

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.

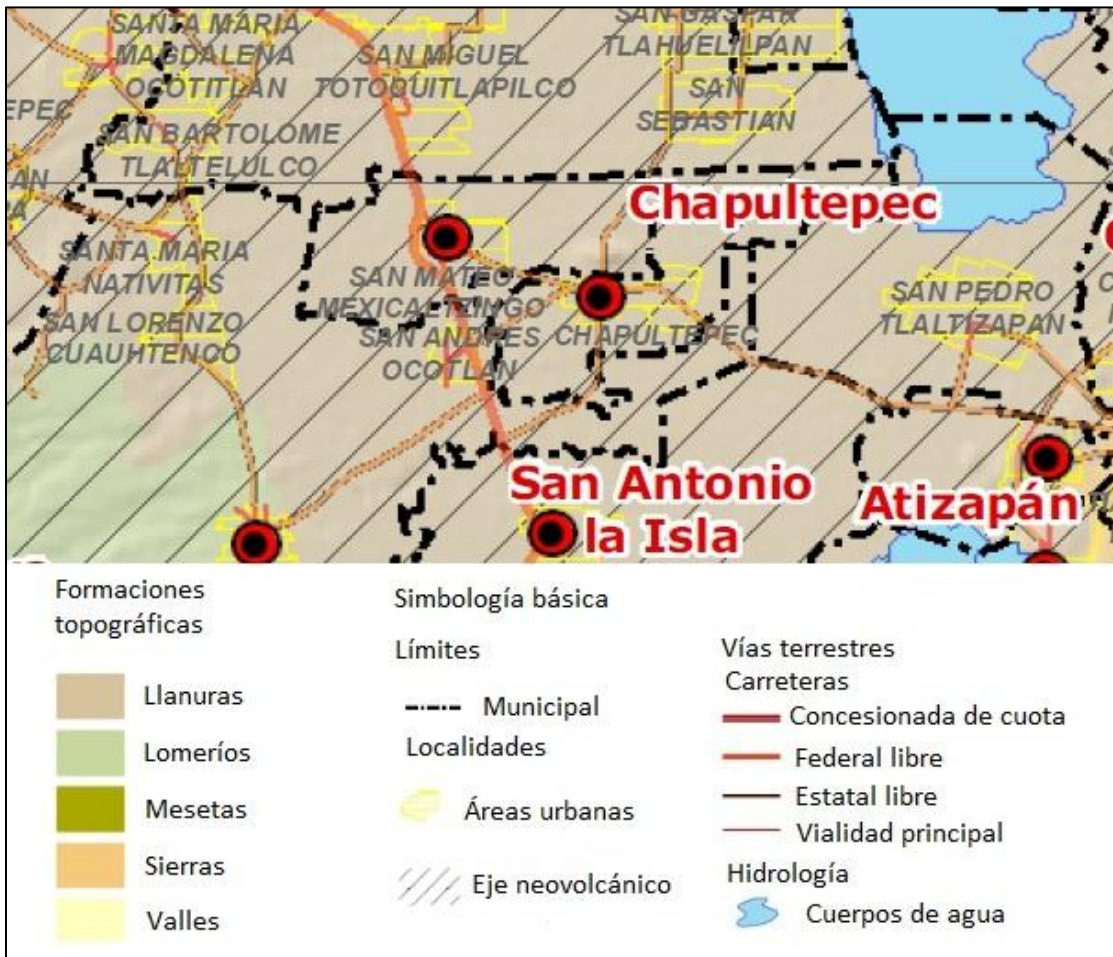


Figura 4.2 Orografía del municipio de Mexicaltzingo (SEDUR, 2007)

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, cenaderías, 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.

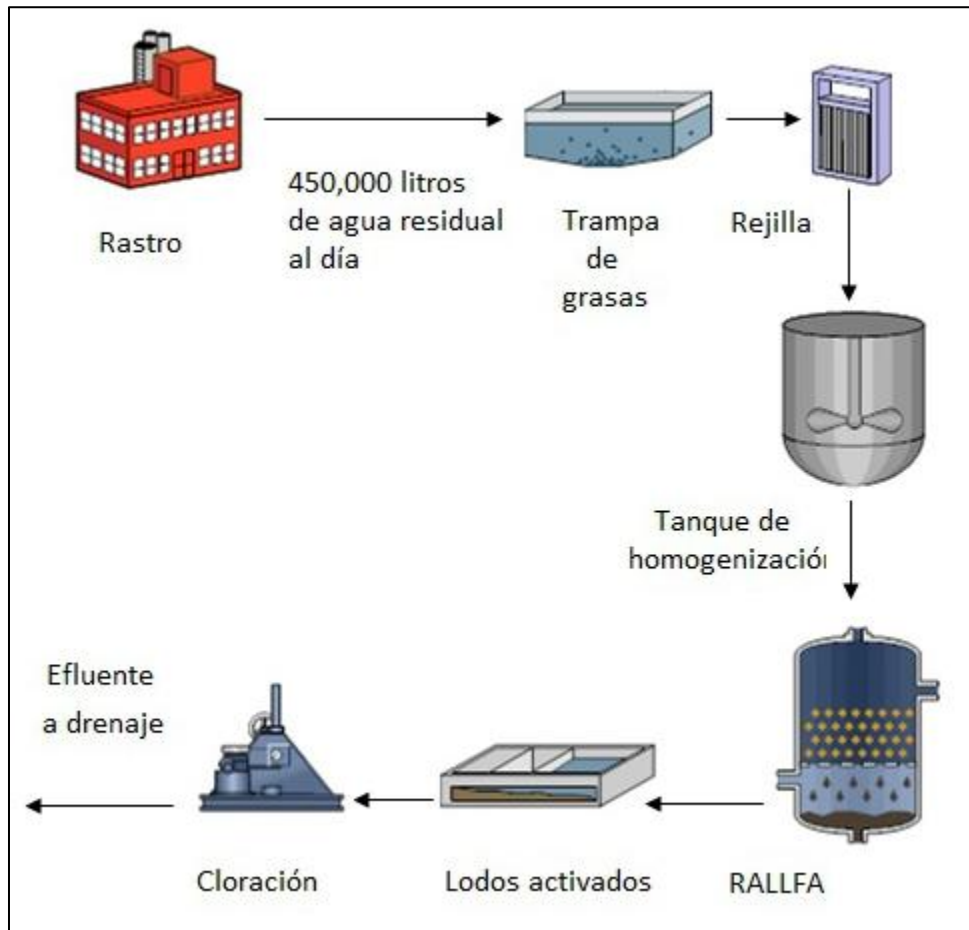


Figura 4.5 Tren de tratamiento de aguas residuales para el rastro de Mexicaltzingo

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 tablones 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 $\left[\frac{m^3}{día} \right]$

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

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):

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

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 $\left[\frac{m^3}{día} \right]$

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 $150\text{ }^{\circ}C$ (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

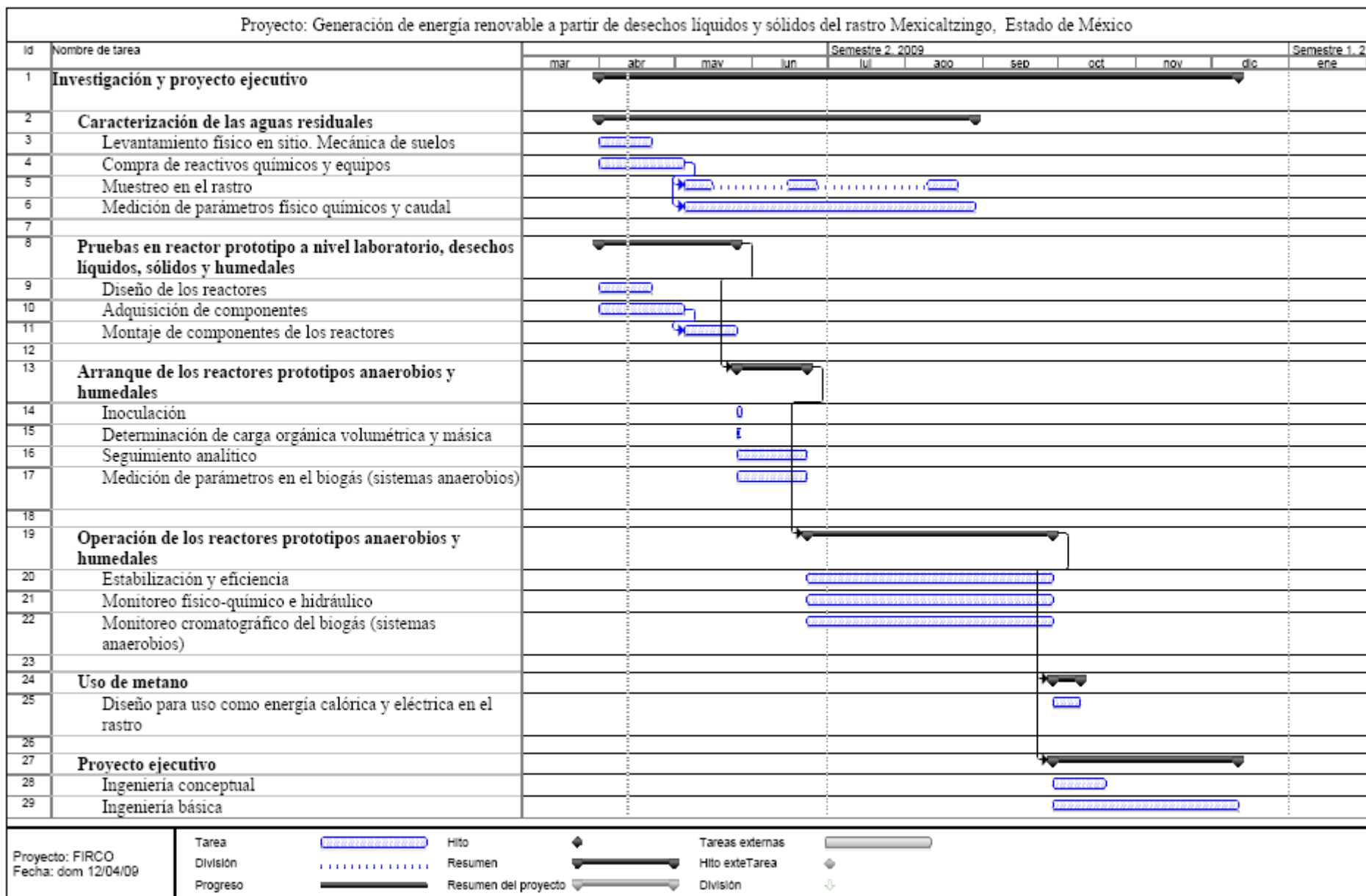


Figura 4.6 Programa de ejecución del proyecto de generación de energía renovable a partir de desechos líquidos del rastro Mexicaltzingo

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.