



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO



FACULTAD DE INGENIERÍA

**PLAN DE NEGOCIOS PARA UN PROYECTO DE BIOGÁS EN
EXPLOTACIONES PECUARIAS**

TESIS

PARA OBTENER EL TÍTULO DE:

INGENIERO ELÉCTRICO ELECTRÓNICO

PRESENTA:

ELIZABETH JIMÉNEZ TREJO

DIRECTORA DE TESIS:

DRA. ALEJANDRA CASTRO GONZÁLEZ

MÉXICO D.F., CIUDAD UNIVERSITARIA

2011



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

Esta página se dejó en blanco intencionalmente.

JURADO ASIGNADO

PRESIDENTE:	M. I. Ricardo Mota Marzano
VOCAL:	Dra. Alejandra Castro González
SECRETARIO:	Dr. Arturo Guillermo Reinking Cejudo
1er. SUPLENTE:	M. I. Juan Carlos Cedeño Vázquez
2do SUPLENTE:	Dra. Manuela Azucena Escobedo Izquierdo

SITIO DONDE SE DESARROLLÓ EL TEMA:

Posgrado de la Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional Autónoma de México

ASESORA DEL TEMA:

Dra. Alejandra Castro González

SUSTENTANTE:

Elizabeth Jiménez Trejo

Esta página se dejó en blanco intencionalmente.

A mis padres

A mis abuelos

A mis compañeras de viaje

A mis compañeros de viaje

Esta página se dejó en blanco intencionalmente.

Agradecimientos

A la energía del Universo que me hizo estar en los lugares y momentos indicados para ser la persona que hoy soy.

A mi mamá por enseñarme a columpiarme.

A mi papá por enseñarme a sonreír.

A mi hermano por enseñarme a compartir.

A Sarita, a Rosarito, a Héctor, a Brenda y a Eduardo por existir.

A Federico por enseñarme a lanzar botellas al mar de la incomprensión.

A Tabaré por darle un verbo a una actividad que solemos hacer los seres humanos sin darnos cuenta.

A Miguel, a Judith y a Annie por acompañarme durante mi estancia en la Universidad.

A Joanna y Lázaro por acompañarnos en la realización de nuestras respectivas tesis.

A Beto, Richard, Erik, Jacobo, George, Sam y Julio porque con ellos aprendí a trabajar y vivir en equipo.

A Iván por construir hermosas oraciones con términos propios de la Física.

A todos los que fueron mis profesores, a los que fueron excelentes y también a aquellos que no lo fueron, porque de todos aprendí.

A nuestra Universidad porque en sus instalaciones además de su formación académica, cultural y deportiva, encontré seres humanos íntegros.

A mis sinodales que con sus observaciones enriquecieron este trabajo.

A la Dra. Alejandra Castro por su paciencia, comprensión y motivación.

Esta página se dejó en blanco intencionalmente.

ÍNDICE

ÍNDICE DE FIGURAS	I
ÍNDICE DE TABLAS	II
GLOSARIO	IV
ABREVIATURAS.....	V
RESUMEN	VI
INTRODUCCIÓN.....	VII
OBJETIVO GENERAL.....	IX
OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	IX
1. CAPÍTULO 1.....	1
1.1. DESCRIPCIÓN DE LAS OPERACIONES DEL PROCESO PRODUCTIVO DE LA INDUSTRIA CÁRNICA PARA PORCINOS	1
1.1.1. Recepción y estabulación	1
1.1.2. Aturdimiento y colgado.....	1
1.1.3. Desangrado.....	2
1.1.4. Escaldado.....	3
1.1.5. Depilado / Flagelado.....	4
1.1.6. Flameado / Chamuscado.....	4
1.1.7. Evisceración y corte de cabeza y patas	5
1.1.8. Corte de la canal / Esquinado.....	5
1.1.9. Oreo refrigerado.....	5
1.1.10. Despiece	6
1.1.11. Refrigeración / Congelación de piezas	6
1.1.12. Procesos secundarios	6
1.2. NORMAS GENERALES PARA EL DESARROLLO DE UN RASTRO TIPO INSPECCIÓN FEDERAL (TIF).....	7
1.2.1. Norma oficial mexicana NOM-004-ZOO-1994	7
1.2.2. Norma oficial mexicana NOM-008-ZOO-1994	7
1.2.3. Norma oficial mexicana NOM-009-ZOO-1994	9
1.2.4. Reglamento para la industrialización de la carne	10
2. ANÁLISIS Y DIAGNÓSTICO DE LA SITUACIÓN ACTUAL Y PREVISIONES SIN EL PROYECTO	11
2.1. PROBLEMAS AMBIENTALES GENERADOS POR LOS RASTROS.....	13
2.1.1. Consumo de agua	14
2.1.2. Generación de aguas residuales.....	15
2.1.3. Consumo de energía.....	18
2.1.4. Decomisos	19
3. ANÁLISIS DE LA SITUACIÓN AMBIENTAL EN RASTROS.....	21
3.1. PLAN Y ESTRATEGIAS DE SUSTENTABILIDAD AMBIENTAL	21
3.1.1. Gases efecto invernadero y emisión de olores	21
3.1.2. Consumo de agua y efluente.....	22
3.1.3. Residuos sólidos	25
3.1.4. Energía.....	25
3.2. CONDICIONES Y MECANISMOS DE UTILIZACIÓN DE EQUIPOS DE ENERGÍAS RENOVABLES.....	26
3.2.1. Tratamiento de desechos líquidos industriales.....	28

3.2.2.	Sistemas de tratamiento empleados en desechos líquidos de rastros	29
3.2.2.1.	Sistemas de tratamiento empleados en desechos líquidos	30
3.2.2.1.1.	Pretratamiento (sistemas de tratamiento primario)	30
3.2.2.1.1.1.	Rejillas de desbaste	30
3.2.2.1.1.2.	Flotación	32
3.2.2.1.1.3.	Homogenización	33
3.2.2.1.2.	Tratamiento anaerobio (sistemas de tratamiento secundario).....	33
3.2.2.1.2.1.	Reactor de mezcla completa sin recirculación (RMC)	34
3.2.2.1.2.2.	Reactor de mezcla completa con recirculación (reactor anaerobio de contacto).....	34
3.2.2.1.2.3.	Reactor de flujo pistón	35
3.2.2.1.2.4.	Reactor con retención de biomasa.....	35
3.2.2.1.2.5.	Filtro anaerobio	36
3.2.2.1.2.6.	Lecho fluidizado.....	37
3.2.2.1.2.7.	Reactor de lecho de lodos de flujo ascendente	37
3.2.2.1.2.8.	Sistemas discontinuos	38
3.2.2.1.2.9.	Sistemas de dos etapas	38
3.2.2.1.2.10.	Sistemas de dos fases	39
3.2.2.1.2.11.	Sistemas híbridos	39
3.2.2.1.3.	Tratamiento aerobio (sistemas de tratamiento secundario).....	39
3.2.2.1.3.1.	Lagunas aireadas	39
3.2.2.1.3.2.	Lodos activados	40
3.2.2.1.3.2.1.	Reactores de lodos activados con mezcla completa.....	41
3.2.2.1.3.2.2.	Reactores de flujo pistón con lodos activados.....	41
3.2.2.1.3.2.3.	Reactores en serie con lodos activados	42
3.2.2.1.3.2.4.	Canales de oxidación.....	42
3.2.2.1.3.2.5.	Reactor secuencial discontinuo (RSD).....	43
3.2.2.1.3.3.	Filtro percolador	43
3.2.2.1.3.4.	Discos rotativos biológicos o biodiscos (DRB)	43
3.2.2.1.3.5.	Humedales.....	44
3.2.2.1.4.	Cloración (tratamiento terciario)	45
3.3.	BIOGÁS	47
3.3.1.	Características generales.....	47
3.3.2.	Aprovechamiento del biogás.....	48
3.3.3.	Sistemas de recuperación de energía	48
3.3.4.	Pretratamiento del biogás.....	49
4.	INGENIERÍA DEL CASO DE ESTUDIO	53
4.1.	LOCALIZACIÓN Y DESCRIPCIÓN ESPECÍFICA DEL SITIO DEL PROYECTO	53
4.1.1.	Localización	53
4.1.2.	Orografía.....	54
4.1.3.	Hidrografía.....	54
4.1.4.	Principales ecosistemas.....	55
4.1.5.	Clima.....	56
4.1.6.	Recursos naturales	57
4.1.7.	Características y uso de suelo	57
4.1.8.	Evolución demográfica	57
4.1.9.	Infraestructura social y de comunicaciones	58
4.2.	INFRAESTRUCTURA Y EQUIPO ACTUAL DEL RASTRO DE ESTUDIO	60

4.3.	DESCRIPCIÓN DE LA PROPUESTA TÉCNICA DEL PROYECTO.....	60
4.3.1.	Operaciones y procesos unitarios propuestos	60
4.3.1.1.	Trampa de grasa	61
4.3.1.2.	Rejas de limpieza manual	62
4.3.1.3.	Tanque de homogenización	63
4.3.1.4.	Tratamiento anaerobio: RALLFA	64
4.3.1.4.1.	Reactor	64
4.3.1.4.2.	Volumen del reactor	65
4.3.1.4.3.	Sistemas de alimentación	67
4.3.1.4.4.	Separador gas-sólido-líquido	68
4.3.1.4.5.	Producción esperada de metano	69
4.3.1.4.6.	Descarga de lodos	69
4.3.1.4.7.	Recirculación del efluente.....	70
4.3.1.4.8.	Producción teórica de biomasa.....	70
4.3.1.4.9.	Materiales de construcción.....	70
4.3.1.1.	Tratamiento aerobio: Lodos activados.....	71
4.3.1.1.1.	Equipo de aireación	71
4.3.1.1.2.	Tanques de aireación	71
4.3.1.1.3.	Procedimiento de diseño del reactor de lodos activados de mezcla completa	72
4.3.1.1.4.	Instalaciones para la separación de sólidos (sedimentador)	81
4.3.1.1.5.	Procedimiento de diseño del sedimentador secundario	81
4.3.1.1.6.	Bombas para purga de lodos y para recirculación.....	84
4.3.1.2.	Cloración.....	84
4.3.2.	Motor para el aprovechamiento del biogás.....	87
4.3.3.	Suministro de energía	89
4.3.4.	Programas de mantenimiento.....	90
4.3.4.1.	Mantenimiento diario	90
4.3.4.2.	Mantenimiento semanal	90
4.3.4.3.	Mantenimiento mensual	91
4.3.4.4.	Mantenimiento anual.....	91
4.3.4.5.	Mantenimiento eventual.....	92
4.3.5.	Escenarios con diferentes volúmenes de agua residual	93
4.3.6.	Programas de ejecución, administrativos, de capacitación y asistencia técnica	94
4.4.	CUMPLIMIENTO DE NORMAS SANITARIAS Y AMBIENTALES	96
5.	FACTIBILIDAD AMBIENTAL	97
6.	ANÁLISIS FINANCIERO	99
6.1.	PRESUPUESTOS Y PROGRAMA DE INVERSIONES Y FUENTES DE FINANCIAMIENTO	99
6.2.	PROYECCIÓN FINANCIERA	102
6.2.1.	Ingresos	102
6.2.2.	Costos	105
6.2.1.	Punto de equilibrio	107
6.3.	EVALUACIÓN FINANCIERA DEL PROYECTO	108
6.3.1.	Flujo de efectivo	108
6.3.2.	Valor presente (VP)	110
6.3.3.	Valor Presente Neto (VPN)	111
6.3.4.	Relación Beneficio Costo (RBC)	112
6.3.5.	Tasa Interna de Retorno (TIR)	112

6.3.6.	Periodo de Recuperación de la Inversión (PRI)	113
6.3.1.	Análisis de sensibilidad.....	114
7.	CONCLUSIONES	117
	REFERENCIAS.....	119

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1	Recepción de porcinos	2
Figura 1.2	Tanque de escaldado	3
Figura 1.3	Depilado de porcinos	4
Figura 1.4	Corte de la canal	5
Figura 1.5	Sala de despiece.....	6
Figura 1.6	Diagrama de flujo para el proceso productivo para porcino.....	8
Figura 3.1	Sistema sugerido de depósito de residuos líquidos y sólidos en un rastro.....	31
Figura 3.2	Reactor de mezcla completa (RMC) sin recirculación	34
Figura 3.3	Reactor de mezcla completa (RMC) con recirculación	35
Figura 3.4	Digestor de flujo pistón.....	36
Figura 3.5	Reactores con retención de biomasa	36
Figura 3.6	Reactor de lecho fluidizado	37
Figura 3.7	Reactor anaerobio de lecho de lodo de flujo ascendente (RALLFA).....	38
Figura 3.8	Proceso de lodos activados.....	41
Figura 3.9	Canal de oxidación.....	42
Figura 3.10	Discos rotativos biológicos	44
Figura 3.11	Proceso para generar energía eléctrica y térmica en el rastro Mexicaltzingo	52
Figura 4.1	Ubicación del municipio de Mexicaltzingo, Estado de México.....	53
Figura 4.2	Orografía del municipio de Mexicaltzingo.....	54
Figura 4.3	Hidrología del municipio de Mexicaltzingo.....	55
Figura 4.4	Clima en el municipio de Mexicaltzingo	56
Figura 4.5	Tren de tratamiento de aguas residuales para el rastro de Mexicaltzingo	61
Figura 4.6	Programa de ejecución del proyecto de generación de energía renovable.....	95

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2.1	Producción nacional de carne en canal.....	11
Tabla 2.2	Producción en el Estado de México de carne en canal.....	12
Tabla 2.3	Consumo de agua en rastros estimada en México	15
Tabla 2.4	Consumo de agua total por estado, elaboración propia a partir de datos.....	16
Tabla 2.5	Diagrama de flujo por operaciones en el proceso de obtención de carne	16
Tabla 2.6	Concentraciones promedio de contaminantes en el agua residual de plantas de sacrificio por especie.....	17
Tabla 3.1	Situación ambiental generada por rastros.....	26
Tabla 3.2	Desglose del consumo de energía térmica de plantas de sacrificio	27
Tabla 3.3	Desglose del consumo de electricidad de plantas de sacrificio	28
Tabla 3.4	Categoría del tratamiento, tipo de tratamiento y procesos unitarios en el tratamiento de aguas residuales industriales	29
Tabla 3.5	Tren de tratamiento para tres tipos de agua residuales: Urbanas, químicas y alimentarias	30
Tabla 3.6	Dosis típicas de cloro en desinfección.....	45
Tabla 3.7	Características de los recipientes de cloro.....	45
Tabla 3.8	Sistemas de tratamiento aplicados a residuos líquidos provenientes de rastros.....	46
Tabla 3.9.	Componentes del biogás.....	47
Tabla 3.10	Equivalencia energética para un m ³ de biogás	47
Tabla 3.11	Aprovechamiento de biogás de acuerdo a su pureza y poder calorífico	48
Tabla 3.12	Tecnologías disponibles para el aprovechamiento de biogás.....	49
Tabla 3.13	Procesos para remoción de gases ácidos presentes en el biogás.....	51
Tabla 4.1	Actividades económicas en el municipio de Mexicaltzingo	59
Tabla 4.2	Población económicamente activa por sector en el municipio de Mexicaltzingo.....	60
Tabla 4.3	Datos para el diseño de RALLFA.....	65
Tabla 4.4	Características de diseño del reactor RALLFA.....	71
Tabla 4.5	Características del influente al reactor de lodos activados	72
Tabla 4.6	Condiciones y parámetros propuestos para el diseño de un reactor de lodos activados	73
Tabla 4.7	Parámetros definidos para la determinación de P _{X, BIO}	74
Tabla 4.8	Características del tanque de aireación	81
Tabla 4.9	Características de diseño del sedimentador secundario	84
Tabla 4.10	Bombas para el traslado de lodos).....	84
Tabla 4.11	Características de diseño del generador Econogas.....	88
Tabla 4.12	Características de diseño del motor Econogas	88
Tabla 4.13	Opciones comunes de almacenamiento del biogás.....	88
Tabla 4.14.	Consumo eléctrico proyectado para el rastro de Mexicaltzingo	89
Tabla 4.15.	Consumo térmico proyectado para el rastro de Mexicaltzingo.....	89
Tabla 4.16	Programa de mantenimiento	93
Tabla 4.17	Programa de mantenimiento de obras y equipos.....	93
Tabla 4.18	Límites máximos permisibles para contaminantes básicos en las descargas de aguas residuales en aguas y bienes nacionales de la NOM-001-SEMARNAT-1996 y calidad del efluente del sistema acoplado RALLFA-LA de la propuesta	96
Tabla 6.1	Monto de inversión del proyecto.....	99
Tabla 6.2	Porcentaje de participación de las fuentes de financiamiento.....	101
Tabla 6.3	Fuentes de financiamiento y costo de capital.....	101
Tabla 6.4	Pronóstico del costo de gas LP	102

Tabla 6.5	Ingresos por concepto de ahorro de gas LP	103
Tabla 6.6	Pronóstico del costo por kWh	103
Tabla 6.7	Ingresos por concepto de ahorro de energía eléctrica	104
Tabla 6.8	Ingresos totales anuales.....	105
Tabla 6.9	Costos por concepto de depreciación.....	106
Tabla 6.10	Costos de operación y mantenimiento anual	106
Tabla 6.11	Costos totales de producción y administración anuales.....	107
Tabla 6.12	Estado financiero para el caso de estudio.	109
Tabla 6.13	Flujo de efectivo para el caso de estudio.....	110
Tabla 6.14	Valor presente de los flujos de efectivo.....	111
Tabla 6.15	Flujos acumulados actualizados	114
Tabla 6.16	Flujo de efectivo para el caso de estudio considerando un incremento en los costos de operación y mantenimiento.....	115
Tabla 6.17	Comparación de parámetros sobre la evaluación financiera sin y con bonos de carbono	116
Tabla 7.1	Beneficios aportados por la instalación de la planta de tratamiento de aguas residuales	118

GLOSARIO

Canal: El cuerpo del animal desprovisto de piel, cerdas o plumas, cabeza, vísceras y patas.

Decomiso: Las canales, vísceras y demás productos de origen animal, considerados impropios para el consumo humano y que únicamente podrán ser aprovechados para uso industrial.

Despiece: Dividir la canal en distintas partes.

Escaldar: Introducir algo en agua hirviendo.

Evisceración: Retiro de las vísceras blancas y rojas del cuerpo del porcino.

Faenado: Evisceración y eliminación de la piel, cerdas o plumas así como limpieza de la canal.

Fleje: Es una cinta, originariamente de plástico, utilizada para encintar el embalaje de diversos productos, mayormente productos pesados.

Media canal: Animal muerto y abierto, sin tripas y demás despojos cortado por la columna vertebral.

Porcionado: Repartir en raciones y/o cortes la canal.

Rasquetas: Plancha de hierro de cantos afilados y con mango de madera que se usa para raer y limpiar diversas superficies.

Secado de la sangre: Proceso mediante el cual se retira la humedad de la sangre para su posterior aprovechamiento.

Unto: Crasitud o gordura interior del cuerpo del animal.

ABREVIATURAS

DBO: Demanda Bioquímica de Oxígeno

DQO: Demanda Química de Oxígeno

COV: Compuestos Orgánicos Volátiles

FA: Filtro anaerobio

FAD: Flotación por aire disuelto

GEI: Gases de Efecto Invernadero

LA: Lodos activados

RAL: Reactor aerobio por lotes

RALE: Reactor anaerobio de lecho expandido

RALF: Reactor anaerobio de lecho fluidizado

RALGE: Reactor anaerobio de lecho granular expandido

RALLFA: Reactor anaerobio de lecho de lodos de flujo ascendente

RASL: Reactor anaerobio secuencial por lotes

TIF: Tipo inspección federal

TRH: Tiempo de Retención Hidráulico

RESUMEN

En este estudio se propone un tren de tratamiento para procesar 450 m³/día de agua residual. El agua a tratar será producto de un rastro, actualmente en construcción en el municipio de Mexicaltzingo, Estado de México. En dicho establecimiento, se planea el sacrificio de 1,000 porcinos al día y la DQO del agua residual se considero de 4.37 kg/m³, valor tomado del efluente de un rastro ubicado en la ciudad de Cuernava, Morelos. Como producto del tratamiento, además del efluente que cumplirá con la NOM-001-SEMARNAT-1996 y la NOM-002-SEMARNAT-1996, se espera la producción de 429 m³ de biogás al día. La cantidad de biogás esperada contendrá a su vez 288 m³CH₄ con una capacidad de generación de 9,019 MJ/día, esta energía es capaz de encender 1163 focos de 100 W durante un día. Con la producción esperada de biogás se alimentará un motogenerador de la marca MOPESA modelo G4.248 de aspiración natural, de cuatro tiempos, con una capacidad de generación de 30 kW. El consumo del motogenerador oscila de 15 a 17 m³ de biogás/hora. A través de este proceso se producirá energía eléctrica y térmica para cubrir parcialmente el consumo proyectado del rastro. La cantidad de toneladas métricas de CO₂ que se dejarían de emitir a la atmósfera son 1,323. El ahorro que se obtiene, durante el horizonte del proyecto (20 años), por concepto de autoabastecimiento de energía eléctrica es 195,143.42 promedio anual, mientras que por el ahorro en el consumo de gas LP es \$850,501.94 promedio anual. El proyecto tiene un costo de capital de 7.67%, la inversión se recupera antes de la mitad del horizonte de planeación definido.

INTRODUCCIÓN

Un impacto ambiental provocado por la industria cárnica es el vertido de aguas residuales con altas concentraciones de DBO₅, además este hecho también provoca un impacto en la salud pública. Si se toma en cuenta que el consumo de agua diario de los rastros que proveen carne a las localidades con más de 50,000 habitantes en México es de 22'734,560 litros de agua y considerando el consumo de 163 litros por día por persona, se requerirían 139,476 individuos al día para generar este consumo (COFEPRIS, 2006). Evidentemente el volumen de consumo de agua tendrá estrecha relación con el volumen de las descargas.

Las aguas residuales producidas diariamente en rastros y mataderos de México, que no reciben tratamiento previo a su eliminación son el 62.8%. Estos establecimientos generan anualmente 5.8 miles de toneladas de DBO₅, es decir el 6.8% de lo producido por toda la industria alimenticia en México. Para entender la magnitud de esta contaminación, los rastros que proveen carne a las localidades con más de 50,000 habitantes y no realizan ningún tratamiento a sus líquidos residuales, generan diariamente una contaminación equivalente a una población como la de Xalapa en el estado de Veracruz (457,928 habitantes).

Entre los destinos finales de las aguas residuales no tratadas se encuentran el drenaje, canales, arroyos, vía pública o fosas. A nivel nacional la cantidad de agua residual que se vierte directamente al drenaje público es del 72.6% del total de las aguas residuales no tratadas. Uno de los estados que contribuye sustancialmente en esta forma de desecho es el Estado de México, lugar donde se localiza el caso de estudio, con 2'396,236.7 litros al día. Se debe considerar, de acuerdo a datos de la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA), que solamente el 16% de las aguas residuales que se eliminan a través del drenaje público reciben tratamiento en alguna de las 777 plantas instaladas en el país. En consecuencia que un rastro elimine sus aguas residuales por el drenaje, no es indicativo de que la contaminación ambiental no se produzca, debido a que el 84% de las mismas, terminarán contaminando cuerpos de agua.

Las descargas provenientes de los rastros están conformadas por una variedad de compuestos fácilmente biodegradables, como proteínas y grasas, presentes tanto en forma soluble como no soluble. También se caracterizan por sus altas concentraciones de nitrógeno, fósforo y sales. Un aspecto de especial importancia es el microbiológico, el alto contenido de materia orgánica en los residuos líquidos de los rastros resulta propicio para el desarrollo de microorganismos patógenos presentes (*Salmonella spp.*, *Shigella spp.*), además de contener huevos de parásitos y quistes de amibas, entre otros elementos.

Otros componentes que se pueden encontrar son residuos de plaguicidas, presentes en el alimento de los animales, cloro, salmuera y otros. Todas estas características de las aguas residuales de los rastros convierten a las descargas en un contaminante potencial del suelo y el agua, en que proliferan los malos olores por la descomposición de la materia orgánica. Además de infringir con las normas oficiales mexicanas NOM-001-SEMARNAT-1996 y NOM-002-SEMARNAT-1996.

El consumo de energía en un rastro es también un impacto ambiental. Las principales fuentes de consumo se centran en la generación de energía térmica para la producción de vapor y agua caliente, así como en las instalaciones para refrigeración. Del consumo total de energía el 80% corresponde a energía térmica, ésto genera emisiones directas a la atmósfera por el uso de combustibles fósiles, de elevado costo económico y de alto impacto ambiental causado por los gases producto de la combustión. Además los desechos enviados a cuerpos acuíferos y cielo abierto producen por su descomposición gases que son emitidos a la atmósfera sin ningún control, entre ellos el metano.

La problemática generada por los rastros tiene posibilidades para disminuir su impacto ambiental a través del aprovechamiento de los residuos. En el caso del rastro en construcción en Mexicaltzingo, para la producción de carne se contempla el sacrificio de 1,000 porcinos al día. Lo cual significa que sí el consumo de agua por porcino es de 450 litros de agua (COFEPRIS, 2006), al final del día se desecharían 450, 000 litros de agua residual. Estos residuos son susceptibles de ser tratados para generar biogás y con éste producir energía eléctrica y térmica, para contribuir a la satisfacción de las necesidades energéticas del rastro.

Para lograr el aprovechamiento de los residuos líquidos, se propone implementar un tren de tratamiento compuesto por una etapa de tratamiento previo, un sistema anaerobio y otro aerobio, además de una etapa final de cloración con el fin de alcanzar los niveles establecidos en las normas ambientales NOM-001-SEMARNAT-1996 y NOM-002-SEMARNAT-1996.

El sistema anaerobio es de especial importancia, pues es en él donde se producirá el biogás y además será posible tener acceso a los financiamientos ofrecidos por el Fideicomiso de Riesgo Compartido (FIRCO) para sistemas de digestión (biogás) y motogeneradores. Las contribuciones económicas esperadas por la implementación de este sistema son:

- Ingreso por ahorro eléctrico
- Ingreso por ahorro de gas LP

- Costos evitados por multas

A partir de lo anterior, se desprenden los objetivos de este trabajo, los cuales se mencionan a continuación.

OBJETIVO GENERAL

Determinar la factibilidad técnica, financiera y ambiental de la implementación de un sistema anaerobio para el tratamiento de desechos líquidos en un rastro del Estado de México y aprovechamiento del biogás para la producción de energía térmica y eléctrica.

OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Conocer las características de los residuos líquidos de rastros
- Dimensionar el sistema anaerobio y el sistema aerobio del tren de tratamiento propuesto
- Determinar la producción de biogás al día y su posible aprovechamiento
- Determinar el costo de inversión de un sistema para aprovechamiento de biogás y el periodo de recuperación de la inversión

Esta página se dejó en blanco intencionalmente.

1. CAPÍTULO 1

1.1. Descripción de las operaciones del proceso productivo de la industria cárnica para porcinos

En la industria cárnica se pueden distinguir principalmente tres tipos de actividades:

- Sacrificio de los animales en mataderos
- Despique y porcionado de las canales en salas de despique
- Elaboración de productos cárnicos en plantas de fabricación

Los mataderos o rastros son los establecimientos donde se realiza la primera etapa de industrialización de la carne, donde se obtienen las canales o medias canales como producto acabado. Los productos finales obtenidos en el matadero se pueden clasificar de la siguiente forma:

- Canales, medias canales y vísceras aptas para consumo humano
- Subproductos animales como el cuero, pelo, sangre, tripas y otras fracciones que pueden ser aprovechables en otras actividades industriales afines (alimentaria, farmacéutica, curtidos, entre otras).

A continuación se describe el proceso productivo desarrollado en los mataderos de tipo porcino (CAR/PL, 2006).

1.1.1. Recepción y estabulación

Una adecuada estancia de los animales previa a su sacrificio influirá en la calidad de la carne. El estrés del cerdo ante mórtem tiene, con demasiada frecuencia, repercusiones negativas en la calidad de la carne. Respecto a otro tipo de ganado, el porcino sí suele ser lavado en los establos para retirar la suciedad adherida a la piel (CAR/PL, 2006).

1.1.2. Aturdimiento y colgado

Los animales son conducidos desde los establos hasta la zona de aturdimiento. Previamente al degüello, los animales son aturdidos o anestesiados para producirles una inconsciencia inmediata (CAR/PL, 2006).

En el caso del porcino, suele utilizarse una descarga eléctrica de 280 V durante un segundo en pecho y espalda (SEMARNAT, 2004).

Después son colocados en una mesa para ser colgados. El desangrado posterior se ha de realizar durante los 20-60 segundos posteriores al colgado antes de que el animal recupere la consciencia (CAR/PL, 2006).



Figura 1.1 Recepción de porcinos (PROARCA, 2004)

1.1.3. Desangrado

El degüello del animal se realiza mediante una incisión horizontal a la altura del cuello con la finalidad de seccionar la yugular. Los utensilios de trabajo utilizados (un cuchillo por animal) se depositan en dispositivos esterilizadores después de cada uso.

Parte de la sangre se puede recoger para su posterior aprovechamiento como subproducto, de tal forma que la calidad higiénica con la que ha sido recogida determina en gran medida sus posibilidades de aprovechamiento posterior.

El desangrado vertical es el método clásico que permite recoger la sangre mientras el animal se va desplazando por la zona de desangrado. Presenta un grave riesgo de que la sangre pueda contaminarse por la caída de heces, orina, suciedad o contenido gástrico.

En el desangrado horizontal, el animal (generalmente porcino) se coloca en horizontal y perpendicularmente a la línea de transporte, de forma que la zona donde se ha realizado el corte (desangrado) queda separada del resto del animal, recogándose la sangre de una forma más higiénica que en el caso anterior.

En este sentido, además de los métodos de desangrado vertical y horizontal, para el porcino se utiliza un cuchillo succionador donde la sangre es bombeada directamente desde el animal a un depósito de recogida acondicionado térmicamente, lo que permite recoger la sangre sin contaminaciones intermedias. Esto da lugar a que la sangre pueda ser aprovechada posteriormente para consumo humano (CAR/PL, 2006).

1.1.4. Escaldado

Con esta operación se persigue la fácil retirada de los pelos de la piel. Para ello, se introducen los animales colgados en tanques de escaldado con agua caliente a 60-62 °C durante 5-6 minutos. El contacto del animal con el agua puede ser por inmersión o mediante duchas, donde el agua se proyecta sobre las canales a través de boquillas difusoras colocadas a lo largo de todo el túnel de escaldado. En el caso de la inmersión, se aporta el agua que se va perdiendo o arrastrando con los animales. En el segundo caso, se puede llegar a cierto grado de reutilización del agua usada.

Una variante de estos sistemas es el escaldado con vapor, donde las canales se introducen igualmente en un túnel donde las boquillas difusoras inyectan vapor. Un sistema de agua fría reduce la temperatura hasta los 63-64 °C, provocando la condensación del vapor en forma de gotitas de agua caliente finamente pulverizadas que caen sobre la superficie de los cerdos y provocan el efecto de escaldado (CAR/PL, 2006 y COFEPRIS, 2006).



Figura 1.2 Tanque de escaldado (PROARCA, 2004)

1.1.5. Depilado / Flagelado

Una vez escaldado el animal, éste se introduce en la máquina de depilado, que posee unos rascadores o cilindros rotatorios con dedos de caucho que, al girar, arrancan la mayor parte del pelo por fricción (CAR/PL, 2006).



Figura 1.3 Depilado de porcinos (El informador, 2010)

1.1.6. Flameado / Chamuscado

Después del depilado, se somete al animal a un proceso de chamuscado, generalmente de forma automática en túneles, con objeto de, por un lado, eliminar aquellas partes de la piel que no han sido retiradas en la operación anterior y, por otro, destruir las bacterias presentes en la piel para favorecer la posterior conservación de la canal.

Normalmente, se utilizan túneles con quemadores de propano en su interior, que se ponen en funcionamiento de forma intermitente durante el paso de los animales y que envuelven completamente la canal durante algunos segundos (CAR/PL, 2006).

Con un lavado posterior se completa la limpieza y retirada de cualquier tipo de resto que haya podido quedar de las etapas anteriores. Suele hacerse con agua a cierta presión.

1.1.7. Evisceración y corte de cabeza y patas

La evisceración debe hacerse en el menor tiempo posible desde la muerte del animal. Es una operación crítica desde el punto de vista higiénico. Los utensilios, las manos del manipulador, los cortes y rupturas del intestino, tracto intestinal, pueden ser causas y origen de contaminaciones microbianas de la carne.

Se procede a la retirada de las vísceras blancas y rojas, que son colocadas en bandejas que se trasladan simultáneamente con la canal para una posterior inspección veterinaria. Las vísceras blancas se destinan a la zona de tripería, donde son lavadas y acondicionadas para su posterior valorización, generalmente la fabricación de suturas o productos cárnicos (CAR/PL, 2006).

1.1.8. Corte de la canal / Esquinado

Una vez que los animales están eviscerados, se procede a dividirlos en dos canales mediante un corte longitudinal por la columna vertebral con una sierra circular (CAR/PL, 2006).

Obtenidas las medias canales, se procede a su limpieza con agua fría a cierta presión para retirar restos de huesos, sangre, etc., y reducir en la medida de lo posible la contaminación bacteriana superficial.



Figura 1.4 Corte de la canal (SAGARPA, 2009b)

1.1.9. Oreo refrigerado

El oreo consiste en reducir la temperatura de la canal lo más rápidamente posible, operación que se realiza normalmente en dos fases. En la primera fase, las canales se introducen en cámaras de refrigeración a baja temperatura (-3 y 0 °C), con el objetivo de reducir rápidamente el calor corporal de

las canales, que en ese momento es de unos 40 °C. Después de una o dos horas, las canales son almacenadas en cámaras a una temperatura de entre 0 y 4 °C (segunda etapa), donde permanecerán hasta su posterior comercialización. En este punto, las canales o medias canales refrigeradas pueden ser congeladas durante un tiempo variable, enviadas directamente a expedición y al mercado consumidor, o bien ser destinadas a las salas de despiece (CAR/PL, 2006).

1.1.10. Despiece

En las salas de despiece, las medias canales procedentes del matadero son deshuesadas y divididas en partes más pequeñas, según las necesidades de los clientes o del producto cárnico a elaborar posteriormente (CAR/PL, 2006). El despiece se realiza en una sala refrigerada con una temperatura no mayor a los 10 °C.



Figura 1.5 Sala de despiece (PROARCA, 2004)

1.1.11. Refrigeración / Congelación de piezas

Al igual que las canales, en función de si su envío al mercado es inmediato o a medio plazo, las piezas pueden ser refrigeradas o congeladas. En otros casos, tanto refrigeradas como congeladas, el destino de las piezas puede ser las industrias de elaborados cárnicos (CAR/PL, 2006).

1.1.12. Procesos secundarios

El caso de estudio, tiene el objetivo de ser una planta tipo inspección federal (TIF), en esta clase de establecimientos se desarrollan procesos secundarios. Por ejemplo, la cabeza, cuero, grasa, codillo,

hueso de la cola, unto, recorte, hueso de cabeza de lomo y riñón son colectados, empacados a granel, pesados, etiquetados, flejados y por último almacenados en cuartos fríos, para después ser enviados al cliente.

El hueso de fémur se recolecta, se le quitan los pedazos de carne y se empaca a granel, se fleja, pesa y etiqueta para ser almacenado en cuartos fríos y después venderse.

En el proceso de sazonado las piezas de carne congelada se muelen y mezclan con el sazón, se embolsan, pesan y se pre-empacan al vacío, para finalmente pasar a etiquetado, empacado, flejado y almacenado temporalmente hasta ser vendido. Las partes sazonadas son de espaldilla y jamón (KOWI, 2004).

En la Figura 1.6 se muestra el diagrama de flujo del proceso productivo desarrollado en los mataderos de tipo porcino.

1.2. Normas generales para el desarrollo de un rastro tipo Inspección federal (TIF)

A continuación se mencionan las normas oficiales mexicanas que aplican en plantas TIF.

1.2.1. Norma oficial mexicana NOM-004-ZOO-1994

Esta Norma tiene por objeto establecer las bases para la detección y el control de residuos tóxicos en tejidos alimenticios primarios de origen animal y es aplicable a la carne, grasa, hígado y riñón de bovinos, equinos, porcinos y ovinos, provenientes de establecimientos de sacrificio ubicados en el país o de una planta aprobada por la Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos, cuando éstos sean de importación (SAGARPA, 1994a).

1.2.2. Norma oficial mexicana NOM-008-ZOO-1994

Tiene por objeto establecer las especificaciones zoosanitarias para la construcción y equipamiento de establecimientos para el sacrificio de animales y los dedicados a la industrialización de productos cárnicos.

Los apartados que se describen en la norma referentes a plantas TIF, son los siguientes: documentación y planos con que deberá contar el establecimiento; diseño y construcción; iluminación, ventilación y refrigeración.

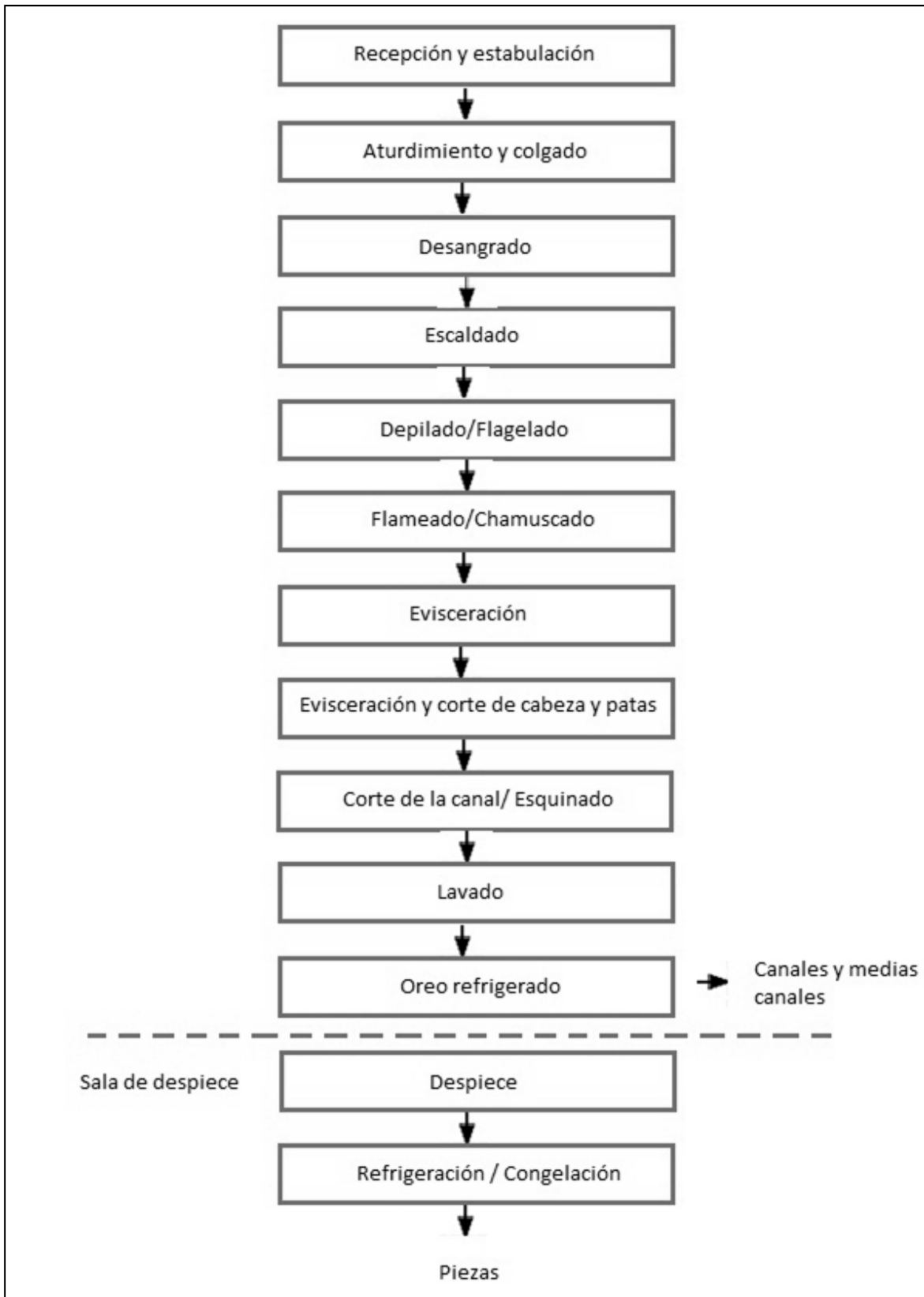


Figura 1.6 Diagrama de flujo para el proceso productivo para porcino (CAR/PL, 2006)

Además del equipo e instalaciones de las áreas de elaboración de productos; facilidades para el lavado de manos, esterilizadores, bebederos, mangueras y áreas de sanitización; procesado de productos comestibles; equipo e instalaciones para establecimientos de sacrificio; instalaciones sanitarias para los empleados; oficina para el médico veterinario oficial; código de colores para tuberías; instalaciones requeridas para el sacrificio de bovinos, ovinos, caprinos, becerros, equinos, aves y porcinos; abastecimiento de agua, drenaje y sistema de disposición de desechos y aguas residuales. El último punto es de interés para el caso de estudio y en él se menciona lo siguiente (SAGARPA, 1994b):

- Para el abastecimiento de agua potable, el de los sistemas públicos será aceptable para el abastecimiento de las plantas, además de asegurar un suministro continuo de agua potable.
- El establecimiento contará con líneas de agua caliente, fría y de vapor. El agua debe distribuirse por toda la planta en cantidad suficiente, con el equipo que garantice una presión constante para asegurar la limpieza de las instalaciones, equipo y producto.
- Las líneas de drenaje de los excusados y de los mingitorios no deberán conectarse con otras líneas de drenaje dentro de la planta ni descargar en trampas de recuperación de grasas.
- Para evitar la contaminación, todos los desechos fecales y aguas residuales de los establecimientos deberán sujetarse a lo que establezcan las disposiciones y autoridades competentes.
- Los materiales de desecho como contenidos estomacales, cerdas, sangre y estiércol de los corrales o corraletas, se eliminarán mediante un sistema aprobado por las autoridades correspondientes, que contemplen tratamientos que garanticen su inocuidad al ambiente.

1.2.3. Norma oficial mexicana NOM-009-ZOO-1994

Esta norma tiene por objeto, establecer los procedimientos que deben cumplir los establecimientos destinados al sacrificio de animales y los que industrialicen, procesen, empaquen, refrigeren productos o subproductos cárnicos para consumo humano, con el propósito de obtener productos de óptima calidad higiénico-sanitaria.

Es aplicable a todos los establecimientos que se dedican al sacrificio de animales para abasto, así como frigoríficos, emparadoras y plantas industrializadoras de productos y subproductos cárnicos (SAGARPA, 1994c).

1.2.4. Reglamento para la industrialización de la carne

Este reglamento aún cuando fue publicado en el diario oficial en el año de 1950 es considerado como un documento de normatividad sanitaria relacionado con el tema de rastros tipo inspección federal.

Está integrado por 16 capítulos y a continuación se menciona cada uno de ellos.

En el capítulo primero se definen las palabras que en el reglamento se van a mencionar constantemente y que tienen una connotación específica; el capítulo segundo se denomina instalación, funcionamiento e inspección; de las condiciones esenciales para todo establecimiento es el título tercero; la inspección del ganado en pie trata el capítulo cuarto. El capítulo quinto se titula de la inspección post-mortem; el capítulo sexto, del destino de las canales, partes y órganos enfermos; del uso de preservativos y conservadores permitidos es el tema que trata el capítulo séptimo; el capítulo octavo se denomina manejo, tratamiento y destino de los animales muertos, canales, sus partes y productos decomisados; el capítulo noveno se llama tratamiento o destrucción de carne con triquina y de sus productos que la contengan. El capítulo décimo se titula del uso de sellos, marcas, rótulos o etiquetas en la identificación de la carne y sus productos; el capítulo undécimo de la re-inspección de los establecimientos; transporte y conducción es el título del capítulo décimo segundo. El capítulo décimo tercero se nombra de la importación; el capítulo décimo cuarto se titula de la exportación; el capítulo décimo quinto se titula inspección y manipulación de la carne de equino y sus productos; el capítulo décimo sexto incluye las sanciones (Jaimes, 2005).

2. ANÁLISIS Y DIAGNÓSTICO DE LA SITUACIÓN ACTUAL Y PREVISIONES

SIN EL PROYECTO

El proceso de sacrificio de animales para la obtención de carne es una actividad económica importante y tomando en cuenta los patrones alimenticios de la población se demanda el continuo funcionamiento de instalaciones donde se lleven a cabo estos procesos (Reyes, 2009). En México el consumo per cápita de carne de cerdo es de 14 kg y se prevé que del 2011 al 2018 el consumo oscile entre 13.9 y 14.7 kg mientras que el consumo per cápita de carne de bovino es de 17.2 kg y se pronostica que el consumo del 2011 al 2018 fluctúe entre 16.9 y 17.1 kg (SAGARPA, 2009a). La producción de carne en canal del año 2005 al 2010 en México se muestra en la Tabla 2.1, se observa que la carne de bovino tiene un mayor aporte a nivel nacional con el 71.60% mientras que la carne de porcino tiene el 27.82% en 2010. Estos datos se obtuvieron a partir de la recolección de datos de 892 rastros municipales.

Tabla 2.1 Producción nacional de carne en canal (INEGI, 2011)

Año	2005	2006	2007	2008	2009	2010
	Miles de pesos					
Total	26,412,183	26,746,308	28,412,083	29,098,625	29,784,064	29,835,661
Ganado bovino	17,754,127	17,844,502	18,789,082	19,148,254	21,377,485	21,362,036
Ganado porcino	8,422,655	8,653,577	9,375,163	9,718,719	8,241,268	8,299,309
Ganado ovino	134,425	143,439	146,270	128,257	100,501	110,019
Ganado caprino	100,976	104,790	101,568	103,395	64,810	64,297

En el Estado de México, la composición de la producción de carne de canal se muestra en la Tabla 2.2. Se puede apreciar que el aporte de la carne de bovino es de 56.70% mientras que la carne de porcino tiene el 42.65%.

Los establecimientos donde se lleva a cabo el proceso de obtención de carne para consumo humano son denominados comúnmente rastros (Rivera, 2000). En la República Mexicana el sacrificio de animales para abasto es realizado en Plantas Tipo Inspección Federal (TIF), en rastros municipales y particulares y en mataderos clandestinos (Villanueva, 1998).

Los establecimientos TIF son cualquier negociación o empresa autorizada por la Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación (SAGARPA) para sacrificar, conservar, beneficiar o aprovechar el ganado de abasto o sus carnes, productos o subproductos. Las plantas TIF en el país son estrictamente vigiladas por las autoridades de la SAGARPA y por las comisiones de países a los que se exporta carne (Villanueva, 1998).

Tabla 2.2 Producción en el Estado de México de carne en canal (valores en miles de pesos) (INEGI, 2011)

Año	2005	2006	2007	2008	2009	2010
	Miles de pesos					
Total	3,119,522	2,703,102	3,215,849	2,730,293	2,859,376	2,725,581
Ganado bovino	1,789,369	1,540,843	1,867,225	1,538,104	1,769,285	1,545,386
Ganado porcino	1,283,663	1,126,998	1,316,330	1,171,503	1,076,227	1,162,643
Ganado ovino	38,646	32,349	31,545	20,255	13,676	17,403
Ganado caprino	7,844	2,912	749	431	188	149

Los rastros son todos aquellos establecimientos dedicados al sacrificio y faenado de animales para abasto con capacidad diaria de sacrificio de al menos 28 cabezas de ganado mayor, ó 56 de ganado menor ó 1,000 aves domésticas, o una combinación considerando la relación de dos cabezas de ganado menor por una de ganado mayor ó de 35 aves domésticas por un animal de ganado mayor, de acuerdo con la definición proporcionada en la NOM-194-SSA1-2004 (Especificaciones sanitarias en los establecimientos dedicados al sacrificio y faenado de animales para abasto, almacenamiento, transporte y expendio).

Los rastros municipales son instalados por los gobiernos de los estados en coordinación con los municipios, cuya inspección sanitaria es controlada por la Secretaría de Salud y la administración se encuentra a cargo del gobierno municipal (INEGI, 2011). Mientras que los rastros particulares deben funcionar bajo la reglamentación de la Secretaría de Salud (Villanueva, 1998).

Los mataderos son establecimientos dedicados al sacrificio y faenado de animales con capacidad menor que los rastros, la cual es establecida en la NOM-194-SSA1-2004 (SSA, 2004). Existen mataderos clandestinos, los cuales no cuentan con un registro por la Secretaría de Salud, las condiciones de operación son sanitariamente riesgosas, no hay un control en el proceso y carecen de las condiciones necesarias que se especifican en las normas relativas al funcionamiento de los mismos (Reyes, 2009).

La Comisión Federal para la Protección contra Riesgos Sanitarios (COFEPRIS) realizó una “Evaluación de riesgos de los rastros y mataderos municipales” en 2006, tomando en cuenta los rastros que se presume proveen de carne a poblaciones con más de 50,000 habitantes. Se registraron 306 establecimientos, como resultado de la evaluación se estima que el costo sanitario aproximado de tener la totalidad de los rastros municipales en el estado actual supera los 2,648 millones de pesos mexicanos anualmente. Es importante señalar que en este estudio no se tuvieron en consideración los costos por enfermedades derivadas de la contaminación del agua por residuos vertidos por los rastros, ni el costo de dicha contaminación ambiental (COFEPRIS, 2006).

2.1. Problemas ambientales generados por los rastros

Dentro de los principales problemas ambientales relacionados con el procesamiento de carne, se encuentra el alto consumo de agua. Ésto es ocasionado porque se deben cumplir estándares higiénicos, es decir el mayor uso de agua en estos procesos se destina a limpieza del ganado antes del sacrificio, del equipo y área de trabajo así como de la carne en canal (COWI, 2001). Dada esta condición y la escasez del agua, la población local compite con los rastros por el agua potable lo que contribuye al aumento de la demanda de nuevas instalaciones hidráulicas (COFEPRIS, 2006).

Otro de los problemas ambientales son las grandes cantidades de agua residual que produce un rastro (COWI, 2001). Este efluente depende del tipo de animal sacrificado, de los métodos de sacrificio, del equipo utilizado, del producto y subproductos, como también de las prácticas locales y costumbres (Castillo y col., 2001). En general, el efluente contiene sangre, excremento, contenido ruminal o estomacal, grasa, plumas y huesos. Estas aguas residuales, vertidas directamente en mantos de agua, generan un ambiente propicio para el desarrollo de moscas y mosquitos capaces de incubar y multiplicar en su cuerpo microorganismos que, posteriormente, podrían ser la causa de enfermedades en el humano, siendo, así, vectores biológicos (COFEPRIS, 2006).

En México, los valores promedio de descarga de los diferentes rastros es muy variada pues existen efluentes de una moderada hasta una fuerte carga de tales contaminantes (Castillo y col., 2001). Cuando el agua residual contiene una cantidad alta de materia orgánica, es propicia para el desarrollo de microorganismos patógenos (*Salmonella* spp., *Shigella* spp.), además de contener, entre otros elementos, huevos de parásitos y quistes de amibas, así como residuos de plaguicidas (presentes en el alimento de los animales), cloro (limpieza de instalaciones), salmuera, entre otros. Resultando ser un

contaminante potencial del suelo y el agua, en el que proliferan los malos olores por la descomposición de la materia orgánica.

En lo que respecta al consumo de energía, la energía térmica en forma de vapor y agua caliente se utiliza para la limpieza y esterilización, mientras que la electricidad se usa para la operación de la maquinaria, refrigeración, ventilación, iluminación y de ser el caso para comprimir el aire.

Al igual que el consumo de agua, el uso de energía para refrigeración y esterilización contribuye a garantizar la calidad de la carne obtenida. Como consecuencia se encuentra la contaminación del aire y la emisión de gases de efecto invernadero por el consumo de combustibles fósiles para producir la energía requerida en este proceso (COWI, 2001).

2.1.1. Consumo de agua

El agua potable es un elemento indispensable en los rastros o mataderos pues se requiere en los siguientes pasos del proceso de obtención de carne:

- Bebida del ganado
- Limpieza o baño del ganado
- Lavado del transporte en el que los animales llegan al rastro
- Escaldado en la producción de cerdos y aves (para facilitar la eliminación de pelos y plumas)
- Lavado de la superficie del animal, posterior al escaldado (aves y cerdos)
- Remoción de piel (según sea el caso)
- Lavado en la evisceración de la canal
- Lavado de la canal
- Transporte de algunos subproductos y residuos
- Limpieza y esterilización de cuchillos y equipo
- Limpieza de pisos y superficies de trabajo

- Enfriamiento de maquinaria (compresoras, condensadores, entre otros)
- Proveer el líquido a los calefactores

El consumo de agua en cada etapa es variable, los factores que afectan este consumo son las prácticas de limpieza, el tamaño de la planta, la modernidad del tipo de proceso, nivel de automatización, la variedad de especies que se faenan e incluso, el tipo de usos y costumbres con los que estén familiarizados los trabajadores (COFEPRIS, 2006).

Los datos disponibles del consumo de agua en esta industria para México (Tabla 2.3) se basan en un estudio realizado por la FAO “Manual para la instalación del pequeño matadero modular”. Debido a que los procedimientos que se aplican en el mencionado estudio son similares a los que se desarrollan en este país (Reyes, 2009).

Tabla 2.3 Consumo de agua en rastros estimada en México (COFEPRIS, 2006)

Especie	Agua promedio requerida (litros/animal)
Animales mayores	1,000
Porcinos	450
Ovinos y caprinos	100

El consumo de agua en México necesario para abastecer a los rastros que proveen de carne a localidades con más de 50,000 habitantes es de aproximadamente 22´734,560 L/día. Los estados que consumen mayor cantidad de agua son Jalisco, Estado de México, Aguascalientes, Guanajuato, Veracruz y Yucatán, los cuales acumulan el 59.1% del consumo nacional de agua de los rastros municipales diariamente, lo que equivale a 13´440,910 litros. El resto de los estados contribuyen a las necesidades de agua con porcentajes menores o iguales a 4.2% (COFEPRIS, 2006). En la Tabla 2.4 se muestra el consumo de agua de los estados antes mencionados, el porcentaje de consumo respecto al total nacional y el número de individuos necesarios para generar ese consumo de agua. Considerando que 163 L/día·persona es la cantidad requerida y que proporciona bienestar de acuerdo al Plan maestro de agua potable del Distrito Federal 1997-2010.

2.1.2. Generación de aguas residuales

El volumen de efluente generado es un reflejo del volumen de agua utilizada, del 80 al 95% del agua utilizada en los rastros es descargada como efluente (COWI, 2001). La Tabla 2.5 se indica el uso del agua en diferentes procesos así como los desechos generados en cada uno de éstos.

Tabla 2.4 Consumo de agua total por estado, elaboración propia a partir de datos (COFEPRIS, 2006)

Estado	Consumo de agua (L/día)	%	No. de personas
Jalisco	3,005,420	13.2	18,439
Estado de México	2,791,270	12.3	17,125
Aguascalientes	2,634,900	11.6	16,166
Guanajuato	2,025,850	8.9	12,429
Veracruz	1,690,470	7.4	10,371
Yucatán	1,293,000	5.7	7,933
Total nacional	22,734,560	100	139,476

Tabla 2.5 Diagrama de flujo por operaciones en el proceso de obtención de carne (COFEPRIS, 2006)

Insumos	Pasos del proceso	Desechos generados
Agua	Recepción y manejo del ganado	Estiércol, aguas residuales, Animales muertos, camas de paja
	Inspección ante-mortem	Animal sospechoso y/o rechazado
Agua	Aturdimiento y sacrificio	Sangre y agua residual
Agua	Remoción del cuero, depilado	Pelo, pezuñas, agua residual
Agua	Evisceración	Vísceras, contenido gastrointestinal, agua residual
Agua	Inspección post-mortem	Vísceras y agua residual
Agua	Detallado y lavado de la canal	Grasa, pedazos pequeños de carne, Agua residual

El agua residual del proceso de obtención de carne generalmente muestran las siguientes características (COWI, 2001):

- Alta carga orgánica debida a la presencia de sangre, grasa, excremento y contenido estomacal
- Altos niveles de grasa
- Fluctuaciones en el pH debido a la presencia de agentes de limpieza
- Altos niveles de nitrógeno, fósforo y sal
- Temperatura alta

La concentración de contaminantes en el agua residual de los rastros varía significativamente de uno a otro, pues depende del tipo y cantidad de especies que se procesen, así como de los residuos desechados y el tipo de tecnología utilizada. Sin embargo es posible obtener características promedio del agua residual de acuerdo al tipo de especie sacrificada en la planta, tal como se muestra en la Tabla 2.6.

Tabla 2.6 Concentraciones promedio de contaminantes en el agua residual de plantas de sacrificio por especie (Reyes, 2009)

Parámetro	Porcinos	Bovinos	Aves	Mixto
pH	7.2	7.2	ND	7-8.5
DBO ₅ (mg/L)	1,250	2,000	1,550	-
DQO (mg/L)	2,500	4,000	2,500	1,000-3,000
SST (mg/L)	700	1,600	ND	400-800
Grasas y aceites (mg/L)	150	270	ND	≤350
N (mg/L)	150	180	150-400	≤300
P (mg/L)	25	27	16-50	≤10

En México, únicamente el 37.2% del total del agua residual vertida por los rastros y mataderos municipales que proveen carne a las localidades con más de 50,000 habitantes, pasa previamente por un tanque de tratamiento, el resto se desecha directamente al drenaje, canales, arroyos, vía pública o fosas, sin las medidas precautorias requeridas.

Sin embargo, existen limitantes en el funcionamiento de los tanques de tratamiento. Una de ellas es el desconocimiento de su funcionalidad, capacidad y tiempos de mantenimiento. La otra es que no se tiene información del destino de las aguas residuales una vez fuera del tanque de tratamiento. Los estados que contribuyen con mayor porcentaje de agua vertida en tanques, a nivel nacional, son: Jalisco, Aguascalientes, Veracruz, Yucatán, Guanajuato y Coahuila que, en conjunto, suman 30.8% del total de agua nacional.

La cantidad de agua residual que se vierte directamente al drenaje público es del 72.6% del total de las aguas residuales no tratadas en México. Los estados que más contribuyen a esta forma de remanentes son, en cantidad de agua vertida, Estado de México, Aguascalientes, Jalisco, Guanajuato y Nuevo León. Los cuales concentran el 40.8 % del total del agua residual sin tratamiento (COFEPRIS, 2006).

Respecto al agua residual sin tratar que se vierte en canales, arroyos o vía pública, el porcentaje es de un 24% del volumen total. Los estados que más contribuyen en aguas residuales de rastros, con

aproximadamente un 12% de este total, son Guanajuato, Michoacán y Puebla. El porcentaje de agua residual sin tratamiento que se vierte en fosas es de 3.2% y el estado que genera mayor contribución a nivel nacional es Querétaro.

Una manera de visualizar la magnitud de la contaminación generada es que un vacuno ó 2.5 cerdos faenados, equivalen a la contaminación producida por una población de 70-200 habitantes. Por lo que se puede inferir que la totalidad de las aguas residuales vertidas por los rastros o mataderos, que no realizan un tratamiento previo, generan una contaminación diaria equivalente a una población como la del estado de Baja California.

El costo anual por el tratamiento del agua residual que producen los rastros en México que proveen de carne a localidades con más de 50,000 habitantes, es de US\$ 1'296,194, considerando un volumen anual vertido de 15'010,567 litros de agua residual. Los estados que deberían invertir una mayor cantidad de dinero por el tratamiento del agua son el Estado de México, con US\$ 223,266; seguido por Aguascalientes, con US\$ 144,711; Guanajuato, con US\$ 117,688; Jalisco, con US\$ 89,575; Michoacán, con US\$ 82,361; Puebla, con US\$ 69,679, y Querétaro, con US\$ 42,632.

El costo de tratar el agua antes de verterla al drenaje y/o a los cuerpos de agua (medida preventiva) es mucho menor que el costo que tendría reparar el impacto ambiental generado, así como sus consecuencias en la biodiversidad y la salud humana (COFEPRIS, 2006).

2.1.3. Consumo de energía

El consumo de energía es uno de los aspectos de mayor preocupación en los rastros industriales, debido al alto costo que conlleva el uso de combustible para generar energía térmica. El consumo de electricidad, principalmente es por el uso de sistemas de refrigeración. En el caso de la energía térmica, la generación de emisiones directas en la planta de procesos es proporcional a la cantidad de combustible quemado para la combustión en las calderas. En el caso de la energía eléctrica, su consumo también genera emisiones indirectas por la demanda de energía en la planta de generación eléctrica (PROARCA, 2004).

Las principales emisiones a la atmósfera se generan en la producción de vapor de agua caliente y en las actividades de escaldado y cocción, y están principalmente compuestas por los gases de combustión CO₂, NO_x, SO_x y CO.

La emisión de CO₂ se relaciona directamente con el consumo de energía térmica. La cantidad emitida de CO₂ dependerá del consumo específico de combustible.

La emisión de NO_x se relaciona con la composición del combustible y con las condiciones de combustión (la temperatura de combustión, el exceso de aire, la forma de la llama, la geometría de la cámara de combustión o el diseño del quemador).

Las emisiones de SO₂ dependen principalmente del tipo de combustible y de su composición. Las instalaciones que utilizan sólo gas natural no producen emisiones de azufre o no son significativas.

Los que emplean combustóleo emiten el azufre contenido en el combustible. Actualmente, la mayoría de las instalaciones consumen combustóleo de bajo índice de azufre (BIA), con un contenido de este compuesto inferior al 1 %.

Las emisiones de CO son poco significativas en el sector cárnico, y están asociadas al funcionamiento incorrecto de calderas o a combustiones incompletas (CAR/PL, 2006).

2.1.4. Decomisos

Los decomisos son órganos y partes de la canal que no son aptos para el consumo humano, porque pueden ocasionar riesgos a la salud, por tanto, se consideran como desechos sólidos que deben ser tratados, comúnmente se incineran.

En México, solamente el 44% de los rastros y el 35% de los mataderos municipales que proveen carne a las localidades con más de 50,000 habitantes, incineran las vísceras decomisadas. Aproximadamente el 65% de los decomisos son eliminados en basureros. Sin embargo, las cifras parecen optimistas pues menos del 30% de los rastros y sólo el 10% de mataderos poseen incineradores en funcionamiento para realizar estas labores (COFEPRIS, 2006).

Esta página se dejó en blanco intencionalmente.

3. ANÁLISIS DE LA SITUACIÓN AMBIENTAL EN RASTROS

El rastro de Mexicaltzingo actualmente está en construcción, lo que facilita la implementación de las variantes necesarias en las instalaciones sanitarias para evitar la problemática ambiental generada por la mayoría de los rastros en México.

3.1. Plan y estrategias de sustentabilidad ambiental

El desarrollo sostenible no es exclusivo de cuestiones ambientales, de acuerdo a la Organización de las Naciones Unidas los tres componentes del desarrollo sostenible son el crecimiento económico, el desarrollo social y la protección al medio ambiente, los cuales son pilares interdependientes que se refuerzan mutuamente (ONU, 2004). El presente proyecto tiene aportaciones ambientales, sociales y económicas, pues se espera que las acciones a realizar se traduzcan en oportunidades para mejorar la calidad de vida de las personas que viven en la periferia, preservando su capital económico, ecológico y cultural. A continuación se presenta el plan de sustentabilidad ambiental propuesto para el rastro.

Con base en los rubros prioritarios, se han identificado cuatro temas: gases de efecto invernadero y emisión de olores, consumo de agua, generación y tratamiento de residuos sólidos y uso de fuentes renovables de energía. A continuación se describen las acciones a llevar a cabo en cada uno de ellos.

3.1.1. Gases efecto invernadero y emisión de olores

Se contempla el aprovechamiento de los desechos originados en el rastro para evitar las emisiones de Gases de Efecto Invernadero (GEI). Un desecho es un material que no podrá incorporarse al mismo proceso que lo generó. Los desechos enviados a cuerpos acuíferos y cielo abierto producen por su descomposición gases que son emitidos a la atmósfera sin ningún control. Para ello los residuos líquidos se convertirán en la materia prima para generar energía. Los residuos al ser tratados se incorporarán al proceso o procesos externos, capturando los gases para convertirlos en un potencial energético para la producción de energía térmica y/o eléctrica que el mismo rastro consumirá.

La emisión de malos olores se evitará tomando las siguientes medidas (PROARCA, 2004):

- Mejorar la higiene operacional

- Remover frecuentemente las grasas acumuladas, lodos del sistema de tratamiento, entre otros materiales que sean generadores de malos olores
- Acortar el tiempo de matanza
- Guardar un mínimo de existencias de materia prima y almacenarlo cerrado y bien ventilado

En caso de ser necesario, utilizar productos 100% biodegradables a base de bacterias lácticas que aceleran el proceso de descomposición mediante fermentación o aumento de microorganismos por unidad para acelerar el proceso. Estas bacterias pueden usarse directamente sobre los emisores de olores, en tuberías y tanques con buenos resultados.

3.1.2. Consumo de agua y efluente

El agua es utilizada abundantemente en el proceso de obtención de carne, por lo tanto las medidas de ahorro de agua son oportunidades comunes para lograr la Producción más Limpia, la cual consiste en la aplicación continua de una estrategia de prevención ambiental a los procesos y a los productos con el fin de reducir riesgos tanto para los seres humanos como para el medio ambiente (PNUMA, 2011). El primer paso es analizar los patrones de consumo de agua mediante la instalación de medidores de agua y registrar el consumo con regularidad. Los datos de consumo se deben recolectar durante las horas de producción, especialmente en los períodos de limpieza, algunos datos deber ser tomados también fuera del horario normal para identificar fugas o algún área de gasto innecesario. Los datos de consumo de agua deben ser presentados y discutidos en las reuniones de gestión para formular estrategias que mejoren la eficiencia del gasto de agua.

También se debe realizar un estudio de toda el área de procesos y operaciones auxiliares para identificar las prácticas no adecuadas. Algunos ejemplos son: dejar las llaves de las mangueras abiertas cuando no estén en uso, utilizar caudales excesivos para realizar alguna parte del proceso, entre otros. La instalación de un control automático para abrir y cerrar las llaves de las mangueras y reductores de caudal podría evitar el desperdicio de agua (COWI, 2000).

Se debe investigar el uso del agua en los procesos esenciales. Es probable que sea difícil establecer el consumo mínimo necesario para mantener las operaciones del proceso y cumplir con las normas higiénicas en la producción de alimentos. El consumo mínimo sólo puede establecerse a través del estudio de cada proceso y ensayos al respecto. Las investigaciones deben llevarse a cabo en colaboración

con los directores de producción, calidad de los alimentos, los representantes de seguridad y personal de operaciones. Cuando la tasa de utilización óptima se ha acordado, se tomarán medidas para ajustar los mecanismos y evitar el control manual.

En lo que respecta a la reutilización, el agua residual que se encuentren ligeramente contaminada puede utilizarse en otras áreas. Por ejemplo, el agua que se descongela de los sistemas de refrigeración y la utilizada en las bombas de vacío esta generalmente limpia, y podría ser reutilizada en áreas no críticas. El agua utilizada en el lavado de las canales puede ser reciclada. El efluente resultado del tratamiento del agua residual proveniente del rastro puede ser utilizado para el lavado de los corrales u otras áreas.

La reutilización de las aguas residuales tratadas no debe comprometer la calidad de los productos. Los sistemas de reutilización deben ser instalados adecuadamente para evitar una confusión entre las líneas de agua potable y las de aguas residuales tratadas. La calidad del agua residual debe cumplir con las normas vigentes (COWI, 2000).

Otros lineamientos a seguir para disminuir el consumo de agua son (COWI, 2000; PROARCA 2004):

- Realizar la limpieza en seco antes del lavado con agua en las áreas de procesos de pre-limpia y suelos. Los materiales sólidos deben ser recolectados de las superficies a lavar y ser enviados a su tratamiento final.
- Lavar superficies de trabajo, paredes y pisos con detergentes biodegradables.
- Instalación de boquillas de pulverización de alta presión y bajo volumen.
- El uso de alta presión en lugar de alto volumen para la limpieza de superficies. Se recomienda una presión de 25 a 30 bar.
- Sustituir periódicamente las boquillas de rociado de las mangueras utilizadas en las operaciones de limpieza.
- Reutilización de aguas residuales relativamente limpias en los sistemas de refrigeración, bombas de vacío y para el lavado de ganado, siempre y cuando se cumplan con las normas vigentes.
- Volver a utilizar el enjuague final de las operaciones de limpieza para el enjuague inicial al día siguiente.

- Utilizar los sistemas de control automático para operar en el flujo de agua en las estaciones de lavado de manos y esterilización de cuchillos u otros instrumentos.
- Realizar el mantenimiento de válvulas y tuberías para prevenir fugas.
- Capacitar y supervisar permanentemente a los trabajadores en las prácticas nuevas de limpieza. El consumo de agua puede ser reducido de 10 a 50% con sólo incrementar la conciencia de los trabajadores y mostrándoles cómo reducir el consumo innecesario de agua.

En lo relativo al efluente, las acciones se concentran en reducir la carga contaminante. Una cuestión importante es el volumen de las aguas residuales generadas pero dado que éstas son proporcionales al agua consumida, la reducción en la cantidad de agua empleada se traducirá en un menor volumen del efluente. Las medidas para reducir la carga contaminante del efluente deben evitar la descarga de sustancias tales como sangre, contenido sin digerir del estómago del animal a sacrificar, grasa y restos de carne en el agua residual. Ésto significa impedir que este tipo de residuos lleguen al alcantarillado y utilizar métodos de limpieza en seco siempre que sea posible (COWI, 2000).

Puesto que la sangre es una de las principales fuentes de contaminación orgánica de los mataderos, su recuperación es una iniciativa de producción limpia importante, la recuperación de sangre pueden disminuir la carga orgánica en un 40% (Jones, 1974).

Otras medidas para reducir la carga orgánica del efluente son:

- Maximizar la separación de la sangre mediante el diseño de instalaciones adecuadas para su extracción y con tiempo suficiente para el sangrado, por lo general siete minutos.
- Barrer el material sólido para su uso como subproductos, en lugar de lavarlos y mezclarlos con los efluentes.
- Ajustar los desagües con pantallas y/o trampas para evitar que los materiales sólidos entren en el sistema de efluentes.
- Utilizar los sistemas de transporte de despojos que eviten o minimicen el uso del agua.
- Usar rociadores de agua con una presión inferior a 10 bar de la canal de lavado para evitar la eliminación de la grasa de la superficie.

- Utilizar técnicas de limpieza en seco de las áreas de procesos de pre-limpia y suelos antes de lavar con agua.

3.1.3. Residuos sólidos

Casi todos los residuos sólidos generados son recuperables, a excepción de los lodos de las plantas de tratamiento de las aguas residuales y el estiércol proveniente de los corrales. Estos residuos tendrán un tratamiento adecuado de bajo a nulo mantenimiento y operación. Ésto evitará que sean arrojados a cielo abierto, lo cual tiene un alto impacto ambiental en suelo y cuerpos acuíferos. Asimismo los desechos a cielo abierto generan gases efecto invernadero sin control. . La ingeniería conceptual para definir el tipo de tratamiento esta fuera de los alcances de este estudio.

3.1.4. Energía

A partir del tratamiento de los desechos líquidos por un sistema de anaerobio, se obtendrá como producto biogás que será aprovechado en el rastro para obtener energía térmica y/o eléctrica según convenga. Además del uso de energía renovable, se implementarán directrices para el uso eficiente de la energía, las cuales se mencionan a continuación (COWI, 2000; PROARCA, 2004):

- Instalar iluminación de bajo consumo y alta eficiencia.
- Instalar sensores para desactivar o apagar las luces y equipos cuando no estén en uso.
- Instalar luminarias agrupadas en circuitos, para permitir el uso independiente de acuerdo a las necesidades.
- Mejorar el aislamiento de calefacción, refrigeración y tuberías, además de instalar alarmas que detecten cuando las puertas de la cámara de refrigeración estén abiertas.
- Aislar y cubrir los tanques de escaldado.
- Recuperar el calor residual de las corrientes de aguas residuales, de ventilación, extractores y compresores.
- Recuperar calor de las corrientes de vapor de desecho y compresores. Utilizar evaporadores de efectos múltiples, en caso de ser necesario.

- Mantener libre de fugas de aire comprimido.
- Favorecer la compra de equipo con alta eficiencia energética. La instalación de bombas eficientes pueden reducir el consumo de energía en más del 50% comparado con las bombas estándares.
- Mejora continua del plan de mantenimiento para maximizar la eficiencia energética de los equipos.
- Mantener la eficiencia óptima de combustión en las calderas. Controlar los parámetros de operación para evitar variaciones en las variables de trabajo que afecten la eficiencia de las mismas.
- Eliminar las fugas de vapor.

En la Tabla 3.1 se presenta un resumen de la situación ambiental generada por los rastros, su causa y la propuesta para disminuir el impacto ambiental.

Tabla 3.1 Situación ambiental generada por rastros

Situación	Causa	Propuesta
Generación de gases sin control (GEI)	Inadecuada disposición de residuos líquidos y sólidos	Tren de tratamiento para aguas residuales
Consumo de agua	Altos consumo de agua para cumplir con estándares higiénicos	Mantenimiento adecuado en tuberías, lavado en seco, instalación de boquillas de alta presión y bajo volumen, entre otras
Residuos sólidos	Estiércol proveniente de los corrales de recepción. Órganos y partes de la canal no aptos para consumo humano	Tratamiento anaerobio de bajo a nulo mantenimiento.
Consumo de energía	Quema de combustibles fósiles y emisiones indirectas por la demanda de energía a la planta de generación eléctrica	Aprovechamiento del biogás obtenido en el tratamiento de residuos líquidos

3.2. Condiciones y mecanismos de utilización de equipos de energías renovables

Las energías renovables son aquellas que se regeneran y se espera que perduren por cientos o miles de años, éstas se basan en los flujos y ciclos implícitos en la naturaleza. Así mismo, se consideran de libre

disposición, se distribuyen en amplias zonas y tienen impactos ambientales poco significativos. Entre este tipo de energía se encuentran la eólica, solar, minihidráulica, geotermia y bioenergía (SENER, 2009).

La bioenergía resulta cuando los combustibles de la biomasa de reciente origen biológico son usados para fines energéticos. La biomasa es la materia orgánica contenida en productos de origen vegetal y animal, incluyendo los desechos orgánicos, que puede ser capturada y usada como una fuente de energía química almacenada. Un sistema anaerobio involucra la descomposición de desechos orgánicos por una bacteria en un ambiente libre de oxígeno, ésto produce un gas rico en metano que puede ser usado para generar calor y/o electricidad, conocido como biogás (IILSEN, 2004).

Para el aprovechamiento del biogás se considera el consumo total de energía del rastro, el cual dependerá de los tipos de actividades que ocurren en él. Por ejemplo, el escaldado es un proceso que consume energía y es específico de los mataderos de cerdos. Aproximadamente el 80-85% de la necesidad total de energía de un matadero es energía térmica en forma de vapor o agua caliente, producida a partir de la quema de combustible en las calderas del sitio. El porcentaje de consumo de cada proceso se indica en la Tabla 3.2, se asume que el tratamiento de los subproductos y el escaldado forman parte del proceso.

Tabla 3.2 Desglose del consumo de energía térmica de plantas de sacrificio (COWI, 2001)

Áreas de consumo	Porcentaje del total %
Tratamiento de los subproductos	42%
Pérdidas en la caldera	25%
Agua caliente	14%
Escaldado	3%
Secado de la sangre	3%
Otros	13%

El restante 15-20% del consumo energético es por energía eléctrica. La Tabla 3.3 muestra un desglose indicativo de uso de la electricidad en un matadero. Como se puede observar, el consumo en refrigeración es una proporción significativa del consumo de electricidad (COWI, 2001).

Dado que el mayor consumo energético de un rastro es de tipo térmico, el aprovechamiento de biogás, es una opción importante para lograr la sustentabilidad y formar un ciclo en el que se disminuya la emisión de GEI al mismo tiempo que se protegen y preservan las aguas.

Tabla 3.3 Desglose del consumo de electricidad de plantas de sacrificio (COWI, 2001)

Áreas de consumo	Porcentaje del total
Refrigeración	59%
Cuarto de calderas	10%
Procesos de subproductos	9%
Área de sacrificio	6%
Aire comprimido	5%
Sala de deshuesado	3%
Otros	8%

Para el caso del rastro en construcción de Mexicaltzingo se propone un tren de tratamiento para los desechos líquidos que consiste en un proceso anaerobio y otro aerobio como unidades principales de degradación de la carga de la materia orgánica de los residuos. Además, el diseño se complementará con las instalaciones necesarias para transformar el biogás en energía eléctrica y térmica, esta última para sustituir el gas LP, que se utiliza comúnmente para pailas y flameado.

Para entender las barreras técnicas que enfrenta el uso de biogás en México, primero hay que tener una idea de cómo se genera el biogás y para ellos es necesario entender cómo funciona un sistema anaerobio. Este sistema aparentemente simple es una tecnología relativamente nueva que ha sido puesta en práctica en varios sitios alrededor del mundo. Sin embargo, cada sistema anaerobio es diferente debido a los animales que contribuyen a su contenido y su ubicación. Por lo tanto, cada sistema debe ser diseñado individualmente para asegurar el funcionamiento apropiado (Lokey, 2007).

La ubicación del sistema anaerobio es quizás el parámetro más significativo para que funcione. Los sistemas que son instalados a grandes altitudes o en temperaturas frías o en un sitio con lluvia frecuente, pueden reducir su temperatura, disminuyendo la eficiencia en la producción de metano, sustancial componente del biogás. (Lokey, 2007). A continuación se describe el tratamiento de residuos líquidos industriales. Este tema es trascendente porque a partir de una fase del tren de tratamiento de residuos líquidos se obtendrá el biogás necesario para producir calor y energía eléctrica.

3.2.1. Tratamiento de desechos líquidos industriales

Las aguas residuales de un número significativo de industrias en las que se incluyen químicas, farmacéuticas y agroalimentarias poseen una alta carga orgánica en su composición. Lo cual conlleva a que los principales procesos de tratamiento estén enfocados a la eliminación de la composición orgánica. Los métodos usados para el tratamiento de aguas residuales se denominan operaciones y procesos

unitarios. Las operaciones unitarias incluyen remoción de contaminantes por fuerzas físicas. Los procesos unitarios consisten en la utilización de reacciones biológicas y químicas (González, 2008). En una planta de tratamiento típica el agua residual es dirigida a través de una serie de tratamientos (tren de tratamiento) que pueden ser físicos, químicos y biológicos, cada uno de los cuales posee una función para reducir una carga contaminante específica. Estas funciones son típicamente las mostradas en la Tabla 3.4 (Kiely, 1998).

En la Tabla 3.5 se muestran las operaciones y procesos unitarios para tres tipos de aguas residuales: Urbanas, químicas y alimentarias. En ella se muestra el tren de tratamiento para cada tipo de agua residual, dado que poseen características diferentes entre sí, es importante la elección adecuada del procedimiento a emplear para lograr resultados óptimos.

Tabla 3.4 Categoría del tratamiento, tipo de tratamiento y procesos unitarios en el tratamiento de aguas residuales industriales (elaborado a partir de Rivera, 2000)

Categoría del tratamiento	Tipo de tratamiento	Operaciones y procesos unitarios
Pretratamiento	Físico y/o químico	Rejillas Desarenadores Homogeneización Tanques de preaeración
Tratamiento primario	Físico	Tanques sépticos Tanques de sedimentación simple
Tratamiento secundario	Biológico	Procesos anaerobios Procesos aerobios
Tratamiento terciario y/o avanzado	Físico y/o químico y/o biológico	Adsorción en carbón activado Intercambio iónico Osmosis inversa Cloración Ozonación

3.2.2. Sistemas de tratamiento empleados en desechos líquidos de rastros

La Figura 3.1 muestra un posible sistema de tratamiento de los desechos líquidos y sólidos generados en un rastro. El tren de tratamiento para la totalidad del agua residual comprende un pretratamiento, que consiste en una trampa de grasas y rejillas. Un proceso anaerobio, en donde se produce biogás, seguido de uno aerobio y finalmente su posterior vertido. A continuación se explica con mayor detalle cada uno de estos procesos.

Tabla 3.5 Tren de tratamiento para tres tipos de agua residuales: Urbanas, químicas y alimentarias (adaptado de Kiely, 1998)

Categoría del tratamiento	Agua residual urbana	Agua residual de la industria química	Agua residual de la industria láctea
Pretratamiento físico	Homogeneización Reja de gruesos Reja de finos Eliminación de arenas	Homogeneización Lavado con aire Oxidación/reducción Flotación	Reja de gruesos Reja de finos Eliminación de arenas Flotación
Pretratamiento químico	Ninguno	Neutralización	Neutralización
Tratamiento primario	Tratamiento primario	Clarificación primaria	No se aplica
Tratamiento secundario	Tratamiento biológico Lodos activados Filtros percoladores Lagunas aireadas Clarificación secundaria	Lodos activados biológicos	Biotorres Lodos activados
Tratamiento terciario	Filtros de arena	Filtros de arena	Filtros de arena
Eliminación de nutrientes	Biológico Químico Biológico	Adsorción Oxidación química Ozonización	No se aplica

3.2.2.1. Sistemas de tratamiento empleados en desechos líquidos

3.2.2.1.1. Pretratamiento (sistemas de tratamiento primario)

Antes del tratamiento anaerobio, el agua residual de rastro debe ser sometida a un pretratamiento que tiene como objeto separar la mayor cantidad posible de materia que dada su naturaleza o tamaño, generaría problemas en los tratamientos posteriores (López y Casp, 2003). Además los procesos de tratamiento anaerobio pueden ser más eficaces si la grasa y los sólidos suspendidos son removidos por un pretratamiento (Mittal, 2006).

3.2.2.1.1.1. *Rejillas de desbaste*

El objetivo es la separación de sólidos flotantes de gran tamaño para proteger las distintas unidades subsecuentes de posibles obstrucciones. Existen cuatro tipos de rejillas de uso habitual:

- Rejillas de gruesos: Aberturas mayores a 6mm.

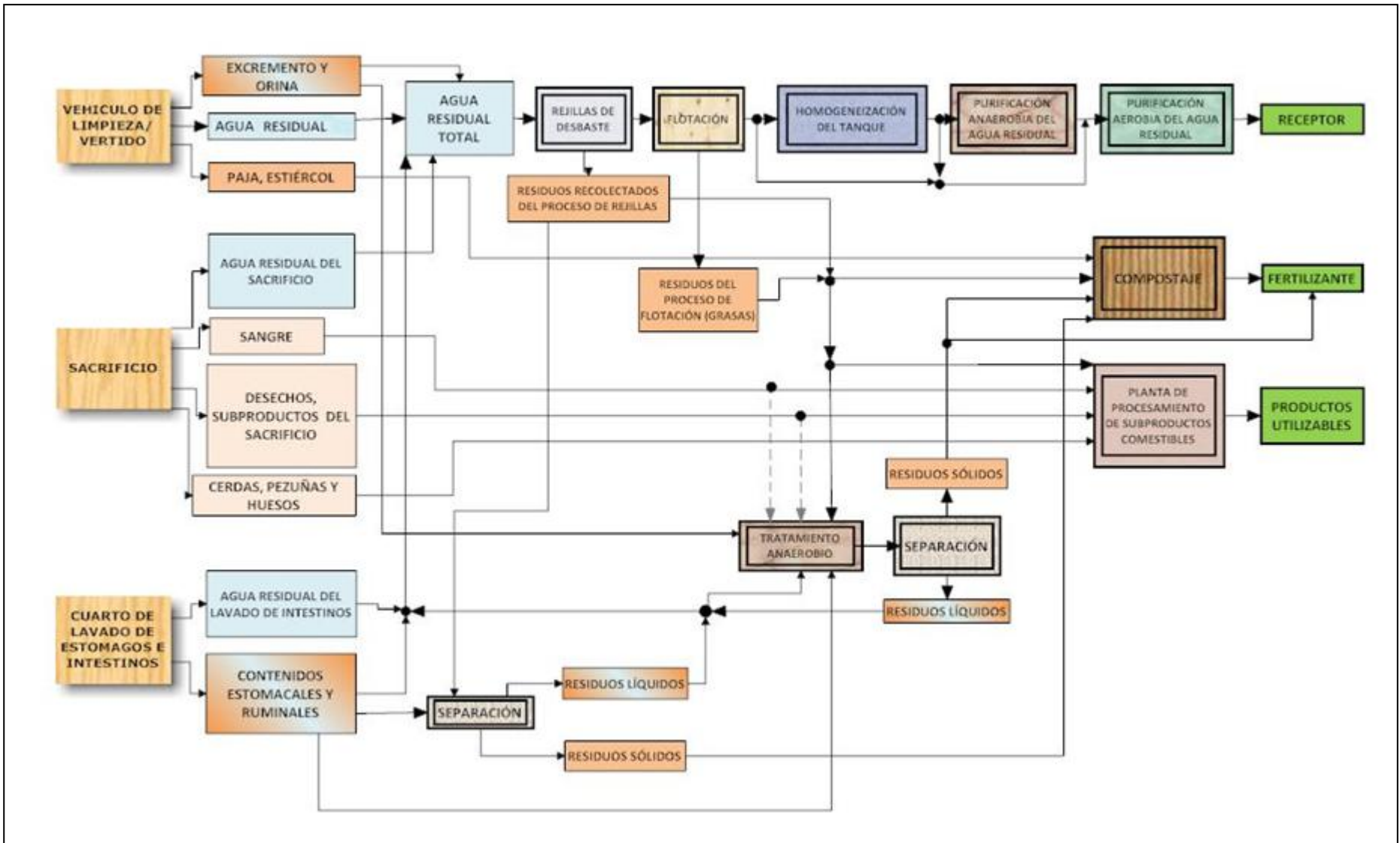


Figura 3.1 Sistema sugerido de depósito de residuos líquidos y sólidos en un rastro.

- Rejillas de finos: Aberturas en un rango entre 1.5 a 6 mm. La abertura más utilizada en mataderos está entre 1 y 2 mm (López y Casp, 2003)
- Rejillas de extrafinos: Aberturas en un rango entre 0.2 y 1.5 mm.
- Microtamices: Aberturas en un rango entre 0.001 a 0.3 mm. Éstos no se emplean en un pretratamiento sino como proceso de tratamiento de una sola etapa para aguas residuales con un contenido predominantemente inorgánico.

3.2.2.1.1.2. Flotación

Es el proceso unitario de separación basado en la capacidad para flotar de partículas sólidas en una fase líquida. Este proceso implica el aporte de burbujas de aire por la parte inferior en los recipientes de flotación. Estas burbujas de aire se adhieren a la materia sólida y la capacidad del conjunto para flotar provoca que las partículas se eleven hasta la superficie donde son recogidas con rasquetas (Kiely, 1998). En los sistemas de flotación se incluyen:

- Flotación por gravedad. Se acompaña por la denominada <<trampa de grasas>> o una serie de ellas. El residuo líquido fluye a través de cámaras y debido a que las partículas de grasa son más ligeras que el agua, éstas se elevan a la superficie.
- Flotación al vacío. Consiste en saturar con aire el agua residual en el tanque de aireación y posteriormente provocar un vacío parcial en un depósito cubierto, lo que provoca la liberación de burbujas diminutas.
- Electroflotación. Unos electrodos dispuestos en la base del tanque producen unas microburbujas cuando el líquido del tanque es electrolizado por medio de corriente continua. Este proceso tiene un alto costo.
- Flotación por aire disuelto (FAD). El caudal se almacena en un depósito a presión donde se satura con aire, para después ser mezclado con el caudal bruto de la entrada, conforme la presión vuelve a ser atmosférica, el aire disuelto se desprende de la solución formando burbujas finas.
- Flotación por aire. El aire se introduce en el tanque de flotación por medio de un soplante.

3.2.2.1.1.3. Homogenización

El vertido de aguas residuales provenientes de un rastro no es homogéneo, por lo que podría ser necesario realizar una homogenización de varios parámetros, entre los cuales están:

- Homogenización de caudal. Para minimizar las puntas y proveer de una caudal de entrada constante a la planta y de un efluente continuo de la planta al medio o proceso receptor.
- Homogenización orgánica. Para amortiguar las fluctuaciones
- Equilibrado de nutrientes.
- Equilibrado de pH. El pH del agua en los tratamientos biológicos debe mantenerse entre 6.5 y 8.5 para asegurar una adecuada actividad biológica.

3.2.2.1.2. Tratamiento anaerobio (sistemas de tratamiento secundario)

Dado que el agua residual de rastro presenta un alto contenido de materia orgánica biodegradable, los sistemas anaerobios son los más convenientes para el tratamiento de estos efluentes (Malina y Pohland, 1992; Veall, 1993; Caldera y col., 2005; Mittal, 2006).

Las ventajas asociadas con el tratamiento anaerobio de aguas residuales provenientes de rastros incluyen (Tritt y Schuchardt, 1992):

- Considerables reducciones en la concentración de impurezas en el agua
- Baja producción de lodos
- Producción de lodos estables biológicamente
- No hay emisión de olores
- Producción de gas rico energéticamente que puede ser usado en el rastro como sustituto de la energía primaria convencional

Dichos sistemas se pueden clasificar en función de su capacidad para mantener altas concentraciones de microorganismos en el reactor, siguiendo diferentes métodos (IDAE, 2007), los cuales se explican a continuación.

3.2.2.1.2.1. *Reactor de mezcla completa sin recirculación (RMC)*

Consiste en un reactor que mantiene una distribución uniforme de concentraciones, tanto de sustrato como de microorganismos (Figura 3.2). Mediante un sistema de agitación la cual puede ser mecánica o neumática, y nunca violenta. Comparativamente a otros reactores, el tiempo de retención necesario es alto.

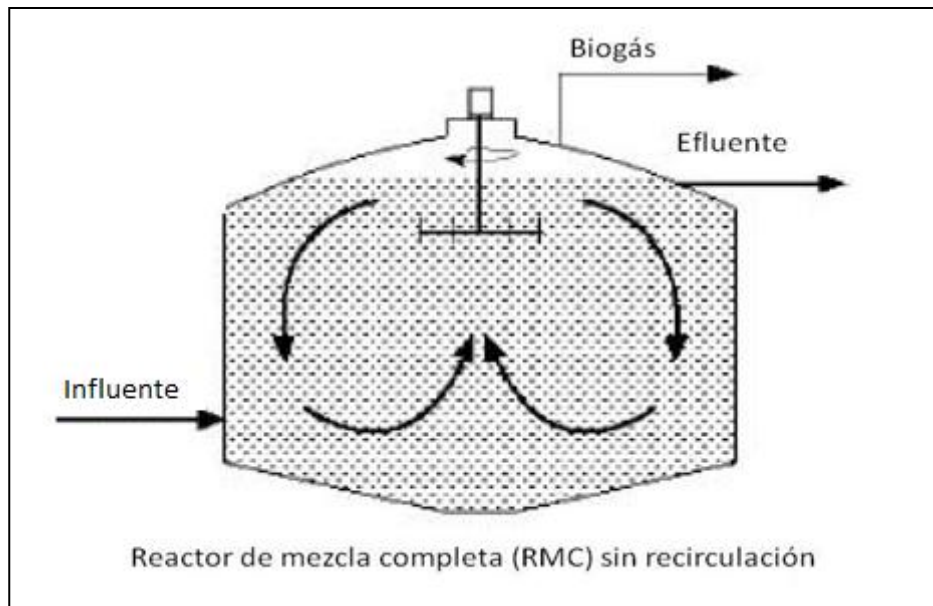


Figura 3.2 Reactor de mezcla completa (RMC) sin recirculación (IDAE, 2007)

3.2.2.1.2.2. *Reactor de mezcla completa con recirculación (reactor anaerobio de contacto)*

Es equivalente al sistema de lodos activados aerobios para el tratamiento de aguas residuales (Figura 3.3). Regulando la recirculación es posible conseguir tiempos de retención hidráulica más bajos que en un reactor simple de mezcla completa. Sólo es aplicable a aguas residuales de alta carga orgánica. Antes del decantador se debe disponer de un sistema de desgasificación, sin el cual la decantación se puede ver imposibilitada.

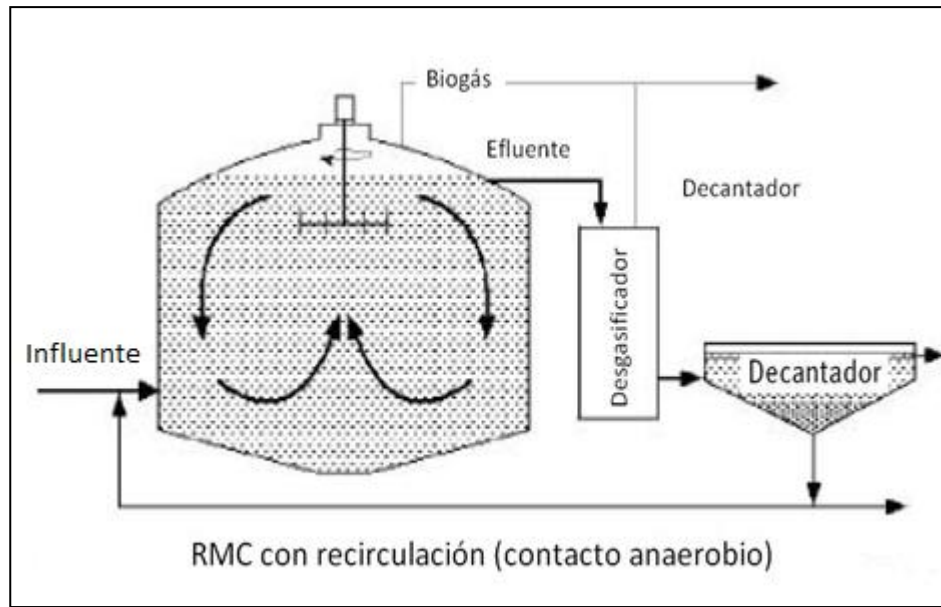


Figura 3.3 Reactor de mezcla completa (RMC) con recirculación (IDAE, 2007)

3.2.2.1.2.3. Reactor de flujo pistón

La tasa de crecimiento de microorganismos es más elevada a la entrada del reactor, donde la concentración de sustrato también es más elevada. Lo cual hace que la concentración media en el reactor sea superior a la correspondiente a un RMC, o en todo caso superior a la de salida, por lo que el tiempo de retención es inferior (Figura 3.4).

3.2.2.1.2.4. Reactor con retención de biomasa

Si se retienen bacterias en el interior del reactor, evitando la configuración de RMC, es posible reducir el tiempo de retención. Los métodos de retención de biomasa son básicamente dos:

- a) Inmovilización sobre un soporte (filtros anaerobios y lechos fluidizados)
- b) Agregación o floculación de biomasa y su retención por gravedad (reactores de lecho de lodos)

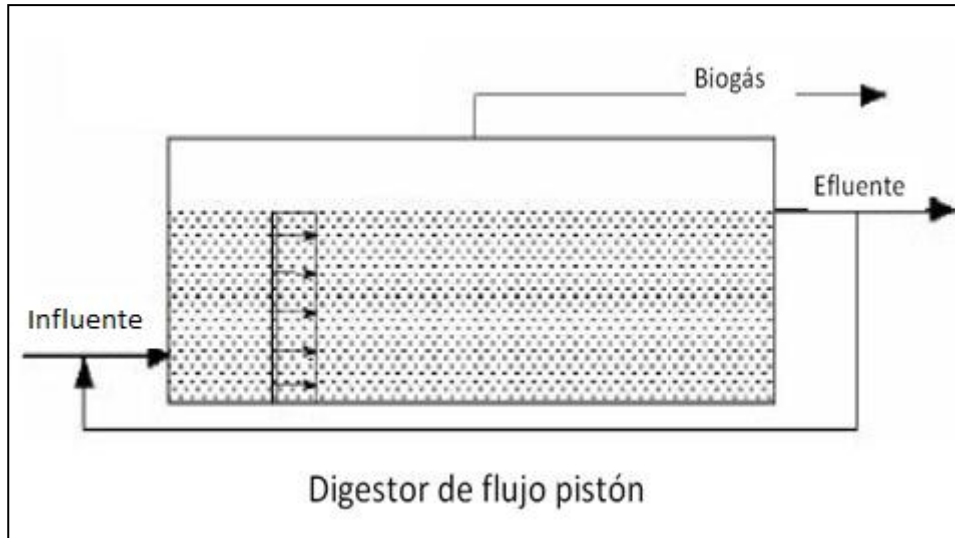


Figura 3.4 Digestor de flujo pistón (IDAE, 2007)

3.2.2.1.2.5. Filtro anaerobio

Consiste en hacer pasar el agua a través de un lecho o medio poroso, natural o sintético, en dirección ascendente o descendente (Figura 3.5). La biopelícula fija sobre el medio remueve la materia orgánica a través de un proceso de degradación biológica anaerobia. Los filtros anaerobios trabajan en un amplio intervalo de carga orgánica de 1-50 kgDQO/m³día y temperatura ambiente (Malina y Pohland, 1992). El coste de inversión es una limitante importante para su implantación.

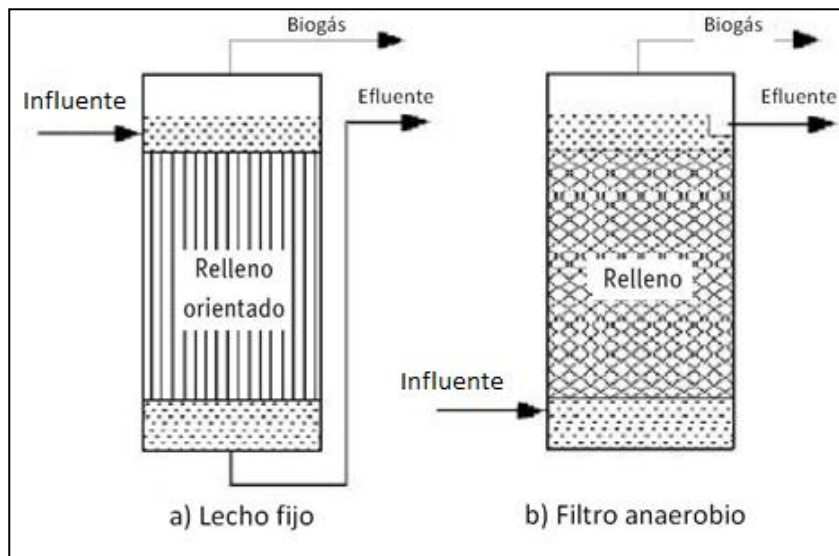


Figura 3.5 Reactores con retención de biomasa, a) Lecho fijo con flujo ascendente, la distribución es regular y orientada verticalmente b) Filtro anaerobio con flujo ascendente, la distribución es irregular (IDEA, 2007)

3.2.2.1.2.6. *Lecho fluidizado*

En este sistema las bacterias se encuentran fijas, formando una biopelícula, sobre pequeñas partículas de material inerte que se mantienen fluidizadas mediante el flujo ascendente adecuado del fluido. Para mantener el caudal adecuado, que permita la expansión y fluidización del lecho, se recurre a la recirculación (Figura 3.6).

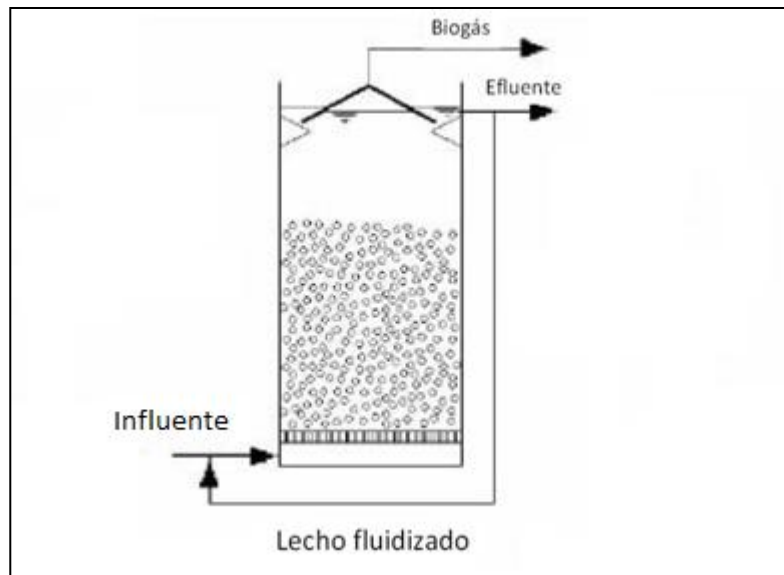


Figura 3.6 Reactor de lecho fluidizado (IDEA, 2007)

3.2.2.1.2.7. *Reactor de lecho de lodos de flujo ascendente*

En este sistema se favorece la floculación o agregación de bacterias entre ellas, formando gránulos o consorcios, de forma que por sedimentación se mantienen en el interior del reactor, con la velocidad ascendente adecuada del fluido, siempre que en la parte superior exista un buen separador sólido (biomasa)/líquido/gas. El diseño más común es el Reactor anaerobio de lecho de lodos de flujo ascendente (RALLFA, que por sus siglas en inglés es *Upflow Anaerobic Sludge Blanket*, UASB). El influente inyectado en el fondo del reactor se encuentra primero con una capa gruesa de gránulos de biomasa (lecho de lodo granular) producidos por los organismos anaerobios bajo determinadas condiciones. Estos gránulos son los principales responsables de la eliminación de los contaminantes. Dichos gránulos poseen una densidad lo suficientemente alta como para quedar retenidos en la parte baja del reactor sin ser arrastrados por el agua residual ascendente. Por encima de esta capa, existe una región que contiene organismos individuales, flóculos y gránulos pequeños (manta de lodo). Esta biomasa se mantiene en suspensión y es arrastrada en sentido ascendente por el flujo del líquido y las burbujas de gas que se

forman durante el proceso anaerobio. Toda esta región posee recolectores de gas en forma de campana que solo dejan pasar el líquido a la parte superior del reactor. Por encima de los recolectores de gas existe una zona de calma que permite que gran parte de los sólidos vuelvan a las regiones inferiores donde podrán seguir con su actividad metabólica (Figura 3.7). El efluente es recolectado por la parte superior. Las ventajas de los reactores RALLFA con respecto a otros reactores anaerobios son su bajo costo de inversión, consumo de energía bajo, resistencia a fluctuaciones de carga. El único limitante para su aplicación es que la biomasa activa granule, esto es, que forma agregados de alta densidad. Para ello es determinante la composición del agua a tratar y mantener una operación adecuada.

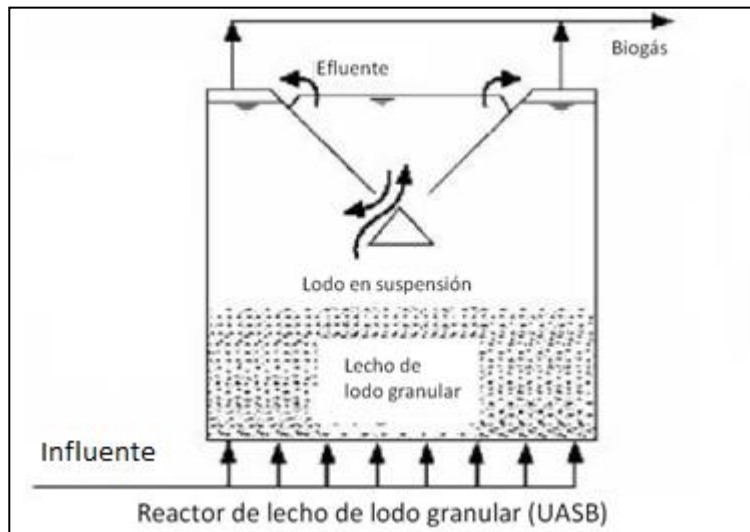


Figura 3.7 Reactor anaerobio de lecho de lodo de flujo ascendente (RALLFA) (IDEA, 2007)

3.2.2.1.2.8. *Sistemas discontinuos*

La curva de evolución temporal de la producción de biogás sigue la misma tendencia que la curva típica del crecimiento de microorganismos (latencia, crecimiento exponencial, estacionalidad y decrecimiento). Para conseguir una producción de biogás cercana a la continuidad deben combinarse varios reactores discontinuos con puestas en marcha intercaladas en el tiempo.

3.2.2.1.2.9. *Sistemas de dos etapas*

Los reactores anteriores pueden ser combinados para conseguir sistemas más eficientes, según el tipo de residuo a tratar. Éstos consisten en un primer reactor con elevado tiempo de retención, en el cual se favorece la hidrólisis, seguido de un reactor de bajo tiempo de retención que digiere la materia orgánica disuelta y los ácidos producidos en la primera etapa.

3.2.2.1.2.10. *Sistemas de dos fases*

A diferencia de los sistemas de dos etapas, la separación de fases se refiere a mantener dos reactores en serie, en los cuales se realizan, respectivamente, las fases de acidogénesis y metanogénesis, y su objetivo es conseguir un tiempo de retención global inferior al correspondiente a un único reactor de mezcla completa.

3.2.2.1.2.11. *Sistemas híbridos*

En general serán sistemas que combinen los conceptos que sustentan los diferentes tipos de reactores descritos. Los dos sistemas anteriores podrían considerarse como tales. También se han realizado diseños de reactores con retención de biomasa híbridos, en los cuales la parte baja de éste se comporta como un RALLFA y la parte superior como un filtro.

3.2.2.1.3. Tratamiento aerobio (sistemas de tratamiento secundario)

Con el fin de reducir la materia orgánica (MO) en su totalidad o como etapas de pulimento diferentes tipos de tratamiento aerobios han sido utilizados para tratar los efluentes anaerobios (Omil y col., 2003; Gutiérrez-Sarabia y col., 2004, Mittal, 2006). El proceso básico de tratamiento aeróbico es el proporcionar un medio de alto contenido de oxígeno para que los organismos puedan degradar la porción orgánica de los desechos a dióxido de carbono y agua en presencia del oxígeno. A continuación se exponen el funcionamiento de los sistemas aerobios empleados en el tratamiento de aguas residuales provenientes de rastros.

3.2.2.1.3.1. *Lagunas aireadas*

Se trata de embalses de agua provistos de aireadores superficiales que promocionan la transferencia de oxígeno y mantienen las condiciones aerobias en toda la laguna, la cual tiene una profundidad de entre 2 y 5 metros. La energía requerida por el sistema de agitación para transferir suficiente oxígeno es bastante importante, normalmente del orden de 3 a 4 kW/m³. Desde un punto de vista microbiológico, las lagunas bien aireadas y completamente aerobias operan de forma similar al proceso de lodos activados, en el cual los organismos aerobios se alimentan del material orgánico y crean flóculos microbianos. Sin embargo, al contrario que en el proceso de lodos activados, muchas lagunas aerobias operan generalmente como un sistema de flujo continuo de paso único sin recirculación. Esto quiere decir que la densidad de la biomasa normalmente es baja y que el efluente de la laguna contiene flóculos

microbianos que han de ser separados antes del vertido de las aguas residuales tratadas. Por todas estas razones, las lagunas aerobias generalmente forman parte de un sistema de lagunas. En estos sistemas, a la laguna aerobia le sigue una laguna facultativa y/o una laguna de sedimentación donde los lodos aerobios son parcialmente descompuestos o sedimentados.

Las lagunas aerobias pueden verse afectadas de forma importante por las variaciones diarias y estacionales de temperatura (Armenante, 1997).

3.2.2.1.3.2. *Lodos activados*

Los factores esenciales del proceso de lodos activados son (Yáñez, 1979):

- Etapa de contacto, adsorción o floculación
- Etapa de aireación
- Etapa de separación
- Etapa de recirculación
- Etapa de disposición

En el proceso de lodos activados (Figura 3.8) los desechos líquidos son alimentados continuamente a un tanque aireador (reactor) en el que se encuentra el cultivo de los microorganismos (lodos activados), en su mayoría bacterias en suspensión. Las cuales en su conjunto se conocen como licor mezclado que metabolizan y floculan biológicamente los compuestos orgánicos. El medio ambiente aerobio, así como la mezcla del sustrato (agua residual influente) y microorganismos (sólidos suspendidos volátiles SSV) se mantiene mediante el uso de aireación. Después de un determinado tiempo de retención el licor mezclado pasa a un tanque de sedimentación, donde se lleva a cabo la separación de microorganismos en forma de flóculos del agua. La cual sale por la parte superior del tanque, terminándose aquí el tratamiento mediante lodos activados. Una parte de la biomasa sedimentada es retornada al tanque de aireación (lodos de retorno) para mantener la concentración deseada de sólidos suspendidos volátiles en el licor mezclado (SSVLM) y la otra parte es retirada del sistema como lodos de desecho (López, 2010).

Los lodos en exceso suponen un producto residual importante en el proceso de lodos activados, y se utilizan diversos sistemas alternativos para su tratamiento y evacuación final.

Los procesos de lodos activados no difieren en su principio básico operativo sino en la configuración de los dos componentes principales del proceso, es decir, el tanque de aireación y el decantador secundario (Armenante, 1997). Algunas de las configuraciones más importantes se explican a continuación.

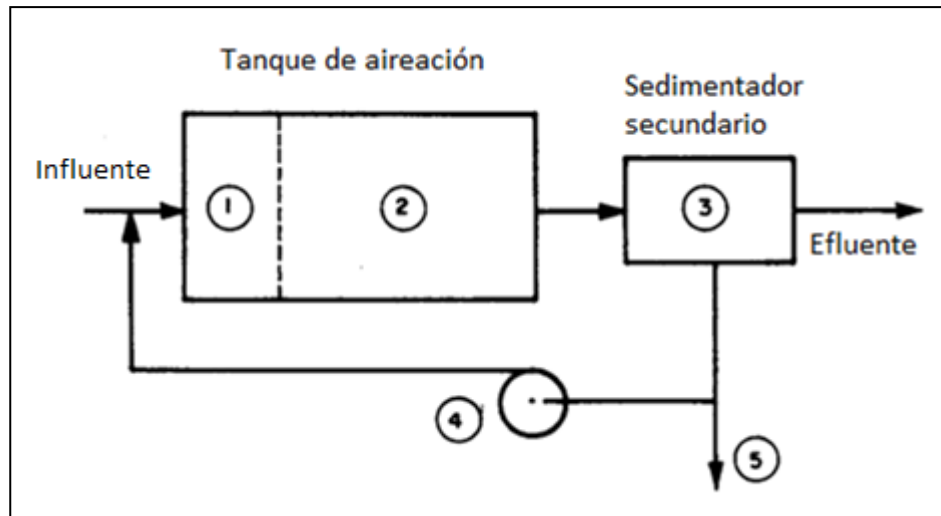


Figura 3.8 Proceso de lodos activados (Yáñez, 1979)

3.2.2.1.3.2.1. Reactores de lodos activados con mezcla completa

La configuración básica de este tipo de reactor es la de un depósito en el que se mezcla y airea completamente el contenido. Por lo tanto, la composición del líquido en el interior será la misma en cualquier punto. Estos sistemas soportan las sobrecargas puntuales, debido a que cualquier variación en la composición del influente se amortigua en la disolución que se genera cuando el influente se mezcla con el contenido del reactor. Se emplean con frecuencia para tratar aguas residuales que contienen contaminantes complejos y difícilmente biodegradables, como los contenidos en los efluentes de las plantas químicas (Armenante, 1997).

3.2.2.1.3.2.2. Reactores de flujo pistón con lodos activados

El agua residual fluye por tanques de aireación largos y angostos. El reactor de flujo pistón generalmente estimula el crecimiento de un lodo de buena calidad con excelentes características de sedimentación. Una desventaja de este tipo de reactores es su sensibilidad respecto a una sobrecarga puntual.

3.2.2.1.3.2.3. Reactores en serie con lodos activados

Para eliminar la sensibilidad a una sobrecarga puntual, se pueden emplear diversos métodos, uno de ellos consiste en dividir el reactor en una serie de reactores más pequeños de mezcla completa que se alimentarán en serie. Otro método es utilizar un sistema de distribución para lograr que el influente entre en diversos puntos del reactor de flujo pistón.

3.2.2.1.3.2.4. Canales de oxidación

Son reactores con forma de pista de atletismo, la entrada del influente es antes de una de las rectas del reactor, el agua es bombeada horizontal y longitudinalmente mediante agitadores axiales horizontales sumergidos. Los cuales pueden ser distribuidos de manera que generen zonas alternas, ricas y pobres en oxígeno a lo largo del sistema, favoreciendo la nitrificación y desnitrificación, respectivamente. La velocidad del agua debe ser tal que la mayoría de los sólidos se mantenga en suspensión. El efluente del estanque se separa de forma continua en un punto del sistema antes del punto de entrada y se envía a un decantador donde se separa parcialmente la biomasa y se recircula.

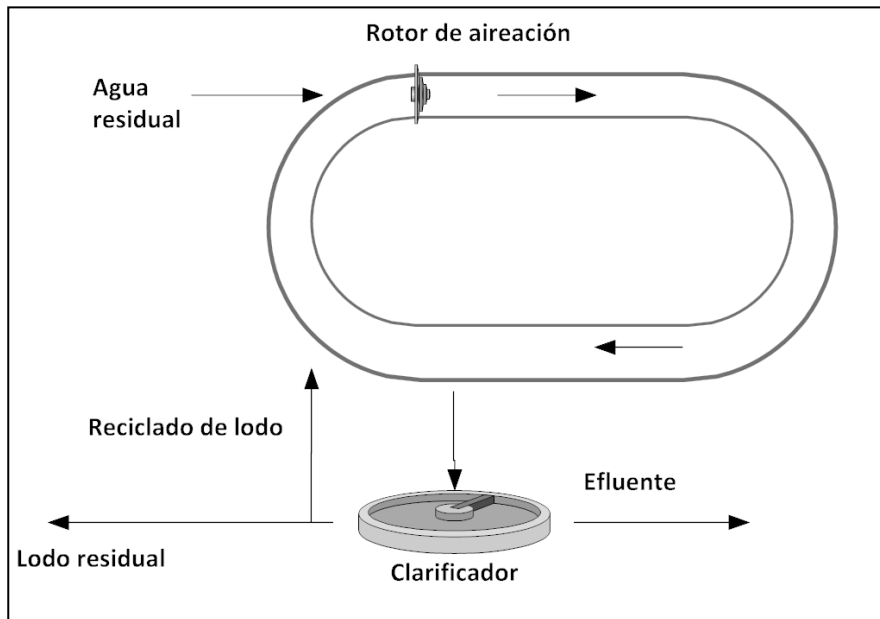


Figura 3.9 Canal de oxidación

3.2.2.1.3.2.5. *Reactor secuencial discontinuo (RSD)*

Es un reactor en donde tiene lugar un proceso de lodos activados, utilizando un sólo reactor para todos los pasos del proceso, uno después de otro de manera discontinua. Cada ciclo comienza con el reactor casi vacío, con una capa de lodos aclimatados en el fondo, después el reactor se llena con las aguas residuales y comienza la aireación y agitación. La degradación biológica inicia durante el proceso de llenado y continúa, una vez lleno el reactor, hasta lograr un valor deseado de purificación del agua. Entonces, la aireación y agitación se detienen, y el lodo comienza a sedimentarse. Cuando el lodo ha sedimentado, se vierte la capa superior clarificada de las aguas residuales tratadas y se puede iniciar un nuevo ciclo. Una ventaja de los RSD es que pueden asimilar grandes variaciones de caudal y composición del influente sin fallar.

3.2.2.1.3.3. *Filtro percolador*

La estructura de un filtro percolador generalmente es un cilindro grande y abierto, relleno con un material grueso y suelto. El reactor posee un equipo de distribución de agua, el cual consiste en una serie de brazos giratorios colocados sobre el relleno que distribuyen uniformemente las aguas residuales sobre la superficie de la capa superior del relleno. Durante la operación del reactor se forma una biopelícula sobre todo el relleno, así cuando el agua residual percola en forma descendente a través del relleno, se va depurando progresivamente mediante la acción de la biomasa.

3.2.2.1.3.4. *Discos rotativos biológicos o biodiscos (DRB)*

Son reactores formados por etapas cada una de las cuales tiene una serie de discos paralelos entre sí y unidos a un eje horizontal que pasa a través de sus centros, estos discos se encuentran parcialmente dentro de un tanque. La biopelícula se forma sobre la superficie de los discos, que giran aproximadamente a una velocidad de 1 y 2 rpm. La alimentación del agua residual pasa a través de los tanques en serie, perpendicular a los discos y paralelo al eje de estos, de manera que la superficie de los discos está aproximadamente el 40% sumergida en todo momento. Debido a la rotación diferentes sectores de los discos se exponen de forma alterna al líquido y al aire, de esta manera se consigue la oxigenación de la biopelícula sin necesidad de una compresión o dispersión del aire. La biopelícula se desprende periódicamente debido a su crecimiento, en consecuencia la disminución de contaminantes en los DRB está dada por un mecanismo similar al del filtro percolador, por la presencia de la biopelícula

formada junto al disco. Así como un mecanismo análogo al de los lodos activados, por la presencia de biomasa en suspensión.

Estos reactores poseen como ventajas el bajo consumo de energía y mantenimiento sencillo, aunque son bastante sensibles a los cambios de temperatura.

3.2.2.1.3.5. Humedales

Habitualmente se trata de embalses de agua, con un tamaño que puede variar entre unos cientos de metros cuadrados y varios kilómetros cuadrados, en los cuales los organismos autotróficos, por ejemplo las algas, son los que realizan las actividades de descontaminación. La fotosíntesis de estos organismos produce el oxígeno que los microorganismos emplean para atacar y degradar los contaminantes. A cambio, la población microbiana responsable de la degradación del contaminante genera dióxido de carbono y otros productos residuales que pueden ser utilizados por las algas. Las algas necesitan luz, por lo que las lagunas aerobias son poco profundas, entre 0.15 y 1m, lo que también permite mantener las condiciones aerobias.

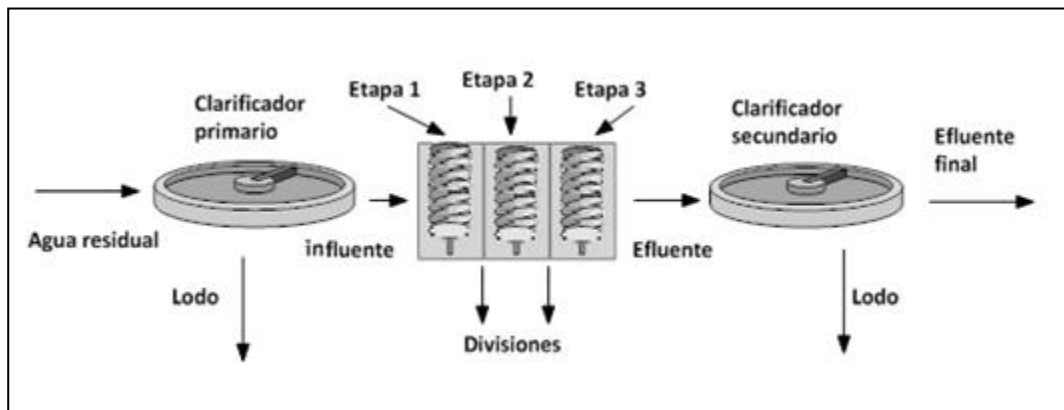


Figura 3.10 Discos rotativos biológicos

Debido a la elevada relación área/volumen, las lagunas aerobias pueden sufrir importantes variaciones de temperatura, esto tiene un efecto significativo sobre la población microbiana y, finalmente, sobre el rendimiento de la laguna. Las cargas orgánicas en las lagunas aerobias son menores que en lagunas facultativas o anaerobias.

Las cargas típicas se encuentran en torno a $0.01 \text{ kgDQO/m}^3\text{día}$, con DBO del orden de miligramos por litro. El tiempo de retención hidráulico varía de pocos días a 100 días aproximadamente, con una tasa de eliminación entre 80 y 90 % (Armenante, 1997).

3.2.2.1.4. Cloración (tratamiento terciario)

La cloración es un proceso muy usado en el tratamiento de aguas residuales industriales y urbanas. Los objetivos de la cloración se resumen como siguen:

Desinfección. El cloro es un desinfectante debido a su fuerte capacidad de oxidación, por lo que destruye o inhibe el crecimiento de bacterias y algas.

Reducción de DBO. El cloro produce una reducción de DBO por oxidación de los compuestos orgánicos presentes en las aguas residuales.

Eliminación o reducción de colores y olores. Las sustancias que producen olor y color presentes en las aguas residuales se oxidan mediante el cloro. La capacidad oxidante del cloro se emplea para el control del olor y la eliminación del color en muchos tratamientos industriales (Rivera, 2000).

Por lo general los tanques de cloración se diseñan con tiempos de contacto de 15 a 30 minutos. Las dosis típicas de cloro requeridas para desinfección se presentan en la Tabla 3.6. La Tabla 3.7 presenta características de los recipientes de cloro comerciales.

Tabla 3.6 Dosis típicas de cloro en desinfección (Rivera, 2000)

Efluente de:	Intervalo de dosificación (mg/L)
Aguas residuales sin tratar	6 a 25
Sedimentación primaria	5 a 20
Planta de precipitación química	2 a 6
Filtro percolador	3 a 15
Lodo activado	2 a 8
Filtro múltiple seguido de planta de lodos activados	1 a 5

Tabla 3.7 Características de los recipientes de cloro (López, 2010)

Peso del contenido	Peso solo	Máxima cantidad de gas que se puede extraer
kg	kg	Kg/día
50	33	11.7
75	50-59	18.2
908	680	182

Se han desarrollado diversos proyectos con diferente configuración del tren de tratamiento, la Tabla 3.8 muestra los resultados obtenidos aplicando aisladamente pretratamiento, procesos anaerobios, aerobios y una combinación de ellos.

Tabla 3.8 Sistemas de tratamiento aplicados a residuos líquidos provenientes de rastros

Tratamiento	Carga orgánica [kgDQO/m ³ día]	T [°C]	TRH [días]	Reducción DQO[%]	Producción de CH ₄ [LCH ₄ /gDQO _{rem}]	Referencia
Pretratamiento						
Rejillas, FAD	NA	NA	NA	68	NA	Massé y Massé, 2000
Químico, FAD	NA	NA	NA	42	NA	Massé y Massé, 2000
Anaerobio						
RALF	2.9-54	35	0.0208-0.3333	75-99	0.320	Borja y col., 1995b
RALF con filtrado	0.78-10.4	35	-	>70	-	Chen y col., 1997
RALF sin filtrado	0.78-10.5	35	-	<70	-	
RASL	2.25-2.86	20-25	-	90.3	0.310	Massé y col., 2001
RALGE	15	35	0.2083	65-80	-	Nuñez y Martínez, 1999
RALLFA	0.34-1.01	35	10-15.6	51-87	0.200-0.320	Hansen y West, 1992
RALLFA	6.5	37	1.2	59	-	Ruiz y col., 1997
RALLFA	2.7-10.8	35	0.58, 0.75 y 0.916	77-91	0.157-0.845	Caixeta y col., 2002
RALLFA	5.6	-	2	80	-	Rodríguez y col., 2002
RALLFA	5.7-17	37	1	80	-	Caldera y col., 2005
FA	0.47-2.98	23.6-27.1	0.8-4.9	37-77	-	Viraraghavan y Varadarajan, 1996
FA	6.16	37	1.5	63	-	Ruiz y col., 1997
FA	8	35	0.625	87	-	del Pozo y col., 2000
Sistemas acoplados (pretratamiento, anaerobios, aerobios)						
DAF-RALLFA	4	30	0.416	90	0.340	Manjunath y col., 2000
Dos RALLFA	15	18-30	0.16	90		Sayed y col., 1993
RALLFA-FA integrados	5.00-25	35	-	96	0.216	Borja y col., 1995a
RALLFA-FA integrados	2.49-20.82	35	0.5	90-93	0.345	Borja y col., 1998
RALLFA-LA	2.5	35-20	0.7	85	-	Nuñez y Martínez, 2001
RALLFA-LA	4.6	23-20	2.4	89-93	0.280 m ³ CH ₄ /kgDQO _{rem}	Reyes, 2009
RALE-LA	4.7	30-20	2.1	94-91	0.470 m ³ CH ₄ /kgDQO _{rem}	Reyes, 2009
Aerobios				Reducción DBO [%]		
Lagunas aerobias	-	-	3.0-10.0	95	-	EPA, 2002
Filtros percoladores	-	-	-	60-90	-	EPA, 2002
LA	0.4-8	-	-	95	-	EPA, 2002

TRH: Tiempo de Retención Hidráulico, RALGE: Reactor anaerobio de lecho granular expandido, FA: Filtro anaerobio, RALLFA: Reactor anaerobio de lecho de lodos de flujo ascendente, FAD: Flotación por aire disuelto RALF: Reactor anaerobio de lecho fluidizado, RASL: Reactor anaerobio secuencial por lotes, RAL: Reactor aerobio por lotes, LA: Lodos activados RALE: Reactor anaerobio de lecho expandido NA: No Aplica

3.3. Biogás

3.3.1. Características generales

Como resultado de la degradación anaerobia de las aguas residuales se obtiene biogás, el cual es una mezcla de metano y dióxido de carbono junto con trazas de otros gases, como hidrógeno, nitrógeno, sulfuro de hidrógeno y vapor de agua (Tabla 3.9)

Tabla 3.9. Componentes del biogás (FIRCO, 2007)

Compuesto	% Volumen
Metano (CH ₄)	55-70
Dióxido de carbono (CO ₂)	35-40
Nitrógeno (N ₂)	0.5-3
Hidrógeno (H ₂)	1-3
Sulfuro de hidrógeno (H ₂ S)	0.1
Vapor de agua (H ₂ O)	Trazas

Con base en la eficiencia de un quemador convencional, un m³ de biogás equivale a los valores mostrados en la Tabla 3.10. La combustión del metano da como resultado dióxido de carbono y agua, además de ser una reacción exotérmica por lo que es una fuente importante de energía. El biogás puede ser aprovechado en procesos térmicos tales como calentamiento de agua y aire. Además de generación de energía eléctrica para el bombeo de agua, iluminación (Montúfar, 2008) y en algunos casos venta de electricidad.

Tabla 3.10 Equivalencia energética para un m³ de biogás (Geraldo y Jabes, 2005)

Combustible	Equivalencia energética para un m ³ de biogás
Gasolina	0.613 L
Diésel	0.579 L
Gas licuado	0.454 L
Gas natural	0.535 m ³
Electricidad	1.428 kWh

3.3.2. Aprovechamiento del biogás

Dado que el biogás es una mezcla de gases puede ser aprovechado de diferentes maneras de acuerdo a su grado de pureza y poder calorífico (McBean y col., 1995). Algunos métodos de aprovechamiento son los mostrados en la Tabla 3.11.

Tabla 3.11 Aprovechamiento de biogás de acuerdo a su pureza y poder calorífico (elaboración a partir de Domenzain y Espinosa, 2009)

Tipo de gas	Poder calorífico [kcal/m ³]	Método de aprovechamiento	Tratamiento
Combustión directa del biogás extraído		Incineración: Limita la emisión de olores y la cantidad de GEI hacia la atmósfera	Ninguno. Se instala un sistema activo de recolección y control.
Gas con bajo potencial calorífico	4,000	Combustible en calderas para calentar agua y hacer funcionar turbinas de vapor	Sólo se remueve la humedad
Gas con potencial calorífico medio	6,200	Combustible para: Turbinas de vapor Turbinas de gas	Remoción de humedad, compuestos sulfurosos, siloxanos, partículas sólidas, mercaptanos y COV
Gas con potencial calorífico alto	8,900	Motores de combustión interna	Remoción del 100% de humedad, trazas de otros gases y CO ₂ .

3.3.3. Sistemas de recuperación de energía

Para lograr el aprovechamiento del biogás existen tecnologías disponibles en el mercado que permiten obtener un biogás medianamente purificado. Este último es un combustible versátil y puede utilizarse para calentamiento y para la generación de energía eléctrica, usando turbinas de vapor, turbinas de gas o motores recíprocos de combustión interna. Las turbinas de vapor se utilizan en sistemas grandes de 10 a 50 MW y las turbinas de gas y los motores recíprocos se utilizan en los sistemas más pequeños de 1 a 10 MW (Domenzain y Espinosa, 2009). En la Tabla 3.12 se muestran algunas tecnologías disponibles para el aprovechamiento del biogás. Algunas de las ventajas de las turbinas de gas es que son más resistentes a la corrosión, generan menos emisiones, cuentan con un sistema dual de aceite que previene paros inesperados, simple operación y se adaptan a los cambios de cantidad y calidad del biogás. Aunque tienen un costo inicial alto y una eficiencia energética baja (15 y 25%), sin embargo generan una gran cantidad de calor de desecho que puede ser aprovechado por sistemas de generación de ciclo

combinado (Mcbean y col., 1995). La principal ventaja de un ciclo combinado es su alta eficiencia (Tchobaulogos y col., 1994).

Tabla 3.12 Tecnologías disponibles para el aprovechamiento de biogás (elaboración a partir de Domenzain y Espinosa, 2009)

Tecnología	Descripción
Turbinas de vapor	Consecuencia de la combustión del biogás se produce vapor de agua que se utiliza para mover una turbina de vapor que alimenta un generador eléctrico.
Turbinas de gas	Consisten en un compresor, un combustor y una turbina para convertir los gases calientes de combustión en energía mecánica. El generador eléctrico se conecta al eje de salida de la turbina de gas.
Turbinas de ciclo combinado	Se utilizan los gases de escape a alta temperatura de una turbina de gas para aportar a la caldera o generador de vapor de recuperación, el cual a su vez alimenta de vapor a la turbina de vapor.
Motores de combustión interna	En los motores de dos o cuatro tiempos, la explosión/inflamación se realiza en una cámara de combustión que tiene una parte móvil (pistón) que se desplaza dentro del cilindro con un movimiento lineal. El pistón está unido al mecanismo del cigüeñal que transforma el movimiento lineal en giratorio, y que a su vez está conectado al generador.

3.3.4. Pretratamiento del biogás

Las opciones de pretratamiento del biogás son desde un simple proceso de remoción de humedad y condensados, hasta procesos más complejos para llevar al biogás a una calidad de gas natural.

Remoción de H₂O

Dado que la digestión se realiza en un medio acuoso, existe vapor de agua en el biogás, el cual posee una humedad relativa del 100%. Los equipos para el aprovechamiento del biogás requieren un menor contenido de agua en la mezcla, por lo que el agua debe ser eliminada por alguno de los procesos descritos a continuación.

Condensación del vapor de agua. Se aprovecha el efecto Joule-Thomson. El biogás pasa por una cámara de expansión lo cual hace que la temperatura de la mezcla disminuya y el vapor de agua se condense, para ser drenado posteriormente. Éste es un sistema muy sencillo y de bajo costo y sólo es necesario instalar una cámara de expansión (Tchobanoglous y col., 1994).

Compresión y enfriamiento. Al comprimir un volumen de biogás saturado habrá un excedente de agua en el volumen final sobrecalentado. Si al volumen final le sigue una etapa de enfriamiento hasta la

temperatura inicial de la mezcla, la cantidad de agua excedente para ese volumen se condensará. Cuando la temperatura de saturación es alta (mayor a 30° C), la compresión no es necesaria y es suficiente un proceso de enfriamiento (Domenzain y Espinosa, 2009).

Adsorción del vapor de agua. Consiste en una adhesión entre el vapor de agua y una superficie de un sólido desecante. El agua forma una película muy delgada que se adhiere a la superficie del sólido por las fuerzas de atracción, pero no existe una reacción química. El desecante es un sólido granulado que tiene una gran superficie efectiva por unidad de masa gracias a una multitud de poros y canales capilares microscópicos. Un sistema de deshidratación por adsorción es simple en operación y diseño, capaz de adaptarse a cualquier flujo de biogás. Sin embargo, los costos de inversión y mantenimiento son altos (Domenzain y Espinosa, 2009).

Absorción del vapor de agua. La absorción puede ser tanto física como química. En la física, los solventes más usados son los glicoles o soluciones concentradas de litio y sodio mientras que en la absorción química del agua, las soluciones de cal viva son los absorbentes más usados. Debido a la alta capacidad de absorción de los solventes, estos sistemas pueden manejar altos volúmenes de biogás a costos de operación relativamente bajos. El absorbente puede ser recuperado mediante un sencillo proceso de destilación (Domenzain y Espinosa, 2009).

Remoción de gases ácidos (CO₂ y H₂S)

Para prevenir problemas de corrosión y taponamiento, el tratamiento del biogás incluye la reducción de CO₂ y H₂S. El gas natural que contiene H₂S y otros compuestos de azufre se conoce como gas amargo, mientras que el gas que contiene únicamente CO₂ se conoce como gas dulce. El sulfuro de hidrógeno es un gas altamente tóxico que en presencia de agua forma un ácido débil muy corrosivo. El valor límite para una exposición prolongada es de 10 ppm. Se detecta fácilmente, incluso a bajas concentraciones (0.13 a 4.6 ppm) por su olor a huevo podrido. En concentraciones elevadas (200 ppm) mata las terminaciones nerviosas de la nariz en segundos. A 500 ppm produce problemas respiratorios severos y puede ocasionar la muerte en minutos.

El dióxido de carbono no es inflamable por lo que en altas concentraciones puede inhibir la combustión del metano. Al igual que el H₂S, en presencia de agua forma un ácido débil corrosivo a una presión parcial mayor a 2 bar. La concentración de estos gases en el biogás no llega a ser tan alta como en el gas natural de reservas naturales, pero sus niveles deben reducirse para cumplir con las especificaciones de

los equipos con los que se desee generar energía y también con la normatividad ambiental (Domenzain y Espinoza, 2009).

Los procesos que se utilizan para remover CO_2 y H_2S se pueden agrupar en cinco categorías de acuerdo a su tipo y pueden ser sencillos o complejos de acuerdo a si es necesario recuperar o no los gases removidos y el material usado para removerlos.

En algunos casos no hay regeneración con recobro de azufre y en otros sí (Martínez, 2008). En la Tabla 3.13 se muestran las cinco categorías para la remoción de gases ácidos.

Tabla 3.13 Procesos para remoción de gases ácidos presentes en el biogás (realizado a partir de Martínez, 2008)

Proceso	Características
Absorción química	Es un proceso con aminas y carbonato de potasio. La regeneración se hace con incremento de temperatura y decremento de presión.
Absorción física	La regeneración no requiere calor.
Híbridos	Utiliza una mezcla de solventes químicos y físicos. El objetivo es aprovechar las ventajas de los absorbentes químicos en cuanto a capacidad para remover los gases ácidos. Sobre los absorbentes físicos en cuanto a bajos requerimientos de calor para regeneración.
Conversión directa	El H_2S es convertido directamente a azufre.
Lecho seco	El gas agrio se pone en contacto con un sólido que tiene afinidad por los gases ácidos. Se conocen también como procesos de adsorción.

La elección del método o técnica de purificación que debe emplearse en la limpieza del biogás generado en un sistema de tratamiento, depende principalmente del flujo de biogás disponible y de la pureza del metano que se desee alcanzar lo que lleva a determinar la viabilidad económica de la purificación

Finalmente, el proceso a seguir para generar energía a partir de los residuos líquidos de un rastro se muestra en la Figura 3.11.

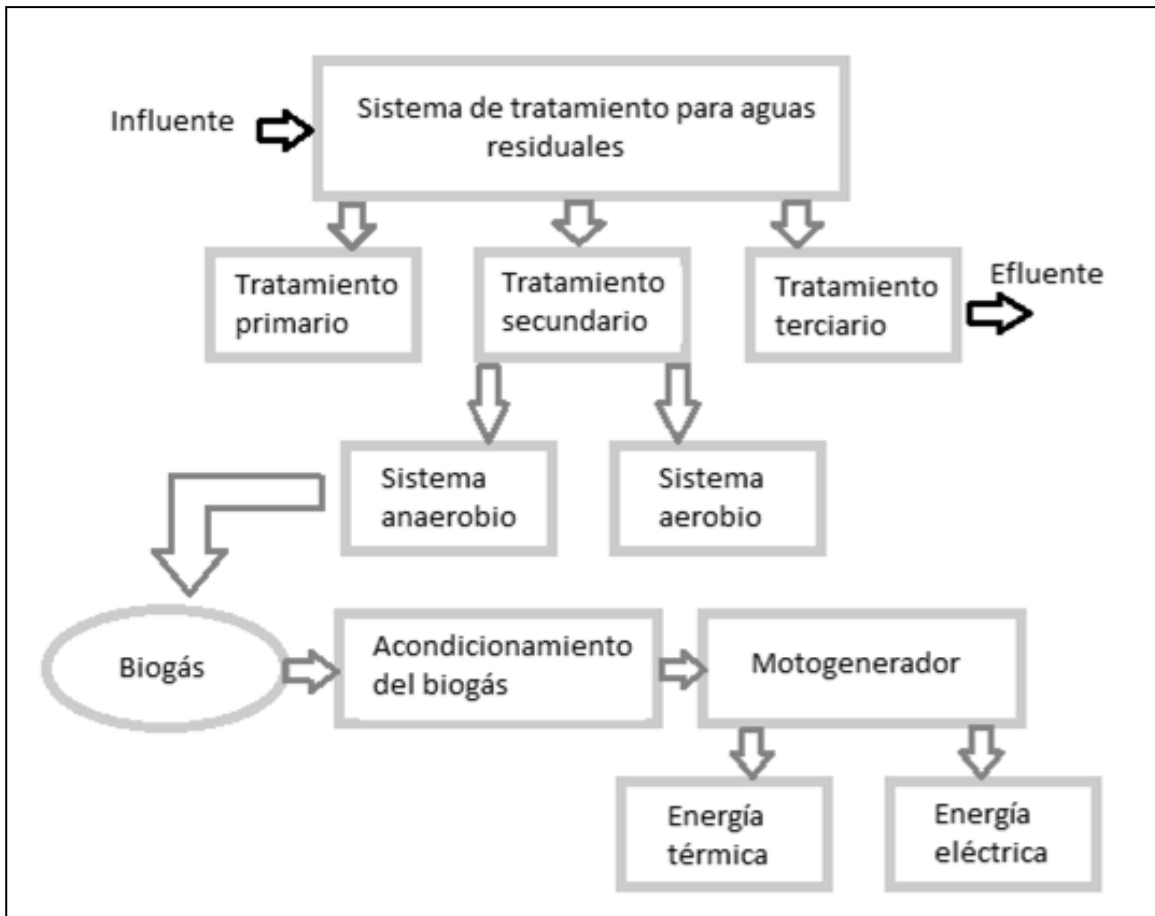


Figura 3.11 Proceso para generar energía eléctrica y térmica a partir de residuos líquidos de rastros

4. INGENIERÍA DEL CASO DE ESTUDIO

4.1. Localización y descripción específica del sitio del proyecto

4.1.1. Localización

El proyecto se llevará a cabo en el municipio de Mexicaltzingo, Estado de México. El municipio se localiza entre los paralelos $19^{\circ} 11' 43''$ y los $19^{\circ} 13' 15''$ de latitud norte, y entre los meridianos $99^{\circ} 33' 05''$ y $99^{\circ} 37' 02''$ de longitud oeste. Su extensión territorial es de 12.20 kilómetros cuadrados. En el mapa físico del Estado de México se encuentra ubicado en la parte meridional del Valle de Toluca cerca de la laguna desecada del Chicnahuapan y de las faldas del volcán Xinantécatl. Colinda al norte con Metepec; al este y sur con el municipio de Chapultepec; al sur y al oeste con el municipio de Calimaya (Figura 4.1).



Figura 4.1 Ubicación del municipio de Mexicaltzingo, Estado de México (INAFED, 2011)

4.1.2. Orografía

Los terrenos ocupados por el municipio forman una llanura casi plana, mostrando una escasa pendiente que corre de oeste a este, constituida principalmente por materiales de depósito aluvial y lacustre. En la región sureste se encuentra la única alteración de la planicie, conocido como el Cerro de Chapultepec, que posee una altura media de 2,660 m.s.n.m. La orografía del municipio y los alrededores se presenta en la Figura 4.2.

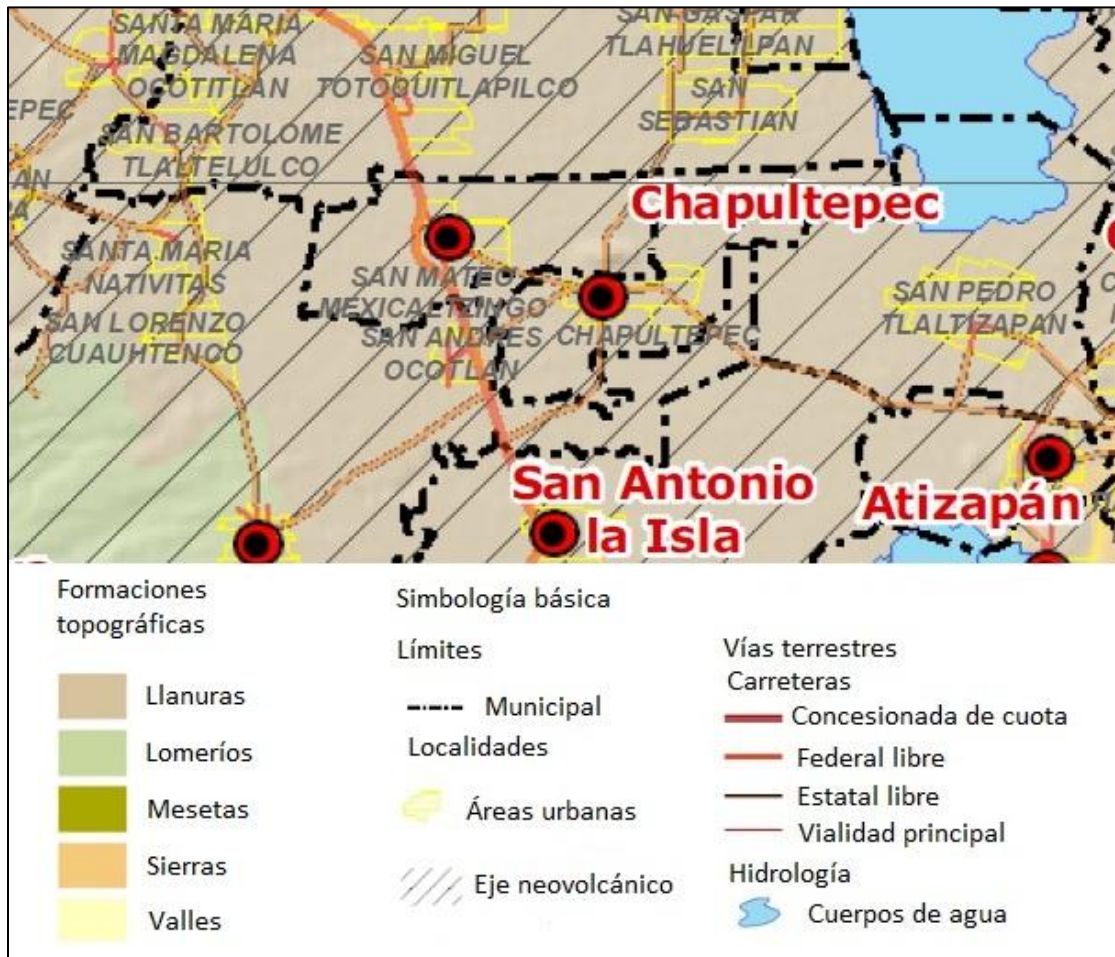


Figura 4.2 Orografía del municipio de Mexicaltzingo (SEDUR, 2007)

4.1.3. Hidrografía

El municipio carece de corrientes superficiales abundantes; en la porción oeste, donde se agudiza el declive del terreno, se forman pequeños arroyos estacionales que provocan la inundación de la zona en la temporada verano-otoño. En la zona central del municipio, lado oriente de la cabecera municipal nace el arroyo “Ojo de Agua”. Los mantos freáticos, localizados aproximadamente entre uno y 200 m bajo la

superficie, son explotados para abastecer a la población de agua potable. Cuenta con cuatro manantiales llamados "ojos de agua", 12 pozos profundos y dos arroyos intermitentes, uno de los cuales utiliza Santa María Nativitas Tarimoro, del municipio de Calimaya, para drenar las aguas negras de su población (Figura 4.3).

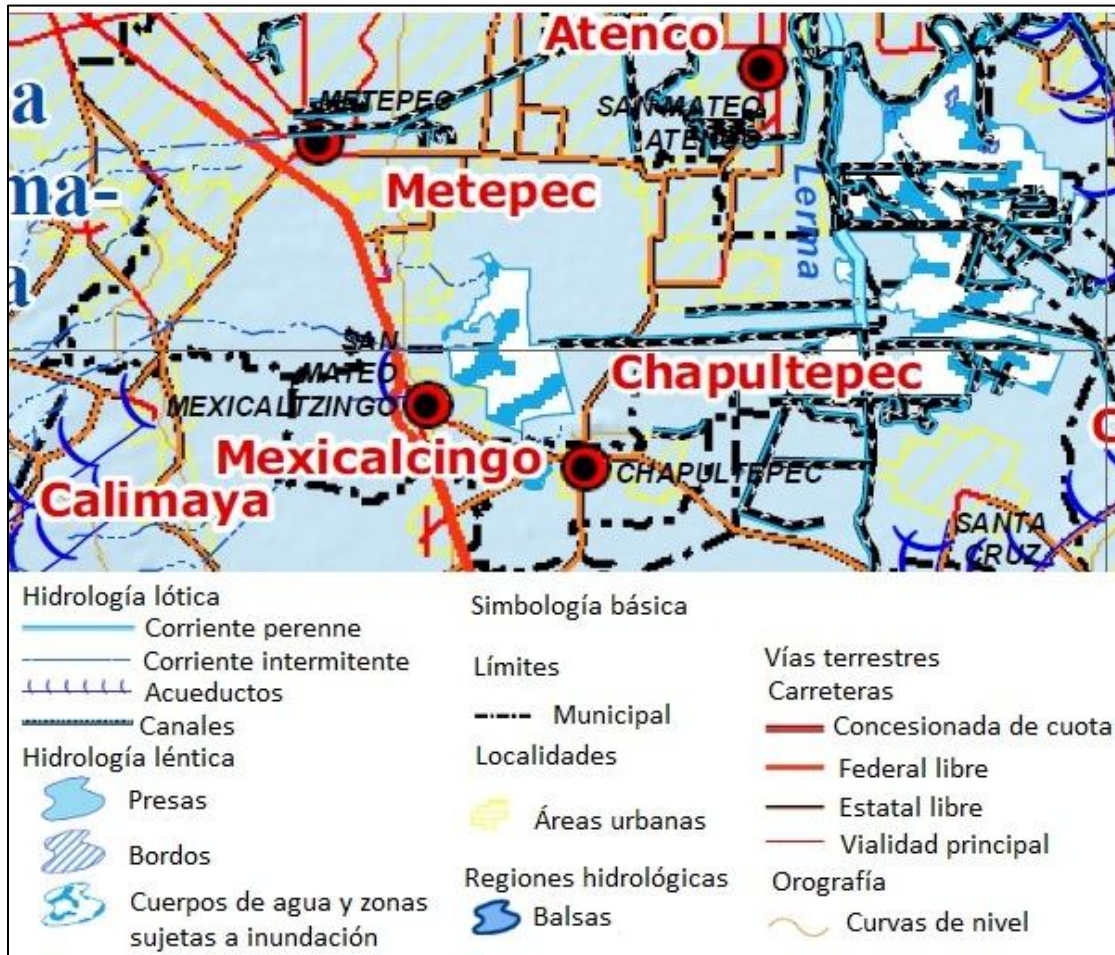


Figura 4.3 Hidrología del municipio de Mexicaltzingo (SEDUR, 2007)

4.1.4. Principales ecosistemas

La vegetación que prevalece es la llamada acuática riparia o de ribera, constituida por árboles, arbustos y hierbas de tamaño variable, localizadas en zonas templadas como el resto de cuenca del río Lerma. En el área de cultivos predomina el maíz. Existen además conjuntos arbóreos de sauces llorones (*Salix babilónica*), y, en forma aislada y escasa, pino (*Pinus montezumae*), cedro (*Cupressus lindleyi*), mimbre, casuarina, eucalipto, chopo y álamo. Actualmente la fauna está pasando por un proceso de extinción. Por esta razón raramente pueden observarse ejemplares de animales silvestres que antes abundaban como conejos, ardillas, entre otros. Entre los meses de noviembre y febrero, en "El Potrero" se

encuentra la garza blanca, emigrante de Canadá, y en la época de lluvias, en los corredores de algunas casas, anidan golondrinas (INAFED, 2011).

4.1.5. Clima

El municipio de Mexicaltzingo forma parte de la unidad geomórfica del Valle de Toluca; su clima es frío húmedo y templado subhúmedo con lluvias en verano (Figura 4.4) y la temperatura promedio anual oscila entre 11.51 y 13.50°C (SEDUR, 2007). De acuerdo a la clasificación Koppen modificada por Enriqueta García, es C(w2)(w)b(i)g, que es clima templado, subhúmedo, con verano largo, lluvia invernal al 5%, isotermal y la temperatura más elevada se manifiesta antes del solsticio de verano. La temporada de heladas de invierno en ocasiones se prolonga hasta los meses de marzo y abril (INAFED, 2011).



Figura 4.4 Clima en el municipio de Mexicaltzingo (SEDUR, 2007)

4.1.6. Recursos naturales

En el Cerro de Chapultepec hay una mina que está formada por materiales de origen volcánico, principalmente basalto, conocido popularmente como "lava", y brecha volcánica o "grava". Este cerro pertenece por partes iguales a los municipios de Chapultepec y Mexicaltzingo (INAFED, 2011).

4.1.7. Características y uso de suelo

La composición del suelo del municipio de Mexicaltzingo está integrado por los siguientes tipos:

- *Phaeozem háplico*. Se caracteriza por su capa superficial oscura, suave, rica en materia orgánica y nutrientes;
- *Phaeozem lúvico*. En el subsuelo presenta una capa de arcilla, puede ser más infértil y ácido que en la generalidad de los phaeozem y tiene una susceptibilidad a la erosión de moderada a alta
- *Cambisol éutrico*. Posee una alta saturación de bases dentro de los 30 a 50 centímetros de la superficie.

El 7% del territorio municipal es zona urbana, el 57% agrícola, el 20% pecuaria y el 16% del suelo se destina para otros usos (INAFED, 2011).

4.1.8. Evolución demográfica

Según el Censo de Población y Vivienda realizado en 1995, en el municipio de Mexicaltzingo la población total es de 8,662 habitantes, 4,221 hombres y 4,441 mujeres. La densidad de población es de 709.67 hab/km² y la tasa de crecimiento media anual es de 3.20.

La tasa bruta de natalidad por mil registrada para el municipio fue de 36.7, que es mayor a la del estado, 24.52. Considerando la tasa bruta de mortalidad, el municipio presentó un significativo incremento entre 1990 y 1995, ya que este indicador pasó de 3.86 defunciones por cada 1,000 habitantes a 5.77, respectivamente. Del total de población en 1990, 6,995 personas nacieron en el Estado de México, 276 en otras entidades de la República Mexicana y una en el extranjero. Lo que representa un porcentaje de inmigración del 4% del total de la población, sin variación con respecto a 1980.

Es significativo señalar que para el año 2000, de acuerdo con los resultados preliminares del Censo General de Población y Vivienda efectuado por el INEGI, existían en el municipio un total de 9,217

habitantes, de los cuales 4,479 son hombres y 4,738 son mujeres; esto representa el 49% del sexo masculino y el 51% del sexo femenino.

De acuerdo a los resultados que presento el II Censo de Población y Vivienda en el 2005, el municipio cuenta con un total de 10,161 habitantes.

4.1.9. Infraestructura social y de comunicaciones

Educación

Para el nivel preescolar el municipio cuenta con 4 escuelas, 3 escuelas de instrucción primaria, 2 para secundaria, una preparatoria, educación extraescolar y alfabetización. Las cuales son atendidas por un total de 106 profesores.

El analfabetismo, el cual es de 7.3%, se ha combatido por medio de las campañas del Instituto Nacional de Educación para Adultos y la Coordinación contra el Analfabetismo.

Salud

El municipio cuenta con un centro de atención básico del Instituto de Salud del Estado de México y una clínica municipal atendida por médicos de la localidad que atienden los casos de prevención y cirugía menor, las personas que requieren atención especializada se canalizan a los Hospitales de Toluca.

Vivienda

En el año 2000, de acuerdo a los datos preliminares del Censo General de Población y Vivienda, efectuado por el INEGI, hasta entonces, existían en el municipio 1,723 viviendas en las cuales en promedio habitan 4.35 personas en cada una. De acuerdo a los resultados que presentó el II Censo de Población y Vivienda en el 2005, en el municipio cuentan con un total de 1,868 viviendas de las cuales 1,821 son particulares.

Servicios públicos

La disponibilidad de servicios en la vivienda se ha incrementado considerablemente en las últimas décadas en el municipio. De este modo, la proporción de las viviendas que cuentan con energía eléctrica aumentó del 77.36% a 97.66%, con agua entubada de 89% a 92% y con drenaje de 5.7% a 92%, entre 1970 a 1995.

Medios de comunicación

Los habitantes del municipio disponen de señales de radio y televisión. Los periódicos nacionales y locales circulan en la cabecera municipal. Existe una central telefónica que atiende a las poblaciones de Villa San Mateo Mexicaltzingo y San Miguel Chapultepec con el servicio doméstico y casetas públicas. Hay una agencia de correos que también da servicio telegráfico. Las líneas de autotransporte que dan servicio al municipio son las que proceden de la ciudad de Toluca, Tenango del Valle, Santiago Tianguistenco y de la ciudad de México. Existe un sitio de taxis.

Vías de comunicación

Por el municipio cruzan las carreteras de Toluca a Ixtapan de la Sal, Villa San Mateo Mexicaltzingo a Santiago Tianguistenco y Colonia San Isidro a San Mateo Atenco. Además de los caminos vecinales que lo comunican con las localidades de los municipios vecinos (INAFED, 2011).

Actividad económica

Las actividades económicas que existen en Mexicaltzingo se muestran en el Tabla 4.1.

Tabla 4.1 Actividades económicas en el municipio de Mexicaltzingo

Actividad económica	Descripción
Agricultura	Maíz, avena forrajera, cebada, zanahoria, chícharo y otras legumbres.
Fruticultura	Ciruela, duraznos, manzanas y otras frutas de clima templado.
Ganadería	Bovino, porcino y ovino. Producción de leche para autoconsumo.
Avicultura	Sólo se cría para el consumo doméstico de carne y huevos.
Apicultura	Es mínima la producción de miel.
Industria	Una fábrica metal mecánica y dos de materiales de construcción. Talleres de maquila de ropa. Talleres artesanales. Obradores de chicharrón.
Comercio	Expendios de víveres básicos.
Servicios	Hotel, loncherías, taquerías, cenadurías, gasolineras y talleres de reparación de calzado, mecánicos y eléctricos.

En 1990 las actividades económicas del municipio por sector, se distribuyeron como se muestran en la Tabla 4.2. En el municipio hay 1,969 habitantes ocupados y 27 desocupados.

Tabla 4.2 Población económicamente activa por sector en el municipio de Mexicaltzingo

Sector	PORCENTAJE (%)
Primario (Agricultura, ganadería, caza y pesca)	14.75
Secundario (Minería, petróleo, industria manufacturera, construcción y electricidad)	24.14
Terciario (Comercio, turismo y servicios)	57.94
Otros	3.17

4.2. Infraestructura y equipo actual del rastro de estudio

Actualmente el rastro se encuentra en construcción en un área de 3,210 m², de los cuales 361 m² serán destinados para el diseño de la planta de tratamiento de desechos líquidos y sólidos.

Al terminar la construcción y entrar en operación se planea el sacrificio diario de 1000 porcinos, con un consumo de agua de 450 L/porcino. La DQO del agua residual utilizada para este estudio fue de 4.37 kgDQO/m³, valor promedio del muestreo que realizó Reyes (2009) al agua proveniente del rastro municipal de Cuervaca, Morelos en donde se sacrifican porcinos.

4.3. Descripción de la propuesta técnica del proyecto

4.3.1. Operaciones y procesos unitarios propuestos

Dadas las características de los desechos líquidos de los rastros, éstos deben ser sometidos a un pretratamiento. Éste tiene por objeto separar la mayor cantidad de materia que por su tamaño o naturaleza, generaría problemas en los tratamientos posteriores, en este caso un sistema anaerobio.

Los sistemas anaerobios son los más convenientes para el tratamiento de efluentes que presentan un alto contenido de materia biodegradable (Malina y Pohland, 1992; Veall, 1993; Caldera y col., 2005; Mittal, 2006), como es el caso de los efluentes de rastros. Sin embargo, no remueven fosfato, amonio y sulfuros, por ello es necesario aplicar un tratamiento posterior adecuado, para remover este tipo de compuestos y remanentes de contaminantes orgánicos, incluyendo sólidos suspendidos (Malina y Pohland, 1992).

Un proceso aerobio puede emplearse después del tratamiento anaerobio como una etapa de pulimento al efluente (Metcalf y Eddy, 2004). La investigación realizada por Reyes (2009), para tratar efluentes de rastro muestra que un sistema acoplado anaerobio-aerobio, compuesto por un RALLFA y lodos activados, logró una remoción del 93%.

Aunado a las características del efluente, el espacio disponible para el tren de tratamiento y las normas a cumplir (NOM-001-SEMARNAT-1996 y NOM-002-SEMARNAT-1996), el tren de tratamiento resultante es el que muestra la Figura 4.5.

A continuación se describen los procesos unitarios a emplear y sus respectivas características.

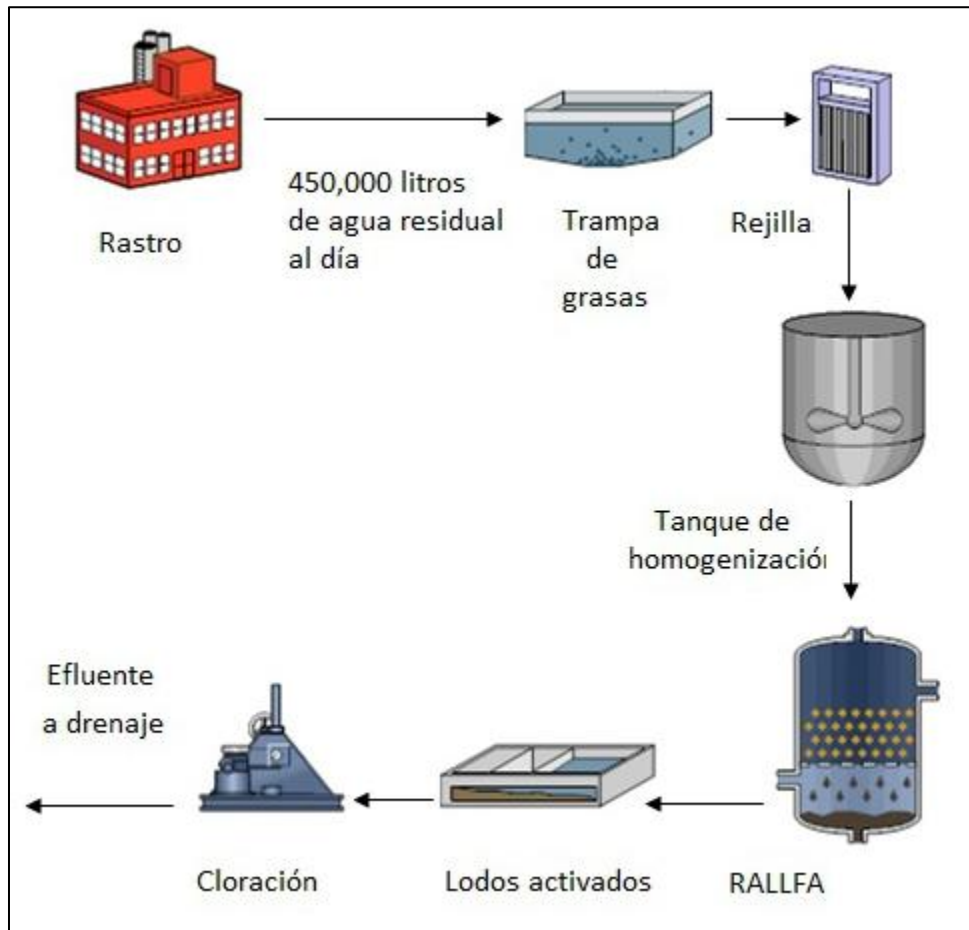


Figura 4.5 Tren de tratamiento de aguas residuales para el rastro de Mexicaltzingo

4.3.1.1. Trampa de grasa

La unidad de flotación consiste en una trampa de grasas, la cual debe cumplir con las siguientes características:

- Controladores de flujo en las entradas para protección contra sobrecargas
- El ingreso a la trampa de grasa se hará por medio de codo de 90° y la salida será por medio de una "T"

- La parte inferior del codo de entrada deberá prolongarse hasta 0.15 m por debajo del nivel de líquido
- La diferencia de nivel entre la tubería de ingreso y de salida deberá de ser no menor a 0.05 m
- La parte superior del dispositivo de salida deberá dejar una luz libre para ventilación de no más de 0.05 m por debajo del nivel de la losa del techo
- La parte inferior de la tubería de salida deberá estar no menos de 0,075 m ni más de 0.15 m del fondo
- El espacio sobre el nivel del líquido y la parte inferior de la tapa deberá ser como mínimo 0.30 m
- Un bastidor metálico con malla de alambre, el cual se encuentra en el fondo de la trampa de grasas y es retirado en forma manual periódicamente para eliminar la grasa acumulada
- Tiempo de detención de 1 a 15 minutos
- Capacidad suficiente de acumulación de grasa entre cada operación de limpieza
- Condiciones de turbulencia mínima suficiente para permitir la flotación del material.
- Dispositivos de entrada y salida convenientemente proyectados para permitir una circulación normal del influente y el efluente.
- Distancia entre los dispositivos de entrada y salida, suficiente para retener la grasa y evitar que este material sea arrastrado con el efluente.
- Debe evitarse el contacto con insectos, roedores, entre otros (CEPIS, 2003)

4.3.1.2. Rejas de limpieza manual

Deberán instalarse dos o más unidades, de forma que una de ellas pueda estar fuera de servicio por razones de mantenimiento. Es conveniente que existan compuertas a base de tablonces con sus correspondientes ranuras antes y después de cada reja de forma que la unidad pueda ser puesta en seco, en caso de tener que pintar, sustituir algún cable o cadena, eliminar obstrucciones, entre otras situaciones. Otras medidas que se deben tomar en cuenta son (Metcalf y Eddy, 1985):

- La longitud de la reja de limpieza manual no debe exceder de lo que pueda rastrillarse fácilmente a mano
- Es esencial que la velocidad de aproximación se limite a unos 0.45 m/s a caudal medio
- Los residuos recogidos de las rejillas serán dispuestos de acuerdo a su composición, en caso de ser orgánicos se destinarán al sistema anaerobio para residuos sólidos.

4.3.1.3. Tanque de homogenización

El efluente resultado del proceso de obtención de carne puede variar estacional, mensual, diaria y horariamente, no sólo en términos de flujo, sino también en el aspecto de la concentración de contaminantes (Fair y col., 1994). Es por ello, que se debe tener una etapa de homogenización y regulación del caudal. Para el caso de estudio, seis de los siete días de la semana se producen 450 m³ de agua. El caudal promedio al año es de 384.66 m³/día.

El material de construcción del tanque de homogenización debe ser concreto. La geometría del tanque debe permitir el funcionamiento del tanque como un reactor de mezcla completa. Los accesorios de servicio con los que debe contar son los siguientes:

- Instalaciones para la limpieza con chorro de agua de los sólidos y grasas que tengan tendencia a acumularse sobre las paredes del tanque
- Aliviadero de emergencia para el caso de fallo de bombas
- Toma a niveles superiores para la eliminación de las materias flotantes y espumas
- Pulverizadores de agua para evitar la acumulación de espuma en las paredes del tanque en caso de que la espuma pueda constituir un problema

Otros requerimientos son:

- Necesidades de mezclado y aireación: La aireación se requiere para evitar el desarrollo de condiciones sépticas en el agua residual. Para mantener las condiciones aerobias la cantidad de aire a suministrar varía entre 0.01 y 0.015 m³/m³*min
- Sistemas de bombeo y control: El sistema de bombeo debe dotarse de la instrumentación necesaria para controlar el caudal homogeneizado preseleccionado. Independientemente del

método de descarga utilizado, la salida del tanque debe incorporar un medidor de caudal para controlar el caudal homogeneizado (Metcalf y Eddy, 2004).

4.3.1.4. Tratamiento anaerobio: RALLFA

Dada la naturaleza del agua a tratar, el reactor adecuado es el RALLFA por sus características dado que una de las ventajas del RALLFA son los requerimientos mínimos de inversión comparados con los sistemas de lecho fluidizado y los filtros anaerobios (Rajeshwari y *col.*, 2000). Asimismo, la utilización de lodos granulares, con alta velocidad de sedimentación, hacen innecesario el uso de material de soporte que, en otras configuraciones, es necesario para tener una retención de biomasa apropiada. Otra ventaja es la elevada carga orgánica que se puede aplicar a estos sistemas (Speece, 1996). Dentro de las desventajas están el largo periodo de arranque del sistema, así como un requerimiento elevado de inóculo granular cuando se desea acelerar este proceso (Rajeshwari y *col.*, 2000).

Los sistemas con lodo granular, operando a temperaturas de 20 a 40°C, pueden recibir cargas en el intervalo de 4-32 kgDQO/m³d, de acuerdo a las características del agua a tratar. La presencia de grasas y lípidos en el agua residual puede provocar la flotación de la biomasa, floculenta y granular (Malina y Pohland, 1992).

4.3.1.4.1. Reactor

En el diseño de un proceso que involucre a un RALLFA se considera necesaria una etapa de acidificación con un tiempo de residencia de 6 a 24 horas, la cual puede lograrse en el mismo tanque de homogenización. Para desechos con concentraciones mayores a 1,000 mg/L de DQO, el volumen de reactor depende sobre todo de la concentración del agua residual y de la aplicación de la carga orgánica volumétrica (B_v) (Jiménez y Martínez, 1995).

Se recomienda modular a partir de 400 m³, dado que se obtienen ventajas durante el arranque y operación. Las ventajas que se pueden obtener con el diseño de un reactor modular en lugar de un reactor único son (Jiménez y Martínez, 1995):

- El arranque inicial de la planta se facilita, en el caso de disponer de pequeñas cantidades de lodo de inóculo. Uno o dos módulos pueden arrancarse separadamente a partir de otro módulo, de tal forma que el lodo requerido es menor y se genera inóculo para los módulos restantes

- Los eventuales trabajos de limpieza y/o reparación de los módulos por separado, se realizan con mayor facilidad, evitando el paro total de la planta
- Los diferentes compartimentos pueden operarse en serie, lo cual puede ser una opción de operación interesante

El RALLFA tendrá un recubrimiento que fungirá como aislante, para mantener constante la temperatura del reactor y mejorar su desempeño (Huerta, 2010).

La Tabla 4.3 muestra los datos utilizados para calcular el volumen del reactor, la producción esperada de metano y la producción de teórica de biomasa.

Tabla 4.3 Datos para el diseño de RALLFA

Símbolo	Parámetro	Unidades	Valor	Referencia
C	Concentración de materia orgánica	$\left[\frac{kgDQO}{m^3}\right]$	3.059	Concentración de materia orgánica después de la trampa de grasas
Q	Gasto	$\left[\frac{m^3}{d}\right]$	384.66	Caudal promedio al año
TRH	Tiempo de residencia hidráulica	[d]	0.8	Reyes, 2009
-	Tasa de producción de biogás	$\left[\frac{m^3}{kgDQO_{rem}}\right]$	0.5	Malina y Poland, 1992
-	Eficiencia de remoción de DQO	$\left[\frac{kgDQO_{rem}}{kgDQO}\right]$	0.73	Reyes, 2009
-	Producción teórica de biomasa	$\left[\frac{kgSSV}{kgDQO_{rem}}\right]$	0.1	Jiménez y Martínez, 1995

4.3.1.4.2. Volumen del reactor

A continuación se muestra el procedimiento para obtener el volumen del reactor.

Carga orgánica volumétrica (COV)

La carga orgánica volumétrica es la cantidad de sustrato (kgDQO) que se introduce por unidad de volumen (m³ reactor) por unidad de tiempo (al día). Aplicando la Ecuación 4.1 se obtiene el valor de la COV (Jiménez y Martínez, 1995):

$$B_v = \frac{C}{TRH} \dots \dots \dots (4.1)$$

Donde:

$$B_v : \text{Carga orgánica volumétrica} \left[\frac{\text{kgDQO}}{\text{m}^3 \cdot \text{d}} \right]$$

$$C : \text{Concentración de materia orgánica} \left[\frac{\text{kgDQO}}{\text{m}^3} \right]$$

$$TRH : \text{Tiempo de residencia hidráulica} [\text{d}]$$

Sustituyendo los valores de la Tabla 4.3 en la Ecuación 4.1, se tiene la carga orgánica volumétrica, la cual tiene un valor de 3.8 kgDQO/m³*d.

$$B_v = \frac{3.059}{0.8} = 3.82375 \left[\frac{\text{kgDQO}}{\text{m}^3 \cdot \text{d}} \right]$$

Volumen del reactor

Una vez obtenida la carga orgánica volumétrica, es posible calcular el volumen del reactor, con la ecuación 4.2.

$$V_r = \frac{C \times Q}{B_v} \dots \dots \dots (4.2)$$

Donde:

$$V_r : \text{Volumen del reactor} [\text{m}^3]$$

$$C : \text{Concentración de materia orgánica} \left[\frac{\text{kgDQO}}{\text{m}^3} \right]$$

$$Q : \text{Gasto} \left[\frac{\text{m}^3}{\text{d}} \right]$$

$$B_v : \text{Carga orgánica volumétrica} \left[\frac{\text{kgDQO}}{\text{m}^3 \cdot \text{d}} \right]$$

Sustituyendo los valores correspondientes en la Ecuación 4.2, se obtiene:

$$V_r = \frac{3.059 \times 384.66}{3.82} = 307.73 [\text{m}^3] \cong 308 [\text{m}^3]$$

El volumen del reactor es de 308 m³, considerando un 25% adicional para el espacio que ocupará el biogás dentro del reactor, el volumen final del reactor será de 385 m³ con una altura de 4 m, con un

área total de 96.25 m² la cual se dividirá en dos partes para hacer más versátil el arreglo en cuestiones de operación y arranque, es decir, 48.16 m² por cada módulo, a continuación el cálculo:

$$\text{Área total} = \frac{V_r}{h} [m^2] \dots \dots \dots (4.3)$$

Donde:

$$V_r = 385 [m^3]$$

$$h: \text{altura del módulo} = 4 [m]$$

$$\text{Área total} = \frac{385}{4} = 96.25 [m^2]$$

$$L = \sqrt{\text{área total}} = 9.81 [m]$$

El área y volumen del todo el arreglo: 96.25 m² y 385 m³ con dimensiones de 9.81 m x 9.81 m x 4 m

$$\text{Área por módulo} = 48.13 [m^2]$$

$$L = \sqrt{\text{área por módulo}} = 6.94 [m]$$

El área y volumen de cada módulo: 48.13 m² y 192.5 m³ respectivamente, con dimensiones de 6.94 m x 6.94 m x 4m.

4.3.1.4.3. Sistemas de alimentación

El sistema de distribución para la alimentación constituye una parte fundamental para el reactor, porque de éste depende que el lecho de lodos tenga un mejor contacto con el agua residual, evitando así que se presenten acanalamientos y la formación de zonas muertas.

Para una adecuada irrigación de la alimentación, cada boquilla del sistema de distribución debe cubrir una cierta área de la base. Se recomienda tener como mínimo una boquilla por cada 6 m² (Jiménez y Martínez, 1995).

4.3.1.4.4. Separador gas-sólido-líquido

Es un dispositivo característico del RALLFA, en el cual se produce el proceso de sedimentación de los sólidos en suspensión y la separación del biogás. Los principales objetivos del separador gas-sólido-líquido son los siguientes:

- Separa y descarga el biogás del reactor
- Evitar el posible lavado de flóculos o granos
- Prevenir el lavado de lodo granular flotante
- Provocar un efecto de pulimento mediante una sedimentación secundaria
- Permitir la decantación del lodo dentro del reactor
- Sirve como barrera para detener las expansiones excesivas de la cama de lodos, la cual está principalmente constituida por lodo floculento.

Para la construcción del separador se deben tener las siguientes consideraciones:

- Las mamparas deben tener un ángulo entre 45 y 60° con respecto a la horizontal
- El área de pasos entre los colectores debe ser del 15 al 20% de la superficie del reactor
- La altura del dispositivo es entre 1.5 y 2m para reactores de 5-7 m de altura
- Debe crearse dentro del colector una interfase líquido-gas para facilitar la evacuación del gas y tomar medidas contra la formación de natas
- El traslape entre colectores superiores e inferiores debe ser al menos 20 cm
- Se recomienda instalar mamparas frente a las canaletas de agua tratada
- El diámetro de la tubería de evacuación del gas debe ser suficientemente grande para facilitar la operación, incluso en presencia de natas o espumas
- Si hay formación de natas, se debe prever la instalación de boquillas aspersoras dentro de los colectores

- El material de construcción puede ser acero recubierto con algún material plástico, para evitar su pronta corrosión o bien de plásticos estructurales moldeados

En el separador es de gran importancia la velocidad, tanto entre los pasos entre colectores, como en la zona de sedimentación. Para la zona de paso se recomiendan velocidades ascendentes inferiores a 3 m/h. Para la zona del sedimentador, la velocidad debe mantenerse por debajo de 1 m/h (Jiménez y Martínez, 1995).

4.3.1.4.5. Producción esperada de metano

La producción esperada de biogás se obtiene como indica la Ecuación 4.4.

Producción esperada de biogás

$$\begin{aligned}
 &= \text{Tasa de producción de biogás} \times Q \times C \times \text{eficiencia de remoción} \\
 &= \left[\frac{\text{m}^3 \text{ biogás}}{d} \right] \dots \dots \dots (4.4)
 \end{aligned}$$

Sustituyendo valores de la Tabla 4.3 en la Ecuación 4.4:

$$\text{Producción esperada de biogás} = 0.5 \times 384.66 \times 3.059 \times 0.73 = 429.48 \left[\frac{\text{m}^3 \text{ biogás}}{d} \right]$$

La producción esperada de biogás es de 429.48 m³biogás/día. Si el porcentaje de metano que contiene el biogás es 60 %, la producción esperada de metano al día es de 257.69 m³CH₄/día.

4.3.1.4.6. Descarga de lodos

Se debe incorporar al diseño un dispositivo para la evacuación del lodo en exceso del reactor. Generalmente, el punto de descarga se sitúa a la mitad de la altura de la zona de lodos del reactor, aunque también debe instalarse una purga cerca del fondo.

La descarga rutinaria del exceso de lodo se realiza por la parte superior de la cama de lodos, zona donde se encuentra el lodo floculento.

La frecuencia de la descarga puede ser dividida o incluso semanal, de acuerdo al volumen que será evacuado, el cual deberá exceder por extracción el 5% del volumen del reactor (Jiménez y Martínez, 1995).

4.3.1.4.7. Recirculación del efluente

La recirculación del efluente se recomienda cuando se tienen aguas residuales con altas concentraciones y el objetivo es la dilución del nivel del DQO a valores de 15 g/L. Con una recirculación, además, se disminuye la toxicidad eventual del desecho, se mejora el contacto del lodo con el agua residual y se favorece la granulación y adaptación del lodo durante el arranque.

Otra ventaja de recircular el efluente es aprovechar en la corriente de entrada la alcalinidad producida por el mismo reactor. Lo que contribuye a una mayor estabilidad del proceso, resistencia a choques de pH y de carga orgánica, además de reducir los posibles consumos alcalinos. Como recomendación general se puede plantear la incorporación de una línea de recirculación de aproximadamente 25% del caudal, la cual será activada durante el arranque o cuando se presenten algunos problemas de acidificación en el sistema (Jiménez y Martínez, 1995).

4.3.1.4.8. Producción teórica de biomasa

La biomasa generada en el reactor se calcula con la ecuación 4.5.

Biomasa generada en el reactor

$$\begin{aligned}
 &= \text{Producción teórica de biomasa} \times Q \times C \times \text{eficiencia de remoción} \\
 &= \left[\frac{\text{kgSSV}}{d} \right] \dots \dots \dots (4.5)
 \end{aligned}$$

Sustituyendo valores tomados de la Tabla 4.3, obtenemos que la biomasa generada por el reactor es de 85.90 kgSSV/d.

$$\text{Biomasa generada en el reactor} = 0.1 \times 384.66 \times 3.059 \times 0.73 = 85.90 \left[\frac{\text{kgSSV}}{d} \right]$$

4.3.1.4.9. Materiales de construcción

El principal problema que presenta el RALLFA es la corrosión, la zona más afectada es la parte superior donde el ácido sulfhídrico (H₂S) se oxida con el aire y forma ácido sulfúrico (H₂SO₄). Ésto da lugar a bajas condiciones de pH en el sitio, lo cual hace que materiales como el concreto y el acero sean afectados. La corrosión por CO₂ se dará en la fase líquida y atacará el óxido de calcio (CaO) del concreto. Actualmente, para evitar los problemas de corrosión se acostumbra recubrir el concreto con polipropileno en la zona

de interfase líquido-atmósfera. El uso de aditivos adecuados y el concreto más apropiado debe asegurarse en toda la instalación (Jiménez y Martínez, 1995).

La Tabla 4.4 muestra las principales particularidades del reactor anaerobio de lecho de lodos de flujo ascendente para tratar los efluentes del rastro de Mexicaltzingo.

Tabla 4.4 Características de diseño del reactor RALLFA

Características	Unidades
Volumen del reactor	385 m ³
Tiempo de residencia	0.8 días
Carga orgánica volumétrica	3.82 kgDQO/m ³ d
Módulos del reactor	2
Área por módulo	48.13 m ²
Área total del reactor	96.25 m ²
Dimensiones totales	9.81 m x 9.81 m x 4 m
Boquillas de alimentación por módulo	8
Altura del dispositivo de separación líquido-sólido-gas	1.5 m
Material de construcción	Concreto cubierto de polipropileno
Producción esperada de biogás	429.48 m ³ de biogás/d
Producción esperada de biomasa	85.90 kgSSV/d

4.3.1.1. Tratamiento aerobio: Lodos activados

4.3.1.1.1. Equipo de aireación

Para la aireación del proceso se utilizarán difusores de tubo los cuales se roscan en los distribuidores de aire, que pueden disponerse a lo largo del tanque, cerca del fondo, y a un lado, o bien se pueden montar en brazos de aireación extraíbles. Los difusores de burbuja fina tienen un rendimiento de transferencia (RT) de 1.3 kgO₂/kWh en condiciones medias y de servicio (Hernández, 2001).

Con base en lo anterior, se utilizarán brazos de aireación extraíbles, dado que es posible sacar un distribuidor fuera del agua sin interrumpir el proceso y sin tener que vaciar el tanque y proceder a la extracción de los difusores para su limpieza o sustitución.

4.3.1.1.2. Tanques de aireación

El material de construcción de los tanques de aireación será concreto, de forma rectangular abierto de la parte superior. Debido a que la capacidad total requerida para el proceso excede los 140 m³, el tanque se

dividirá en dos unidades capaces de funcionar independientemente. Se deberán tener las siguientes consideraciones:

- La profundidad del agua residual dentro del tanque será de 3 a 5 m, de modo que los difusores puedan funcionar eficazmente
- Deberá proveerse un resguardo de 0.3 a 0.6 m sobre la superficie del agua
- Los tanques individuales deben tener válvulas o compuertas de entrada y salida de forma que puedan desmontarse en un momento dado para su inspección y reparación
- Los tanques de aireación deben disponer de desagües y sumideros para su vaciado (Metcalf y Eddy, 2004).

4.3.1.1.3. Procedimiento de diseño del reactor de lodos activados de mezcla completa

El reactor de lodos activados se diseño conforme al procedimiento que establece Metcalf y Eddy (2004).

Las características del influente al reactor se muestran en la Tabla 4.5 y las condiciones y parámetros propuestos para el diseño se resumen en la Tabla 4.6. También se tendrá en cuenta que la DQO biodegradable es:

$$bDQO_0 = 718.56 \left[\frac{mg}{L} \right]$$

Tabla 4.5 Características del influente al reactor de lodos activados

Parámetro	Unidades	Valor
Q	L/s	4.45
Q	m ³ /s	0.0046
Q	m ³ /día	384.66
DBO ₀	mg/L	627.71
DQO ₀	mg/L	825.93
SST ₀	mg/L	595
SSF ₀	mg/L	125
SSV ₀	mg/L	470

Tabla 4.6 Condiciones y parámetros propuestos para el diseño de un reactor de lodos activados

Parámetro	Unidades	Valor	Referencia
sDBO/DBO	%	60	Reyes, 2009
sDBO ₀	mg/L	376.62	Calculado
sDQO/DQO	%	60	Reyes, 2009
sDQO ₀	mg/L	495.56	Calculado
bDQO/DBO	mg/L	1.14	Calculado
T	°C	20	Propuesto
X _{MLSS}	g/m ³	3500	Propuesto

Cálculo de la concentración de sólidos suspendidos volátiles no biodegradables

Para conocer la concentración de sólidos suspendidos volátiles no biodegradables, primero es necesario resolver la Ecuación 4.6

$$\frac{bpDQO}{pDQO} = \frac{\left[\frac{bDQO}{DBO} (DBO_{influyente} - sDBO_{influyente}) \right]}{(DQO_{influyente} - sDQO_{influyente})} \dots \dots \dots (4.6)$$

Donde:

bpDQO: DQO biodegradable particular

pDQO: DQO particular

$\frac{bDQO}{DBO}$: Relación de bDQO y DBO

DBO_{influyente}: DBO a la entrada del reactor $\left[\frac{mg}{L} \right]$

sDBO_{influyente}: DBO soluble a la entrada del reactor $\left[\frac{mg}{L} \right]$

DQO_{influyente}: DQO a la entrada del reactor $\left[\frac{mg}{L} \right]$

sDQO_{influyente}: DQO soluble a la entrada del reactor $\left[\frac{mg}{L} \right]$

El resultado de aplicar la Ecuación 4.6 es:

$$\frac{bpDQO}{pDQO} = 0.87$$

Con el resultado anterior, se sustituyen valores en la Ecuación 4.7.

$$nbSSV = \left(1 - \frac{bpDQO}{pDQO}\right) (SSV_0) \dots \dots \dots (4.7)$$

Donde:

nbSSV: concentración de sólidos suspendidos volátiles no biodegradables $\left[\frac{g}{m^3}\right]$

SSV₀: SSV a la entrada del reactor $\left[\frac{mg}{L}\right]$

Una vez aplicada el resultado fue:

$$nbSSV = 61.1 \left[\frac{g}{m^3}\right]$$

Determinación de la producción de sólidos biológicos (P_{X, BIO})

Para determinar la P_{X, BIO} primero se calculó la concentración de bDQO en el efluente (S), empleando la Ecuación 4.8 (Metcalf y Eddy, 2004). Una vez que se obtuvo S, se calculó la P_{X, BIO} con la Ecuación 4.9 (Metcalf y Eddy, 2004). Los parámetros necesarios para la determinación de la P_{X, BIO} y de S se resumen en la Tabla 4.7 y en donde el TRS debe estar en el intervalo de 3 a 15 días.

Tabla 4.7 Parámetros definidos para la determinación de P_{X, BIO}

Parámetro	Unidades	Valor	Referencia
nbSSV	g/m ³	61.1	Calculado
S ₀ =bDQO ₀	mg/L	718.56	Calculado
Y	gSSV/gbDQO	0.68	Gorgün y col., 1995
K _s	g/m ³	30	Gorgün y col., 1995
μ _{m, 20 °C}	g/g*día	4.2	Gorgün y col., 1995
K _{d, 20 °C}	g/g*día	0.1	Gorgün y col., 1995
fd	g/g	0.15	Metcalf y Eddy, 2004
TRS	día	4	Metcalf y Eddy, 2004

$$S = \frac{[(K_s)(1 + (K_d \times TRS))]}{[(TRS)(\mu_m - K_d) - 1]} \dots \dots \dots (4.8)$$

Donde:

S : Sustrato a la salida del reactor, en este caso bDQO $\left[\frac{g}{m^3}\right]$

TRS : Tiempo de retención de sólidos [día]

μ_m : Coeficiente cinético de consumo alimento – microorganismo

K_d : Coeficiente cinético de decaimiento celular

K_s : Coeficiente cinético de reacción

El resultado de aplicar la Ecuación 4.7 fue 2.72 g/m³ lo que corresponde a 2.3 g/m³ de DBO en el efluente.

$$S = 2.72 \left[\frac{g}{m^3}\right]$$

$$P_{X,BIO} = \left[\frac{(Q_d \times Y)(S_0 - S)}{1 + (K_d \times TRS)}\right] + \left[\frac{(fd \times K_d \times Q_d \times Y \times TRS)(S_0 - S)}{1 + (K_d \times TRS)}\right] \dots \dots \dots (4.9)$$

Donde:

$P_{X,BIO}$: Producción de sólidos biológicos $\left[\frac{g}{día}\right]$

TRS : Tiempo de retención de sólidos [día]

Q_d : Gasto de diseño $\left[\frac{m^3}{día}\right]$

Y : Coeficiente cinético de producción celular

K_d : Coeficiente cinético de decaimiento celular

S_0 : Sustrato a la entrada del reactor, en este caso bDQO $\left[\frac{g}{m^3}\right]$

S : Sustrato a la salida del reactor, en este caso bDQO $\left[\frac{g}{m^3}\right]$

Aplicando la ecuación 4.8, la producción de sólidos biológicos resultó $P_{X, BIO} = 141,765.97$ g/día lo cual equivale a 141.77 kg/día de lodos biológicos.

Determinación de la producción de SSV ($P_{X,SSV}$)

Con la Ecuación 4.10 se determina la producción de sólidos suspendidos volátiles:

$$P_{X,SSV} = P_{X,BIO} + (Q_d \times nbSSV) \dots \dots \dots (4.10)$$

$P_{X,SSV}$: Producción de sólidos suspendidos volátiles $\left[\frac{g}{día}\right]$

$P_{X,BIO}$: Producción de sólidos biológicos $\left[\frac{g}{día}\right]$

Q_d : Gasto de diseño $\left[\frac{m^3}{día}\right]$

$nbSSV$: concentración de sólidos suspendidos volátiles no biodegradables $\left[\frac{g}{m^3}\right]$

El resultado de la ecuación fue $P_{X,SSV}$ 165,268.54 g/día lo cual equivale a 165.27 kg/día.

Determinación de la producción de sólidos suspendidos totales

La Ecuación 4.11 indica como calcular la producción de sólidos suspendidos totales:

$$P_{X,SST} = \frac{P_{X,BIO}}{0.85} + (Q_d \times nbSSV) + (Q_d(SST_0 - SSV_0)) \dots \dots \dots (4.11)$$

Donde:

$P_{X,SST}$: Producción de sólidos suspendidos totales $\left[\frac{g}{día}\right]$

$P_{X,SSV}$: Producción de sólidos suspendidos volátiles $\left[\frac{g}{día}\right]$

$P_{X,BIO}$: Producción de sólidos biológicos $\left[\frac{g}{día}\right]$

Q_d : Gasto de diseño $\left[\frac{m^3}{día}\right]$

$nbSSV$: concentración de sólidos suspendidos volátiles no biodegradables $\left[\frac{g}{m^3}\right]$

SST_0 : SST a la entrada del reactor $\left[\frac{mg}{L}\right]$

SSV_0 : SSV a la entrada del reactor $\left[\frac{mg}{L}\right]$

El resultado fue $P_{X, SST} = 238,368.26$ g/día, lo cual equivale a 238.37 kg/día.

Cálculo de la masa de sólidos suspendidos volátiles en el reactor

Para calcular la masa de sólidos suspendidos volátiles en el reactor, se aplica la Ecuación 4.12:

$$SSVLM = P_{X,SSV} \times TRS \dots \dots \dots (4.12)$$

Donde:

$SSVLM$: Masa de sólidos suspendidos volátiles en el licor mezclado [kg]

$P_{X,SSV}$: Producción de sólidos suspendidos volátiles $\left[\frac{kg}{día}\right]$

TRS : Tiempo de retención de sólidos [día]

El resultado fue 661.074 kg de SSVLM.

Cálculo de la masa de sólidos suspendidos totales en el reactor

Para obtener la masa de sólidos suspendidos totales en el reactor, se emplea la Ecuación 4.13:

$$SSLM = P_{X,SST} \times TRS \dots \dots \dots (4.13)$$

Donde:

$SSLM$: Masa de sólidos suspendidos en el licor mezclado [kg]

$P_{X,SST}$: Producción de sólidos suspendidos totales $\left[\frac{kg}{día}\right]$

TRS : Tiempo de retención de sólidos [día]

El resultado de aplicar la ecuación 4.12 fue 953.47 kg.

Determinación del volumen del reactor

Con la Ecuación 4.14 se deduce el volumen del reactor:

$$V_t = \frac{SSLM}{X_{SSLM}} \dots \dots \dots (4.14)$$

Donde:

V_t : Volumen total del reactor [m^3]

$SSLM$: Masa de sólidos suspendidos en el licor mezclado [g]

X_{SSLM} : Concentración de sólidos suspendidos en el reactor [$\frac{g}{m^3}$]

El volumen total del reactor resultó de $272.42 \approx 272 m^3$.

Revisión del tiempo de retención hidráulica

Para determinar el tiempo de retención hidráulico se empleó la Ecuación 4.14.

$$\theta = \frac{V_t}{Q_d} \dots \dots \dots (4.14)$$

Donde:

θ : Tiempo de retención hidráulica [h]

V_t : Volumen total del reactor [m^3]

Q_d : Gasto de diseño [$\frac{m^3}{hrs}$]

El resultado fue 16.99 hrs, valor que es menor al tiempo de retención hidráulica que reporta Reyes (2009) para la etapa de lodos activados, tratando agua residual de rastro.

Determinación del oxígeno requerido (DO_2)

Con la Ecuación 4.15, se determinó la cantidad de oxígeno necesario para el sistema.

$$DO_2 = Q_d(S_0 - S) - 1.42(P_{X,BIO}) \dots \dots \dots (4.15)$$

Donde:

DO_2 : Demanda de oxígeno [$\frac{kgO_2}{día}$]

Q_d : Gasto de diseño [$\frac{m^3}{día}$]

S_0 : Sustrato a la entrada del reactor, en este caso $bdQO_0 \left[\frac{kg}{m^3} \right]$

S : Sustrato a la salida del reactor, en este caso $bdQO \left[\frac{kg}{m^3} \right]$

$P_{X,BIO}$: Producción de sólidos biológicos $\left[\frac{kg}{día} \right]$

El requerimiento de oxígeno fue 74.04 kgO₂/día

Determinación del consumo energético

El consumo energético se calculó con el rendimiento de transferencia (RT) de 1.3 kgO₂/kWh en condiciones medias y de servicio.

$$CE = \frac{DO_2}{RT} \dots \dots \dots (4.16)$$

Donde:

CE : Consumo energético por aireación en una hora $\left[\frac{kWh}{día} \right]$

DO_2 : Demanda de oxígeno $\left[\frac{kgO_2}{día} \right]$

RT : Rendimiento de transferencia $\left[\frac{kgO_2}{kWh} \right]$

El resultado de aplicar al ecuación es $CE= 56.95 \approx 57$ kWh/día.

Revisión de la intensidad de carga

La intensidad de carga (A/M), que es la relación entre la carga orgánica alimentada y la cantidad de microorganismos disponibles en el sistema.

$$\frac{A}{M} = \frac{Q_d \times S_0}{X_{SSVLM} \times V_t} \dots \dots \dots (4.17)$$

Donde:

$\frac{A}{M}$: Intensidad de carga $\left[\frac{g}{g \cdot \text{día}}\right]$

Q_d : Gasto de diseño $\left[\frac{m^3}{\text{día}}\right]$

S_0 : Sustrato a la entrada del reactor, en este caso $bdQO_0 \left[\frac{g}{m^3}\right]$

X_{SSVLM} : Concentración de sólidos suspendidos volátiles en el licor mezclado $\left[\frac{g}{m^3}\right]$

V_t : Volumen total del reactor $[m^3]$

La intensidad de carga A/M resultó de 0.34, donde según Metcalf y Eddy (2004) ésta relación puede oscilar entre 0.2 y 0.4 g/g*día, para reactores de lodos activados de mezcla completa, por lo tanto se acepta el diseño.

Cálculo de la remoción de DBO

$$DBO_{removida} = \frac{Q_d \times (S_0 - S)}{\frac{bdQO}{DBO}} \dots \dots \dots (4.18)$$

Donde:

Q_d : Gasto de diseño $\left[\frac{m^3}{\text{día}}\right]$

S_0 : Sustrato a la entrada del reactor, en este caso $bdQO_0 \left[\frac{kg}{m^3}\right]$

S : Sustrato a la salida del reactor, en este caso $bdQO \left[\frac{kg}{m^3}\right]$

$\frac{bdQO}{DBO}$: Relación de $bdQO$ y DBO

La remoción de DBO fue de 240.54 kg/día.

Las características del tanque de aireación se exponen en la Tabla 4.8.

Tabla 4.8 Características del tanque de aireación

Parámetro	Unidades	Valor
Volumen total requerido	m ³	272
Consumo de oxígeno	kgO ₂ /día	74.04
Consumo energético	kWh/día	57
Producción de lodos	kg/d	238.37

4.3.1.1.4. Instalaciones para la separación de sólidos (sedimentador)

Existen dos tipos de tanques circulares de sedimentación secundaria: Alimentación periférica y de alimentación central. Ambos utilizan mecanismos rotatorios para transportar y evacuar el lodo del fondo del clarificador. A su vez, existen dos tipos de mecanismos de succión: El que se mantiene por reducción de la altura estática en cada una de las tuberías de extracción y el lodo que se extrae por presión hidrostática o por bombeo.

El sistema de extracción de lodos debe cumplir las dos condiciones operativas siguientes:

1. Deberá tener una capacidad elevada tal que, cuando se desee una tasa elevada de recirculación de lodo, no se produzca succión del líquido existente en la parte superior a través del lodo.
2. El mecanismo debe ser suficientemente robusto para transportar y extraer los lodos muy densos que se acumulen en el tanque de sedimentación durante periodos de rotura mecánica o fallo de energía.

4.3.1.1.5. Procedimiento de diseño del sedimentador secundario

El objetivo del sedimentador secundario es la separación de sólidos y líquidos. El procedimiento de diseño que se llevó a cabo fue el siguiente:

Definición del gasto de diseño.

Éste es el mismo que se ha utilizado en todo el tren de tratamiento y para facilidad en el diseño se expresará en m³/día.

$$Q_d: \text{Gasto de diseño} = 384.66 \left[\frac{m^3}{día} \right]$$

Determinación de la tasa de recirculación de lodos activados (R)

Se propone una concentración de lodos en el sedimentador secundario (X_r) que puede estar entre 4,000 y 12,000 g/m³. Para este caso se seleccionó una concentración de 8000 g/m³. Con este valor se determinó la tasa de recirculación (Metcalf y Eddy, 2004):

$$R = \frac{X_{SSLM}}{X_r - X_{SSLM}} \dots \dots \dots (4.19)$$

Donde:

R: Tasa de recirculación

X_r : Concentración de lodos en el sedimentador secundario $\left[\frac{g}{m^3}\right]$

X_{SSLM} : Concentración de sólidos suspendidos en el reactor $\left[\frac{g}{m^3}\right]$

Sustituyendo valores en la ecuación 4.19, la tasa de recirculación es de 0.78.

Concentración de SST en el efluente

Para asegurar que una concentración promedio anual de SST en el efluente del sedimentador sea de 30 mg/L, es necesario que la tasa de aplicación hidráulica (TAH) esté muy cerca y de preferencia por debajo de 0.8 m/h es decir 19.2 m³/m²*día (WEF, 1992).

Selección de la tasa de aplicación hidráulica (TAH) y cálculo del área superficial necesaria para la sedimentación

Para el sedimentador secundario de cualquier proceso de lodos activados, excepto aireación extendida, la TAH es de 16-28 m³/m²*día (Metcalf y Eddy, 2004). Para el diseño en este trabajo se tomó una carga promedio de 19 m³/m²*día, con el objetivo de tener un efluente promedio anual de 30 mg/L. El área superficial ideal es (Metcalf y Eddy, 2004):

$$AS = \frac{Q_d}{TAH} \dots \dots \dots (4.20)$$

Donde:

AS: Área superficial ideal para la sedimentación [m²]

Q_d : Gasto de diseño $\left[\frac{m^3}{\text{día}} \right]$

TAH : Tasa de aplicación hidráulica $\left[\frac{m^3}{m^2 \cdot \text{día}} \right]$

El área superficial requerida es de 20.25 m².

Determinación del volumen del sedimentador secundario

La WEF (1992) establece que la profundidad del sedimentador secundario después de un sistema de lodos activados debe estar entre 4 y 5 m. Para esta propuesta se seleccionó una profundidad de 4.5 m, con la cual se obtuvo un volumen de sedimentador secundario de 91.10 m³.

Revisión de la carga de sólidos del sedimentador

Para corroborar que se estuviera dentro del rango que establece la literatura de 4 y 6 kg/m²*hr, se emplea (Metcalf y Eddy, 2004):

$$CS = \frac{(1 + R)(Q_d \times X_{SSLM})}{(AS) \left(\frac{24hrs}{\text{día}} \right)} \dots \dots \dots (4.21)$$

Donde:

CS : Carga de sólidos en el sedimentador secundario $\left[\frac{kg}{m^2 hr} \right]$

R : Tasa de recirculación

X_{SSLM} : Concentración de sólidos suspendidos en el reactor $\left[\frac{kg}{m^3} \right]$

Q_d : Gasto de diseño $\left[\frac{m^3}{\text{día}} \right]$

AS : Área superficial del sedimentador secundario [m²]

La carga de sólidos del sedimentador, resultado de aplicar la Ecuación 4.21 fue de 4.93 kg/m²h.

En la Tabla 4.9 se muestran las características del sedimentador secundario.

Tabla 4.9 Características de diseño del sedimentador secundario

Parámetro	Unidades	Valor
Área requerida	m ²	20.25
Volumen requerido	m ³	91.10
Carga de sólidos	kg/m ² hr	4.93
tasa de recirculación		0.78

4.3.1.1.6. Bombas para purga de lodos y para recirculación

El tipo de bomba a utilizar para transportar de un punto a otro de la planta los lodos producidos en las plantas de tratamiento varía de acuerdo al tipo de lodo a trasladar. En la Tabla 4.10 se describen las bombas para el traslado de lodos.

Tabla 4.10 Bombas para el traslado de lodos (realizado a partir de Metcalf y Eddy, 2004)

Tipo de lodo	Bomba aplicable	Comentario
Lodo digerido	De pistón; tipo centrífugas de vórtice, bombas de desplazamiento positivo y de cavidad progresiva	El lodo bien digerido es homogéneo, contiene del 5 al 8% de sólidos y cierta cantidad de burbujas de gas, pero puede contener hasta el 12% de sólidos. El lodo mal digerido puede ser difícil de manipular. Debe disponerse, al menos de una bomba de desplazamiento positivo.
Activado de retorno	Bomba centrífuga inatascable o de flujo mixto	El lodo es muy diluido y contiene únicamente sólidos finos de tal modo que pueda ser rápidamente bombeado con estos tipos de bombas, funcionando a baja velocidad porque la altura de bombeo es pequeña y no debe alterarse el carácter floculante del lodo

4.3.1.2. Cloración

La unidad de desinfección a base de cloro se compone de caseta de cloración, almacén y tanque de contacto de cloro (López, 2010).

La capacidad del clorador se calculará tomando en cuenta el gasto medio, en este caso es de 4.45 L/s y la dosis recomendada para efluentes de lodos activados de 8 mg/L. Por lo tanto la capacidad del clorador es de (López, 2010):

$$\frac{Cl_2}{\text{día}} = \text{Gasto} \left[\frac{L}{S} \right] \times \text{Dosis} [mg/L] \dots \dots \dots (4.22)$$

Sustituyendo valores:

$$\frac{Cl_2}{\text{día}} = 4.45 \left[\frac{L}{s} \right] \times 8 \left[\frac{mg}{L} \right] = 35.6 \left[\frac{mg}{s} \right] = 3.1 \frac{kg}{\text{día}} \text{ de cloro}$$

El gasto de cloro al día es de 3.1 kg/día de cloro. Para calcular el número de tanques necesarios para tener una reserva de 20 días, se utiliza la Ecuación 4.23 (López, 2010). Un tanque de 50kg cubre con los requerimientos de cloro al día, por lo tanto:

$$N = \frac{1.25 \times Q \times t}{C} \dots \dots \dots (4.23)$$

Donde:

N: Número de tanques

Q: Consumo de cloro al día $\left[\frac{kg}{\text{día}} \right]$

t: tiempo de almacenaje o traslado

C: Capacidad del tanque: 50 kg

Sustituyendo valores:

$$N = \frac{1.25 \times 3.1 \times 20}{50} = 1.5 \cong 2$$

El número de tanques que se deben adquirir para tener una reserva de 20 días es de 2 tanques cada uno con capacidad de 50 kg.

La ecuación 4.24 muestra como calcular el volumen del tanque de cloración (López, 2010):

$$V_c = Q_d \times t_c \dots \dots \dots (4.24)$$

Donde:

V_c : Volumen del tanque de cloración [m^3]

Q_d : Gasto de diseño $\left[\frac{m^3}{s} \right]$

t_c : tiempo de contacto [s]

Con un tiempo de contacto de 30 minutos, sustituyendo valores en la Ecuación 4.24:

$$V_c = 0.00445 \times 30 \times 60 = 8 \text{ m}^3$$

Considerando que la altura del tanque puede ser de 1 a 2 m y que la forma del tanque es rectangular con una relación de largo y ancho de 2 a 1 (López, 2010). Las dimensiones del tanque de contacto son: ancho: 2 m; largo: 4 m y tirante: 1 m.

Son requisitos primordiales de diseño en la cloración de aguas la continuidad, adecuación y confiabilidad del servicio, que fundamentalmente estarán aseguradas mediante:

- El almacenamiento del cloro en cantidades suficientes para satisfacer los requerimientos máximos. Debe disponerse de un abastecimiento de 30 días. El cloro líquido nunca se deberá manejar bajo el nivel de piso. El gas es pesado y se asienta en las depresiones.
- Poseer el número suficiente de cloradores para satisfacer las velocidades máximas de dosificación cuando la unidad más grande se encuentre fuera de servicio.
- Un almacén de refacciones de acceso fácil, con énfasis en los componentes delicados.
- Básculas a nivel de piso, que proporcionen un servicio ininterrumpido cuando se están cambiando los cilindros vacíos. Además las básculas miden la cantidad de cloro remanente en los cilindros y sus lecturas permiten comprobar la exactitud de la dosimetría.
- Abastecimiento de agua para disolver el cloro y conducirlo a los puntos de aplicación.
- El cuarto de cloración debe mantenerse cerca de 21.1°C y permitir que el cloro líquido se evapore con la rapidez necesaria para satisfacer las máximas demandas.

- Debido a que las soluciones de cloro y el cloro líquido o gaseoso que contenga humedad son corrosivos, la tubería para su transporte debe ser de vidrio, hule duro, plástico u otro material de resistencia probada. El cloro líquido o gaseoso seco se puede transmitir en forma segura mediante tubería de hierro negro o forjado.
- Los cloradores y salas de almacenamiento de cloro deben estar separados de los otros espacios de operación y ventilados independientemente. Se deberá tener una ventana de observación en el muro divisorio interior. Las salas deberán contar con extractores a nivel de piso pues el cloro gaseoso es pesado. Los controladores del ventilador y las máscaras de gas deberán localizarse en la entrada de la instalación.

Finalmente, los sistemas de abastecimiento de agua a la planta, se deben proteger de los contraflujos en todas las partes en que se conecten a equipo hidráulico. En los sistemas duales o múltiples de aguas, la red de tubería que conduce el agua pura se debe proteger contra conexiones cruzadas de otras redes (Fair y col., 1994).

4.3.2. Motor para el aprovechamiento del biogás

Los quemadores de gas convencionales se pueden ajustar fácilmente al biogás cambiando la razón estequiométrica aire-biogás. El quemado del biogás es una tecnología establecida y confiable, con demandas bajas en la calidad del biogás. La presión generalmente tiene que estar entre 8 y 25 mbar. Se recomienda para reducir los niveles de H_2S debajo de 1,000 ppm para mantener el punto de condensación en aproximadamente $150\text{ }^\circ\text{C}$ (Valdés, 2010).

Para evitar la explosión o incendio por retroceso de llama y como seguridad en el sistema se colocará una serie de trampas denominadas: trampa de ácido sulfhídrico, trampa o filtro de dióxido de carbono, trampa de agua y trampa de llama. De esta forma se puede utilizar en calidad de gas natural o metano sin ningún riesgo ($7,974$ a $9,514\text{ kcal/m}^3$). El sistema también incluirá un intercambiador de calor.

El motogenerador seleccionado está integrado por un motor de combustión interna para ser accionado con biogás "Econogas" de la empresa MOPESA, acoplado con un generador de 30 kW, con un voltaje de generación de 220-240 volts. El motogenerador trabaja con biogás, con concentraciones de metano mínimas del 60% y consumos de 15m^3 a 17m^3 por hora a plena carga. Las características del generador y motor se muestran en la Tabla 4.11 y la Tabla 4.12, respectivamente.

Tabla 4.11 Características de diseño del generador Econogas

Generador	Síncrono seriado
Potencia del generador (kW)	30kW
Voltaje de generación (V)	220-440
Factor de potencia	0.8
Frecuencia de luz	60
R.P.M.	1800
Fases	3
Hilos	4
Ciclo de operación	continuo y/o intermitente

Tabla 4.12 Características de diseño del motor Econogas

Motor G4.248	
Número de cilindros	4
Desplazamiento cúbico en L	4.07
Tiempos	4
Enfriamiento	50% agua y 50% anticongelante
Sistema eléctrico	12 V
Tipo de encendido	electrónico
Orden de encendido	1-3-4-2
Rotación	sentido de las manecillas de reloj
Diámetro de cilindro	100.96 mm

La producción de gas en un sistema anaerobio es continua en el transcurso del día, no ocurre lo mismo con el consumo que generalmente está concentrado en una fracción del día. Por este motivo será necesario almacenar el gas producido durante las horas en que no se consuma. Las opciones de almacenamiento se resumen en la Tabla 4.13.

Tabla 4.13 Opciones comunes de almacenamiento del biogás (Wallis y col., 1989)

Presión	Recurso de almacenamiento
Baja (0.14-0.41 bar)	Mantener el biogás confinado
Baja	Recolección de biogás
Media (1.05-1.97bar)	Tanque para gas propano y butano
Alta (200 bar)	Cilindros de gas comercial

4.3.3. Suministro de energía

Como resultado del tratamiento de los residuos líquidos del rastro Mexicaltzingo se obtendrán 429.48 m³ de biogás al día. Los cuales podrán aprovecharse para generar energía eléctrica y para calentar el agua utilizada en el proceso de escaldado. Con la producción de biogás esperada se generarían 2792 kWh/día (10,051.2 MJ/día) con lo cual se podría mantener encendidos 1,163 focos de 100W durante 24 horas. Al año se obtendrán 3, 668,219.42 MJ.

El consumo eléctrico al año, proyectado para el rastro será de 1, 920, 484.6 kWh (6, 913, 744.56 MJ), tomando como referencia el sacrificio de 1,000 porcinos diarios. El consumo de una línea de matanza para 80 cerdos/hora es el mostrado en la Tabla 4.14. En esta también se indica la energía requerida para almacenar la carne producto del sacrificio y la energía que consumirá el tratamiento de residuos líquidos. El costo por la energía eléctrica necesaria, a lo largo del horizonte de planeación, con referencia en los precios pronosticados de la Tabla 6.6 es de \$ 35, 651,630.06.

Tabla 4.14. Consumo eléctrico proyectado para el rastro de Mexicaltzingo (a partir de RUTA, 2007)

Área del rastro	[kW]	Horas al día [h]	Energía al día [kWh]	Días al año	Energía al año [kWh]
Maquinaria de la línea de matanza	120	12.5	1,500	312	468,000
Equipos frigoríficos	140	24	3,360	365	1,226,400
Otros equipos (compresor, alumbrado, etc.)	50	13	650	312	202,800
Tratamiento de residuos líquidos		24	63.79	365	23284.62
Total	310		5,573.8		1,920,484.6

El consumo de energía térmica será de 2, 473, 519.77 MJ/año (Tabla 4.15), se considera que para procesar cada porcino se ocupan 178 gramos de gas LP, es decir al año la cantidad de gas LP requerida es de 55,536 kg. A lo largo del horizonte de planeación, este consumo representa un gasto de \$22, 062,861.78.

Tabla 4.15. Consumo térmico proyectado para el rastro de Mexicaltzingo

Número de porcinos al día	kgGLP/porcino	kgGLP/día	MJ/día	Días al año	kgGLP/año	MJ/año
1000	0.178	178	7,927.95	312	55,536	2,473,519.77

El uso de un motogenerador con intercambiador de calor nos permitirá aprovechar aproximadamente el 80% de la energía generada por el biogás y así aportar a la demanda energética del rastro.

4.3.4. Programas de mantenimiento

4.3.4.1. Mantenimiento diario

Las actividades a efectuar diariamente en la planta de tratamiento son:

- Limpiar los elementos flotantes en los tanques
- Mantener limpia la rejilla de entrada a la planta. Retirar los materiales no degradables y colocarlos en un lugar protegido de los insectos o depredadores. Estos elementos serán dispuestos como residuos sólidos.
- Limpiar las bocas de tubería a la entrada y salida de los tanques. Además de observar el correcto funcionamiento de las tuberías.
- Revisar la correcta operación eléctrica y mecánica de los equipos (amperaje y voltaje)
- Verificar que los difusores funcionen adecuadamente
- Destapar la tubería del retorno de lodos en caso de ser necesario
- Efectuar los análisis necesarios en el sitio como: pH, oxígeno disuelto y concentración de lodos
- Verificar el manto de lodos en el clarificador para prevenir el escape de lodos en el agua tratada
- Inspeccionar visualmente el aspecto que presenta el tanque de aireación. Las burbujas gruesas indican que los difusores se están incrustando y deben limpiarse con ráfagas de aire o lavarse. Una cantidad excesiva de agua burbujeando indica un fallo en alguna conexión (Botero, 2010).

4.3.4.2. Mantenimiento semanal

Las acciones que se deben realizar cada semana en la planta de tratamiento son:

- Retirar de los alrededores del equipo y planta los desechos y/o desperdicios. Estos elementos serán dispuestos como residuos sólidos.
- Raspar los muros de los sedimentadores. Al impulsar el lodo hacia la parte baja del sedimentador tener cuidado de no agitar en exceso el agua.
- Ajustar el caudal de la bomba dosificadora si fuese necesario

- Cuando la planta empieza a operar correctamente, el proceso de limpieza del sedimentador secundario puede ser semanal o cuando la experiencia del operario lo considere conveniente.
- Supervisar el correcto funcionamiento de la etapa de cloración (Botero, 2010).

4.3.4.3. Mantenimiento mensual

Las labores a ejecutar mensualmente en la planta de tratamiento son:

- Verificar la tensión y la temperatura de los motores
- Dar mantenimiento al equipo de aireación de acuerdo al manual del fabricante. Para la inspección de difusores de burbuja fina se recomienda (Botero, 2010):
 - Añadir agua hasta alcanza un nivel de 50 o 70 mm aproximadamente sobre los difusores
 - Inspeccionar que no existan fugas de aire
 - Verificar que todos los difusores tengan una distribución uniforme de aire
 - Si el tanque de aireación debe permanecer fuera de servicio durante un periodo prolongado, es importante mantener un nivel mínimo de 1m de agua sobre los difusores o en su defecto almacenar los difusores
- Controlar fauna nociva y maleza (fumigar y/o podar áreas verdes)

4.3.4.4. Mantenimiento anual

Para conservar o bien prolongar la vida útil de la planta de tratamiento, cada año se debe:

- Cepillar y pintar las partes metálicas y tuberías con pintura adecuada para el ambiente en el que se encuentran instaladas
- Drenar completamente el sedimentador secundario inspeccionando el estado estructural y los elementos metálicos sumergibles efectuando los mantenimientos del caso

Si las operaciones de la planta lo permiten, es recomendable el siguiente programa de mantenimiento una vez al año (Botero, 2010):

- Evacuar el tanque

- Quitar el exceso de sedimentos sólidos acumulados
- Limpiar los difusores de ser necesario
- Inspeccionar los soportes, verificar que todos los componentes estén intactos y apretados
- Inspeccionar los difusores, verificar que los anillos estén en su lugar y apretados

4.3.4.5. Mantenimiento eventual

Las trampas de grasa deben operarse y limpiarse regularmente para prevenir el escape de cantidades apreciables de grasa y la generación de malos olores. La frecuencia de limpieza debe determinarse con base en la observación. Generalmente, la limpieza debe hacerse cada vez que se alcance el 75% de la capacidad de retención de grasa como mínimo. Dado que las grasas, que son más livianas que el agua, quedan a flote y pueden ser extraídas periódicamente por medio de un bastidor metálico con una malla de alambre. El bastidor, que reposa en el fondo del dispositivo es subido en forma manual para retirar la grasa o nata sobrenadante. Luego se vuelve a colocar en el mismo lugar.

Se pueden presentar problemas de formación de canales internos en el lodo depositado en el fondo del sedimentador. Este problema se detecta en el retorno del lodo al tanque de aireación cuando este se nota de muy baja concentración. Con el raspado y movimiento cuidadoso de los lodos en el fondo del tanque sedimentador, se logrará un correcto retorno de los mismos al tanque de aireación (Botero, 2010).

Cuando el lodo se vuelve demasiado denso se dificulta su retorno al tanque de aireación, una agitación en el fondo del sedimentador hará una mejor dilución de los lodos.

Lavar la tubería que conduce el lodo de purga después de cada uso, ya que está propensa a obstruirse debido a la sedimentación de lodo en la tubería.

Remover el material sólido del fondo del sistema anaerobio cuando exista una obstrucción en las salidas de la tubería de alimentación.

Brindar el mantenimiento de acuerdo a las recomendaciones del fabricante de los dispositivos

Tomar muestras del influente y efluente del sistema. La frecuencia de los muestreos depende del fin que tengan los datos obtenidos (Botero, 2010).

En la Tabla 4.16 se presentan las actividades a realizar para dar mantenimiento a la planta de tratamiento. En la Tabla 4.17 señala el programa de mantenimiento de obras y equipos.

Tabla 4.16 Programa de mantenimiento

Actividades	Anual	Mensual	Semanal	Diaria
Limpieza				
Monitoreo o vigilancia de instalaciones eléctricas, red de agua potable, agua residual, entre otras.				
Pintura				
Control de residuos sólidos y líquidos				
Control de fauna nociva y maleza				

Tabla 4.17 Programa de mantenimiento de obras y equipos

Área	Anual	Mensual	Semanal	Diaria
Trampa de grasas				
Rejillas				
RALLFA				
Tren de lodos activados				
Sistema de bombeo				
Electrificación				
Vialidades interiores, áreas de circulación y andadores				
Obra civil				

4.3.5. Escenarios con diferentes volúmenes de agua residual

Son pocos los proyectos que se encuentran claramente determinados y tan directos en su posible desarrollo que justifiquen la opción de un solo periodo de preparación. La optimización puede requerir de aumentos progresivos en el tratamiento o bien el escalonamiento de las capacidades de la planta (Lynn, 1964). Las plantas de tratamiento se diseñan generalmente para trabajar con los flujos máximos diarios y aun los máximos horarios dentro del alcance del período de diseño. En el caso del rastro en construcción de Mexicaltzingo, el sistema modular ofrece la posibilidad de tratar el agua residual producto del sacrificio de 1,000 cerdos/día como máximo y un mínimo de 300 cerdos/día. Además la distribución funcional, que coloca en paralelo a los componentes múltiples de los sistemas de tratamiento, incluyendo los espacios para agregar componentes de la misma categoría, ofrece las siguientes ventajas (Fair y col., 1994):

- Flexibilidad de operación y economía en la construcción mediante el dimensionamiento óptimo de las unidades múltiples de la misma clase
- Ajuste a su sitio de los componentes de la planta
- Centralización de los suministros y servicios compartidos
- Ampliación selectiva de los componentes más efectivos

Dado que el rastro tendrá una distribución funcional, en caso de aumentar la producción será posible ampliar la capacidad del sistema de tratamiento de aguas residuales agregando módulos a cada proceso ya existente. En el caso contrario, sólo se utilizará un módulo de cada proceso, mientras la producción retoma sus niveles normales.

4.3.6. Programas de ejecución, administrativos, de capacitación y asistencia técnica

La Figura 4.6 muestra el programa de ejecución para el proyecto de generación de energía renovable a partir de desechos líquidos del rastro Mexicaltzingo el cual incluye;

- Caracterización de las aguas residuales
- Pruebas en reactor prototipo a nivel laboratorio
- Arranque de reactores prototipo anaerobios
- Operación de reactores anaerobios prototipo
- Uso del metano
- Elaboración del proyecto ejecutivo

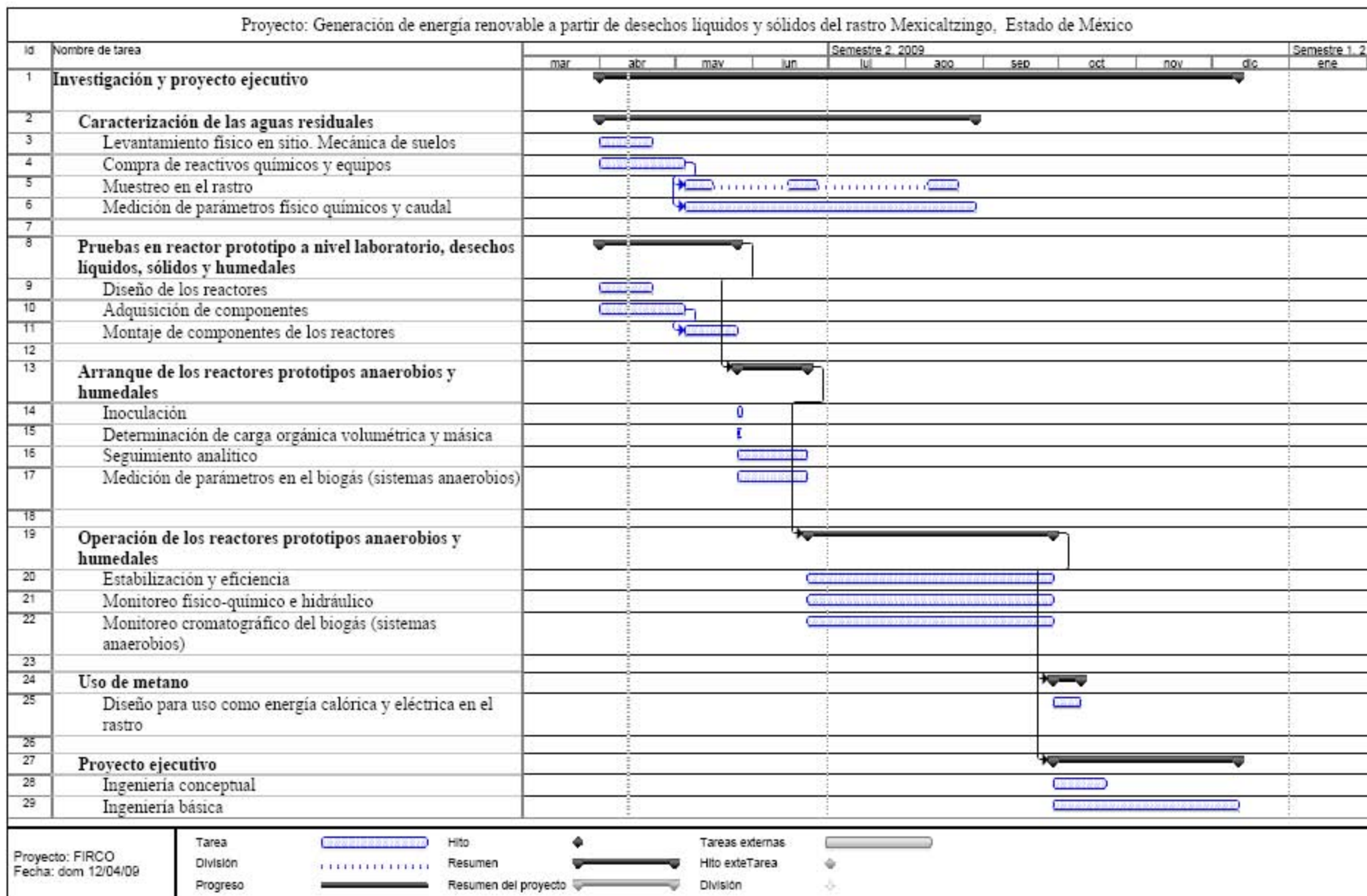


Figura 4.6 Programa de ejecución del proyecto de generación de energía renovable a partir de desechos líquidos del rastro Mexicaltzingo

4.4. Cumplimiento de normas sanitarias y ambientales

De acuerdo a Reyes (2009), quién realizó pruebas en laboratorio sobre la calidad del efluente del tren de tratamiento RALLFA-Lodos Activados, la calidad del agua resultante cumple con los límites de descarga para materia orgánica establecidos en la norma mexicana NOM-001-SEMARNAT-1996 y la NOM-002-SEMARNAT-1996. En el estudio realizado la concentración de DBO₅ promedio en el efluente fue de 42 mg/L (Tabla 4.18).

De acuerdo con los niveles establecidos de materia orgánica, el efluente cumple con los requerimientos de descarga a cuerpos receptores tipo A, B y C. En cuanto al PT, se tiene una concentración promedio de 11.9 mg/L, adecuada para la descarga a cuerpos receptores tipo A y B con excepción de estuarios (Reyes, 2009). Sin embargo, los niveles de NT sobrepasan el límite máximo establecido por la NOM-001-SEMARNAT-1996.

Tabla 4.18 Límites máximos permisibles para contaminantes básicos en las descargas de aguas residuales en aguas y bienes nacionales de la NOM-001-SEMARNAT-1996 y calidad del efluente del sistema acoplado RALLFA-LA de la propuesta (SEMARNAT, 1997a y 1997b; Reyes, 2009)

Parámetros			DBO ₅ [mg/L]	Nitrógeno Total [mg/L]	Fósforo Total [mg/L]
Ríos	Uso en riego agrícola (A)	P.M.	150	40	20
		P.D.	200	60	30
	Uso público urbano (B)	P.M.	75	40	20
		P.D.	150	60	30
	Protección de vida acuática (C)	P.M.	30	15	5
		P.D.	60	25	10
Embalses naturales y artificiales	Uso en riego agrícola (B)	P.M.	75	40	20
		P.D.	150	60	30
	Uso público urbano (C)	P.M.	30	15	5
		P.D.	60	25	10
Aguas costeras	Explotación pesquera, navegación y otros usos (A)	P.M.	150	N.A.	N.A.
		P.D.	200	N.A.	N.A.
	Recreación (B)	P.M.	75	N.A.	N.A.
		P.D.	150	N.A.	N.A.
	Estuarios (B)	P.M.	75	15	5
		P.D.	150	25	10
RALLFA-LA		P.D.	30	110	11.5

P.D. = Promedio Diario P.M. = Promedio Mensual N.A. = No es aplicable (A), (B) y (C): Tipo de Cuerpo Receptor según la Ley Federal de Derechos. RALLFA Reactor Anaerobio de Lecho de Lodos de Flujo Ascendente. LA Lodos Activados.

5. FACTIBILIDAD AMBIENTAL

El tratamiento de las aguas residuales con alta carga orgánica es una alternativa tanto energética como ambiental. Con éste se disminuyen las emisiones de gas metano a la atmósfera causantes del efecto invernadero y la contaminación de los cuerpos de agua (Valdés, 2010).

Los beneficios ambientales son:

- Eliminación de malos olores
- Reducción de patógenos
- Disminución de gases de efecto invernadero
- Protección de los recursos de mantos freáticos y aguas superficiales
- Promoción de energías renovables

El aprovechamiento del biogás y la utilización del metano, principal compuesto de éste, al transformarlo en CO₂ mediante la quema directa o usándolo de combustible para accionar motogeneradores, atiende uno de los factores que inciden en el cambio climático, ya que el metano es 21 veces más contaminante que el bióxido de carbono.

La siguiente expresión calcula las toneladas equivalentes de CO₂ que se obtienen de las emisiones de metano anuales (UNFCCC, 2006). Para el caso de estudio la producción diaria de metano es de 257.69 m³, al año es de 94,056.91 m³.

$$CO_{2eqmetano} = (CH_{4anual})(GWP_{CH_4}/1000) \dots \dots \dots (5.1)$$

Donde:

$CO_{2eqmetano}$: Emisión equivalente de bióxido de carbono en toneladas métricas

CH_{4anual} : Producción de metano en $\frac{kg}{año}$

GWP_{CH_4} : Potencial de calentamiento global del metano = 21

La densidad del metano a 20°C y con una atmósfera de presión es de 0.67 kg/m³ (INE, 2005).

Multiplicando la cantidad de metano generado anualmente por su densidad se obtiene:

$$94,056.91 \frac{m^3}{año} \times 0.67 \frac{kg}{m^3} = 63,018.13 \frac{kg}{año}$$

Aplicando la ecuación 5.1:

$$CO_{2eqmetano} = \left(63,018.13 \frac{kg}{año} \right) (21/1000) = 1,323.38 T_{eq} CO_2$$

Si no se evitará la emisión de 63,018 kgCH₄ en un año, esta sería equivalente a las emisiones de CO₂ generadas anualmente por 259 vehículos de pasajeros y al carbono secuestrado durante un año por 282 hectáreas de bosques de pino o abeto (EPA, 2011).

En lo que respecta al consumo eléctrico proyectado para el rastro este es equivalente a las emisiones de CO₂ generadas anualmente por 260 vehículos de pasajeros y al carbono secuestrado durante un año por 282 hectáreas de bosques de pino o abeto (EPA, 2011).

Mientras que el consumo térmico esperado del rastro equivale a las emisiones de CO₂ generadas anualmente por 92.9 vehículos de pasajeros y al carbono secuestrado durante un año por 101 hectáreas de bosques de pino o abeto (EPA, 2011).

Sin el proyecto las emisiones equivalentes de CO₂ generadas anualmente serían las de 611.9 vehículos de pasajeros, mientras que con el proyecto se reducen a 352.9 vehículos de pasajeros.

6. ANÁLISIS FINANCIERO

6.1. Presupuestos y programa de inversiones y fuentes de financiamiento

En la Tabla 6.1 se presenta el monto de inversión para llevar a cabo el sistema propuesto. La inversión fija es aquella que reúne a todo tipo de activos los cuales tienen una vida útil mayor a un año además de proveer las condiciones necesarias para realizar aquellas actividades que requiere la empresa, en este tipo de inversión se encuentra el terreno, la infraestructura, maquinaria, equipo auxiliar, entre otros (Abreu, 2006). Para el caso de estudio, gran parte de la inversión se destinará a infraestructura y equipamiento.

Tabla 6.1 Monto de inversión del proyecto

Descripción	Costo total (\$)	Referencia
LODOS ACTIVADOS Obra civil, equipamiento, obra eléctrica y tuberías e interconexiones	486,042.55	Fypasa, 2011
RALLFA Sistema anaerobio para residuos industriales	1,787,657.42	Bermúdez y col., 2003
SISTEMA DE GENERACIÓN DE ENERGÍA Motogenerador, tablero, filtro para biogás, intercambiador de calor y obra eléctrica	550,000.00	Mopesa, 2011
Ingeniería	282,370.00	
COSTO TOTAL	\$3,106,069.97	

La inversión diferida se realiza sobre los bienes y servicios intangibles que son necesarios para iniciar el proyecto, pero a diferencia de la inversión fija, la diferida no interviene directamente en la producción. Además están sujetas a la amortización y son recuperables en el largo plazo (Abreu, 2006). En el caso de estudio, una inversión diferida es la ingeniería del proyecto que tiene un costo de \$282,370.00.

Una vez concluido el periodo de implantación y prueba del equipo, se llevará a cabo la operación productiva, no existiendo restricciones de tipo técnico para aprovechar la infraestructura y equipo instalado, se sacrificarán 1,000 porcinos diarios. Con este volumen de producción en el rastro, se asegura el volumen necesario de residuos líquidos para el correcto funcionamiento del tren de tratamiento de aguas residuales y por ende la producción de biogás.

En el caso de estudio se considerarán los ahorros que se obtendrán a partir del uso de biogás como combustible para producir energía térmica y eléctrica. Al tratar el agua residual se evita el pago de multas, estos costos también se consideran como ahorro.

Para el caso de estudio, se contempla el apoyo del Fideicomiso de Riesgo Compartido (FIRCO) el cual opera un Programa de Apoyo a la Generación y Aprovechamiento de Biogás en Explotaciones Pecuarias, el resto de la inversión será aportada por los socios del rastro.

El costo del capital (K) es el interés ponderado por el uso del dinero, proveniente de las distintas fuentes de financiamiento (Hernández y Hernández, 2001). En el caso del apoyo aportado por FIRCO (Aportaciones Directas No Recuperables), por concepto de inversión, se indica a continuación:

Sistemas de biogás: Se apoyará con el 50% de la inversión proyectada, incluyendo la instalación del sistema, con un monto máximo de un millón de pesos por beneficiario o agronegocio.

Motogeneradores: Se apoyará con el 50% de la inversión proyectada, incluyendo la instalación del equipo, o hasta un máximo de doscientos cincuenta mil pesos por beneficiario o agronegocio (FIRCO, 2009). Por lo anterior, el financiamiento por parte de FIRCO, sin cobrar interés, sería el siguiente:

Motogenerador: \$250, 000

Sistema anaerobio: \$1, 000, 000

Total: \$1, 000, 000 + \$250, 000 = \$1, 250, 000

El resto del financiamiento será pagado por los socios. Tomando en consideración que el rendimiento que deben ganar en el proyecto es del 10%.

El apoyo por parte de FIRCO, es de \$1, 250, 000 de pesos, monto que representa el 40.24% de la inversión total del proyecto, mientras que la aportación de los socios es de \$1, 856,069.97 que representa el restante 59.76%.

La Tabla 6.2 muestra el porcentaje de participación de las fuentes de financiamiento.

Tabla 6.2 Porcentaje de participación de las fuentes de financiamiento

Concepto	Aportación (\$)	Participación en %
FIRCO	1,250,000.00	$\frac{1,250,000}{3,106,069.97} \times (100) = 40.24$
Socios	1,856,069.97	$\frac{1,856,069.97}{3,106,069.97} \times (100) = 59.76$
Total	3,106,069.97	100

Con la información anterior se puede calcular el costo del capital financiero (K_f), el cual es la suma de multiplicar la participación por la tasa efectiva correspondiente a cada fuente de financiamiento (Ecuación 6.1) (Hernández y Hernández, 2001):

$$K_f = \sum (tasa\ efectiva \times \% \text{ de participación}) \dots \dots \dots (6.1)$$

Donde:

K_f : Costo de capital financiero

tasa efectiva: en este caso, porcentaje que esperan ganar los socios

% de participación: porcentaje de participación de las fuentes respecto al total

$$K_f = (0 \times .4024) + (0.1 \times .5976) = 0.0598$$

El costo del capital financiero (K_f) es de 5.98%. A este valor hay que sumarle el riesgo país que para el caso de México es de 1.77% (SHCP, 2011). Por lo tanto el costo del capital es 7.75% y sobre esta tasa se va efectuar la evaluación financiera. En la Tabla 6.3 se muestran las fuentes de financiamiento y el costo del capital obtenido.

Tabla 6.3 Fuentes de financiamiento y costo de capital

Concepto	Aportación (\$)	Participación en %	Tasa efectiva %	Costo del capital financiero	Riesgo país	Costo de capital (K)
FIRCO	1,250,000.00	40.24	0.00	0.00%		
Socios	1,856,069.97	59.76	10.00	5.98%	1.77%	7.75%
Total	3,106,069.97	100.00		5.98%	1.77%	7.75%

6.2. Proyección financiera

6.2.1. Ingresos

El horizonte de planeación, depende del tipo de proyecto, para el caso de estudio se hará a 20 años, pues es el tiempo de vida útil típica para instalaciones de tratamiento de aguas (Metcalf y Eddy, 2004).

La demanda de energía térmica al año en el rastro es de 2,473,519.77 MJ, de este gasto el biogás producido cubrirá 1,907,035.79 MJ, lo cual equivale a 79,275.92 litros de gas LP al año. La Tabla 6.4 muestra el pronóstico del costo por litro de gas LP utilizado en este estudio. El costo ahorrado en pesos por este rubro, se encuentra en la Tabla 6.5.

Tabla 6.4 Pronóstico del costo de gas LP (EIA, 2011)

Año	Dólar por galón	Pesos por litro (\$/L)
2011	2.154	7.022
2012	2.223	7.246
2013	2.294	7.478
2014	2.367	7.718
2015	2.754	8.978
2016	2.842	9.265
2017	2.933	9.561
2018	3.027	9.867
2019	3.124	10.183
2020	3.297	10.748
2021	3.403	11.092
2022	3.511	11.447
2023	3.624	11.813
2024	3.740	12.191
2025	3.798	12.381
2026	3.920	12.777
2027	4.045	13.186
2028	4.174	13.608
2029	4.308	14.044
2030	4.283	13.962

En cuanto a la energía eléctrica, se cubrirá parte del consumo, esto es 210,240.00 kWh al año. La Tabla 6.6 expone el pronóstico del costo por kWh empleado para este estudio. El costo que tendría esta energía, de ser requerida al servicio público se presenta en la Tabla 6.7.

Tabla 6.5 Ingresos por concepto de ahorro de gas LP

Año	Pesos (\$) /año
1	556,658.75
2	574,471.83
3	592,854.93
4	611,826.28
5	711,716.89
6	734,491.83
7	757,995.57
8	782,251.43
9	807,283.48
10	852,044.52
11	879,309.94
12	907,447.86
13	936,486.19
14	966,453.75
15	981,518.07
16	1,012,926.65
17	1,045,340.30
18	1,078,791.19
19	1,113,312.51
20	1,106,856.74

Tabla 6.6 Pronóstico del costo por kWh (EIA, 2011)

Año	Centavos de dólar por kWh	Pesos/kWh
1	6.80	0.839
2	6.91	0.853
3	7.02	0.866
4	7.13	0.880
5	6.60	0.814
6	6.71	0.827
7	6.81	0.841
8	6.92	0.854
9	7.03	0.868
10	7.30	0.901
11	7.42	0.915
12	7.54	0.930
13	7.66	0.945
14	7.78	0.960
15	8.10	1.000
16	8.23	1.016
17	8.36	1.032
18	8.50	1.048
19	8.63	1.065
20	9.00	1.111

El pronóstico del costo del litro de gas LP y del kWh se toman de la EIA, porque el precio de estos insumos en el país no presenta una tendencia siempre a la alza además son susceptibles de ser regulados mediante subsidios u algún otro mecanismo.

Tabla 6.7 Ingresos por concepto de ahorro de energía eléctrica

Año	Pesos (\$)/año
1	176,416.59
2	179,239.25
3	182,107.08
4	185,020.80
5	171,227.87
6	173,967.51
7	176,750.99
8	179,579.01
9	182,452.27
10	189,388.40
11	192,418.61
12	195,497.31
13	198,625.27
14	201,803.27
15	210,143.29
16	213,505.58
17	216,921.67
18	220,392.42
19	223,918.70
20	233,492.54

De acuerdo a las Normas Oficiales Mexicanas en materia de descargas de aguas residuales, emitidas por la Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT 1997a, 1997b) y la Ley del agua del Estado de México (Estado de México, 2011), publicada en el periódico oficial del gobierno del estado libre y soberano de México, las multas por arrojar o depositar sustancias peligrosas en cauces y vasos estatales y sistemas de drenaje y alcantarillado va desde 2,001 hasta 10,000 salarios mínimos.

Mientras que la sanción por descargar aguas residuales, desechos sólidos o líquidos, productos de procesos industriales u otros, en la red de drenaje o alcantarillado, ríos, manantiales, arroyos, corrientes, colectores, canales o cualquier cuerpo receptor, sin contar con el permiso de la autoridad correspondiente o haber manifestado datos falsos para obtener el permiso de referencia o incumplir con las medidas de tratamiento y reuso de aguas tratadas puede ir de 2,001 a 10,000 salarios mínimos

vigentes en el área geográfica, es decir en el municipio de Mexicaltzingo. El salario mínimo en esta área es de \$56.70 (SAT, 2011).

En el caso de estudio se estarían evitando los costos por las multas, pues no se arrojaría sangre proveniente del proceso de obtención de carne a los cauces y vasos estatales. Tampoco se arrojarían aguas residuales a la red de drenaje, dado que el agua resultado del proceso de tratamiento cumple con lo estipulado en la Normas Oficiales Mexicanas referentes a la descarga en el drenaje público.

En la Tabla 6.8 se muestran los ahorros, considerados como ingresos, generados en el horizonte de planeación del proyecto. Estos ingresos son el resultado de sumar los ahorros en energía eléctrica, consumo de gas LP y los pagos evitados por concepto de multas.

Tabla 6.8 Ingresos totales anuales

Año	Ingresos (\$)
1	959,988.74
2	980,624.48
3	1,001,875.41
4	1,023,760.48
5	1,109,858.16
6	1,135,372.75
7	1,161,659.97
8	1,188,743.84
9	1,216,649.15
10	1,268,346.31
11	1,298,641.95
12	1,329,858.57
13	1,362,024.86
14	1,395,170.42
15	1,418,574.76
16	1,453,345.63
17	1,489,175.37
18	1,526,097.01
19	1,564,144.61
20	1,567,262.68

6.2.2. Costos

Los costos son el desembolso en efectivo o en especie hecho en el pasado, en el presente o en el futuro, ya sea tangible o en forma virtual. Existen varios tipos de costos: Costos de producción, costos de administración, costos de venta y costos financieros (Abreu, 2006).

La amortización se aplica a los activos diferidos o intangibles, ya que con el uso del tiempo no bajan de precio o se deprecian, por lo que el término amortización se refiere al cargo anual que se hace para recuperar esa inversión (Coss, 2005). En el caso de estudio la amortización por concepto de ingeniería tiene un valor anual de \$14,118.50 pesos.

La Tabla 6.11 presenta los costos de producción y de administración, generados a lo largo de los años del horizonte de planeación. Ambos costos consideran la variación anual de 0.48% (BANXICO, 2011).

Tabla 6.11 Costos totales de producción y administración anuales

Año	Costos de producción (\$)	Costos de administración (\$)
1	546,226.08	14,118.50
2	548,847.96	14,186.27
3	551,482.43	14,254.36
4	554,129.55	14,322.78
5	556,789.37	14,391.53
6	559,461.96	14,460.61
7	562,147.38	14,530.02
8	564,845.68	14,599.77
9	567,556.94	14,669.85
10	570,281.22	14,740.26
11	573,018.57	14,811.01
12	575,769.06	14,882.11
13	578,532.75	14,953.54
14	581,309.70	15,025.32
15	584,099.99	15,097.44
16	586,903.67	15,169.91
17	589,720.81	15,242.72
18	592,551.47	15,315.89
19	595,395.72	15,389.40
20	598,253.61	15,463.27

6.2.1. Punto de equilibrio

El punto de equilibrio es el nivel de producción en el que son exactamente iguales los beneficios por ventas (en el caso de estudio ahorros), a la suma de los costos fijos y los variables. Utilizando la ecuación 6.3 se obtiene el punto de equilibrio (Amat y Soldevila, 2011).

Tabla 6.12 Estado financiero para el caso de estudio.

Año	Ingresos (ahorros)(\$) [A]	Costo de producción(\$) [B]	Utilidad bruta (\$) [C=A-B]	Costo administrativo(\$) [D]	Utilidad antes del ISR (\$) [E=C-D]	ISR (30.00%) [F]	Utilidad neta (\$) [G=E-F]
1	959,988.74	546,226.08	413,762.66	14,118.50	399,644.16	119,893.25	279,750.91
2	980,624.48	548,847.96	431,776.52	14,186.27	417,590.25	125,277.08	292,313.18
3	1,001,875.41	551,482.43	450,392.98	14,254.36	436,138.61	130,841.58	305,297.03
4	1,023,760.48	554,129.55	469,630.93	14,322.78	455,308.15	136,592.44	318,715.70
5	1,109,858.16	556,789.37	553,068.79	14,391.53	538,677.26	161,603.18	377,074.08
6	1,135,372.75	559,461.96	575,910.79	14,460.61	561,450.17	168,435.05	393,015.12
7	1,161,659.97	562,147.38	599,512.59	14,530.02	584,982.57	175,494.77	409,487.80
8	1,188,743.84	564,845.68	623,898.16	14,599.77	609,298.39	182,789.52	426,508.87
9	1,216,649.15	567,556.94	649,092.21	14,669.85	634,422.36	190,326.71	444,095.65
10	1,268,346.31	570,281.22	698,065.10	14,740.26	683,324.84	204,997.45	478,327.39
11	1,298,641.95	573,018.57	725,623.39	14,811.01	710,812.37	213,243.71	497,568.66
12	1,329,858.57	575,769.06	754,089.51	14,882.11	739,207.41	221,762.22	517,445.18
13	1,362,024.86	578,532.75	783,492.11	14,953.54	768,538.57	230,561.57	537,977.00
14	1,395,170.42	581,309.70	813,860.72	15,025.32	798,835.40	239,650.62	559,184.78
15	1,418,574.76	584,099.99	834,474.77	15,097.44	819,377.33	245,813.20	573,564.13
16	1,453,345.63	586,903.67	866,441.96	15,169.91	851,272.05	255,381.62	595,890.44
17	1,489,175.37	589,720.81	899,454.56	15,242.72	884,211.84	265,263.55	618,948.29
18	1,526,097.01	592,551.47	933,545.54	15,315.89	918,229.65	275,468.90	642,760.76
19	1,564,144.61	595,395.72	968,748.89	15,389.40	953,359.49	286,007.85	667,351.64
20	1,567,262.68	598,253.61	969,009.07	15,463.27	953,545.79	286,063.74	667,482.06

Tabla 6.13 Flujo de efectivo para el caso de estudio

Año	Utilidad neta (\$)	Depreciación (\$)	Amortización (\$)	Flujo neto de efectivo (\$)
1	279,750.91	168,685.00	14,118.50	462,554.41
2	292,313.18	169,494.69	14,186.27	475,994.13
3	305,297.03	170,308.26	14,254.36	489,859.65
4	318,715.70	171,125.74	14,322.78	504,164.23
5	377,074.08	171,947.14	14,391.53	563,412.76
6	393,015.12	172,772.49	14,460.61	580,248.23
7	409,487.80	173,601.80	14,530.02	597,619.62
8	426,508.87	174,435.09	14,599.77	615,543.73
9	444,095.65	175,272.38	14,669.85	634,037.87
10	478,327.39	176,113.68	14,740.26	669,181.33
11	497,568.66	176,959.03	14,811.01	689,338.70
12	517,445.18	177,808.43	14,882.11	710,135.72
13	537,977.00	178,661.91	14,953.54	731,592.45
14	559,184.78	179,519.49	15,025.32	753,729.59
15	573,564.13	180,381.18	15,097.44	769,042.75
16	595,890.44	181,247.01	15,169.91	792,307.36
17	618,948.29	182,117.00	15,242.72	816,308.01
18	642,760.76	182,991.16	15,315.89	841,067.81
19	667,351.64	183,869.52	15,389.40	866,610.56
20	667,482.06	184,752.09	15,463.27	867,697.42

6.3.2. Valor presente (VP)

Este método consiste en actualizar los flujos de efectivo, traerlos a valor presente, uno a uno, descontándolos a una tasa igual al costo de capital (K) y sumar éstos, comparar dicha suma con la inversión inicial (I₀). De tal forma que si el valor actual de la suma de los flujos es mayor o igual al de la inversión, el proyecto se acepta como viable, en caso contrario se rechaza (Hernández y Hernández, 2001). Lo anterior se representa para el caso de estudio como:

$$\begin{aligned}
 VP = & \frac{F_1}{(1+K)^1} + \frac{F_2}{(1+K)^2} + \frac{F_3}{(1+K)^3} + \frac{F_4}{(1+K)^4} + \frac{F_5}{(1+K)^5} + \frac{F_6}{(1+K)^6} + \frac{F_7}{(1+K)^7} + \frac{F_8}{(1+K)^8} \\
 & + \frac{F_9}{(1+K)^9} + \dots + \frac{F_{13}}{(1+K)^{13}} + \frac{F_{14}}{(1+K)^{14}} + \frac{F_{15}}{(1+K)^{15}} + \frac{F_{16}}{(1+K)^{16}} + \frac{F_{17}}{(1+K)^{17}} \\
 & + \frac{F_{18}}{(1+K)^{18}} + \frac{F_{19}}{(1+K)^{19}} + \frac{F_{20}}{(1+K)^{20}} \dots \dots \dots 6.4
 \end{aligned}$$

Si

$VP \geq I_0$ El proyecto se acepta

$VP < I_0$ El proyecto se rechaza

En la Tabla 6.14 se muestra el valor presente de los flujos de efectivo del proyecto.

Tabla 6.14 Valor presente de los flujos de efectivo

Año	Flujos de efectivo en valor presente
1	429,302.28
2	410,017.44
3	391,627.13
4	374,087.76
5	387,997.13
6	370,865.15
7	354,509.13
8	338,892.42
9	323,980.23
10	317,356.57
11	303,414.76
12	290,098.69
13	277,379.27
14	265,228.82
15	251,163.20
16	240,159.39
17	229,646.75
18	219,602.68
19	210,005.64
20	195,153.19
VP	6,180,487.65

El valor presente de la suma de los flujos efectivo es 6,180,487.65 este valor es mayor que la inversión inicial del proyecto hecha por los socios (6,180,487.65 > 1,856,069.97), por lo tanto es viable y se acepta.

6.3.3. Valor Presente Neto (VPN)

Este método consiste en restar al valor presente (VP) la inversión inicial (I_0), de tal forma que si está diferencia es cero o mayor a cero, el proyecto se considera viable y se acepta, en caso contrario se rechaza (Hernández y Hernández, 2001). Para el caso de estudio:

$$VPN = VP - I_0 \dots \dots \dots 6.5$$

$VPN \geq 0$ El proyecto se acepta

$VPN < 0$ El proyecto se rechaza

Sustituyendo valores en la Ecuación 6.5, tenemos:

$$VPN = 6,180,487.65 - 1,856,069.97 = 4,324,417.68$$

Este valor es positivo, el proyecto se considera viable y se acepta.

6.3.4. Relación Beneficio Costo (RBC)

Este método consiste en dividir el valor presente (VP) entre la inversión inicial (I_0). Si el resultado del cociente es mayor o igual a uno, el proyecto se considera viable y se acepta. Caso contrario se rechaza (Hernández y Hernández, 2001). Para el caso de estudio:

$$RBC = \frac{VP}{I_0} \dots \dots \dots 6.6$$

$RBC \geq 1$ El proyecto se acepta

$RBC < 1$ El proyecto se rechaza

Aplicando la Ecuación 6.6, obtenemos:

$$RBC = \frac{6,180,487.65}{1,856,069.97} = 3.33$$

Esta cantidad es mayor a uno, por lo tanto se acepta.

6.3.5. Tasa Interna de Retorno (TIR)

Este método consiste en igualar la inversión inicial, con la suma de los flujos actualizados a una tasa de descuento (i) supuesta, que haga posible su igualdad. Si la tasa de interés que hizo posible la igualdad es mayor o igual al costo de capital (K), el proyecto se acepta, de lo contrario se rechaza (Hernández y Hernández, 2001).

$$I_0 = \frac{F_1}{(1+i)^1} + \frac{F_2}{(1+i)^2} + \dots + \frac{F_n}{(1+i)^n} \dots \dots \dots 6.7$$

$TIR \geq K$ El proyecto se acepta

$TIR < K$ El proyecto se rechaza

Para determinar la tasa de interés, que haga posible que la suma del valor actual de los flujos sea igual al de la inversión, las tasas se suponen, buscando que la diferencia entre el valor presente (VP) y el de la inversión (I_0), se mínima, hasta lograr una cantidad positiva ($VA > I_0$) y otra negativa ($VA < I_0$). Posteriormente se emplea la Ecuación 6.8 y 6.9.

$$TIR = ib + (ia - ib) \times \frac{P}{P + N} \dots \dots \dots 6.7$$

$$TIR = ib + (ia - ib) \times \frac{N}{P + N} \dots \dots \dots 6.8$$

Donde:

TIR: Tasa Interna de Retorno

ia: Tasa de interés más alta

ib: Tasa de interés más baja

P: Cantidad Positiva

N: Cantidad negativa

Sustituyendo valores para el caso de estudio, se obtuvo que i es igual a 28.5%, porcentaje que es mayor a K (7.75%), por tanto se acepta el proyecto.

6.3.6. Periodo de Recuperación de la Inversión (PRI)

Este método consiste en determinar el tiempo que tarda un proyecto, en ser pagado y se determina mediante restas sucesivas de uno por uno de los flujos de efectivo a la inversión original (I_0), hasta que ésta queda saldada. De tal forma que si la inversión (I_0) se amortiza en un tiempo menor o igual al horizonte del proyecto, éste se considera viable y se acepta, caso contrario se rechaza (Hernández y Hernández, 2001). En la Tabla 6.15 se presenta a detalle los flujos acumulados actualizados y el tiempo

en que se amortiza la inversión. El proyecto se termina de pagar en 4 años con 7 meses, tiempo menor al horizonte del proyecto, por lo tanto se acepta.

Pago mensual= $\$387,997.13/12=\$32,333.09$

Número de meses= $\$251,035.35/\$32,333.09=7.7$ meses.

Tabla 6.15 Flujos acumulados actualizados

Flujo de inversión pesos (\$)	Años n	Costo de capital K	Factor de actualización $1/(1+K)^n$	Flujos actualizados $F(1/(1+K)^n)$	Saldo pesos (\$)
1,856,069.97	0	7.75%	1	0	1,856,069.97
462,554.41	1	7.75%	0.928111957	429,302.28	1,426,767.69
475,994.13	2	7.75%	0.861391805	410,017.44	1,016,750.25
489,859.65	3	7.75%	0.799468034	391,627.13	625,123.11
504,164.23	4	7.75%	0.741995842	374,087.76	251,035.35
563,412.76	5	7.75%	0.688655213	387,997.13	-136,961.78
580,248.23	6	7.75%	0.639149137	370,865.15	-507,826.93
597,619.62	7	7.75%	0.593201957	354,509.13	-862,336.06
615,543.73	8	7.75%	0.550557829	338,892.42	-1,201,228.48
634,037.87	9	7.75%	0.510979304	323,980.23	-1,525,208.71
669,181.33	10	7.75%	0.474246002	317,356.57	-1,842,565.28
689,338.70	11	7.75%	0.440153385	303,414.76	-2,145,980.04
710,135.72	12	7.75%	0.40851162	290,098.69	-2,436,078.74
731,592.45	13	7.75%	0.379144519	277,379.27	-2,713,458.01
753,729.59	14	7.75%	0.351888561	265,228.82	-2,978,686.83
769,042.75	15	7.75%	0.326591981	251,163.20	-3,229,850.02
792,307.36	16	7.75%	0.303113923	240,159.39	-3,470,009.41
816,308.01	17	7.75%	0.281323656	229,646.75	-3,699,656.17
841,067.81	18	7.75%	0.261099849	219,602.68	-3,919,258.84
866,610.56	19	7.75%	0.242329892	210,005.64	-4,129,264.49
867,697.42	20	7.75%	0.224909271	195,153.19	-4,324,417.68

6.3.1. Análisis de sensibilidad

El análisis de sensibilidad se refiere a la medición de las variaciones en la rentabilidad dada por la variación de algún factor económico del proyecto, y nos permite tomar decisiones sobre los costos. Para el caso de estudio, el factor económico a variar será el costo de operación y mantenimiento. Se considerará que estos costos se duplican.

El flujo de efectivo del proyecto producto de esta consideración se muestra en la Tabla 6.16.

Tabla 6.16 Flujo de efectivo para el caso de estudio considerando un incremento en los costos de operación y mantenimiento

Año	Utilidad neta (\$)	Depreciación (\$)	Amortización (\$)	Flujo neto de efectivo (\$)
1	15,472.16	168,685.00	14,118.50	198,275.65
2	26,765.88	169,494.69	14,186.27	210,446.84
3	38,475.11	170,308.26	14,254.36	223,037.73
4	50,613.04	171,125.74	14,322.78	236,061.56
5	107,684.52	171,947.14	14,391.53	294,023.20
6	122,332.49	172,772.49	14,460.61	309,565.60
7	137,505.89	173,601.80	14,530.02	325,637.71
8	153,221.45	174,435.09	14,599.77	342,256.31
9	169,496.45	175,272.38	14,669.85	359,438.68
10	202,410.11	176,113.68	14,740.26	393,264.06
11	220,326.98	176,959.03	14,811.01	412,097.03
12	238,872.75	177,808.43	14,882.11	431,563.29
13	258,067.41	178,661.91	14,953.54	451,682.87
14	277,931.63	179,519.49	15,025.32	472,476.44
15	290,960.96	180,381.18	15,097.44	486,439.59
16	311,930.78	181,247.01	15,169.91	508,347.70
17	333,625.62	182,117.00	15,242.72	530,985.34
18	356,068.54	182,991.16	15,315.89	554,375.59
19	379,283.30	183,869.52	15,389.40	578,542.22
20	378,030.99	184,752.09	15,463.27	578,246.35

El valor presente con estas condiciones es de \$ 3,443,405.42 este valor es mayor a la inversión inicial de \$1,856,069.97, por lo tanto el proyecto es viable.

El valor presente neto da como resultado \$ 1,587,335.45, cifra que es mayor a cero, lo que indica que el proyecto se considera viable.

La relación beneficio costo es de 1.86, número mayor a uno, por lo que el proyecto se acepta.

La tasa interna de retorno es de 15.6%, porcentaje mayor al costo de capital que es de 7.73%, por tanto el proyecto se acepta.

El periodo de recuperación de la inversión, es de 9 años con 11 meses, este periodo de tiempo es menor que el horizonte de planeación propuesto, entonces el proyecto es aceptado.

En general el VP, el VPN, RBC, TIR y PRI, están dentro de las condiciones necesarias para aceptar el proyecto, pero el periodo de recuperación de la inversión es poco más del doble de tiempo si se considera el aumento al doble de los costos de operación y mantenimiento. La Tabla 6.17 muestra una comparación sobre la evaluación financiera con y sin considerar el aumento de los costos mencionados.

Tabla 6.17 Comparación de parámetros sobre la evaluación financiera sin y con bonos de carbono

	VP (\$)	VPN (\$)	RBC (\$/\$)	TIR (%)	PRI (años)
sin aumento en costos	6,180,487.65	4,324,417.68	3.33	28.5	4 años 7 meses
con aumento en costos	3,443,405.42	1,587,335.45	1.86	15.6	9 años 11 meses

7. CONCLUSIONES

Los principales beneficios que se obtienen del tratamiento de aguas residuales, son evitar la contaminación de los cuerpos de agua y disminuir la emisión de gas metano a la atmósfera.

Los residuos líquidos producto del proceso de obtención de carne, al ser dispuestos de una manera inadecuada provocan la formación de lixiviados. Éstos arrastran contaminantes hacia los cuerpos de agua superficiales o se infiltran hacia los acuíferos. Lo anterior ocasiona el deterioro de las fuentes de abastecimiento de agua para consumo humano e irrigación de campos agrícolas, dañando además, los ecosistemas acuáticos. Al evitar la disposición inconveniente de los residuos, se contribuye a la protección de los mantos freáticos, que en el caso de Mexicaltzingo se encuentran entre uno y 200 metros bajo la superficie. Además de cumplir con las normas mexicanas NOM-001-SEMARNAT-1996 y la NOM-002-SEMARNAT-1996.

El volumen de agua residual generada en el rastro es de 450 m³ al día. Para visualizar la magnitud del daño evitado, se considera que 2.5 porcinos sacrificados generan la contaminación producida por una población de 70 a 200 habitantes (COFEPRIS, 2006). En el caso de 1,000 porcinos al día, la contaminación es equivalente a una población de 2,800 a 8,000 habitantes, casi la totalidad de la población de Mexicaltzingo.

Cuando el agua residual contiene una cantidad muy alta de materia orgánica, favorece el desarrollo de microorganismos patógenos normalmente presentes en dicha materia. Los residuos líquidos de rastro, también contienen huevos de parásitos y quistes de amibas, así como residuos plagicidas (presentes en el alimento de los animales), cloro (limpieza de las instalaciones), salmuera, entre otros. Como resultado el agua proveniente de rastros es un contaminante potencial no sólo del agua sino también del suelo. Con el sistema de tratamiento se evitarán estos problemas.

Los residuos provenientes del rastro también atraen moscas, cucarachas, ratas y otras especies de fauna nociva transmisora de enfermedades. Las moscas y mosquitos son capaces de incubar y multiplicar en su cuerpo microorganismos. En consecuencia podrían ser la causa de enfermedades en el ser humano, convirtiéndose, así en vectores biológicos. Dado que todos los residuos estarán confinados, este problema no se presentará.

La descomposición de materia orgánica presente en las aguas residuales, desprende malos olores y gases como el metano. Este gas de efecto invernadero es susceptible de ser aprovechado para generar energía

eléctrica y térmica que provocará ahorros en los costos de producción del rastro. El equipo utilizado para el aprovechamiento de biogás cuenta con sistemas de seguridad para evitar percances asociados a la combustión del metano, como explosiones o incendios.

Para el análisis financiero se consideraron los ahorros por sustituir el consumo de gas LP y electricidad, por la producción de energía eléctrica y energía térmica a través de la combustión del biogás. Así como el ahorro por el pago de multas por la inadecuada disposición de los residuos líquidos. Se plantearon dos escenarios uno con un costo de operación y mantenimiento de 377,541.08 al año y otro con un valor de \$755,082.16, es decir el doble del primero. En ambos casos el costo del proyecto se recupera antes de finalizar el horizonte de planeación del proyecto, el cual es de 20 años. Si se considera el aumento de los costos de operación y mantenimiento el periodo de recuperación de la inversión es de 9 años con 11 meses. Si no se consideran este aumento, el periodo de recuperación es de 4 años con 7 meses. Los flujos de efectivo resultaron positivos a lo largo del periodo de planeación, en ambas consideraciones. Esto es porque la relación beneficio costo es mayor a 1 y a que la tasa interna de retorno es mayor al costo de capital, también en ambos casos.

Con la implementación del sistema se conseguirán ahorros por el monto de \$ 1, 045,645.36 en promedio anuales, sólo considerando el ahorro en electricidad y gas LP. Aún con el aumento en los precios de operación y mantenimiento el proyecto resulta factible. Lo anterior contribuye a disminuir los costos de producción sin mermar la calidad del producto.

Otro de los beneficios es el efecto multiplicador. Al incorporar este tipo de sistemas de tratamiento y aprovechamiento de biogás, se contribuirá a promover la energía renovable en México.

Tabla 7.1 Beneficios aportados por la instalación de la planta de tratamiento de aguas residuales

Descripción	Sin el proyecto	Con el proyecto
Disminución de costos de producción	\$0	\$1,045,645.36 promedio al año
Emisiones de GEI	336.635 m ³ CH ₄	Residuos de combustión
Energía eléctrica generada (ahorro)	\$0	\$195,143.42 promedio al año
Energía térmica generada (ahorro)	\$0	\$850,501.94 promedio al año
Cantidad de agua residual generada sin tratar	384.66 [m ³ /día] sin tratar	0 [m ³ /día]
Carga contaminante en el agua residual	4.37 kgDQO/m ³	Cumplimiento con la NOM-001-SEMARNAT-1996
Pago de multas	\$226,913.40	\$0
Fauna transmisora de enfermedades	SI	NO

REFERENCIAS

- Abreu, M. 2006. Formulación y evaluación de proyectos de inversión en México. **Administración contemporánea**. (COLPARMEX), I (5):1-26.
- Amat O. y Soldevila P. 2011. Contabilidad y gestión de costos. Ed. Profit. 6ª edición. Pág. 66 Barcelona, España.
- Armenante, P.M. 1997. Biorreactores. En: Biotratamientos de residuos tóxicos y peligrosos. Editado por Levin, M. y Gealt M.A. Pág.67-112. McGraw-Hill.
- BANXICO, 2011. Estadísticas sobre los indicadores de la inflación. Publicación del Banco de México. México, D.F. México.
- Bermúdez, R., Rodríguez, S., Martínez, M. y Terry, A. 2003. Ventajas del empleo de reactores RALLFA en el tratamiento de residuales líquidos para la obtención de biogás. Publicaciones del Centro de Estudios de Biotecnología Industrial de la Universidad de Oriente. Santiago de Cuba, Cuba.
- Borja, R., Banks, C. y Wang, Z. 1995a. Performance of a hybrid anaerobic reactor, combining a sludge blanket and filter, treating slaughterhouse wastewater. **Applied Microbiology and Biotechnology**. 43: 351-357.
- Borja, R., Banks, C. y Wang, Z. 1995b. Effect of organic loading rate on anaerobic treatment of slaughterhouse wastewater in a fluidized-bed reactor. **Bioresource Technology**. 46: 157-162.
- Borja R., Banks, C. y Wang, Z. 1998. Anaerobic digestion of slaughterhouse wastewater using a combination of sludge blanket and filter arrangement in a single reactor. **Bioresource technology**. 65: 125-133.
- Botero, J. B. 2010. Instructivo de operación y mantenimiento de la planta de tratamiento de aguas residuales de lodos activados por aireación extendida. Publicación de la Universidad Tecnológica de Pereira. Pereira, Colombia.
- Caixeta, C., Cammarota, M. y Xavier, A. 2002. Slaughterhouse wastewater treatment: evaluation of a new three-phase separation system in a UASB reactor. **Bioresource Technology**. 81: 61-69.
- Caldera, Y., Madueño, P., Griborio, A., Fernández, N., y Gutiérrez, E. 2005. Effect of the organic load in the performance the UASB reactor treating slaughterhouse effluent. **Rev. Téc. Ing. Univ. Zulia**. 28: 119-127.
- CAR/PL, 2006. Prevención de la contaminación en la industria cárnica en la región mediterránea. Publicación del Centro de actividad regional para la producción limpia (CAR/PL). Barcelona. España.
- Castillo, L., Montoya, L. y Ruiz J. 2001. Tratamiento integral de residuos de rastros. **Ciencia y Desarrollo**, 27 (160): 48-53.

CEPIS, 2003. Especificaciones técnicas para el diseño de trampa de grasa. Publicación del Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria y Ciencias del Ambiente. Organización Panamericana de la Salud. Lima, Perú.

Chen, C.Y., Li, C.T., Shieh, W. 1997. Anaerobic fluidized bed pretreatment of hog wastewater. *Journal of Environmental Engineering*. 123 (4):389-394.

COFEPRIS, 2006. Evaluación de riesgos de los rastros y mataderos municipales. Publicación de la Comisión Federal para la Protección contra Riesgos Sanitarios. México. D.F. México.

Coss, R. 2005. Análisis y evaluación de proyectos de inversión. Limusa 2ª edición. México.

COWI, 2001. Cleaner production assessment in meat processing. Consulting Engineers and Planners AS. Publicación de Dinamarca for United Nations Environment Programme and Danish Environmental Protection Agency. París, Francia.

Del Pozo, R., Diez, V. y Beltrán, S. 2000. Anaerobic pre-treatment of slaughterhouse wastewater using fixed-film reactors. *Bioresource Technology*. 71: 146-149.

Domenzain, M. y Espinosa, M. 2009. Generación de energía en rellenos sanitarios a partir del aprovechamiento del biogás emitido. Tesis de Licenciatura de Ingeniería Química. Facultad de Química, UNAM. México, D. F. México.

EIA, 2011. Annual Energy Outlook 2011 with projections to 2035. Publicación de Energy Information Administration. Washington, D.C., EEUA.

El informador, 5 de noviembre 2010. Benéfica operación de rastro porcino municipal al ofrecer carne de calidad. Huixtla, Chiapas.

EPA, 2002. Environmental assessment of proposed effluent limitations guidelines and standards for the meat and poultry products industry point source. Publicación de Environmental Protection Agency, Washington, EEUA.

Estado de México. 2011. Ley del agua para el Estado de México y municipios. Publicada en el Periódico Oficial del Gobierno del Estado Libre y Soberano de México. No. 16. Toluca de Lerdo, México.

Fair, G., Geyer J. y Okun D. 1994. Ingeniería sanitaria y de aguas residuales. Ed. Limusa. Tomo II. México.

FIRCO, 2007. Aprovechamiento de biogás para la generación de energía eléctrica en el sector agropecuario. Publicación de la Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación.

FIRCO, 2009. Proyecto de apoyo a proyectos de generación y aprovechamiento de biogás en explotaciones pecuarias. Publicación de la Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación. México, D.F., México.

Fypasa. 2011. Presupuestos económicos obtenidos por entrevista. Empresa dedicada al diseño y proyecto para el tratamiento, conducción, distribución, recolección, saneamiento y disposición de agua potable y agua servida. Construcciones Fypasa S.A. de C.V. México, D.F., México.

Geraldo, C. y Jabes, J. 2005. Estudio de factibilidad económica para la materialización de una planta productora de biogás y fertilizantes en base a estiércol de cerdos. Trabajo de título de Ingeniería en construcción. Facultad de ciencias de la construcción y ordenamiento territorial, ITEM. Santiago, Chile.

González, E. 2008. Tratamiento de las aguas residuales industriales. Tesis de Licenciatura de Ingeniería Civil. Facultad de Ingeniería, UNAM. México, D.F., México.

Gorgün, E., Ubay, G., Ohron, D., Germili, F. y Artan N. 1995. Modeling biological treatability for meat processing effluent. **Water Science and Technology**. 32(12): 43-52.

Gutiérrez, A., Fernández, G., Martínez, P., Rinderknecht, Noemí y Poggi, H. 2004. Slaughterhouse wastewater treatment in a full-scale system with constructed wetlands. **Water Environment Research**. 76(4):334-343.

Hansen, C. y West, G. 1992. Anaerobic digestion of rendering waste in an upflow anaerobic sludge blanket digester. **Bioresource Technology**. 41: 181-185.

Hernández, A. 2001. Depuración y desinfección de aguas residuales. Colegio de ingenieros de caminos, canales y puertos. 5ª. Edición. Madrid, España.

Hernández, A., Hernández, A. 2001. Formulación y evaluación de proyectos de inversión para principiantes. Pág. 127-183. Editorial Thomson-Learning. México, D.F., México.

Horngren C., Sundem, G. Elliott, J. 2000. Introducción a la contabilidad financiera. 7ª Ed. Pearson Educación. México.p.281

Huerta, N. 2010. Degradación anaerobia de residuos de restaurantes de Ciudad Universitaria. Tesis de Licenciatura. Facultad de Ingeniería de Ingeniería Eléctrica y Electrónica, UNAM. México, D.F., México.

IDEA, 2007. Biomasa: Digestores anaerobios. Publicación del Instituto para la Diversificación y Ahorro de Energía. Ministerio de Industria, Turismo y Comercio. Madrid, España.

IILSEN, 2004. Nuevas energías renovables: Una alternativa energética sustentable para México. Publicación del Instituto de Investigaciones Legislativas del Senado de la República. México, D.F., México

INAFED, 2011. Enciclopedia de los municipios y delegaciones de México. Publicación del Instituto Nacional para el Federalismo y el Desarrollo Municipal.

INE, 2005. Inventario de emisiones de metano en la industria del carbón en México. Publicación del Instituto Nacional de Ecología.

INEGI, 2011. Estadística de sacrificio de ganado en rastros municipales por entidad federativa 2005-2010. Instituto Nacional de Estadística y Geografía. México.

Jaimes, C. 2005. Rastro tipo inspección federal (T.I.F.). Tesis de Licenciatura de Arquitectura. Escuela Nacional de Estudios Superiores Aragón. UNAM. Estado de México, México.

Jiménez, R. y Martínez, M. 1995. Instalación y arranque de un reactor anaerobio en un tren anaerobio-aerobio de una planta piloto de tratamiento de vinazas. Tesis de Licenciatura de Ingeniería Química. Facultad de Química, UNAM. México, D.F. México.

Jones, R. 1974. Pollution control in meat, poultry and seafood processing. Ed. Noyes Data Corporation. New Jersey, EEUA.

Kiely, G. 1998. Ingeniería Ambiental. Mcgraw-Hill/Interamericana de España. Pág. 363-341. España.

Lokey, E. 2009. The status and future of methane destruction projects in México. **Renewable energy**. 34 (3): 566-569

López, R. 2010. Aguas residuales municipales y biosólidos. Publicación de la Facultad de ingeniería. UNAM. México, D.F., México.

Lopez, R. y Casp, A. 2003. Tecnología de mataderos. Ed. Mundiprensa. Pág. 303-304. Madrid, España.

Lynn, W. 1964. Stage development of wastewater treatment works. **Water pollution control federation**. 36 (6): 722-751.

McBean, E., Rovers, F. y Farquhar, G. 1995. Solid waste landfill engineering and design. Pretince Hall. EEUA.

Malina, J. y Pohland, F. 1992. Design of anaerobic processes for the treatment of industrial and municipal waste. Ed. Technomic Publishing Company, pp. 214. Pennsylvanian, EEUA.

Manjunath, N., Mehrotra, I. y Mathur, R. 2000. Treatment of wastewater from slaughterhouse by DAF- UASB system. **Water Research**. 34(6):1930-1936.

Martínez, A. 2008. Utilización de biodigestores para la reducción de gases de efecto invernadero. Tesis de Licenciatura de Ingeniería Eléctrica y Electrónica. Facultad de Ingeniería. UNAM. México, D.F., México.

Massé, D. y Mase, L. 2000. Characterization of wastewater from hog slaughterhouses in eastern Canada and evaluation of their inplant wastewater treatment systems. **Can. Agric. Eng.** 42 (3): 139–146.

Massé, D., Mase, L., Verville, A. y Bilodeau, S. 2001. The start-up of anaerobic sequencing batch reactors at 20 and 25 °C for the treatment of slaughterhouse wastewater. **J. Chem. Technol. Biotechnol.** 76: 393–400.

Metcalf & Eddy. 1985. Tratamiento, evacuación y reutilización de aguas residuales. Ingeniería sanitaria. Ed. McGraw-Hill. Madrid, España.

Metcalf & Eddy. 2004. Wastewater engineering: Treatment and reuse. 4ª ed. Ed. McGraw-Hill. Nueva York, EEUUA.

Mittal, G. 2006. Treatment of wastewater from abattoirs before land application—a review. **Bioresource Technology**. 27:1119-1135.

Montúfar, A.O., 2008. Uso de biogás en el sector agropecuario de México y Opciones de financiamiento. Publicación de la Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación.

MOPESA. 2011. Presupuestos económicos obtenidos por entrevista. Empresa dedicada a la fabricación de motores diesel, gas LP, gas natural y biogás, plantas de luz, motobombas y venta de refacciones. Mopesa Motores Power S.A. Toluca, Estado de México, México.

Nuñez, L. y Martínez, B. 1999. Anaerobic treatment of slaughterhouse wastewater in an expanded granular sludge (EGSB) reactor. **Water science and technology**. 40(8):99-106.

Nuñez, L. y Martínez, B. 2001. Evaluation of an anaerobic/aerobic system for carbon and nitrógeno removal in slaughterhouse wastewater. **Water Science and Technology**. 44(4):271-277.

Omil, F., Garrido J., Arrojo, B. y Méndez R. 2003. Anaerobic filter reactor performance for the treatment complex dairy wastewater at industrial scale. **Water Research**. 37(17): 4099-4108.

ONU, 2004. Plan de Aplicación de las Decisiones de la Cumbre Mundial sobre el Desarrollo Sostenible. Publicación de la Organización de las Naciones Unidas.

PNUMA, 2011. Producción Limpia. Publicación del Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente.

PROARCA, 2004. Guía Básica de Manejo Ambiental de Rastros Municipales. Publicación del Programa Ambiental Regional para Centroamérica y Sistemas de Gestión para el Medio Ambiente. Nicaragua.

Rajeshwari, K., Balakrishnan, M., Kansal, A., Lata, K. y Kishore V. 2000. State-of-the-art of anaerobic digestion technology for industrial wastewater treatment. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**. 4:135-156.

Reyes, M. 2009. Tratamiento de aguas residuales provenientes de rastro mediante un sistema de biodegradación anaerobia-aerobia. Tesis de maestría en Ingeniería Ambiental. Facultad de Ingeniería, UNAM. Campus Morelos, México.

Rivera, J. 2000. Propuesta de tratamiento de aguas residuales provenientes de rastros tipo inspección federal de aves. Tesis de Licenciatura de Ingeniería Civil. Escuela Nacional de Estudios Profesionales Acatlán, UNAM. México, D.F., México.

Rodríguez, J., Sosa, G. y Garza Y. 2002. Bioconversión anaerobia como una alternativa para la remoción de DQO contenido en aguas residuales del rastro municipal de la ciudad de Saltillo, Coahuila, México. *Revista de la sociedad química de México*. 46 (2): 185-188.

Ruiz, I., Veiga, M., de Santiago, P. y Blázquez, R. 1997 Treatment of slaughterhouse wastewater in a UASB reactor and an anaerobic filter. *Bioresource technology*. 60: 251-258.

RUTA, 2007. Estudio de factibilidad y diseño para la construcción de un rastro de porcinos en El Salvador. Publicación de Desarrollo Rural Sostenible de Centroamérica.

SEDUR, 2007. Plan estatal de desarrollo urbano. Publicación de la Secretaría de Desarrollo Urbano del Estado de México.

SAGARPA, 1994a. Norma oficial mexicana NOM-004-ZOO-1994. Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación. México, D.F., México.

SAGARPA, 1994b. Norma oficial mexicana NOM-008-ZOO-1994. Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación. México, D.F., México.

SAGARPA, 1994c. Norma oficial mexicana NOM-009-ZOO-1994. Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación. México, D.F., México.

SAGARPA, 2009a. Escenario base del sector agropecuario en México, proyecciones 2009-2018. Publicación de la Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación. México, D.F., México.

SAGARPA, 2009b. Banco de imágenes. Sala de prensa. Publicación de la Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación. México, D.F., México.

SAT, 2011. Tarifas e indicadores fiscales: Salarios mínimos. Publicación del Servicio de administración tributaria. México, D.F., México.

Sayed, S., Van der Spoel, H. y Truijen, G. 1993. A complete treatment of slaughterhouse wastewater combined with sludge stabilization using two stage high rate UASB process. *Water Sci. Technol.* 27 (9), 83-90.

SEMARNAT. 1997a. NOM-001-SEMARNAT-1996. Secretaria de Medio Ambiente y Recursos Naturales. México, D.F., México.

SEMARNAT. 1997b. Norma oficial NOM-002-SEMARNAT-1996. Secretaria de Medio Ambiente y Recursos Naturales. México, D.F., México.

SEMARNAT, 2004. Sistema de tratamiento de aguas residuales del rastro TIF 74. Publicado por la Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales.

SENER, 2009. Programa especial para el aprovechamiento de energías renovables. Publicación de la Secretaría de Energía. México. D.F. México.

SHCP, 2011. Informe semanal. Del 22 al 26 de agosto de 2011. Publicación de la Secretaría de Hacienda y Crédito Público. México, D.F. México.

Speece R. 1996. Anaerobic biotechnology for industrial wastewaters. Ed. Archae Press. EEUUA. 394 p.

SSA, 2004. Norma oficial NOM-194-SSA1-2004. Secretaria de Salud. México, D.F., México.

Tchobanoglous, G., Theisen, H. y Vigil, S. 1994. Gestión Integral de residuos sólidos. Mc Graw Hill. Vol II. Madrid, España.

Tritt, W., y Schuchardt, F. 1992. Materials flow and possibilities of treating liquid and solids wastes from slaughterhouse in Germany. ***Bioresource Technology***. 41:235-245.

UNFCCC. 2006. Greenhouse gas mitigation from improved animal waste management systems in confined animal feeding operations. Publicación de United Nations Framework Convention on Climate Change. EEUUA.

Valdés, G. 2010. Factibilidad de la conversión de una planta de tratamiento de aguas residuales a generadora de energía eléctrica. Tesis de licenciatura de Ingeniería Eléctrica y Electrónica. Facultad de Ingeniería. UNAM. México, D.F., México.

Veall, F., 1993. Estructura y funcionamiento de mataderos medianos en países en desarrollo. Publicación de la Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación.

Villanueva, V., De Aluja, A, 1998. Estado actual de algunas plantas de sacrificio de animales para consumo humano en México. ***Veterinaria México*** (UNAM), 29 (3): 273-278.

Viraraghavan, T. y Varadarajan, R. 1996. Low temperature kinetics of anaerobic-filter wastewater treatment. ***Bioresource Technology***. 57, 165–171.

Wallis, J., Ross, C., Smith, M. y Harper, S. 1989. Biomass. 20:277-90.

WEF, 1992. Design of municipal wastewater treatment plants, 3rd ed., Manual of Practice no. 8. Publicación de Water Environment Federation, Alexandria Virginia, EEUUA.

Yáñez, F. 1979. Procesos de lodos activados y aeración prolongada. Publicación del Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria y Ciencias del Ambiente.