemistry*, 37(5), 483-488.
- 28 Gaspar , L., & Matos, A. (2007). Producción de biogás por digestión anaeróbica de residuos vegetales. *Universidad Peruana Unión*.
- 29 Vereda, C., Gómez, C., García, F., & Rodríguez, J. (2006). Producción de biogás a partir de residuos vegetales. Características, etapas y limitaciones. *Universidad de la Rioja*, 114-122.
- 30 Pérez Espejo, R. (2006). *Granjas porcionas y medio ambiente: Contaminación del agua en la Piedad, Michoacán*. México: Plaza y Valdés.
- 31 Castells, X. (2005). *Tratamiento y valorización energética de residuos*. Madrid: Díaz de Santos.
- 32 Armijo de Vega, C., Aguilar Virgen, Q., Taboada González, P., Ojeda Benítez, S., & Quintero Nuñez, M. (Agosto de 2010). Biogas Generation in the Landfill of Ensenada, Baja California Mexico. *Journal of Solid Waste Technology & Management*, 36, 100 – 109.
- 33 Rocha Aguilera, G. (2005). Estudios de los fenómenos de transporte en el endulzamiento del gas natural. *Universidad de las Américas Puebla*, 8 – 27.
- 34 Salamanca, J. (2009). Diseño, construcción y puesta en marcha de un biodigestor a escala piloto para la generación de biogás y fertilizante orgánico. *Universidad San Francisco de Quito*, 17 – 28.
- 35 Botero, R., & Preston, T. (1987). *Biodigestor de bajo costo para la producción de combustible y fertilizante a partir de excretas. "Manual para su instalación, operación y utilización"*. Cali: Editado en Cali.

- 36 Martí Herrero, J. (2008). *Biodigestores familiares. Guía de diseño y manuales de instalación. Biodigestores de polietileno tubular de bajo costo para trópico, valle y altiplano*. La Paz: Creative Commons.
- 37 Manosalvas Arias, R. (2012). Determinación de la efectividad de "Biol Biogest potencializado", como efluente nutricional complementaria en el cultivo de brócoli (*Brassica oleracea*) en la provincia de Cotopaxi. *Escuela Politécnica Nacional*, 7-45.
- 38 Zuluaga Bernal, C. A. (2007). Implementación de un biodigestor en ganadería de carne en Guaduas, Cundinamarca. *Universidad de la Salle*, 16-53.
- 39 Medina Enríquez, F., & Orellana Alvarenga, A. (Abril de 2010). Estimación de la generación de biogás en una ganadería lechera y su aprovechamiento energético en una planta procesadora de lácteos. *Universidad Don Bosco*, 6-19.
- 40 Fernández, J. (2003). Energía de la biomasa. En J. de Juana, *Energías renovables para el desarrollo* (págs. 243-261). Madrid: Thomson Paraninfo.
- 41 Fogler, S. (2008). *Elementos de ingeniería de las reacciones químicas* (Cuarta edición ed.). México D.F., México: Pearson Prentice Hall.
- 42 Guevara Vera, A. (1996). Fundamentos básicos para el diseño de biodigestores anaeróbicos rurales. Producción de gas y saneamiento de efluentes. *Organización panamericana de la salud*, 22-33.
- 43 Atkinson, B. (2002). *Reactores bioquímicos*. Barcelona: Reverté.
- 44 Shuler, M., & Kargi, F. (2002). *Bioprocess Engineering* (Segunda ed.). Estados Unidos: Prentice Hall.
- 45 González, C., & Hurtado, E. (2000). Aspectos generales de la producción de cerdos a campo: Una reseña corta. *Revista computarizada de producción porcina*, 7(3), 40-60.
- 46 Eaton, A., & Franson, M. (2005). *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater*. Estados Unidos : American Public Health Association.
- 47 Levenspiel, O. (1998). *Ingeniería de las reacciones químicas* (Tercera ed.). New York: Wiley.

- 48** Company, Cole Parmer (2006). Cole - Parmer Delivering Solutions You Trust. Hong Kong.
- 49** Puente, P. (Diciembre de 2012). Estudio de la digestión anaeróbica de desechos de fruta en la planta piloto del Laboratorio de Desarrollo de Energías Alternativas. *Universidad San Francisco de Quito*, 15- 82.
- 50** Crespi, M., Huertas, J. (1986). Determinación simplificada de la demanda química de oxígeno por el método del dicromato. *Intextar*, 89 – 96.
- 51** Proaño, G. (Enero de 2011). Optimización en la operación de un biodigestor a escala piloto y caracterización de productos y materia prima. Universidad San Francisco de Quito, 23 – 34.

9. ANEXOS

ANEXO 1: Equipos mecánicos de la planta de digestión anaeróbica en Latinoamericana de Jugos S.A.