



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE QUÍMICA

**EVALUACIÓN CONCEPTUAL DE UNA PLANTA DE
TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES DE UNA EMPRESA DE
ALIMENTOS**

TESIS

**QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE
INGENIERA QUÍMICA**

PRESENTA

MIRIAM MOLINA GUZMÁN



MÉXICO, D.F.

2014



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.

JURADO ASIGNADO:

PRESIDENTE: **Profesor: José Antonio Ortiz Ramírez**

VOCAL: **Profesor: María del Carmen Duran Domínguez**

SECRETARIO: **Profesor: Rolando Salvador García Gómez**

1er. SUPLENTE: **Profesor: Alfonso Durán Moreno**

2° SUPLENTE: **Profesor: Marisela Bernal González**

UNAM, FACULTAD DE QUÍMICA

ASESOR DEL TEMA: DRA. MARÍA DEL CARMEN DURAN DOMÍNGUEZ _____

SUSTENTANTE: MIRIAM MOLINA GUZMÁN _____

Índice

Índice de tablas	iii
Índice de figuras.....	v
Índice de ecuaciones	vi
Glosario de términos.....	vi
Resumen	1
Capítulo 1. Problemática.....	2
1.1 Introducción	2
1.2 Justificación	3
1.3 Metas y objetivos	4
1.4 Alcance	4
Capítulo 2. Estudio técnico.....	7
2.1 Bases de diseño.....	7
2.1.1 Generalidades.....	7
2.1.2 Capacidad, rendimiento y flexibilidad	7
2.1.3 Especificación de las alimentaciones en los límites de batería	8
2.1.4 Especificaciones de los productos en los límites de batería	8
2.1.5 Agentes químicos.....	8
2.1.6 Eliminación de desechos.....	8
2.1.7 Servicios auxiliares.....	9
2.1.8 Energía eléctrica	10
2.1.9 Sistema de seguridad.....	10
2.1.10 Condiciones climatológicas	10
2.2 Características de la materia prima y capacidad del proceso	10
2.3 Normativa aplicable.....	12
2.4 Aspectos geográficos y estadísticos.....	19
2.5 Evaluación de técnicas disponibles	22
2.5.1 Depuración de aguas residuales	29
2.6 Selección del proceso	36
Capítulo 3. Diagrama de flujo de proceso	39
3.1 Descripción del proceso	39



3.2	Dimensionamiento de equipos	41
3.2.1	Tanque de igualación	41
3.2.2	Reactor anaerobio tipo <i>UASB</i>	44
3.2.3	Reactor aerobio.....	48
3.2.4	Clarificador secundario.....	55
3.3	Lista de equipos	56
3.4	Diagrama de flujo de proceso y balance de masa	57
Capítulo 4. Filosofía de operación y diagrama de tuberías e instrumentación.....		59
Capítulo 5. Especificación y arreglo preliminar de equipos.....		63
5.1	Especificación de equipos.....	63
5.1.1	Tanque igualación (Figura 5.1).....	63
5.1.2	Bloque de tratamiento biológico (Figuras 5.2 y 5.3).....	63
5.1.3	Tanque de recolección de sólidos	64
5.1.4	Tanque de almacenamiento de agua tratada	64
5.2	Arreglo de equipos	64
Capítulo 6. Evaluación económica preliminar del proyecto.....		69
6.1	Evaluación de inversión inicial preliminar	69
6.2	Estado financiero anualizado	71
6.3	Evaluación económica del proyecto	72
Capítulo 7. Seguridad en la planta		73
7.1	Riesgos en plantas de proceso	73
7.2	Factores de peligro en la planta de proceso.....	74
Capítulo 8. Conclusiones y recomendaciones.....		77
8.1	Conclusiones.....	77
8.2	Recomendaciones	78
Bibliografía		80



Índice de tablas

Número	Nombre de la tabla	Página
Tabla 2.1	Comparación de muestra analizada con Normativas Oficiales Mexicanas (DOF, 1996, 1997)	11
Tabla 2.2	Tabla 2.2. Clasificación de los productosobtenidos en la panificación según la Normativa Mexicana NMX-F-521-1992 (DOF, 1992)	13
Tabla 2.3	Distribución porcentual de sitios de evaluación en cuerpos de agua superficiales. Conagua. Subdirección General Técnica. 2010 (Conagua, 2011)	21
Tabla 2.4	Estadísticas del agua en México, 2004. México, D.F. (Conagua, 2011)	22
Tabla 2.5	Clasificación de los principales contaminantes presentes en el agua residual	29
Tabla 2.6	Comparación del tratamiento anaerobio y aerobio	33
Tabla 3.1	Caudal L/s y L/h obtenido en un día laboral	42
Tabla 3.2	Área bajo la curva y volumen acumulado por día	43
Tabla 3.3	Datos del agua residual de efluente al reactor anaerobio	44
Tabla 3.4	Datos del agua residual de efluente al reactor anaerobio	45
Tabla 3.5	Carga orgánica volumétrica, kgDQO/m ³ /d (WEF, 1998)	47
Tabla 3.6	Tiempo de residencia hidráulica, h (WEF, 1998)	47
Tabla 3.7	Velocidad de flujo ascendente y altura de reacto (WEF, 1998)r	47
Tabla 3.8	Resumen de diseño del reactor anaerobio	48
Tabla 3.9	Características de influente, demanda química de oxígeno	49
Tabla 3.10	Características de influente, demanda bioquímica de oxígeno	49
Tabla 3.11	Características de influente SST	49
Tabla 3.12	Características de influente, nitrógeno	49
Tabla 3.13	Características de influente, otros parámetros	50
Tabla 3.14	Coeficientes cinéticos de las bacterias nitrificantes	51
Tabla 3.15	Coeficientes cinéticos de las bacterias heterótrofas	52
Tabla 3.16	Parámetros de diseño de reactor de lodos activados completamente mezclado	52
Tabla 3.17	Cálculos cinéticos a condiciones de operación	54
Tabla 3.18	Características del efluente	55
Tabla 3.19	Lista de equipos	56
Tabla 3.20	Balance de masa (1/2)	57



Número	Nombre de la tabla	Página
Tabla 3.21	Balance de masa (2/2)	57
Tabla 6.1	Valor de INPC para los años de estudio (SAT, 2013)	69
Tabla 6.2	Tipo de cambio por año. (SAT, 2013)	69
Tabla 6.3	Precio de equipo	70
Tabla 6.4	Medición del área superficial del módulo de tratamiento biológico	70
Tabla 6.5	Cotización de la PTAR (Perry et al., 1997)	71



Índice de figuras

Número	Nombre de la figura	Página
Figura 2.1	Distribución de precipitación anual en México (1971-2000). CONAGUA Coordinación General del Servicio Meteorológico Nacional (Conagua, 2011)	20
Figura 2.2	Ríos principales con sus cuencas hidrográficas. CONAGUA. Subdirección General de Programación. 2010. Elaborado a partir de: Conagua. Subdirección General Técnica. 2010 (Conagua, 2011)	20
Figura 2.3	Ríos principales con sus cuencas hidrográficas. CONAGUA. Subdirección General de Programación. 2010. Elaborado a partir de: Conagua. Subdirección General Técnica. 2010 (Conagua, 2011)	21
Figura 2.4	Clasificación de los sólidos	26
Figura 2.5	Lodos activados. Completamente mezclado	34
Figura 2.6	Filtro percolador. Biopelícula	34
Figura 2.7	Biodiscos. Biopelícula	34
Figura 2.8	Reactor UASB. Cultivo en suspensión	35
Figura 2.9	Proceso simplificado de degradación anaerobia	35
Figura 2.10	Esquema representativo del proceso seleccionado anaerobio-aerobio para fábricas panificadoras	37
Figura 3.1	Gráfica de variación de flujo a lo largo de un día normal	42
Figura 3.2	Gráfica de valores de volumen acumulado para el cálculo del tanque de igualación	43
Figura 3.3	Diagrama del balance de masa en el reactor anaerobio	45
Figura 3.4	Diagrama de flujo de proceso	58
Figura 4.1	Diagrama de tuberías e instrumentación	61
Figura 4.2	Simbología DTI	62
Figura 5.1	TAN-01 y BNM-01	65
Figura 5.2	Bloque de tratamiento biológico (1/2)	66
Figura 5.3	Bloque de tratamiento biológico (2/2)	67
Figura 5.4	Arreglo general de planta	68

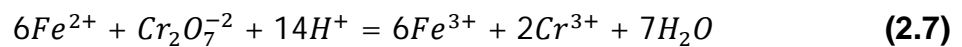
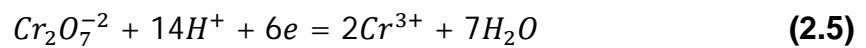
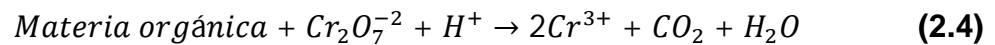


Índice de ecuaciones

$$pH = -\log aH^+ \quad (2.1)$$

$$pH(X) = pH(P) + \frac{E(P)-E(X)}{(RT/F)\ln 10} \quad (2.2)$$

$$\text{Cantidad inicial} - \text{Cantidad remanente} = \text{Materia orgánica oxidada} \quad (2.3)$$



$$W_1 = Q_D \cdot DQO_1 \quad (3.1)$$

$$W_{conv} = \varepsilon \cdot W_1 \quad (3.2)$$

$$W_2 = W_1 - W_{conv} \quad (3.3)$$

$$Y + Z = 1 \quad (3.4)$$

$$P_B = YW_{conv} \quad (3.5)$$

$$P_{SSV} = \frac{P_B}{f} \quad (3.6)$$

$$\rho = \left[\frac{(1-SS)}{1000} + \frac{SV \cdot SS}{1050} + \frac{SF \cdot SS}{2500} \right]^{-1} \quad (3.7)$$

$$SST_{acum} = W_{1SST} \cdot (1 - e_{SST}) \quad (3.8)$$

$$Q_X = P_X + SST_{acum} \quad (3.9)$$

$$M_{CH_4} = Z \cdot W_{conv} \quad (3.10)$$

$$V_{CH_4}^0 = \frac{22.4 \cdot M_{CH_4}}{64} \quad (3.11)$$



$$V_u = \frac{W_1}{B_v} \quad (3.12)$$

$$\theta_{rh} = \frac{W_1}{B_v} \quad (3.13)$$

$$A = \frac{V_1}{H} \quad (3.14)$$

$$v_a = \frac{Q}{A} \quad (3.15)$$

$$DQOs = DQOsb + DQOsnb \quad (3.16a)$$

$$DQOp = 1.42SSV \quad (3.16b)$$

$$DQObp = \frac{DQOb}{DBO}(DBOp) = \frac{DQOb}{DBO}(DBO - DBOs) \quad (3.16c)$$

$$DQOnb = DQOsnb + DQOpnb \quad (3.17)$$

$$DQOb = DQOsb + DQOpb \quad (3.18)$$

$$DQOsnb = DQOs - \left(\frac{DQOb}{DBO} \right) DBOs \quad (3.19)$$

$$SSVnb = \left(1 - \frac{DQObp}{DQOp} \right) SSV = \left(\frac{DQOpnb}{DQOp} \right) SSV \quad (3.20)$$

$$SST = SSV + SSTi \quad (3.21)$$

$$NTK_0 = (N - NH_4^+)_0 + (N - Org)_0 \quad (3.22)$$

$$f_{od} = \frac{OD}{K_o + OD} \quad (3.23)$$



$$f_{pH} = \frac{1}{1 + 0.04(10^{pH_{opt} - pH} - 1)} \quad (3.24)$$

$$\mu_T = \mu_{T,20} \theta^{(T-20)} \quad (3.25)$$

$$\mu_n = \mu_{n,T} * f_{OD} * f_{pH} \quad (3.26)$$

$$TRC_{min} = \frac{1}{\mu_m - k_d} \quad (3.27)$$

$$FS = \frac{TRC}{TRC_{min}} \quad (3.28)$$

$$\tau = \frac{V}{Q} \quad (3.29)$$

$$F / M = \frac{QS_0}{X_{SSV}V} \quad (3.30)$$

$$L_{org} = \frac{QS_0}{V} \quad (3.31)$$

$$Y_{obs} = \frac{P_{X, SST_ó_SSV}}{DBO_ó_bDQO_removido} \quad (3.32)$$

$$S = \frac{K_s [1 + (k_d)TRC]}{TRC(\mu_m - k_d) - 1} \quad (3.33)$$

$$Ne = \frac{K_n [1 + (k_{dn})TRC]}{TRC(\mu_{mn} - k_{dn}) - 1} \quad (3.34)$$



$$\mu_{op} = \frac{\mu_m S}{K_S + S} - k_d \quad (3.35)$$

$$\mu_{n,op} = \frac{\mu_{nm} N}{K_N + N} - k_{n,d} \quad (3.36)$$

$$\% E_{NO_x} = \frac{NO_{x,producidos}}{NTK_{inf luente}} \quad (3.37)$$

$$NO_x = TKN - N_e - \frac{0.12 P_{X,bio}}{Q} \quad (3.38)$$

$$P_{X,bio} = \frac{QY(S_0 - S)}{1 + k_d(TRC)} + \frac{QY_n(NO_x)}{1 + k_{dn}(TRC)} + \frac{f_d k_d QY(TRC)(S_0 - S)}{1 + k_d(TRC)} \quad (3.39)$$

$$P_{X,SSV} = P_{X,bio} + Q(SSVnb) \quad (3.40)$$

$$P_{X,SST} = \frac{P_{X,bio}}{0.85} + Q(SSVnb) + Q(SSTi) \quad (3.41)$$

$$V = \frac{P_x \cdot TRC}{X_{SST}} = \frac{0.21 \cdot 12.86}{3.00} = 0.9 m^3 \quad (3.42)$$

$$R = \frac{SSR}{X_R - SSR} = 0.75 \quad (3.43)$$

$$Q_W X_R + (Q - Q_W) X_e = P_{X,TSS} \quad (3.44)$$

$$A = \frac{(Q + Q_R)}{SRL} X \quad (3.45)$$

$$\text{Valor Presente} = \text{Valor original} \cdot \frac{INPC_{actual}}{INPC_{pasado}} \quad (6.1)$$

$$\text{Valor Presente} = \$1095 \cdot \frac{109.328}{89.093} = \$1343.69 \quad (6.2)$$

$$\text{Costo TOTAL} = \$174,619.62 + \$19,585.23 = \$194,204.85 \quad (6.3)$$



$$1 \text{ ingeniero} = 6 \frac{\text{bimestres}}{\text{año}} \cdot \$1500 \frac{\text{consulta}}{\text{bimestre}} = \$9,000 \quad (6.4)$$

$$\text{Contratiempos} = \$50,282.21 \cdot 0.05 = \$2,514.11 \quad (6.5)$$

$$\text{Consumo} = kW_{BCM-01} + kW_{SOP-01} + kW_{SOP-02} + kW_{filtros} = 0.3531 \text{ kWh} \quad (6.6)$$

$$\text{Gasto anual} = 0.3531 \frac{\text{KW}}{\text{h}} \cdot \$1.741 \frac{\text{precio}}{\text{KW}} \cdot \frac{24\text{h}}{\text{d}} \cdot \frac{365\text{d}}{\text{año}} = \$5,385.18 \quad (6.7)$$

$$\text{Ahorro libre} = \text{Ahorro total} - \text{Costos de operación} = \$30,222.21 \quad (6.8)$$

$$\text{Recuperación de inversión} = \frac{\text{Costo total de la PTAR}}{\text{Ahorro libre anual}} = \frac{\$194,204.85}{\$30,222.21} = 6.4 \text{ años} \quad (6.9)$$



Glosario de términos

A	Area transversal
Alc	Alcalinidad
DAF	“ <i>Disolved air flotation</i> ” Operación unitaria de separación de sólidos por medio de aire disuelto inyectado a presión
DBO	Contaminantes medidos como demanda bioquímica de oxígeno
DQO	Contaminantes medidos como demanda química de oxígeno
e	Eficiencia de remoción de contaminantes
F/M	Relación entre sustrato y microorganismos
FS	Factor de seguridad
G y A	Contaminantes medidos como grasas y aceites
M _{CH4}	Producción de metano
NTK	Contaminantes medidos como compuestos nitrogenados de manera total siguiendo el método de Kjeldahl
N-org	Contaminantes medidos como compuestos nitrogenados orgánicos
OD	Oxígeno disuelto
P	Presión
PB	Producción de biomasa
PSST	Producción de biomasa expresada en SSV
PTAR	Siglas para planta de tratamiento de aguas residuales
P-total	Contaminantes medidos como compuestos de fósforo de manera total
Q	Caudal, m ³ /h



R	Recirculación de lodo
SS	Sólidos sedimentables en una muestra de agua
SSF	Contaminantes medidos como sólidos suspendidos fijos
SSLM	Sólidos suspendidos totales en el efluente del reactor aerobio
SST	Contaminantes medidos como sólidos suspendidos totales
SSV	Contaminantes medidos como sólidos suspendidos volátiles
SSVR	Sólidos suspendidos volátiles en el reactor
T	Temperatura
TRC	Tiempo de retención celular
TRH	Tiempo de residencia hidráulico
UASB	" <i>Upflow anaerobic sludge blanket</i> " Lecho de lodos anaerobios de flujo ascendente
Vu	Volúmen útil
W	Flujo másico
Y	Coefficiente global de rendimiento de biomasa
Z	Coefficiente de generación de metano
ρ	densidad
μ	Velocidad de crecimiento para bacterias
θ_{rh}	Tiempo de residencia hidráulico



Evaluación conceptual de una planta de tratamiento de aguas residuales de una empresa de alimentos

Miriam Molina Guzmán
Tesis Profesional. Ingeniería Química

RESUMEN

Ante la necesidad de mejorar la calidad de vida y el ambiente, se plantea el desarrollo de un sistema de tratamiento de aguas residuales que permita a una empresa que procesa alimentos evitar la emisión de aguas residuales contaminantes y así abatir las costosas multas que esto genera. Se tomará como ejemplo una empresa que procese cereales, como el trigo, ya sea para elaborar pan o galletería. Las aguas residuales del proceso tienen residuos del propio cereal, así como restos de otras materias primas, tanto en forma suspendida como disuelta. Esta materia orgánica e inorgánica representa una elevada carga contaminante desde el punto de vista ambiental. Para degradar esta materia disuelta y abatir la contaminación generada, se usará un proceso anaerobio completado por un proceso aerobio que, como cualquier proceso químico biológico generan residuos, los cuales, pueden ser aprovechados de manera útil. La parte anaerobia del proceso genera una emisión de biogás (aproximadamente dos tercios de metano y un tercio de dióxido de carbono) y una biomasa microbiana que podría ser usada en alimentos balanceados. Se ha demostrado que estos sistemas (anaerobio-aerobio) son idóneos para convertir la materia orgánica e inorgánica disuelta en los efluentes de la industria alimentaria, especialmente la de los cereales. Una ventaja importante es que el agua tratada es de tal calidad que puede emplearse como agua de riego (zonas de jardineras en áreas urbanas o de cultivos en áreas suburbanas o rurales) sin crear problemas de contaminación, o bien, como agua para el lavado de pisos, equipos u otros servicios. En esta tesis se desarrolló el diseño conceptual, dimensionamiento preliminar de una planta de tratamiento de aguas residuales tomando una base específica de acuerdo con un estudio de mercado previo (mini o pequeña empresa). Se hizo un análisis muy preliminar de prefactibilidad que indicó que podría recuperarse el costo de inversión en poco más de 6 años tomando un precio del metro cúbico de agua de aproximadamente \$25.00 M.N.

Palabras clave: Evaluación conceptual, planta de tratamiento de aguas residuales, empresa de alimentos, panificación



Capítulo 1. Problemática

1.1 Introducción

La falta de agua a nivel mundial es un tema muy comentado y el problema se acrecienta conforme pasa el tiempo. En el documento ***Water Development Report, 2006*** realizado por la UNESCO (2011), se observa la manera en que el agua es distribuida en el planeta. Se puede decir que el ser humano utiliza el agua del subsuelo, de los ríos y los lagos, lo que representa el 0.75% de toda el agua presente en el globo terráqueo, en esta cifra se ha contemplado la cantidad de agua contaminada, la cual podría presumirse que es más de la mitad.

La distribución del agua no es equitativa en todo el mundo. Para el caso de México, el agua en el año 2000 era de $4,624\text{m}^3/\text{año persona}$, reduciéndose para el año 2005 a $4,360\text{m}^3/\text{año persona}$. A esta velocidad, en el año 2080 a cada mexicano le corresponderá 1m^3 al año. En este análisis aún no se está considerando que a ciudades del norte como Monterrey y Durango les corresponde mucho menos agua de la que se ha mencionado debido al clima árido que se presenta en esa región del país, mientras que para los estados del sureste el agua es mucho mayor a la mencionada. En las ciudades como el Distrito Federal y algunas del Estado de México, donde la densidad poblacional es mucho mayor que en otras partes del país, el agua se reduce para cada uno de los habitantes correspondiéndole $1,642\text{m}^3$ al año. A estas cifras aún falta restarles la cantidad de agua *per cápita* correspondiente al uso industrial y el de servicios (Conagua, 2011).

Se ha realizado este análisis para tener conciencia del agua que se utiliza a diario para entender que el agua no es un recurso interminable y que ha sido desvalorada. Si el agua se sigue contaminado y no se hace algo por evitar desperdiciarla, dentro de muy poco la escasez de agua en el país y en varias partes del mundo van a ser inminentes.

El ahorro de agua se ha visto reflejado más en el ámbito de la industria pues no solamente significa ahorro económico, sino que el tratamiento del agua contaminada y su reutilización como agua para riego, para sanitarios y para lavado de camiones ha significado una reducción de gastos. Para esta investigación, la propuesta es implementar una planta de tratamiento de aguas residuales para una industria de alimentos, en la cual los contaminantes del agua son principalmente residuos de alimentos como azúcar y grasa, ya que entre sus productos principales están el pan, las galletas y los pasteles.

Para el proceso de la elaboración de los productos antes mencionados el agua es importante ya que en ocasiones los ingredientes como la leche o el huevo vienen deshidratados, por lo que el agua es requerida como parte del proceso de elaboración de



las masas para panificación, galletería y pastelería. Esto quiere decir que existe una corriente de agua de proceso con características específicas para la producción y que no es desechada al drenaje. El agua que se desecha al drenaje es esencialmente la que se requirió para el lavado de los utensilios, recipientes y moldes.

En México, los productos de las industrias panificadoras se encuentran en los primeros lugares de la canasta básica. Eso explica la numerosa existencia de panaderías de todo tipo como micro, mini, pequeñas, medianas y grandes industrias en todo el país y, entre mayor sea la producción de estas manufactureras, mayor será la cantidad de agua desechada.

El contenido del agua residual de cualquier industria panificadora está representado por hidratos de carbono, coloquialmente conocidos como carbohidratos, lípidos, etc., teniendo en cuenta para su tratamiento un proceso biológico debido a que son sustancias biodegradables. Entre los subproductos de este tipo de tratamiento de agua está la producción de biomasa que puede ser utilizada para alimentos no convencionales o para el mejoramiento de suelos. El agua tratada puede ser reutilizada para el lavado de áreas comunes, en los retretes o para el riego. Estas acciones para la empresa significan ahorro de dinero, pues aunque existe la inversión de un costo inicial, ésta se recupera con los beneficios de no pagar multas por descargas fuera de norma, reutilización del agua y venta de la biomasa (Durán-Domínguez y col., 1991).

1.2 Justificación

Dentro de la cultura de cuidado del agua hay dos variantes que son importantes, el ahorro y su depuración. Para una planta especializada en pan y pasteles se ha propuesto el diseño de una planta de tratamiento de aguas residuales, la cual además de cumplir con la normatividad¹ de descarga de agua implantada por la SEMARNAT debe beneficiar económicamente a la fábrica en donde se desarrolla el proyecto.

Para las micro-empresas, la inversión de una planta de tratamiento de agua puede parecer grande e innecesario, ya que en algunos casos no se les hace ver que su inversión es recuperada en un tiempo determinado, que quizá llegue a ser a un largo plazo pero económicamente significa un ahorro de gastos.

No sólo es cuestión de de tratar el agua que ya ha sido utilizada sino de ahorrar el agua. Es inevitable que entre más agua se utilice mayor sería el volumen de la planta de

¹ La palabra *normatividad* es un anglicismo que no existe todavía en la lengua española. La palabra correcta es normativa: Conjunto de normas aplicables a una determinada materia o actividad



tratamiento, pero si el gasto de agua es reducido a medida que el agua es tratada los beneficios se verán reflejados inmediatamente. La manera de ahorrar el agua debe ser evaluada en un ambiente técnico-económico, ya que no sólo se trata de cuidar el agua sino que se busca la protección del ambiente en donde esté localizada la planta.

Se realizarán dos tipos de investigaciones, la primera es de campo donde se buscará una fábrica panificadora que proporcione el flujo de agua y las características que ésta tiene. La segunda es bibliográfica para poder conocer las técnicas disponibles para el tratamiento y así poder proponer un método específico para el tipo de agua desechada.

1.3 Metas y objetivos

Este proyecto tiene como meta principal la conservación del ambiente ayudando a las plantas manufactureras a tener una conciencia del impacto ambiental que se tiene por su acción, ayudando a frenar los actos negativos principalmente del derroche del agua potable, así como de su disposición contaminada. Para las plantas que se dedican a la fabricación de pan, galletas y pasteles los efluentes son considerados de alta carga orgánica, pero así mismo son considerados de fácil tratamiento. Teniendo en cuenta esto último, como segunda meta se realizará el tren de tratamiento de sus aguas residuales para la planta seleccionada, teniendo como visión la generación de un proyecto económicamente atractivo. Es importante a nivel empresarial hablar de los beneficios económicos que se obtendrán al realizar este proyecto, enfatizando que se realiza una inversión y no un gasto.

Dentro de los objetivos del proyecto está el de realizar un diseño económicamente factible, compacto y versátil. Lo que se busca también es que el diseño sea técnicamente el adecuado para el tratamiento específico de ese tipo de agua residual ocupando la menor cantidad de equipos posibles y considerando, tanto su funcionalidad como un bajo costo de operación.

Se procurará que el sistema a elegir contemple el reaprovechamiento de los productos secundarios de las reacciones efectuadas y que, además, aquellos que no sean aprovechables puedan reducirse al máximo proponiendo un tratamiento de estabilización de los desechos o, en todo caso, una logística económica y sencilla para su desecho.

1.4 Alcance

Este proyecto sólo contempla el desarrollo de las bases de diseño, diagrama de proceso, tuberías e instrumentación y de la propuesta de arreglo de equipo así como el estudio económico de prefactibilidad ($\pm 20\%$) para obtener un diseño cuyo resultado sea un



efluente de agua que cumpla con las características aplicadas para la normativa vigente. Se darán las bases para el desarrollo del proyecto y su posible construcción en un futuro. Cabe mencionar que este proyecto sólo contempla los aspectos relacionados con la ingeniería conceptual y básica; siendo éstas las bases para la ingeniería de detalle. Asimismo, este estudio solamente propone la manera de que los residuos sean reutilizados o desechados, mas no se desarrollará información detallada acerca de la manera de ser tratados.

Para el diseño de la planta se tomarán los datos proporcionados por el personal de la planta panificadora, como son la caracterización del agua, el flujo y lugar de la instalación. Los aspectos contemplados en esta investigación son los siguientes:

Ingeniería de proyectos

En esta parte del proyecto se informará al cliente de los beneficios que tendría al adquirir una planta de tratamiento de aguas residuales, las bases para su realización y los motivos principales por lo que dicho proyecto se lleva a cabo.

Proceso

Se elaborará todo lo necesario para el diseño y descripción de la planta de tratamiento de aguas. En esto se incluye diagrama de proceso, balances de materia, especificaciones y requerimientos de los equipos más importantes y memorias de cálculo. Para que se lleve a cabo, se analizarán los flujos mínimos y máximos que la planta tenga para evitar sobredimensionamiento y derrames. También se evaluarán los planes de emergencia para la operación de la planta. Como se trata de agua residual es importante especificar los materiales de los equipos, tuberías y válvulas para evitar problemas de corrosión o incrustaciones.

Instrumentación

La instrumentación se ha convertido en un recurso de mucha importancia para la industria de la era moderna. El control exacto de los procesos sin errores humanos, la facilidad de fabricación y la eliminación de la mano de obra son beneficios que significan ahorro de dinero principalmente en el rubro de operación. Debido a esto es posible que una planta pueda operarse continuamente con solamente una supervisión esporádica de su buen funcionamiento. Esta parte se verá reflejada en el proyecto en el diagrama de tuberías e instrumentación así como en la filosofía de operación.

Seguridad

Como en toda área de trabajo será necesario especificar los elementos de seguridad. Cuando se diseña una planta es necesario especificar cada uno de los riesgos que pueden existir y cómo se piensa evitarlos. A este tipo de planeación se le llama estudio de



operabilidad considerando los peligros (“*hazard and operability study*”, *HAZOP*). También dentro de este análisis es importante poder especificar cuáles son las sustancias y residuos peligrosos y recomendar cuál es la acción a tomar por cada uno.

Ambiental

La parte ambiental es muy importante. Se considera en este proyecto la protección del ambiente ya que no tendría caso que se realizara si al eliminar los contaminantes del agua no se hiciera algo por eliminar los contaminantes de los subproductos generados. Otro rubro importante es el del consumo de energía, ya que su producción en su mayoría no es limpia. Todos estos factores serán previstos y, principalmente para los desechos, se buscará establecer su disposición, normativa y características fisicoquímicas.



Capítulo 2. Estudio técnico

2.1 Bases de diseño

Cuestionario para la elaboración de las bases de diseño (Hernández-Morales, 2005; Ortiz, 2008)

Nombre de la Planta: Panificadora La Rosa²

Localización de la Planta: Jaime Torres Bodet Num.227 Col. Santa María la Rivera Delegación Cuauhtémoc, México, Distrito Federal. La que a lo largo de este documento se denominará empresa cooperante.

2.1.1 Generalidades

2.1.1.1 Función de la planta

La planta será diseñada para el tratamiento del agua residual que se deseche de la empresa manufacturera. Dicha planta debe cumplir con la calidad de agua deseada para su reutilización con contacto humano, acatando la norma vigente mexicana, NOM-003-SEMARNAT-1997 (DOF,1997).

2.1.1.2 Tipo de proceso

Se propone un tren de tratamiento común para el tratamiento del agua residual el cual se compone de un tratamiento primario, uno secundario y uno terciario.

2.1.2 Capacidad, rendimiento y flexibilidad

2.1.2.1 Factor de servicio

El factor de servicio será de 0.25. Trabajando los 365 días al año. Se considera que sólo se desecha agua por periodos cortos

2.1.2.2 Capacidad de la planta

Capacidad de diseño de la planta: 218 L/h

Capacidad normal: 145.33 L/h

Capacidad máxima: 218 L/h

Capacidad mínima: 108 L/h

En días de alto rendimiento como lo es en temporadas altas (Primeros días de enero), el efluente excesivo se derivará hacia el drenaje urbano.

2.1.2.3 Rendimiento

El rendimiento mínimo de la planta es de 99.9%

2.1.2.4 Flexibilidad de la planta bajo condiciones anormales

La planta no puede seguir laborando si existe una falla de electricidad.

² La empresa autorizó el uso de su información para esta tesis



El reactor biológico está limitado a soportar solamente cierto tiempo sin energía eléctrica.

La planta no tiene requerimientos de vapor.

2.1.2.5 Flexibilidad en cuanto a operación con cargas y/o modalidades operativas

El proceso no requiere de una sección de acondicionamiento de materias primas.

Se van a manejar los sobrediseños en cuanto a flujos y cargas.

2.1.2.6 Previsión para ampliaciones futuras

No se planea una ampliación a futuro.

2.1.3 Especificación de las alimentaciones en los límites de batería

Alimentación	Componente	Estado físico	Presión (mm Hg)	Temperatura (°C)	Forma de Llegada
1	Agua residual	Líquido con sólidos en suspensión	585	16 a 19	Tubería

2.1.3.1 Elementos de seguridad existentes que protegen las líneas de alimentación

Para la línea de alimentación sólo se debe asegurar que se encuentre en buen estado para evitar las fugas debido a que estas pueden ocasionar accidentes además de emitir malos olores. Se debe limpiar de vez en cuando para evitar las incrustaciones de grasa.

2.1.4 Especificaciones de los productos en los límites de batería

Producto	Componente	Estado físico	Presión (mm Hg)	Temperatura (°C)	Forma de salida
1	Agua tratada	Líquido	585	20.00	Tubería
2	Lodo biológico y sólidos retenidos	Pasta	585	20.00	Contenedores
3	Biogás	Gaseoso	585	20.00	Tubería

2.1.5 Agentes químicos

Agente químico	Composición	Estado físico	Temperatura	Forma de recibo	Procedencia
HClO	13%	Sólido	20.00	Sólido	Contenedores

2.1.6 Eliminación de desechos

2.1.6.1 Existe un sistema de drenaje para los siguientes efluentes

- Agua de lavado de instalaciones De ser posible se procurará su regreso a la primera parte de la planta de tratamiento, de no ser posible se ingresará al drenaje municipal



- Agua de sanitarios Este tipo de agua puede perjudicar en los productos del tratamiento del agua como el lodo además de que la cantidad de ozono o cloro sería mayor para la eliminación de agente patógenos y se ingresará al drenaje municipal
- Agua de lluvia Se dispondrá para la última etapa de tratamiento para su reutilización en caso de existir capacidad para su tratamiento y su captación
- Retrolavado de sistema de filtración Debido a su alta concentración de sólidos suspendidos se dispondrá al drenaje municipal. En una etapa subsecuente podría plantearse su recuperación en una planta más grande.

2.1.6.2 Normas y requerimientos respecto a la pureza de los efluentes

- a) Agua: NOM-003-SEMARNAT-1997 (DOF, 1997). Agua para riego
- b) Productos sólidos: Los residuos del tratamiento primario se dispondrán en unos contenedores, mientras que se instalen unos lechos de secado para el lodo biológico que se dispondrá para la rehabilitación de suelos o para la producción de alimentos no convencionales.

2.1.6.3 Efluentes gaseosos

Si el flujo de biogás es rico en metano, será necesario el uso una antorcha para su incineración. Si el biogás contiene en su mayoría CO₂ será enviado a la atmósfera.

2.1.7 Servicios auxiliares

Vapor

No aplica

Agua de enfriamiento

No aplica

Agua para servicios

Fuente de suministro	La misma planta
Presión	Atmosférica
Temperatura	Atmosférica
Disponibilidad	La requerida

Agua potable

Fuente de suministro	Distribución municipal
-----------------------------	------------------------

Agua contra incendio

No aplica

Agua para proceso

No aplica



2.1.8 Energía eléctrica

Energía suministrada por C.F.E.

Tensión	110V
Fases	Monofásica
Frecuencia	60 Hz
Num. de alimentadores	1

En caso de una emergencia eléctrica la planta deberá dejar de trabajar debido a que no se cuenta con una planta de emergencia, cuando esto suceda el influente (agua de proceso) se deberá desviar al drenaje urbano.

2.1.9 Sistema de seguridad

Sistema contra incendio. Sí

Normas o criterios de diseño para:

Red contra incendios: según lo establecido por la FDA

Equipo móvil y portátil: según lo establecido por la FDA

2.1.10 Condiciones climatológicas

2.1.10.1 Temperatura

Máxima extrema: 34°C

Mínima extrema: -7°C

Máxima promedio: 24°C

Mínima promedio: 6°C

Temperatura de diseño: 18°C

2.1.10.2 Atmósfera

Presión atmosférica local: 585mmHg

Atmósfera corrosiva: Sí No

Nota: En algunas partes de la planta existe calor emanado por los hornos o la caldera.

2.2 Características de la materia prima y capacidad del proceso

La empresa panificadora cooperante realiza periódicamente un análisis del agua residual. Su último análisis fue realizado el 08 de enero del 2011 por la empresa Gamma Consultores, S.A. de C.V. El muestreo fue llevado según lo estipulado por la NOM-002-SEMARNAT-1996 (DOF, 1996); En particular, se tomaron 6 muestras instantáneas para formar una muestra compuesta para la descarga. Durante el muestreo se determinaron los valores de pH, temperatura y medición del gasto volumétrico, para cada una de las muestras puntuales.



En este caso se propuso un sistema de tratamiento de aguas residuales, el cual permitirá la reutilización (“reúso”) del agua residual en el proceso como agua auxiliar para el lavado de pisos, lavado de camiones y posiblemente en sanitarios. El agua no deberá tener contacto directo con la producción del pan. Solamente será empleada para servicios auxiliares. Para el lavado de mesas y utensilios, el agua será potable, lo mismo que el agua de proceso, la cual cumple con características diferentes.

En la Tabla 2.1 se puede observar los datos obtenidos de esa muestra. Se anexan, además, las características que deben de cumplir los parámetros, cuando el agua residual sea de reúso en el servicio público.

En la misma tabla se muestra la comparación de los parámetros medidos, con respecto a los establecidos en las Normas Oficiales Mexicanas. Los datos obtenidos de las normas corresponden al límite máximo permisible y al promedio diario. La primera columna de datos muestra los resultados obtenidos en el laboratorio.

Tabla 2.1. Comparación de muestra analizada con Normativas Oficiales Mexicanas (DOF, 1996, 1997)

Parámetro	Unidad	Muestra	NOM-002-SEMARNAT-1996	NOM-003-SEMARNAT-1997
pH	UpH	7.96	5.5 – 10	5.5 - 10
Temperatura	°C	16.19	40	40
Conductividad	µS/cm	1033	NA	NA
Sólidos suspendidos totales	mg/L	95	125	20
Materia flotante	mg/L	ausente	Ausente	ausente
Arsénico total	mg/L	<0.002	0.75	0.4
Cadmio total	mg/L	<0.100	0.75	0.4
Cianuros	mg/L	<0.020	1.5	3
Cobre total	mg/L	<0.800	15	6
Cromo hexavalente	mg/L	<0.100	0.75	1.5
Mercurio total	mg/L	<0.0005	0.015	0.015
Níquel total	mg/L	<0.800	6	4
Plomo total	mg/L	<0.200	1.5	1
Zinc total	mg/L	<0.300	9	20
DBO ₅	mg/L	120.36	150	20
Sólidos sedimentables	ml/L	4	7.5	0
Grasas y aceites muestra 1	mg/L	57.82	25	15
Grasas y aceites muestra 2	mg/L	62.53	25	15
Grasas y aceites muestra 3	mg/L	55.38	25	15
Grasas y aceites muestra 4	mg/L	51.28	25	15
Grasas y aceites muestra 5	mg/L	60.00	25	15
Grasas y aceites muestra 6	mg/L	53.16	25	15
Grasas y aceites promedio	mg/L	56.368	25	15

Analizando la Tabla 2.1 se puede apreciar que los parámetros relacionados a los metales pesados y cianuros se encuentran dentro de las normas, mientras que los parámetros orgánicos y de sólidos se encuentran excedidos del límite máximo permisible. Estos parámetros son demanda bioquímica de oxígeno en cinco días (DBO₅), grasas y aceites (GyA), sólidos suspendidos totales (SST) y sólidos sedimentables (SS).

El agua no será mezclada con corrientes provenientes de otros servicios, por lo que se puede presumir la ausencia de organismos patógenos o indicadores de ellos, coliformes fecales y totales y huevos de helminto.

2.3 Normativa aplicable

La importancia de este estudio radica en analizar diferentes alternativas de normas, las cuales se han dividido en tres grupos importantes: Normas encaminadas a la producción y normas referentes a las características de productos de panificación, normas referentes a la calidad de salida del agua tratada y normas referentes a las características de los biosólidos desechados.

Para la parte de la panificación la **NORMA MEXICANA NMX-F-521-1992 (DOF,1992), “ALIMENTOS-PRODUCTOS DE PANIFICACIÓN-CLASIFICACIÓN Y DEFINICIONES”** describe cada uno de los productos obtenidos en la panificación como pasteles, galletería y pan dulce. Dentro de su descripción se menciona los ingredientes de los que está hecho cada uno. La clasificación básica está descrita en la Tabla 2.2. El agua residual del proceso de panificación proviene exclusivamente del lavado de los recipientes, los cuales contienen residuos de los ingredientes utilizados. Con esta norma se puede asegurar que el agua residual no contiene algún tipo de contaminante adicional mas que las materias primas y los detergentes a utilizar para el lavado de los recipientes.

Por lo que ya establecido lo anterior, es importante dirigirse a las normas exclusivas para las descargas del agua residual tratada en la planta propuesta. Para este efecto, existen tres tipos de normas oficiales mexicanas que están establecidas según sea su último destino, bienes nacionales, alcantarillado o reutilización (“reúso”), las cuales se describen a continuación.

Desde la menos estricta, se tienen las siguientes: **NORMA OFICIAL MEXICANA NOM-001-SEMARNAT-1996 (DOF, 1996) “QUE ESTABLECE LOS LÍMITES MÁXIMOS PERMISIBLES DE CONTAMINANTES EN LAS DESCARGAS DE AGUAS RESIDUALES EN AGUAS Y BIENES NACIONALES”** , la cual tiene como objetivo



proteger la calidad y posibilitar sus usos. Esta norma oficial es de observancia obligatoria para los responsables de dichas descargas y no se aplica a las descargas de aguas provenientes de drenajes separados de aguas pluviales.

Tabla 2.2. Clasificación de los productos obtenidos en la panificación según la Normativa Mexicana NMX-F-521-1992 (DOF, 1992)

TIPO	DESCRIPCIÓN	INGREDIENTES BÁSICOS
TIPO I	Pan blanco, bolillo y telera	Harina de trigo, agua, sal, azúcar y levadura
TIPO II	Pan de harinas integrales	Harinas de cereales o leguminosas, agua, sal, azúcares, grasas comestibles y levadura
TIPO III	Pan, productos de bollería	Harina de trigo, agua, sal, azúcares, grasas comestibles y levadura
TIPO IV	<p>Pan dulce</p> <p>a) Panquelería</p> <p>b) Hojaldre y feite</p> <p>c) Fritos</p> <p>d) Danés</p> <p>e) Soletas</p> <p>f) Polvorones</p> <p>g) Bisquet</p> <p>h) Bizcocho</p>	Harina en cualquiera de sus tipos, azúcares, agua, sal, adicionada ó no con grasas y/o aceites comestibles, con ó sin levadura o leudante químico. Ingredientes opcionales según sea el tipo
TIPO V	<p>Galletas</p> <p>a) Finas</p> <p>b) Entrefinas</p> <p>c) Comerciales</p> <p>d) Básicas</p> <p>e) Simples</p> <p>f) Compuestas</p> <p>g) Combinadas</p>	Con o sin levadura, con un 40% de harina de cereales y/o leguminosas, azúcares, adicionada o no con huevo, mantequilla o grasas y/o aceites comestibles, agentes leudantes, sal y otros ingredientes
TIPO VI	<p>Pastas secas</p> <p>a) Pastas secas de mantequilla</p>	Harina de cereales y/o leguminosas, azúcar, mantequilla y/o margarina, adicionado o no de grasa y/o aceites comestibles en un 20% mínimo en conjunto; adicionada o no de leche, huevo, agentes leudantes, sal y otros ingredientes
TIPO VII	Pastel	Un máximo de 40% de harinas de cereales y/o leguminosas, azúcares, mantequilla y/o grasas y/o aceites comestibles, agentes leudantes, sal yodada, adicionado o no de huevo y leche. Contiene otros ingredientes
TIPO VIII	“Pay” o tarta	Harina en cualquiera de sus tipos o galleta molida, azúcares, agua potable, sal yodotada, con o sin levadura o leudante químico, grasas y/o aceites comestibles. Ingredientes opcionales.



Esta norma oficial sólo se ha mencionado debido a que en el Distrito Federal la mayor parte de las descargas ocurren al drenaje. La **NORMA OFICIAL MEXICANA NOM-002-SEMARNAT-1996 (DOF, 1996) “QUE ESTABLECE LOS LÍMITES MÁXIMOS PERMISIBLES DE CONTAMINANTES EN LAS DESCARGAS DE AGUAS RESIDUALES A LOS SISTEMAS DE ALCANTARILLADO URBANO O MUNICIPAL”** tiene como fin prevenir y controlar la contaminación de las aguas y bienes nacionales, así como proteger la infraestructura de dichos sistemas y es de observancia obligatoria para los responsables de dichas descargas. Esta norma no se aplica a la descarga de las aguas residuales domésticas, pluviales, ni a las generadas por la industria, que sean distintas a las aguas residuales de proceso y conducidas por drenaje separado.

Dentro de esta norma los límites se establecen de la siguiente manera en el apartado 4:

“4. Especificaciones

4.1 Los límites máximos permisibles para contaminantes de las descargas de aguas residuales a los sistemas de alcantarillado urbano o municipal, no deben de ser superiores a los indicados en la Tabla 1. Para las grasas y aceites es el promedio ponderado en función del caudal, resultante de los análisis practicados a cada una de las muestras simples.

4.2 Los límites máximos permisibles establecidos en la columna instantáneo, son únicamente valores de referencia, en el caso de que el valor de cualquier análisis exceda el instantáneo, el responsable de la descarga queda obligado a presentar a la autoridad competente en el tiempo y forma que establezcan los ordenamientos legales locales, los promedios diario y mensual, así como los resultados de laboratorio de los análisis que los respaldan.

4.3 El rango permisible de pH (potencial hidrógeno) en las descargas de aguas residuales es de 10 (diez) y 5.5 (cinco punto cinco) unidades, determinado para cada una de las muestras simples. Las unidades de pH no deberán estar fuera del intervalo permisible, en ninguna de las muestras simples.

4.4 El límite máximo permisible de la temperatura es de 40°C (cuarenta Grados Celsius), medida de forma instantánea a cada una de las muestras simples. Se permitirá descargar con temperaturas mayores, siempre y cuando se demuestre a la autoridad competente por medio de un estudio sustentado, que no daña al sistema del mismo.



Tabla 1.

LÍMITES MÁXIMOS PERMISIBLES			
PARÁMETROS (miligramos por litro, excepto cuando se especifique otra)	Promedio Mensual	Promedio Diario	Instantáneo
Grasas y aceites	50	75	100
Sólidos sedimentables (mililitros por litro)	5	7.5	10
Arsénico total	0.5	0.75	1
Cadmio total	0.5	0.75	1
Cianuro total	1	1.5	2
Cobre total	10	15	20
Cromo hexavalente	0.5	0.75	1
Mercurio total	0.01	0.015	0.02
Níquel total	4	6	8
Plomo total	1	1.5	2
Zinc total	6	9	12

4.5 La materia flotante debe estar ausente en las descargas de aguas residuales.

4.6 Los límites máximos permisibles para los parámetros demanda bioquímica de oxígeno y sólidos suspendidos totales, que deben cumplir el responsable de la descarga a los sistemas de alcantarillado urbano o municipal, son los establecidos en la Tabla 2 de la Norma Oficial Mexicana NOM-001-ECOL-1996 (DOF, 1996).

4.7 El responsable de la descarga de aguas residuales a los sistemas de alcantarillado urbano o municipal que no dé cumplimiento a lo establecido en el punto 4.6, podrá optar por remover la demanda bioquímica de oxígeno y de sólidos suspendidos totales, mediante el tratamiento conjunto de las aguas residuales en la planta municipal, para lo cual deberá:

- a) Presentar a la autoridad competente un estudio de viabilidad que asegure que no se generará un perjuicio al sistema de alcantarillado urbano municipal.
- b) Sufragar los costos de inversión, cuando así se requiera, así como los de operación y mantenimiento que le correspondan de acuerdo con su caudal y carga contaminante de conformidad con los ordenamientos jurídicos locales aplicables.

4.8 No se deben descargar o depositar en los sistemas de alcantarillado urbano o municipal, materiales o residuos considerados peligrosos, conforme a la regulación vigente en la materia.



4.9 La autoridad competente podrá fijar condiciones particulares de descarga a los responsables de las descargas de aguas residuales a los sistemas de alcantarillado, de manera individual o colectiva, que establezcan lo siguiente:

- c) Nuevos límites máximos permisibles de descarga de contaminantes.
- d) Límites máximos permisibles para parámetros adicionales no contemplados en esta Norma.

Dicha acción deberá estar justificada por medio de un estudio técnicamente sustentado por la autoridad competente o por los responsables de la descarga.” (NOM-002-SEMARNAT-1996).

Si el cliente lo cree necesario y económicamente es factible, se puede llevar el agua a un tratamiento donde el efluente pueda ser reutilizado. En este caso debe aplicarse de manera estricta la **NORMA OFICIAL MEXICANA NOM-003-SEMARNAT-1997 (DOF, 1997) “QUE ESTABLECE LOS LÍMITES MÁXIMOS PERMISIBLES DE CONTAMINANTES PARA LAS AGUAS RESIDUALES TRATADAS QUE SE “REÚSEN” EN SERVICIOS AL PÚBLICO”** que, como se ha presentado en las normas anteriores, tiene como objetivo proteger el medio ambiente y la salud de la población y es de observancia obligatoria para las entidades públicas responsables de su tratamiento y reutilización (“reúso”).

“4. Especificaciones

**TABLA 1
LÍMITES MÁXIMOS PERMISIBLES DE CONTAMINANTES**

Tipo de “reúso”	PROMEDIO MENSUAL				
	Coliformes Fecales NMP/100mL	Huevos de Helminto (h/L)	Grasas y aceites mg/L	DBO ₅ mg/L	SST mg/L
SERVICIOS AL PÚBLICO CON CONTACTO DIRECTO	240	≤1	15	20	20
SERVICIOS AL PÚBLICO CON CONTACTO INDIRECTO Y OCASIONAL	1,000	≤5	15	30	30



4.1 Los límites máximos permisibles de contaminantes en aguas residuales tratadas son los establecidos en la Tabla 1 de esta Norma Oficial Mexicana.” (NOM-003-SEMARNAT-1997).

Ya se han presentado las normas a seguir para el tratamiento del agua, pero entre los subproductos se encuentra el lodo que se acumula en los reactores biológicos y, para este tipo de desechos, se tiene la **NORMA OFICIAL MEXICANA NOM-004-SEMARNAT-2002 (DOF, 2002) “ESPECIFICACIONES Y LÍMITES MÁXIMOS PERMISIBLES DE CONTAMINANTES PARA SU APROVECHAMIENTO Y DISPOSICIÓN FINAL”** Esta norma establece los límites máximos de contaminantes en los lodos y biosólidos proveniente del desazolve de los sistemas de alcantarillado humano o municipal, de las plantas potabilizadoras y de las plantas de tratamiento de aguas residuales, con el fin de posibilitar su aprovechamiento o disposición final y proteger al medio ambiente y la salud humana.

“4. Especificaciones

4.1 Las personas físicas o morales interesadas en llevar a cabo el aprovechamiento o disposición final de los lodos o biosólidos a que se refiere esta Norma Oficial Mexicana, deberá recabar la “constancia de no peligrosidad de los mismos”

4.1.1 En caso del proceso de estabilización alcalina, las muestras de lodos deben ser tomadas antes de ser sometidas a este proceso.

4.2 Los lodos y biosólidos que cumplan con lo establecido en la especificación 4.1 pueden ser manejados como residuos no peligrosos para su aprovechamiento o disposición final como establece en la presente Norma Oficial Mexicana.

4.3 Para que los biosólidos puedan ser aprovechados, deben cumplir con las especificaciones 4.4, 4.5, 4.6, 4.7 y 4.8; lo establecido en las Tablas 1, 2 y 3 de la presente Norma Oficial Mexicana.

4.4 Los generadores de biosólidos deben controlar la atracción de vectores, demostrando su efectividad. Para lo cual se pueden aplicar cualquiera de las opciones descritas, de manera enunciativa pero no limitativa, en el Anexo 1 u otras que el responsable demuestre que son útiles para ello. Se deben conservar los registros del control por lo menos los siguientes 5 (cinco) años posteriores a su generación.



4.5 Para efectos de esta Norma Oficial Mexicana los biosólidos se clasifican en tipo: excelente y bueno en función de su contenido de metales pesados; y en clases: A, B y C en función de su contenido de patógenos y parásitos.

4.6 Los límites máximos permisibles de metales pesados se establecen en la Tabla 1.

TABLA 1
LÍMITES MÁXIMOS PERMISIBLES PARA METALES PESADOS EN BIOSÓLIDOS

CONTAMINANTE (determinados en forma total)	EXCELENTES mg/kg en base seca	BUENOS mg/kg en base seca
Arsénico	41	75
Cadmio	39	85
Cromo	1200	3000
Cobre	1500	4300
Plomo	300	840
Mercurio	17	57
Níquel	420	420
Zinc	2800	7500

4.7 Los límites máximos permisibles de patógenos y parásitos en los lodos y biosólidos se establecen en la Tabla 2.

TABLA 2
LÍMITES MÁXIMOS PERMISIBLES PARA PATÓGENOS Y PARÁSITOS EN LODOS Y BIOSÓLIDOS

CLASE	INDICADOR BACTERIOLÓGICO DE CONTAMINACIÓN	PATÓGENOS	PARÁSITOS
	<i>Coliformes fecales</i> NMP/g en base seca	<i>Salmonella spp.</i> NMP/g en base seca	<i>Salmonella spp.</i> NMP/g en base seca
A	Menor de 1 000	Menor de 3	Menor de 1 (a)
B	Menor de 1 000	Menor de 3	Menor de 10
C	Menor de 2 000 000	Menor de 300	Menor de 35

(a) Huevos de helmintos viables

TABLA 3
APROVECHAMIENTO DE BIOSÓLIDOS

TIPO	CLASE	APROVECHAMIENTO
EXCELENTE	A	Usos urbanos con contacto público directo durante su aplicación Los establecimientos para clases B y C
EXCELENTE O BUENO	B	Usos urbanos sin contacto público directo durante su aplicación Los establecidos para la clase C
EXCELENTE O BUENO	C	Usos forestales Mejoramiento de suelos Usos agrícolas

4.8 El aprovechamiento de los biosólidos, se establece en función del tipo y clase, como se especifica en la Tabla 3 y su contenido de humedad hasta el 85%.” (NOM-004-SEMARNAT-2002).

2.4 Aspectos geográficos y estadísticos

La planta panificadora en estudio se encuentra en el centro de la Ciudad de México. Sus coordenadas geográficas son al norte 19°36', al sur 19°03' de latitud norte; al este 98°57', al oeste 99°22' de longitud oeste (INEGI, 2011). Es importante analizar la cantidad de agua disponible en el lugar donde se ubica la planta.

En la Figura 2.1 se observa por estado la cantidad de agua que precipita anualmente en el país, se observa que en el norte del país la cantidad de agua es mínima. Esto se debe a que, mundialmente, se encuentra a la altura de desiertos como el Sahara y el de Medio Oriente. La cantidad de agua se ve afectada por fenómenos meteorológicos como los huracanes y las sequías, que son muy comunes en México.

Otra fuente de agua para el país son los cuerpos de aguas superficiales. En las Figuras 2.1 a 2.3 se observa la distribución de los lagos y los ríos del país (Conagua, 2011).

Otro medio para abastecerse de agua en el país es por medio de acuíferos subterráneos, de los cuales hay varios que han sido explotados o han tenido aportes marinos. En la cuenca del valle de México hay 14 acuíferos de los cuales 4 se consideran sobreexplotados (Conagua, 2011).



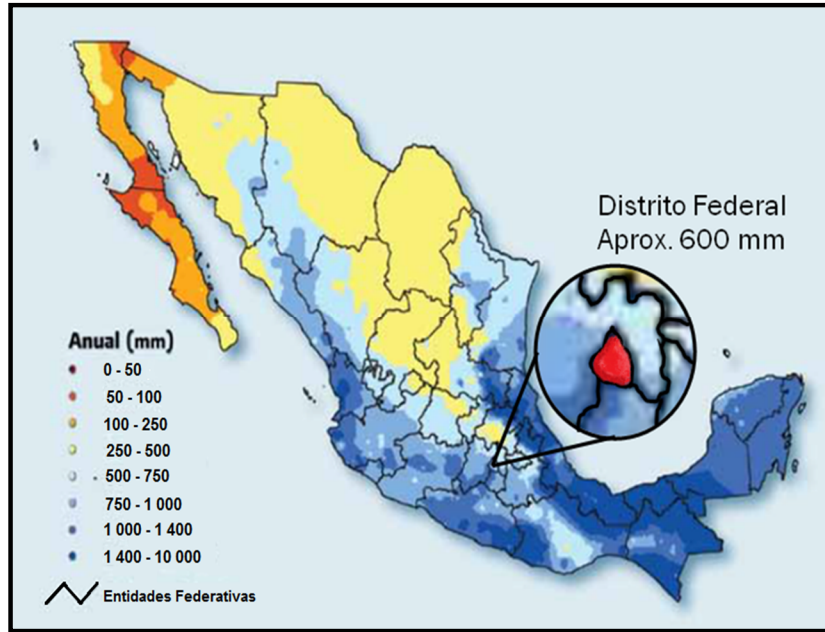


Figura 2.1. Distribución de precipitación anual en México (1971-2000). CONAGUA Coordinación General del Servicio Meteorológico Nacional (Conagua, 2011)

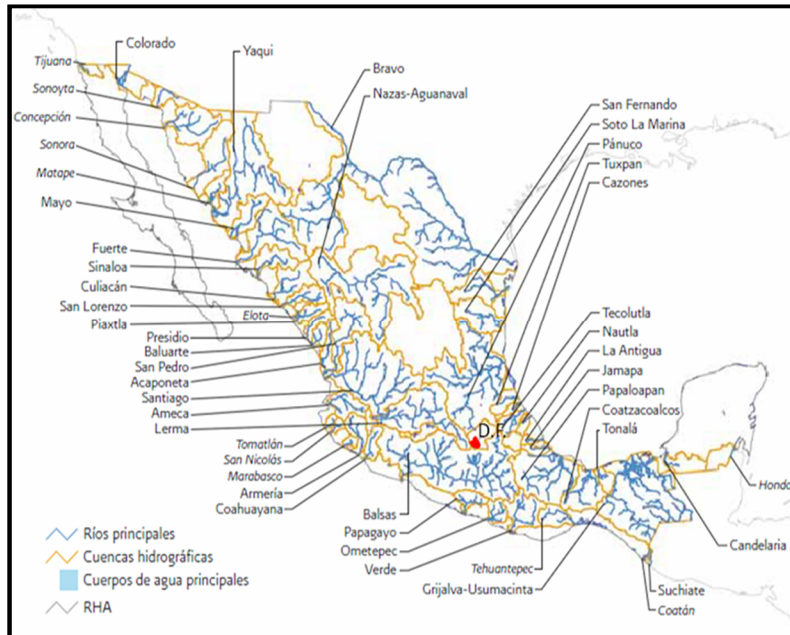


Figura 2.2. Ríos principales con sus cuencas hidrográficas. CONAGUA. Subdirección General de Programación. 2010. Elaborado a partir de: Conagua. Subdirección General Técnica. 2010 (Conagua, 2011)

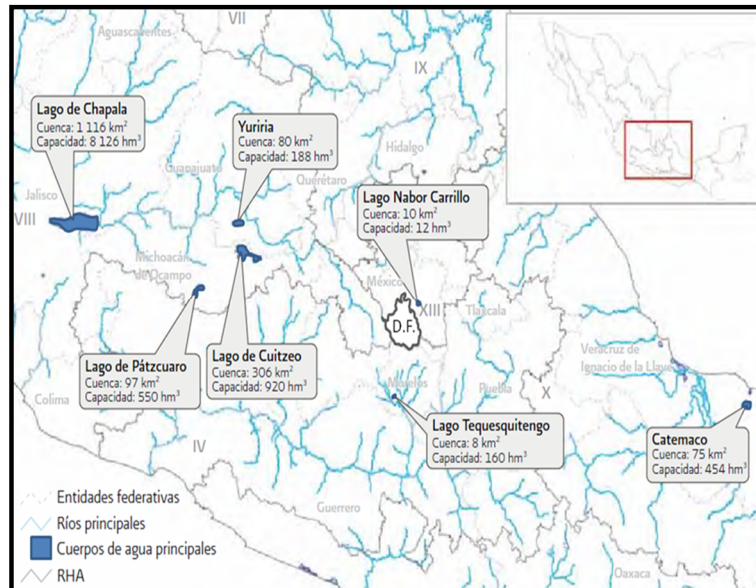


Figura 2.3. Ríos principales con sus cuencas hidrográficas. CONAGUA. Subdirección General de Programación. 2010. Elaborado a partir de: Conagua. Subdirección General Técnica. 2010 (Conagua, 2011)

Ésta es toda el agua disponible para el uso humano en México, pero también hay que agregar que en parte estos cuerpos de agua pueden estar contaminados. La Comisión Nacional del Agua, realizó recientemente en el 2009 un estudio de contaminación del agua tomando en cuenta tres parámetros importantes los cuales son DBO_5 , DQO y SST. En este caso solamente es importante mostrar las que corresponden a la Zona Hidrológica de Aguas del Valle de México que corresponde al D.F. y a una parte del estado de México y del estado de Hidalgo. La Tabla 2.3 muestra la distribución porcentual de los sitios de evaluación en cuerpos de agua superficiales.

Tabla 2.3. Distribución porcentual de sitios de evaluación en cuerpos de agua superficiales. Conagua. Subdirección General Técnica. 2010 (Conagua, 2011)

Lugar	Parámetro	Excelente	Buena calidad	Aceptable	Contaminada	Fuertemente contaminada
Valle de México	DBO_5	4.2	0.0	20.8	25.0	50.0
Total Nacional		41.0	26.8	19.7	7.9	4.6
Valle de México	DQO	4.1	0.0	12.5	29.2	54.2
Total Nacional		28.3	22.1	18.6	23.5	7.5
Valle de México	SST	24.0	24.0	20.0	32.0	0.0
Total Nacional		53.5	28.9	10.1	5.9	1.6

El agua concesionada a todo el país en el año 2009 fue $80,587 \text{ hm}^3$ en todo el año, de la cual al D.F. le corresponde $1,122.9 \text{ hm}^3$, de los cuales sólo 32.1 hm^3 son utilizados en la industria autoabastecida, lo que corresponde al 3% del agua destinada a la entidad. En

la industria, el agua utilizada no es equivalente al agua desechada al drenaje, por lo que en el año fueron desechados 6.1km^3 de aguas no municipales, incluyendo a las desechadas por la industria. De toda esta agua desechada sólo es tratada una sexta parte en todo el país (Conagua, 2011).

Tabla 2.4. Estadísticas del agua en México, 2004. México, D.F. (Conagua, 2011)

Industrias	Descarga de aguas residuales industriales (Metros cúbicos por segundo)	Materia orgánica generada (Miles de toneladas por año)
Acuacultura	67.6	7
Azucarera	45.9	1,750
Petrolera	11.4	1,186
Servicios	10.3	183
Química	6.9	406
Celulosa y papel	5.5	108
Agropecuaria	3.2	1,063
Alimentaria	3.0	193
Cerveza y malta	1.6	272
Minería	0.8	56
Textilería	0.7	14
Destilería y vinicultura	0.4	230
Beneficio de café	0.3	32
Curtiduría	0.1	9
Otros giros	12.9	795

En el Distrito Federal existen 200 plantas de tratamiento de aguas industriales, 60 plantas de tratamiento más que en el año 2009, tratando en su conjunto $0.34\text{ m}^3/\text{s}$. de todas los tipos de industrias.

La industria alimentaria sólo abarca el 1.88% del agua descargada por la industria y aporta el 3.06% de materia orgánica generada (Tabla 2.4).

2.5 Evaluación de técnicas disponibles

A continuación se presentan los parámetros representativos a controlar (Marín, 1995), así como los tratamientos disponibles. Cabe señalar que cualquier cliente busca una alternativa sencilla, de preferencia un tratamiento biológico, el cual no signifique gastos en operación por excesos de energía o por el uso de sustancias y reactivos. Se dará seguimiento a estas alternativas.



En general, para el diseño y control general de una planta de tratamiento de aguas residuales con sistemas aerobios se requiere el conocimiento de los siguientes parámetros:

- Temperatura
- Sólidos
- pH
- Demanda química de oxígeno
- Demanda bioquímica de oxígeno

Además de los métodos mencionados anteriormente, para el control de los sistemas anaerobios se encuentra el siguiente parámetro:

- Alcalinidad

Como se mencionó anteriormente estos parámetros son utilizados para el control básico de una planta de tratamiento de aguas residuales, principalmente para efluentes municipales. Para aguas más específicas y complicadas, como las de tipo industrial, los parámetros son variados incluyendo los ya mencionados. La selección de los parámetros importantes se debe a la calidad del efluente requerido y para los procesos unitarios que requieran de un control más especializado. A continuación se detallan.

Temperatura

Para el funcionamiento de varios procesos y más para relacionar la actividad biológica puesto que están relacionadas con la temperatura.

Para obtener resultados fieles a la calidad real del agua, la temperatura debe tomarse en el sitio de muestreo. Normalmente, la determinación de la temperatura puede hacerse con un termómetro de mercurio de buena calidad. El termómetro debe sumergirse en el agua, preferiblemente con el agua en movimiento, y la lectura debe hacerse después de un periodo de tiempo suficiente que permita la estabilización del nivel de mercurio.

pH

Conceptualmente, el pH en fase acuosa se define como el logaritmo negativo de la actividad del ion hidronio (protón hidratado, H^+):

$$pH = -\log aH^+ \quad (2.1)$$

De esta definición no puede inferirse directamente el procedimiento de medición de esta magnitud debido a que no es posible determinar de manera experimental la actividad de iones individuales.



Por acuerdo internacional se define la diferencia de pH entre dos disoluciones X y P de manera “operacional”, esto es, con base en la operación o procedimiento para realizar experimentalmente la determinación. Para ello, se mide la fuerza electromotriz (fem), E, de las dos celdas siguientes, con el mismo electrodo de referencia, el mismo puente salino de KCl y en las mismas condiciones de temperatura y presión del gas hidrógeno:

- (I) Electrodo de referencia | KCl, $c \geq 3.5m$ °Disolución X | H₂ | Pt fem = E(X)
- (II) Electrodo de referencia | KCl, $c \geq 3.5m$ °Disolución P | H₂ | Pt fem = E(P)

El símbolo “o” representa una unión líquida y “|” representa una interfase.

El pH de la disolución X, pH(X), se relaciona por definición con el de la disolución patrón de referencia, pH(P), mediante la relación:

$$pH(X) = pH(P) + \frac{E(P) - E(X)}{(RT/F) \ln 10} \quad (2.2)$$

donde:

E(X), E(P) es la fuerza electromotriz de las celdas (I) y (II) respectivamente, expresada en volt

R es la constante universal de los gases = 8,314.33 J mol⁻¹ K⁻¹

T es la temperatura absoluta = [t(°C) + 273.15] K

F es la constante de Faraday = 96 487 C mol⁻¹.

Puesto que el coeficiente (RT/F) tiene la dimensión de diferencia de potencial, pH es un número puro (¡No es una concentración!).

Con base en esta definición, el pH de una disolución problema X, pH(X), se determina sin ambigüedad después de asignar un valor de pH, para cada temperatura, a una o varias disoluciones patrón de referencia. Ello se realiza mediante una celda sin unión líquida e involucra un convenio relativo a un cálculo de coeficiente de actividad iónica.

La determinación rutinaria del pH se realiza de manera electrométrica con el electrodo de vidrio comercial en lugar del electrodo de hidrógeno considerado en las celdas (I) y (II) y un electrodo de referencia comercial.

A una temperatura específica, la determinación del pH proporciona un valor característico relacionado con el nivel de acidez intrínseca de la disolución examinada.



El valor de pH de las disoluciones acuosas es de gran importancia en la industria para definir la calidad de las mismas. Este valor se requiere para calcular el índice de Langelier que permite evaluar la agresividad o el poder incrustante del agua.

El valor de pH es un parámetro regulado por límites máximos permisibles en descargas de aguas residuales al alcantarillado o a cuerpos receptores, también es un parámetro de calidad del agua para usos y actividades agrícolas, para contacto primario y para el consumo humano.

Sólidos

Incluye toda la materia, excepto el agua contenida en los materiales líquidos (Figura 2.4).

Sólidos totales: se define como sólidos la materia que permanece como residuo después de la evaporación y secado de la muestra a 103°C. El valor de los sólidos totales incluye material disuelto y no disuelto. Su determinación es por medio gravimétrico, se evapora un volumen conocido de muestra en un recipiente de porcelana puesto a masa³ constante previamente. La diferencia de masa, sobre la masa inicial, representa el contenido de sólidos totales.

Sólidos disueltos: son determinados directamente o por diferencia entre los sólidos totales y los sólidos suspendidos. Si la determinación es directa, se filtra la muestra y el filtrado se evapora a 103°C en una cápsula de masa conocida. La diferencia de masa de la cápsula vacía con su masa final representa los sólidos disueltos.

Sólidos suspendidos: son determinados por filtración a través de un filtro de asbesto o de fibra de vidrio, en un crisol previamente pesado. El crisol con su contenido se seca a 103°C; el incremento del masa sobre la masa inicial, representa el contenido de sólidos suspendidos.

³ El **peso**, en física, es la medida de la fuerza que ejerce la gravedad sobre la masa de un cuerpo. Normalmente, se considera respecto de la fuerza de gravedad terrestre. El peso depende de la intensidad del campo gravitatorio, de la posición relativa de los cuerpos y de la masa de los mismos. La **masa** es una propiedad característica de los cuerpos: La cantidad de materia y no depende de la intensidad del campo gravitatorio, ni de su posición en el espacio. Por ejemplo, una persona de 60 kg de **masa**, pesa 60 **kg-fuerza** en la superficie de la Tierra; pero, la misma persona, en la superficie de la Luna pesaría sólo unos 10 kg-fuerza; sin embargo, su masa seguirá siendo de 60 kg. Las unidades de **peso** y **masa** tienen una larga historia compartida, en parte porque su diferencia no fue bien entendida cuando dichas unidades comenzaron a utilizarse. Cotidianamente, el término "peso" se utiliza a menudo **erróneamente** como sinónimo de masa. La unidad de masa del SI es el kilogramo, kg y la de fuerza es kg_f.



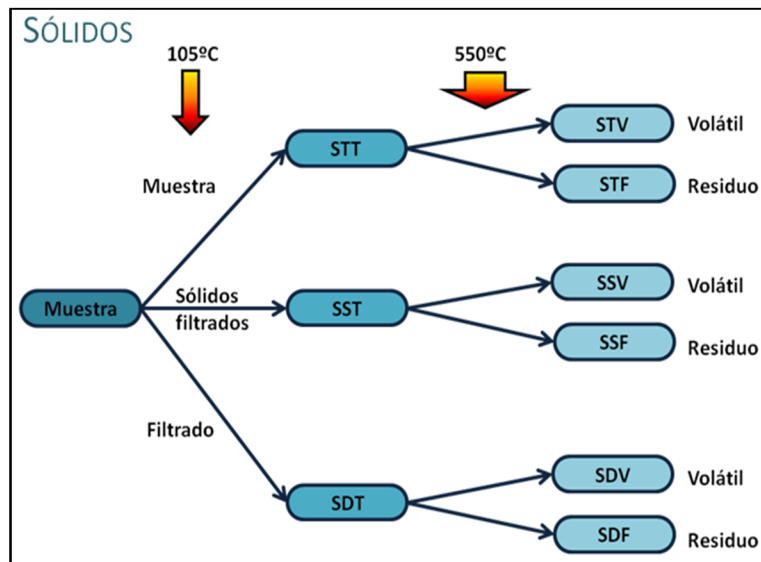


Figura 2.4. Clasificación de los sólidos

Sólidos volátiles y fijos: en aguas residuales y lodos, se acostumbra hacer esta determinación con el fin de obtener una medida de la cantidad de materia orgánica presente. El procedimiento estándar es el de someter las cápsulas, con el residuo contenido después de completar el ensayo para sólidos totales, a calcinamiento en una mufla, a una temperatura de 550°C, durante 15 a 20 minutos. La pérdida de masa se registra como mg/L de sólidos volátiles y el residuo como mg/L de sólidos fijos. El contenido de sólidos volátiles se interpreta en términos de materia orgánica, teniendo en cuenta que a 550°C la materia orgánica se oxida a una velocidad razonable formando los óxidos de N, S y C, y H₂O que se volatilizan. Aunque la interpretación no es exacta pues la diferencia de masa también incluye pérdidas debidas a descomposición o volatilización de ciertas sales minerales, es suficiente para el propósito general de la determinación.

Sólidos sedimentables: la denominación se aplica a los sólidos en suspensión que se sedimentarán, bajo condiciones tranquilas, por acción de la gravedad. La determinación se hace llenando un cono Imhoff de 1 litro de volumen y registrando el volumen de material sedimentado en el cono, al cabo de una hora, en mL/L.

Demanda química de oxígeno, DQO

La demanda química de oxígeno es un parámetro analítico de contaminación que mide el material orgánico contenido en una muestra líquida mediante oxidación química. La determinación de la DQO es una medida de la cantidad de compuestos oxidantes

consumidos por la porción de materia orgánica existente en la muestra y oxidable por dicromato en solución ácida.

La oxidación de la mayoría de las formas de materia orgánica se efectúa mediante ebullición de la muestra con una mezcla de ácido sulfúrico y un exceso de dicromato de potasio estándar. La mezcla formada por la muestra más cantidades conocidas de dicromato y de ácido sulfúrico es sometida a reflujo por dos horas; durante el periodo del reflujo el material orgánico oxidable reduce una cantidad equivalente de dicromato; el dicromato remanente se determina comúnmente mediante una titulación con sulfato ferroso amoniacal estándar.

En pocas palabras se tiene un equilibrio como el siguiente:

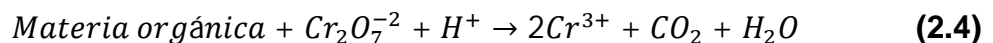
$$\text{Cantidad inicial} - \text{Cantidad remanente} = \text{Materia orgánica oxidada} \quad (2.3)$$

Para el ensayo deben controlarse adecuadamente los siguientes factores:

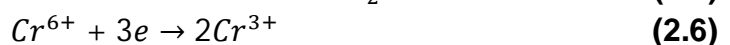
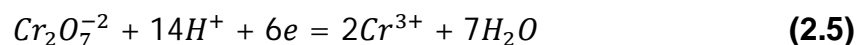
- Deben establecerse correctamente, antes de cada ensayo, la concentración del dicromato de potasio y del sulfato ferroso amoniacal.
- El volumen de la muestra debe medirse exactamente, así como el volumen de ácido sulfúrico y de solución de dicromato.
- Debe mantenerse un tiempo de reflujo suficiente para permitir la oxidación completa de la muestra, aunque generalmente con dos horas es suficiente.

El dicromato es el componente oxidante más usado hoy en día y esto se debe principalmente por ser capaz de oxidar una gran variedad de sustancias orgánicas casi completamente a SO_2 , NO_2 , CO_2 y agua. Sin embargo, los compuestos como los hidrocarburos aromáticos y la $\text{C}_5\text{H}_5\text{N}$ (piridina), no son oxidables bajo ninguna circunstancia por este compuesto. Por otro lado, compuestos orgánicos como alcoholes y aminoácidos sólo son oxidados en presencia de un catalizador. Los iones plata cumplen esta función, por lo que se agrega Ag_2SO_4 .

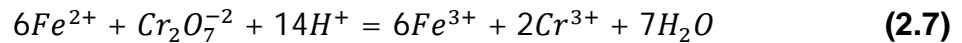
Las reacciones principales son las siguientes:



Por balance de electrones:



Después de la digestión de la materia orgánica con dicromato se determina la concentración de dicromato residual mediante sulfato ferroso amoniacal, el cual suministra los iones ferrosos reductores, Fe^{2+} . La oxidación procede según la reacción siguiente:



El punto final de la titulación ferrosa del dicromato se determina colorimétricamente usando ferroína como indicador. El vire final es muy claro, de un color azul verdoso a rojo negruzco.

Existen muchos otros compuestos que pueden causar interferencia como manganeso, hierro ferroso, sulfitos y sulfuros, susceptibles a la oxidación del dicromato. En general, en aguas residuales los cloruros constituyen la interferencia más importante pues introducen un error por exceso en el valor de la DQO. Su interferencia puede ser evitada agregando un poco de sulfato mercurioso.

Demanda bioquímica de oxígeno, DBO

La DBO es una estimación de la cantidad de oxígeno que requiere una población microbiana heterogénea para oxidar la materia orgánica biodegradable de una muestra de agua en un periodo dado de días. El método se basa en medir el oxígeno consumido por una población microbiana en condiciones en las que se han inhibido los procesos fotosintéticos de producción de oxígeno, en condiciones que favorecen el desarrollo de los microorganismos.

Los resultados de esta prueba son utilizados para:

- Determinar la cantidad aproximada de oxígeno requerida para estabilizar biológicamente la materia orgánica biodegradable presente.
- Medir la eficiencia de ciertos procesos de tratamiento.
- Determinar el cumplimiento de las descargas permitidas de aguas residuales, siempre que no haya compuestos tóxicos que inhiban o eliminen a los microorganismos falseando los resultados.

Alcalinidad

La alcalinidad del agua puede definirse como la capacidad para neutralizar ácidos. En términos más explícitos se explica como la capacidad para aceptar protones. La alcalinidad es debida generalmente a la presencia de tres clases de iones:

- a) Bicarbonatos



- b) Carbonatos
- c) Hidróxidos

En algunas aguas es posible encontrar otras clases de compuestos (borosilicatos, silicatos, fosfatos, etc.) que contribuyen a su alcalinidad; sin embargo la contribución de éstos es insignificante y puede ignorarse. La manera para poder determinar este parámetro es por medio de la titulación con ácido sulfúrico 0.02N y se expresa como mg/L de carbonato de calcio equivalente a la alcalinidad determinada. Los iones H^+ procedentes de la solución 0.02N de ácido neutralizan los iones OH^- libres y los disociados por concepto de la hidrólisis de carbonatos y bicarbonatos.

Este parámetro, mas que para los sistemas aerobios, se usa principalmente para controlar un reactor anaerobio, ya que entre mayor sea su alcalinidad, más estabilizado se encontrará el reactor debido a la neutralización de los ácidos grasos producidos en este proceso.

2.5.1 Depuración de aguas residuales (Hernández-Muñoz, 1990)

El tratamiento de aguas residuales consiste en la eliminación de todo lo que es ajeno al agua, definido como aquello que la contamina. Para el tratamiento de aguas se pueden enumerar tres bloques principales para el tratamiento los cuales, se denominan como primario, secundario y terciario (Tabla 2.5). Al tratar el agua es necesario eliminar los contaminantes poco a poco debido a que no existe operación unitaria que sea capaz de eliminar todas las variedades de contaminantes presentes en una corriente.

Tabla 2.5. Clasificación de los principales contaminantes presentes en el agua residual

Tratamiento	Contaminante principal
Primario	Sólidos Grasas Aceites
Secundario	Materia orgánica biodegradable
Terciario	Microorganismos Características físicas y químicas

La causa por la que es dividido en tres partes es la facilidad que existe para estudiar cada uno de ellos, empezando con lo más sencillo y terminando con una eliminación más específica.



Tratamiento primario: Toda agua residual proveniente de cualquier lugar necesita un tratamiento primario ya sea porque está poco contaminada ó por que se necesita preparar para una etapa más avanzada. Este tratamiento es muy básico y los principales procesos que pueden componerlo son los siguientes:

- Filtración gruesa. Eliminación de sólidos gruesos, además de limpiar el agua, ayuda a eliminar objetos que puedan afectar a los equipos aguas abajo como son las bombas.
 - Cribas
 - Rejillas
 - Tamices
- Dosificación. Algunas veces es necesario agregar sustancias para propiciar la sedimentación o flotación de sólidos.
- Homogeneización. La mayoría de las veces el agua residual llega por lotes y de diferentes lugares por lo que ocasiona que no se tengan concentraciones o flujos constantes, el propósito de la homogenización es estabilizar los picos o ausencias de estos factores para conseguir un proceso más estable en las siguientes etapas.
- Filtración en medio granular. Existen aguas residuales que cuentan con sólidos suspendidos que pueden ser eliminados por este medio. Deben estar poco contaminadas con material en suspensión porque si tienen demasiado se puede presentar un fenómeno de taponamiento en los filtros.
- Desarenación. Como se entiende de su nombre, es el proceso encargado de retirar las arenas del agua residual, el tamaño de partícula de la arena es muy pequeño por lo cual es difícil de retirar por medio de rejillas.
- Trituración. Este proceso sirve para poder minimizar los sólidos y que sea más fácil retirarlos con equipos más chicos que si se dejara en su tamaño original.
- Neutralización. Las aguas residuales pueden llegar con valores de pH alcalinos o ácidos, lo que ocasiona problemas al medio al que será sometido el desecho o al tratamiento biológico que prosiga, por lo que es necesario agregar sustancias para la regulación del pH. También pueden existir sistemas donde se requiere que el agua termine con un valor de pH alcalino ó ácido, generalmente para procesos de floculación y coagulación.
- Sedimentación. Consiste en la eliminación de sólidos con ayuda de la gravedad, enviándolos al fondo de un recipiente, los cuales al ser retirados del agua residual se consideran lodo primario.
- Flotación. Es un método para la eliminación de sólidos a partir de su densidad con respecto al agua a tratar, muchas veces sustancias como las grasas son más fáciles de hacerlas flotar con aire a esperar a que se sedimenten.



- Coagulación y floculación. Los sólidos suspendidos pueden encontrarse con un tamaño de partícula muy pequeño lo cual dificulta la sedimentación, por lo que se desestabiliza su carga y se aglomera por medio de una sustancia coagulante y un floculante para facilitar su eliminación por precipitación.

Como se ha observado, las operaciones unitarias que abarca el tratamiento primario son muy sencillas y en su mayoría abarcan la eliminación de sólidos, grasas y arenas. Su uso incluye el manejo de una infinita combinación de aguas residuales.

Tratamiento secundario: También conocido como tratamiento biológico debido a que está basado en la eliminación de materia orgánica y nutrientes como el nitrógeno y el fósforo por medio de microorganismos. Las diferentes especies de microorganismos utilizados definen los tipos de procesos existentes para el tratamiento de agua y son los siguientes:

- Anaerobio. Sin presencia de oxígeno molecular
- Aerobio. Con presencia de oxígeno molecular
- Anóxico. Sin presencia de oxígeno molecular en los que la oxidación de compuestos orgánicos se da por otros compuestos aceptores de electrones.

Cada uno de ellos tiene diferentes variantes de diseño con el propósito de asegurar el mayor contacto del agua residual con los microorganismos. Para el tratamiento de aguas se llegan a combinar varios de los procesos biológicos según sean las características del agua en cuestión.

Las variables de los procesos biológicos son:

- Demanda bioquímica de oxígeno
- Demanda química de oxígeno
- Oxígeno disuelto
- Contenido de nutrientes
- Variaciones de temperatura y pH
- Contenido de sales
- Toxicidad

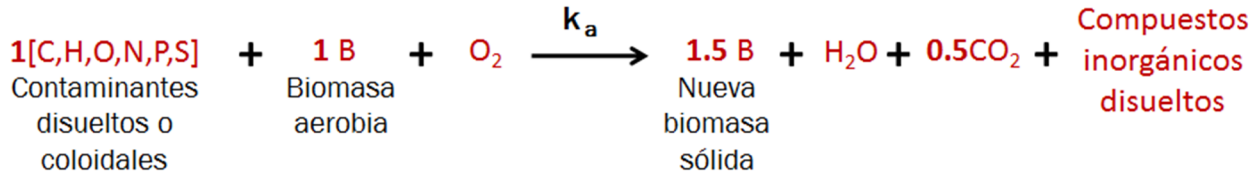
De los tres tratamientos que se mencionaron, los más comunes son el aerobio y el anaerobio, pues los procesos anóxicos son más especializados. De manera más específica, estos procesos pueden ser catalogados de la siguiente manera:



Ambiente	Aceptor de electrones	Proceso
Aerobio	Oxígeno, O_2	Metabolismo aerobio
Anaerobio	Dióxido de carbono, CO_2	Metanogénesis

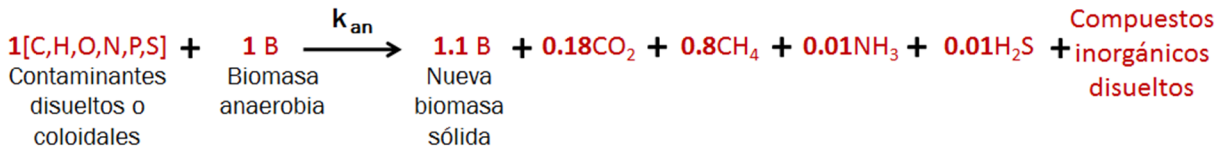
Las reacciones correspondientes a cada tipo de tratamiento son las siguientes.

Tratamiento aerobio:



Como parte del proceso de degradación de materia orgánica, el subproducto de mayor impacto es la producción de biomasa, mientras que para el agua y el dióxido de carbono se desorben a la atmósfera. El lodo puede volverse un problema pues en poco tiempo puede acumularse en el reactor y causar problemas de eficiencia de remoción. Lo ideal es un sistema para la eliminación del lodo en el reactor, generalmente con la ayuda de un clarificador secundario. El lodo, posteriormente, se deshidrata para su mejor manejo.

Tratamiento anaerobio:



En este caso el gas no puede enviarse a la atmósfera con facilidad, debido a los compuestos que se generan en el tratamiento y que reciben el nombre de biogás. Al salir del reactor deben recolectarse. Una alternativa de uso es la combustión aprovechando el poder calorífico del metano. Si hay compuestos azufrados en el agua residual pueden formarse sulfuros y ácido sulfhídrico, que deben eliminarse, especialmente el segundo, por medio de un “lavado” del biogás (Castro-González y Durán-de-Bazúa, 2002). El biogás puede ser aprovechado como combustible, lo cual puede generar una disminución de gastos.

En la Tabla 2.6 se realiza una comparación entre este tipo de tratamientos.



Tabla 2.6. Comparación del tratamiento anaerobio y aerobio

Característica	Aerobio	Anaerobio
Eficiencia de remoción orgánica	Alta	Moderadamente alta
Calidad de efluente	Excelente	Moderadamente buena
Flujo de carga orgánica	Moderado	Alto
Producción de lodo	Alta	Baja
Demanda de nutrientes	Alta	Baja
Demanda de alcalinidad	Baja	Alta
Demanda de Energía	Alta	Moderadamente baja
Sensibilidad a la temperatura	Baja	Alta
Tiempo de arranque	2-4 semanas	2-4 meses
Olor	Menos olor	Problemas potenciales de olor
Recuperación de bioenergía y nutrientes	No	Sí
Modo de tratamiento	Total*	Esencialmente pretratamiento

*Dependiendo de las características de la alimentación

Las negritas indican el mejor sistema

Hablando independientemente de cada uno, los sistemas aerobios requieren que exista una entrada de oxígeno bastante alta, por lo que se han realizado diferentes modelos para que favorezcan el contacto de los microorganismos con el oxígeno y la materia orgánica. Estos pueden clasificarse de la siguiente manera (aunque también son aplicables a los sistemas anaerobios):

- Cultivo en suspensión
- Completamente mezclado
- Sistemas de biopelícula

Unos ejemplos de estos sistemas se presentan en las Figuras 2.5 a 2.8.

En el tratamiento anaerobio, como se ha mencionado, los microorganismos no requieren de oxígeno molecular para realizar sus funciones metabólicas. La degradación anaerobia puede ser explicada de manera sencilla con el diagrama presentado en la Figura 2.9, en el que se subdivide la descomposición de las moléculas orgánicas hasta transformarlas en CO₂ y CH₄.

Los procesos anaerobios son seleccionados para el tratamiento de desechos con altas concentraciones de materia orgánica, de las cuales uno de principales ejemplos lo representa la industria alimentaria.



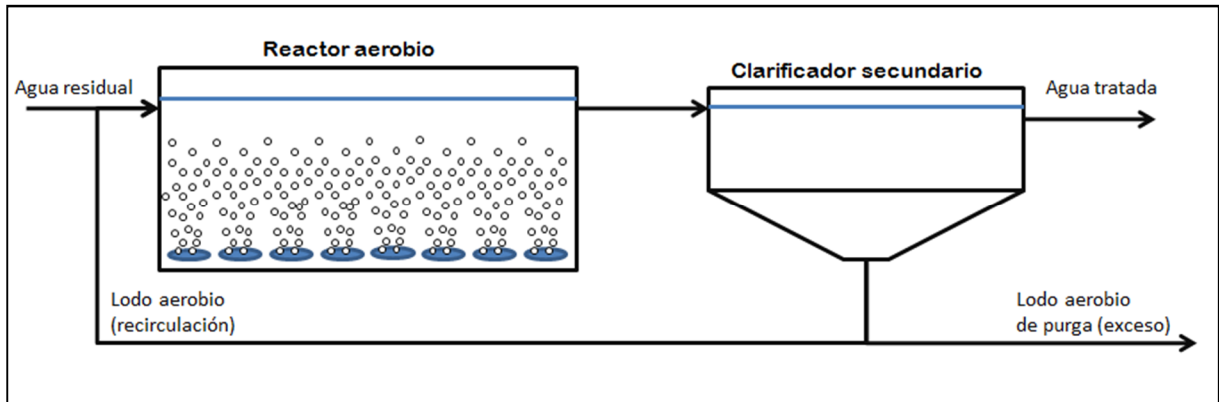


Figura 2.5. Lodos activados. Completamente mezclado

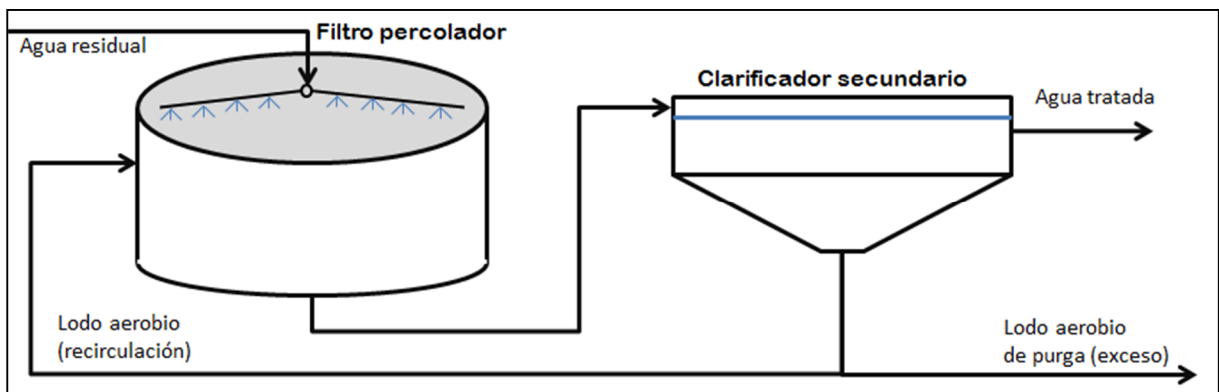


Figura 2.6. Filtro percolador. Biopelícula

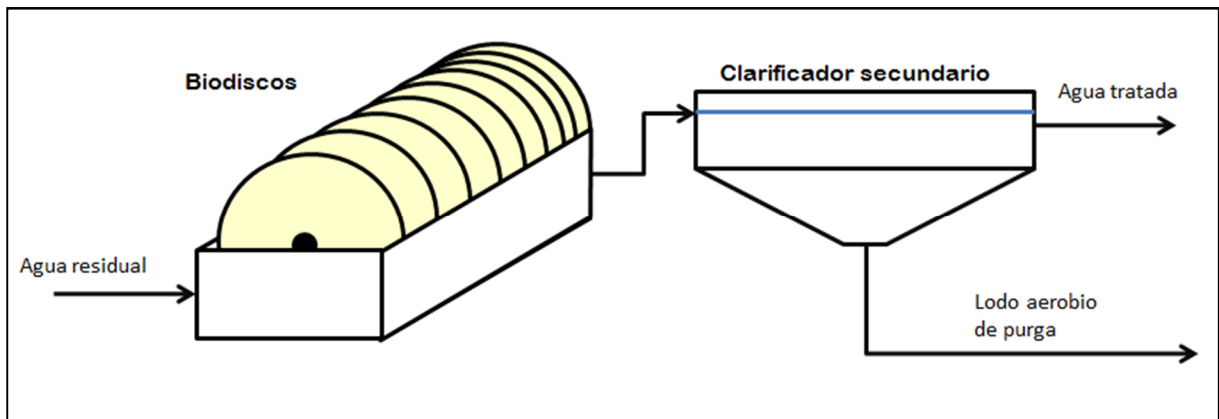


Figura 2.7. Biodiscos. Biopelícula

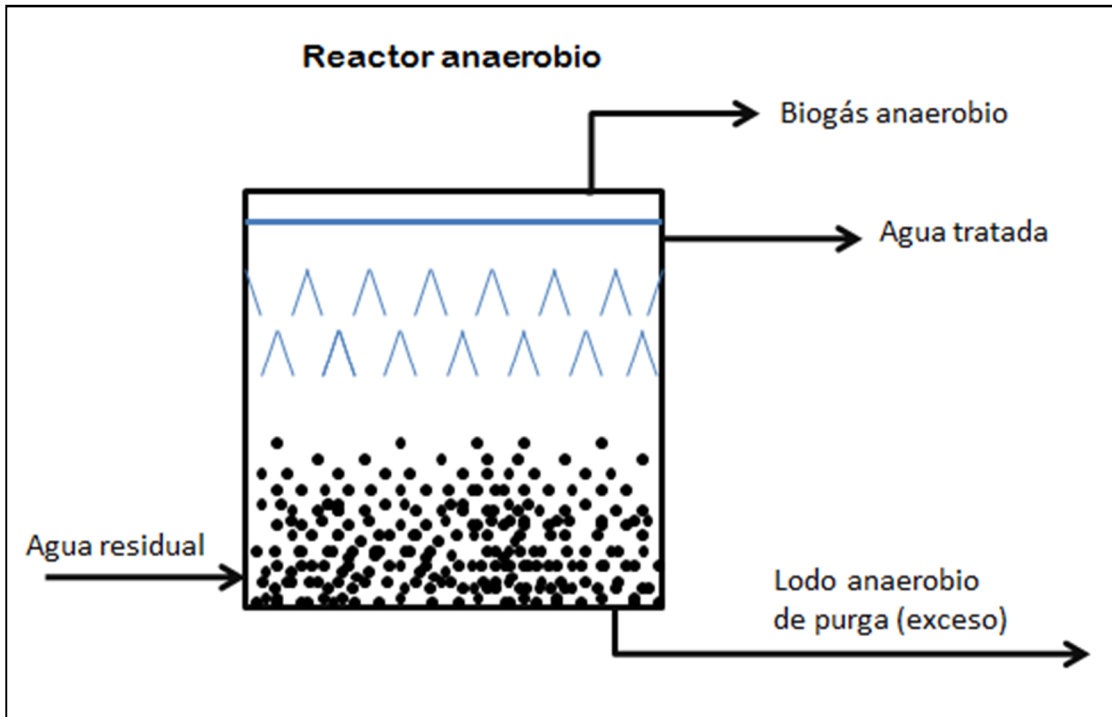


Figura 2.8. Reactor UASB. Cultivo en suspensión

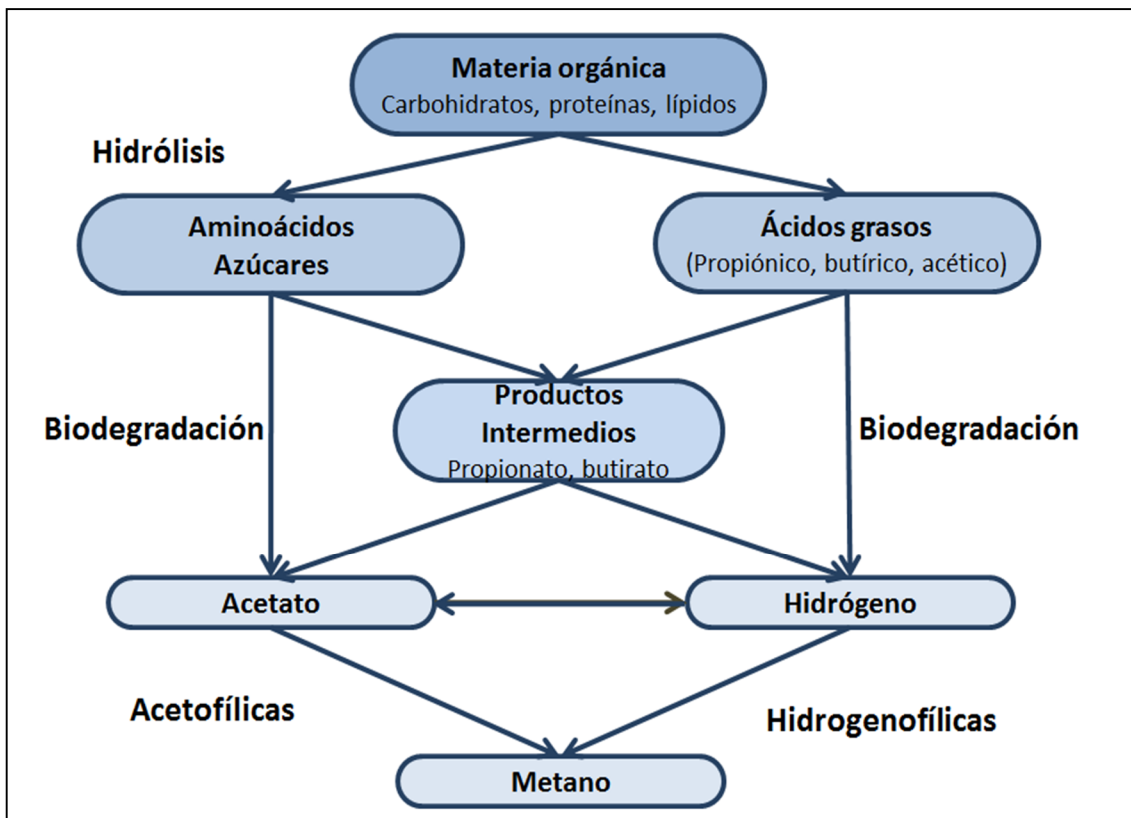


Figura 2.9. Proceso simplificado de degradación anaerobia

Tratamiento terciario: Es un proceso de depuración más refinado y puede ser una la continuación del tratamiento de los efluentes del proceso secundario (a menos que las sustancias disueltas en el agua residual NO sean biodegradables o muy recalcitrantes, y deban ser tratadas por un sistema terciario directamente). El propósito general es preparar el agua para su destino final, la eliminación de microorganismos patógenos, sustancias tóxicas y sustancias que alteran las propiedades físicas y químicas del agua son eliminadas en esta etapa. Por enumerar algunos procesos se tienen los siguientes:

- Adsorción en carbón activado
- Intercambio iónico
- Precipitación
- Ósmosis inversa
- Filtración en todas sus variantes (ultra, nano, etc.)
- Electrodialisis
- Proceso de oxidación química
- Eliminación de nutrientes
- Desinfección

El tratamiento es tan específico que se utiliza un proceso por cada tipo de contaminante a eliminar, constando de varias operaciones unitarias. Esto hace más costoso el tratamiento del agua en esta tercera etapa.

Su última etapa es denominada pulimento y para ella los procesos más utilizados son la filtración y la cloración, con el fin de eliminar sólidos y agentes patógenos, siempre que ya no haya otros compuestos que la contaminen.

2.6 Selección del proceso

Con base en lo señalado en el punto anterior (inciso 2.5) se realizó la selección del proceso más adecuado para la empresa cooperante.

La Figura 2.10 presente el diagrama esquemático del proceso propuesto.

Se utilizará la trampa de grasas que está actualmente en operación en las instalaciones de la panificadora. Existen sistemas de remoción de grasas y de SST de alta eficiencia, conocidos comúnmente como *DAF* por sus siglas en inglés (*dissolved air flotation*), aunque la eficiencia de remoción de grasas y SST puede ser alta en algunos equipos aún se necesita del acompañamiento de sistemas biológicos para poder cumplir con los parámetros requeridos, principalmente para los parámetros de carga orgánica disuelta.



Este tipo de sistemas para este caso de estudio es por un lado de alto costo de inversión y operación además requiere uso de otras operaciones unitarias adicionales.

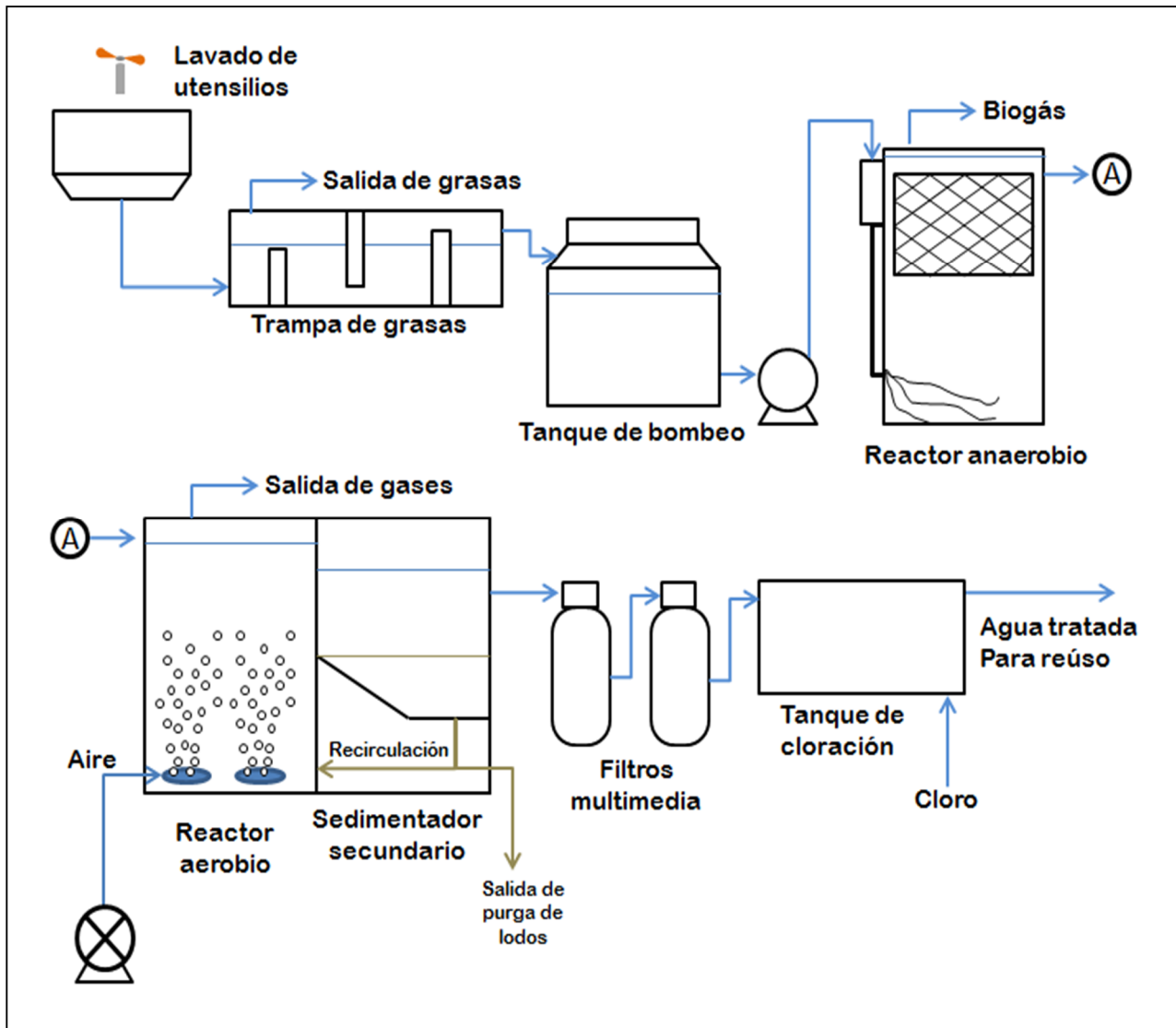


Figura 2.10. Esquema representativo del proceso seleccionado anaerobio-aerobio para fábricas panificadoras

Para ello, para la depuración del agua residual descargada por la planta panificadora se propone un tratamiento biológico combinado **anaerobio-aerobio**, que consiste en la operación en serie de un reactor anaerobio y un reactor aerobio. Se ha escogido un reactor tipo *UASB*⁴ y un reactor aerobio de tipo completamente mezclado.

⁴ *UASB* significa *upflow anaerobic sludge blanket*, lecho de lodos anaerobios de flujo ascendente, RALLFA.

La ventaja de elegir un sistema combinado es que entre ellos se complementan. El reactor anaerobio será de gran ayuda debido a la eliminación de materia orgánica sin gasto de energía mientras que el reactor aerobio servirá para el mejoramiento de las características finales en el efluente del tratamiento biológico (Chen et al., 2008). Si el agua solamente fuera tratada con el reactor anaerobio se tendrían problemas ya que no llegaría a la concentración de contaminantes mínima y estaría por arriba de lo deseado. En caso contrario, si solamente se empleara un tratamiento aerobio, el gasto de energía y el tamaño del reactor serían mucho más grandes para llegar a las condiciones de efluente deseadas, con esto los gastos de inversión y de operación se elevarían al grado de que el tratamiento del agua para su reutilización no sería costeable.

Después del tratamiento secundario el agua solamente tendrá que pasar por un post-tratamiento para su reutilización. Para esta etapa se plantea un tanque de cloración y un par de filtros multimedia y de carbón activado para la eliminación de sólidos y de características físicas que puedan ser desagradables para su uso como olor y color.

En la Figura 2.10 se mostró de manera esquemática el proceso propuesto, el cual se considera de manera preliminar un diagrama de flujo de proceso. Esta representación pretende esquematizar el proceso de manera global, de tal manera que funcione como base para el posterior desarrollo de la ingeniería básica.



Capítulo 3. Diagrama de flujo de proceso

3.1 Descripción del proceso

Este apartado presenta el proceso, así como la descripción detallada de los caudales y operaciones empleadas.

La planta de tratamiento está diseñada para una carga de $5.2\text{m}^3/\text{día}$ y estará ubicada en la panificadora La Rosa, S.A. de C.V. en el Distrito Federal.

Trampa de grasas

Este equipo ya existe actualmente dentro de las instalaciones de la panificadora. Su función principal es eliminar la grasa por medio de su flotación. El equipo tiene un tiempo de residencia que permite que se lleve a cabo la separación de la grasa. También se da la sedimentación de algunos sólidos. Con esto el agua efluente tiene una calidad mejor que cuando ingresó.

Tanque de bombeo (TAN-01)

Las descargas de agua residual no son constantes pues el lavado de utensilios solamente se lleva a cabo cada cierto tiempo. De esta manera se amortiguan los flujos emergentes y se garantiza una alimentación constante a las siguientes operaciones unitarias, principalmente a los sistemas biológicos que no pueden permanecer mucho tiempo sin la alimentación. Para que el flujo de agua sea constante y que no existan derrames, el volumen del tanque debe de ser de 200L considerando que se construya de manera especial para este volumen o especificar un tanque de línea que tenga el volumen más próximo. En cuanto a material se recomienda fibra de vidrio o polietileno de alta densidad.

Bomba de alimentación (BNM-01)

Para continuar el curso del agua se deberá bombear hasta la entrada superior del reactor anaerobio. La trampa de grasas actualmente se encuentra al nivel del suelo y se espera que la mayoría de los equipos puedan estar sobre esta misma. Para un mayor ahorro de energía, tomando en cuenta que la planta panificadora cuenta con una línea de aire de servicios, la bomba de alimentación a la planta es de tipo neumática. Esta bomba tiene la capacidad de bombear de 0 a 15 L/min, mientras que el flujo de diseño es de 3.6 L/min. La bomba está hecha de plástico y teflón, evitando problemas de corrosión a lo largo del tiempo.

Reactor anaerobio tipo UASB (RAN-01)

Debido a que los tratamientos anaerobios no requieren de un consumo de energía excesivo, se ha decidido utilizar un reactor anaerobio de alta tasa para que en la próxima etapa, que es un reactor aerobio sea de menor tamaño, de esta manera los gastos de



operación se ven reducidos. Las eficiencias de remoción esperadas son las siguientes: 65% DQO, 65% DBO y 27% SST.

Reactor aerobio de lodos activados (RAE-01)

Como se mencionó en capítulos anteriores el proceso aerobio puede ser utilizado para un refinamiento de las propiedades del efluente. En este caso, el reactor aerobio va posterior a un proceso anaerobio, la carga orgánica es mucho menor y está lista para llegar el valor deseado con mayor facilidad. El consumo de aire se ve reducido, al igual que el volumen del reactor a que si hubiera sido un proceso enteramente aerobio. Las eficiencias de remoción son las siguientes: 26% DQO, 29% SST y 26% DBO.

Sopladores (SOP-01/01R)

Los sopladores son de una capacidad muy pequeña ya que el consumo de aire puede reducirse. Son los encargados de proveer la cantidad de oxígeno necesaria para que el proceso aerobio sea eficiente. Se considera un relevo debido a que no se puede dejar el sistema biológico sin aire. La demanda de aire a condiciones de operación es de $0.14\text{m}^3/\text{h}$.

Clarificador secundario (CSS-01)

En la misma estructura del reactor aerobio se ha incrustado el clarificador secundario. Este clarificador es considerado como de alta tasa, su estructura y la característica de que esté empacado hace que tenga mejores eficiencias para la separación de los sólidos en el licor mezclado. El proceso de sedimentación se propicia con mayor facilidad, teniendo un tiempo de residencia bajo.

Sistema tipo “air-lift” de recirculación de lodos (SOP-02)

Cuando se trabaja con flujos bajos se puede elegir este tipo de sistemas donde con un poco de aire se realiza un efecto sifón en el fondo del clarificador provocando la salida del lodo. De esta manera se evita la especificación y la compra de una bomba especial para lodos pues estos suelen ser corrosivos. La potencia del soplador es de 0.06 HP.

Tanque de almacenamiento de lodos (TAN-04)

Este tanque almacenará los lodos anaerobios de purga para que se pueda disponer de ellos. También tendrá la finalidad de que en caso de emergencia el lodo aerobio también pueda ser depositado.

Tanque de almacenamiento de agua (TAN-02)

El agua se almacena en este tanque para su disposición del proceso de filtrado ya que es un proceso intermitente.

Bomba centrífuga (BCM-01)

La bomba tiene una capacidad de 1HP. El proceso de filtración se llevará a cabo a un flujo mayor que el del proceso biológico, además, los filtros requieren que el agua esté presurizada para su funcionamiento.



Hidroneumático (HDN-01)

En la planta y la zona donde se encuentra ubicada el agua llega con una baja presión. El proceso anterior es específicamente a gravedad. Es necesario presurizar la corriente de agua para el funcionamiento de los filtros que siguen en el proceso y si la presión de la bomba no es suficiente, se usará un hidroneumático.

Filtro multimedia (FMM-01)

Este filtro empacado es utilizado únicamente para la eliminación de sólidos existentes en el efluente del reactor aerobio.

Filtro de carbón activado (FCB-01)

Después de la eliminación de sólidos el agua pasa por un filtro de carbón activado que se encarga de la reducción de sustancias disueltas que pudieran dar olor y color al agua que se va reutilizar.

Tanque de almacenamiento de agua tratada (TAN-03)

En el agua no se encuentran patógenos debido a que es exclusivamente agua de proceso por lo que esta unidad puede ser opcional. El tanque también tiene la función de contener el agua para su disposición. El tanque puede ser de polietileno de alta densidad siendo este el material más confiable para mantener el agua limpia.

3.2 Dimensionamiento de equipos

En este apartado se dimensionarán los equipos principales para el tratamiento del agua residual, siguiendo las metodologías establecidas en la literatura para cada caso. Los equipos son los siguientes:

- Tanque de igualación
- Reactor anaerobio
- Reactor aerobio
- Clarificador secundario

3.2.1 Tanque de igualación (Metcalf y Eddy, 2003)

Para el cálculo del tanque de igualación durante el muestreo general por cada muestra simple se midió el flujo de descarga. Estos datos son útiles pues ayudarán a para dar una idea de las descargas que ocurren a lo largo del día. En la Tabla 3.1 se pueden ver los datos obtenidos de dicho muestreo.

En la Figura 3.1 se graficaron los datos ya presentados en la Tabla 3.1. Posteriormente, se calcula el área por debajo de la curva por cada periodo representado en L/h. En este caso se realizó con ayuda del programa AutoCAD 2010. Los datos obtenidos se



muestran en la Tabla 3.2. Aquí mismo se ha hecho el cálculo de los m³ acumulados a lo largo del día.

Tabla 3.1 Caudal L/s y L/h obtenido en un día laboral

Hora de muestreo	Flujo (L/s)	Flujo (L/h)
9:06	0.0488	175.68
12:05	0.0505	181.80
15:08	0.0654	235.44
18:07	0.0758	272.88
21:04	0.0680	244.80
0:02	0.0559	201.24

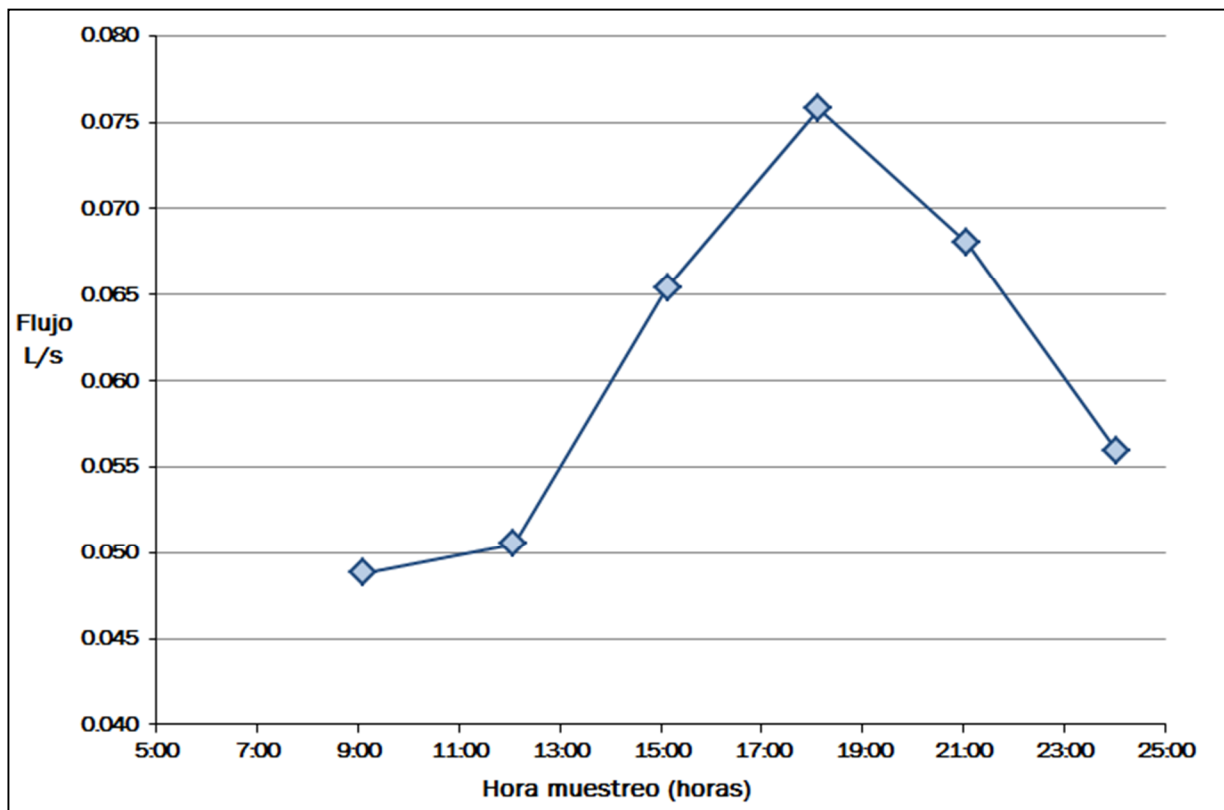


Figura 3.1. Gráfica de variación de flujo a lo largo de un día normal

Tabla 3.2 Área bajo la curva y volumen acumulado por día

Hora	Área (L)	V _{acumulado} (L)	V _{acumulado} m ³
9 a 10	176.5015	176.50150	0.17650
10 a 11	178.5558	355.05730	0.35506
11 a 12	180.6089	535.66620	0.53567
12 a 13	189.2362	724.90240	0.72490
13 a 14	206.7734	931.67580	0.93168
14 a 15	224.3603	1156.03610	1.15604
15 a 16	240.0302	1396.06630	1.39607
16 a 17	252.5948	1648.66110	1.64866
17 a 18	265.1165	1913.77760	1.91378
18 a 19	269.1042	2182.88180	2.18288
19 a 20	259.7443	2442.62610	2.44263
20 a 21	250.2256	2692.85170	2.69285
21 a 22	238.4593	2931.31100	2.93131
22 a 23	223.7558	3155.06680	3.15507
23 a 24	209.0396	3364.10640	3.36411
24 a 1	194.3234	3558.42980	3.55843

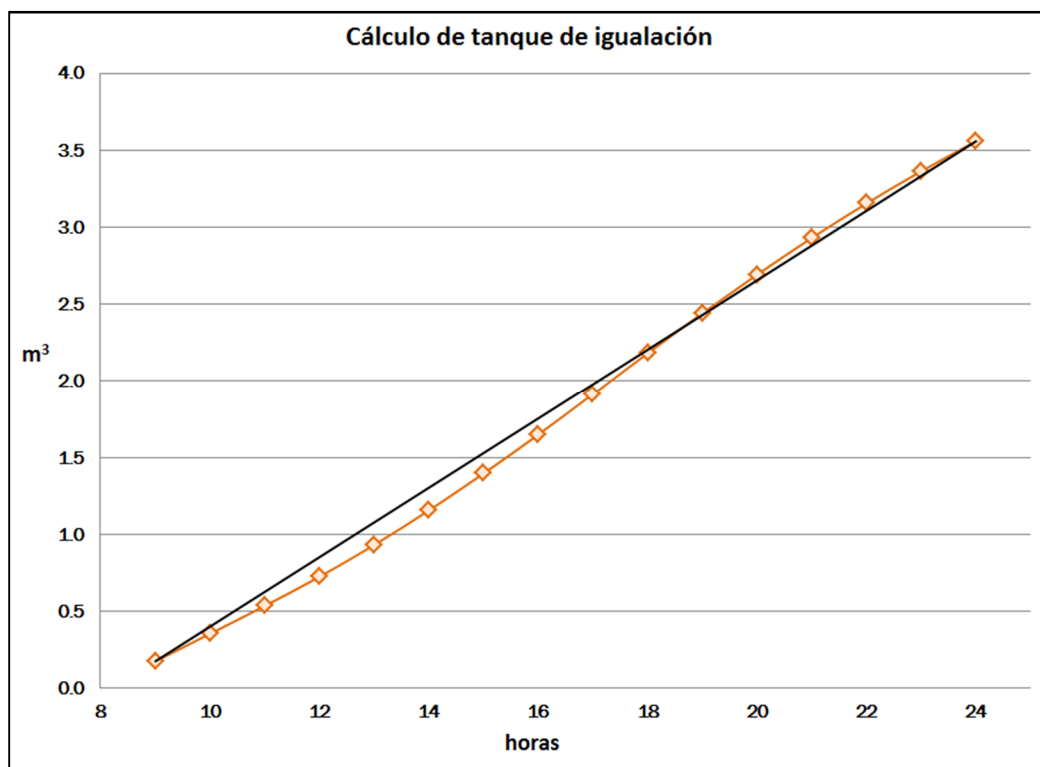


Figura 3.2 Gráfica de valores de volumen acumulado para el cálculo del tanque de igualación

Graficando los valores de volumen acumulado se obtiene lo siguiente: Para el cálculo del volumen del tanque de igualación es necesario trazar una línea del punto inicial hasta el punto final de la línea graficada, esta línea será llamada “curva de masa”, la cual es indispensable. (Figura 3.2)

Se observa que, entre la curva de masa y la línea que representa la acumulación de líquido a través del tiempo, existe dos espacios, uno por la mitad de arriba y el otro por debajo, la mayor distancia representara un desborde del líquido mientras que la otra es una parte en donde se puede quedar vacío el tanque. Sumando las dos distancias se puede obtener el volumen ideal para el tanque de homogenización.

Volumen sobrante: 0.0493 m^3

Volumen faltante: 1.1478 m^3

Volumen del tanque de igualación: 0.1971 m^3

3.2.2 Reactor anaerobio tipo UASB (Sharma, 2014)

Para el diseño del reactor anaerobio se comenzará con el balance de materia correspondiente del equipo, conociendo datos como producción de biogás y purga de lodos (Tabla 3.3, Figura 3.3)

Tabla 3.3 Datos del agua residual de efluente al reactor anaerobio.

		Valor	Unidad	Valor	Unidad
Caudal de diseño de la PTAR	Q	0.218	m ³ /h	5.232	m ³ /d
Demanda química de oxígeno	DQO₁	0.247	kgDQO/m ³	247.000	mg/l
Demanda bioquímica de oxígeno	DBO₁	0.124	kgDBO/m ³	123.600	mg/l
Sólidos suspendidos totales	SST₁	0.095	kgSST/m ³	95.000	mg/l
Sulfatos de influente	SO₄₁	0.015	kgSO ₄ /m ³	15.000	mg/l
pH del influente	pH	7.960	Unidades		
Presión atmosférica del lugar	P_{atm}	0.961	Atm	14.123	psia
Temperatura media del influente	T₁	25.0	°C	77.0	°F
Temperatura media ambiente	T_{amb}	26.5	°C	79.7	°F
Eficiencia de conversión de DQO	e_{DQO}	0.650	% /100		
Eficiencia de conversión de DBO	e_{DBO}	0.650	% /100		
Eficiencia de conversión de SST	e_{DBOSST}	0.270	% /100		



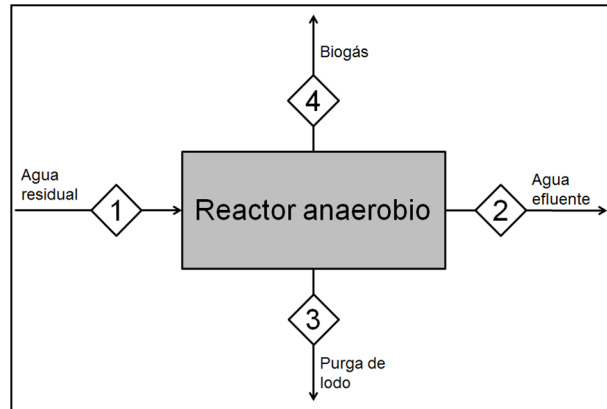


Figura 3.3. Diagrama del balance de masa en el reactor anaerobio

- Cálculo de flujo másico

$$W_1 = Q_D \cdot DQO_1 \quad (3.1)$$

- Cálculo de DQO removida del reactor

$$W_{conv} = \varepsilon \cdot W_1 \quad (3.2)$$

- Cálculo de DQO en el efluente

$$W_2 = W_1 - W_{conv} \quad (3.3)$$

Utilizando las fórmulas anteriores se tienen los siguientes resultados (Tabla 3.4).

Tabla 3.4 Datos del agua residual de efluente al reactor anaerobio.

	Símbolo	Valor	Unidad
Flujo másico influente en términos de DQO	W1	0.054	kgDQO/h
Flujo másico influente en términos de DBO	W1	0.027	kgDBO/h
Flujo másico influente en términos de SST	W1	0.021	kgSST/h
Flujo másico influente en términos de sulfatos	W1	0.003	kgSO4/h
DQO removida (convertida) en reactor	Wconv	0.035	kgDQO/h
DQO efluente del reactor	W2	0.019	kgDQO/h
DBO removida (convertida) en reactor	Wconv	0.018	kgDBO/h
DBO efluente del reactor	W2	0.009	kgDBO/h

- Expresado como DQO se cumple que

$$Y + Z = 1 \quad (3.4)$$

donde:

Y = Coeficiente global de rendimiento de biomasa **0.090 kgSSV-DQO/kgDQOconv**

Z = Coeficiente de generación de metano **0.910 KgCH₄-DQO/kgDQOconv**

- Cálculo de la producción de biomasa como DQO

$$P_B = YW_{conv} = 0.003 \text{ kgSSV-DQO/h} \quad (3.5)$$

- Cálculo de la producción de biomasa como SSV

$$P_{SSV} = \frac{P_B}{f} = 0.002 \text{ kgSSV/h} \quad (3.6)$$

f es el factor de conversión de biomasa con valor de 1.420 kgSSV-DQO/kgSSV

- Cálculo de la densidad de lodos:

$$\rho = \left[\frac{(1-SS)}{1000} + \frac{SV \cdot SS}{1050} + \frac{SF \cdot SS}{2500} \right]^{-1} = 1,008.607 \text{ kgSS/m}^3 \quad (3.7)$$

SS = Porcentaje de sólidos en el lodo = 0.040 %/100

SV = Fracción volátil de la biomasa = 0.700 %/100

SF = Fracción fija de la biomasa = 0.300 %/100

- Purga de lodo anaerobio

$$SST_{acum} = W_{1SST} \cdot (1 - e_{SST}) = 0.0151 \text{ kgSST/h} \quad (3.8)$$

Producción + Acumulación = Purga de lodo

$$Q_X = P_x + SST_{acum} = 0.018 \text{ kgSST/h} = 0.439 \text{ kgSST/día} \quad (3.9)$$

Lo que sería en términos de caudal = $0.0004 \text{ m}^3/\text{h} = 0.011 \text{ m}^3/\text{d}$

Este valor es teórico, se debe considerar una purga menor a este valor pues en el reactor el lodo que no alcanza a formarse en gránulos es llevado a la superficie y sale del reactor. A este fenómeno se le llama lavado del lodo y cuando sucede en menor escala se considera normal.

- Para el cálculo de la producción de metano se tiene lo siguiente.

$$M_{CH_4} = Z \cdot W_{conv} = 0.032 \text{ kgCH}_4\text{-DQO/h} \quad (3.10)$$



La producción de metano a CNTP conocido como $V_{CH_4}^0$

$$V_{CH_4}^0 = \frac{22.4 \cdot M_{CH_4}}{64} = 0.011 \text{ m}^3\text{NCH}_4/\text{h} \quad (3.11)$$

En condiciones de operación el valor de V_{CH_4} es $0.013 \text{ m}^3\text{NCH}_4/\text{h}$. Para conocer a partir de este valor, la cantidad de biogás producido en el reactor se considera una fracción volumétrica del metano en el biogás (X_{CH_4}) de 0.5 %/100, por lo que la cantidad de biogás producido (G) es de $0.025 \text{ m}^3\text{B}/\text{h}$.

Una vez obtenido el balance de materia del reactor se procede con el dimensionamiento. Es importante considerar los siguientes parámetros para un buen diseño (Tablas 3.5, 3.6 y 3.7).

Tabla 3.5. Carga orgánica volumétrica, kgDQO/m³/d (WEF, 1998)

Temperatura, °C	Agua residual con AGV		Agua residual sin AGV	
	Rango	Valor típico	Rango	Valor típico
15	2-4	3	2-3	2
20	4-6	5	2-4	3
25	6-12	6	4-8	4
30	10-18	12	8-12	10
35	15-24	18	12-18	14
40	20-32	25	15-24	18

Tabla 3.6. Tiempo de residencia hidráulica, h (WEF, 1998)

Temperatura, °C	Promedio	Máximo por un periodo de 4 a 6 horas
16-19	10-14	7-9
22-26	7-9	5-7
>26	6-8	4-5

Tabla 3.7. Velocidad de flujo ascendente y altura de reactor (WEF, 1998)

Tío de agua residual	Velocidad ascendente, m/h		Altura del reactor, m	
	Rango	Valor típico	Rango	Valor típico
15	1.0-3.0	1.5	6-10	8
20	1.0-1.25	1.0	3-7	6
25	0.8-1.0	0.7	3-5	5

Para esto se considera una carga orgánica B_v de $1.5 \text{ kgDQO}/\text{m}^3/\text{d}$.

- Volumen útil del reactor, V_u

$$V_u = \frac{W_1}{B_v} = 0.862 \text{ m}^3 \quad (3.12)$$



- Tiempo de residencia hidráulico, θ_{rh}

$$\theta_{rh} = \frac{W_1}{B_v} = 3.95 \text{ h} \quad (3.13)$$

Se considera una altura útil h de 2m por lo que el área del reactor sería de 0.431 m² considerando la fórmula (3.14). Para la velocidad ascendente (v_a) se tiene un valor de 0.506 m/h calculado a partir de la fórmula (3.15).

$$A = \frac{V_1}{H} = 0.431 \text{ m}^2 \quad (3.14)$$

$$v_a = \frac{Q}{A} = 0.506 \text{ m/h} \quad (3.15)$$

Teniendo en cuenta que $A = \text{lado} \times \text{ancho}$ se estima un lado de 0.8m por lo que el ancho es de 0.55m.

La Tabla 3.8 resume las características de diseño del reactor anaerobio.

Tabla 3.8. Resumen de diseño del reactor anaerobio

	Símbolo	Valor	Unidad
Concentración efluente de DQO	DQO ₂	0.086	kg/m ³
Concentración efluente de DBO	DBO ₂	0.043	kg/m ³
Concentración efluente de SST	SST ₂	0.070	kg/m ³
Concentración efluente de NTK	NTK ₂	0.010	kg/m ³
Concentración efluente de N-org	N-org ₂	0.003	kg/m ³
Concentración efluente de P-total	P ₂	0.006	kg/m ³
Flujo de purga de lodo calculada	Q _p	0.0004	m ³ /h
Flujo de biogás a condiciones de operación	G	0.025	m ³ /h
Volumen útil	V _u	0.862	m ³
Altura útil	H _u	2.000	m
Largo – ancho	L - a	0.80 – 0.55	m

3.2.3 Reactor aerobio (Ramalho, 1991)

Como primer punto se definen las características del influente y para esto es necesario establecer cada uno de los parámetros de manera específica (Tablas 3.9 a 3.13).



Tabla 3.9. Características de influente, demanda química de oxígeno

	Símbolo	Valor	Unidad	Ecuación
DQO total	DQO	0.087	kg/m ³	
DQO soluble	$DQOs$	0.017	kg/m ³	(3.16a)
DQO particulada	$DQOp$	0.070	kg/m ³	(3.16b)
Relación entre la DBO y la DQO biodegradable	$DQOb/DBO$	1.700		
DQO completamente biodegradable	$DQOb (S_0)$	0.073	kg/m ³	(3.16c)
DQO no biodegradable	$DQOnb$	0.014	kg/m ³	(3.17)
DQO particulada biodegradable (lentamente biodegradable)	$DQObp (DQOb)$	0.066	kg/m ³	(3.16c)
DQO soluble biodegradable (fácilmente biodegradable)	$DQObs (DQOfb)$	0.007	kg/m ³	(3.18)
DQO particulada no biodegradable	$DQOpnb$	0.004	kg/m ³	(3.17)
DQO soluble no biodegradable	$DQOsnb$	0.010	kg/m ³	(3.19)

Tabla 3.10. Características de influente, demanda bioquímica de oxígeno

	Símbolo	Valor	Unidad
Relación de DQO a DBO	DQO/DBO	2.023	
DBO total	DBO	0.043	kg/m ³
DBO soluble	$DBOs$	0.004	kg/m ³
DBO particulada	$DBOp$	0.039	kg/m ³
Relación de DQO particulada a DBO particulada	$DQOp/DBOp$	1.800	

Tabla 3.11. Características de influente SST

	Símbolo	Valor	Unidad	Ecuación
SSV/SST	SSV/SST	0.700		
SST	TSS	0.070	kg/m ³	
SSV	SSV	0.049	kg/m ³	
SSV no biodegradables	$SSVnb$	0.003	kg/m ³	(3.20)
SSF o inertes	$SSTi$	0.021	kg/m ³	(3.21)

Tabla 3.12. Características de influente, nitrógeno

	Símbolo	Valor	Unidad	Ecuación
Nitrógeno total Kjeldahl	NTK_0	0.010	kg/m ³	
Nitrógeno amoniacal	$N-NH_4^+_0$	0.026	kg/m ³	
Nitrógeno orgánico	$N-Org_0$	0.016	kg/m ³	(3.22)
Nitratos y nitritos	NO_3-N_0	-	kg/m ³	(3.22)

Tabla 3.13 Características de influente, otros parámetros

	Símbolo	Valor	Unidad
Fósforo total	$P\text{-total}$	0.006	kg/m ³
Ortofosfatos totales	PO_4	0.003	kg/m ³
Sulfuros	S^{2-}	0.005	kg/m ³
Sulfatos	SO_4^{2-}	-	kg/m ³
Alcalinidad influente	Alc	0.200	kgCaCO ₃ /m ³
pH		7.000	

Para definir las características de influente se utilizaron las siguientes fórmulas:

$$DQOs = DQOsb + DQOsnb \quad (3.16a)$$

$$DQOp = 1.42SSV \quad (3.16b)$$

$$DQObp = \frac{DQOb}{DBO}(DBOp) = \frac{DQOb}{DBO}(DBO - DBOs) \quad (3.16c)$$

$$DQOnb = DQOsnb + DQOpnb \quad (3.17)$$

$$DQOb = DQOsb + DQOpb \quad (3.18)$$

$$DQOsnb = DQOs - \left(\frac{DQOb}{DBO} \right) DBOs \quad (3.19)$$

$$SSVnb = \left(1 - \frac{DQObp}{DQOp} \right) SSV = \left(\frac{DQOpnb}{DQOp} \right) SSV \quad (3.20)$$

$$SST = SSV + SSTi \quad (3.21)$$

$$NTK_0 = (N - NH_4^+)_0 + (N - Org)_0 \quad (3.22)$$

Además, los valores anteriores ayudan al cálculo del dimensionamiento del reactor pudiendo suponer que la mayoría de la materia orgánica que entra al reactor es biodegradable, por lo que se estima que se puede llegar a tener una buena eficiencia de remoción de DQO y DBO. La Tabla 3.14 muestra los coeficientes cinéticos de las bacterias nitrificantes y la Tabla 3.15 muestra los coeficientes cinéticos de las bacterias heterótrofas.



$$f_{OD} = \frac{OD}{K_o + OD} \quad (3.23)$$

$$f_{pH} = \frac{1}{1 + 0.04(10^{pH_{opt} - pH} - 1)} \quad (3.24)$$

$$\mu_T = \mu_{T,20} \theta^{(T-20)} \quad (3.25)$$

$$\mu_n = \mu_{n,T} * f_{OD} * f_{pH} \quad (3.26)$$

Tabla 3.14. Coeficientes cinéticos de las bacterias nitrificantes

	Símbolo	Unidad	Valor	Ecuación
Constante de semisaturación para oxígeno en la nitrificación	K_o	mg _{O2} /L	0.50	
Factor de corrección por limitación de oxígeno	f_{OD}		0.80	(3.23)
Factor de corrección por pH	f_{pH}		0.74	(3.24)
Rapidez específica de crecimiento máxima para <i>Nitrosomonas</i> a 20 °C	$\mu_{mn,20}$	1/d	0.75	
μ_{mn} corregida por temperatura	$m_{mn,T}$	1/d	0.80	(3.25)
μ_{mn} corregida por temp., pH y OD	$\mu_{mn,T,pH,OD}$	1/d	0.47	(3.26)
Constante de semisaturación para nitrógeno amoniacal a 20 °C	$K_{n,20}$	g _{NH4-N} /m ³	0.74	
K_n corregida a condiciones de operación	K_n	g _{NH4-N} /m ³	0.78	(3.25)
Rendimiento biomasa nitrificante	Y_n	g _{VSS} /g _{NH4-N}	0.120	
Decaimiento endógeno biomasa nitrificante a 20 °C	$k_{dn,20}$	1/d	0.080	
k_{dn} corregida a condiciones de operación	k_{dn}	1/d	0.08	(3.25)
Valores de corrección por temperatura	q para μ_{mn}		1.07	
	q para K_n		1.05	
	q para k_{dn}		1.04	

Tabla 3.15. Coeficientes cinéticos de las bacterias heterótrofas

	Símbolo	Unidad	Valor	Ecuación
Velocidad específica de crecimiento máximo para bacterias heterótrofas a 20 °C	$\mu_m, 20$	1/d	6.00	
μ_m corregida por temperatura	μ_m, T	1/d	6.24	(3.25)
Constante de semisaturación para sustrato orgánico a 20 °C	K_s	DQOsb/m ³	20.00	
Rendimiento de biomasa heterótrofa	Y	SSVg/DQOsb	0.40	
Decaimiento endógeno biomasa heterótrofa a 20 °C	$k_d, 20$	1/d	0.12	
k_d corregida a condiciones de operación	k_d	1/d	0.12	(3.25)
Fracción de masa celular heterótrofa que permanece como desecho celular	f_d		0.15	
Valores de corrección por temperatura	q para μ_m		1.04	
	q para k_d		1.04	

Tabla 3.16. Parámetros de diseño de reactor de lodos activados completamente mezclado

	Símbolo	Unidad	Valor	Ecuación
Tiempo de retención celular mínimo para <i>Nitrosomonas</i>	TRC_{mn}	d	2.57	(3.27)
Tiempo de retención celular mínimo para bacterias heterótrofas	TRC_m	d	0.16	(3.27)
Factor de seguridad para <i>Nitrosomonas</i>	FS		5.00	(3.28)
Factor de seguridad para bacterias heterótrofas	FS		78.63	(3.28)
Concentración de sólidos suspendidos totales en el reactor (SSLM)	$SSLM$	kg/m ³	3.00	
Tiempo de retención celular de la biomasa	TRC	d	12.86	(3.28)
Tiempo de residencia hidráulica	T	h	4.17	(3.29)
Relación entre sustrato y microorganismos	F/M	Kg _{DBO} /kg _{SSV} -d	0.20	(3.30)
Carga orgánica volumétrica	L_{org}	Kg _{DBO} /m ³ -d	0.25	(3.31)
Rendimiento	Y_{obs}	Kg _{SSV} /kg _{DBO}	0.40	(3.32)
		Kg _{SST} /kg _{DBO}	0.95	(3.32)

$$TRC_{min} = \frac{1}{\mu_m - k_d} \quad (3.27)$$

$$FS = \frac{TRC}{TRC_{min}} \quad (3.28)$$



$$\tau = \frac{V}{Q} \quad (3.29)$$

$$F / M = \frac{QS_0}{X_{SSV}V} \quad (3.30)$$

$$L_{org} = \frac{QS_0}{V} \quad (3.31)$$

$$Y_{obs} = \frac{P_{X, SST - \acute{o} - SSV}}{DBO - \acute{o} - bDQO - removido} \quad (3.32)$$

$$S = \frac{K_s [1 + (k_d)TRC]}{TRC(\mu_m - k_d) - 1} \quad (3.33)$$

$$N_e = \frac{K_n [1 + (k_{dn})TRC]}{TRC(\mu_{mn} - k_{dn}) - 1} \quad (3.34)$$

$$\mu_{op} = \frac{\mu_m S}{K_s + S} - k_d \quad (3.35)$$

$$\mu_{n,op} = \frac{\mu_{nm} N}{K_n + N} - k_{n,d} \quad (3.36)$$

$$\% E_{NO_x} = \frac{NO_x_{producidos}}{NTK_{inf\ luenta}} \quad (3.37)$$

$$NO_x = TKN - N_e - \frac{0.12 P_{X,bio}}{Q} \quad (3.38)$$

$$P_{X,bio} = \frac{QY(S_0 - S)}{1 + k_d(TRC)} + \frac{QY_n(NO_x)}{1 + k_{dn}(TRC)} + \frac{f_d k_d QY(TRC)(S_0 - S)}{1 + k_d(TRC)} \quad (3.39)$$

$$P_{X,SSV} = P_{X,bio} + Q(SSVnb) \quad (3.40)$$



$$P_{X,SST} = \frac{P_{X,bio}}{0.85} + Q(SSVnb) + Q(SSTi) \quad (3.41)$$

A partir de estas fórmulas en la Tabla 3.17 se presentan los cálculos cinéticos a condiciones de operación.

Tabla 3.17. Cálculos cinéticos a condiciones de operación

	Símbolo	Unidad	Valor	Ecuación
Tiempo de retención celular del reactor aerobio	<i>TRC</i>	d	12.86	
Concentración promedio del sustrato en el reactor	<i>S</i>	kg _{bCOD} /m ³	0.00067	(3.33)
Nitrógeno amoniacal en el efluente	<i>Ne</i>	kg _N /m ³	0.00040	(3.34)
Velocidad específica de crecimiento para <i>bacterias heterótrofas</i> a condiciones de operación	μ_{op}	1/d	0.078	(3.35)
Velocidad específica de crecimiento para <i>Nitrosomonas</i> a condiciones de operación	$\mu_{n,op}$	1/d	0.078	(3.36)
Eficiencia calculada de nitrificación en condiciones de invierno (respecto a la NTK del influente)	% <i>E_{NOx} calculada</i>	%	78.87	(3.37)
Cantidad de nitrógeno asimilado en la biomasa	<i>N-biomasa</i>	kg _N /m ³	0.002	(3.38)
Flujo de nitrógeno asimilado en la biomasa		kg/d	0.009	
Cantidad de nitrógeno oxidado a nitrato	<i>NO_x</i>	kg _N /m ³	0.008	(3.38)
Producción de biomasa en todo el sistema biológico	<i>P_{X,bio}</i>	kg _{bio} /d	0.07	(3.39)
Producción de sólidos volátiles en todo el sistema biológico	<i>P_{X,SSV}</i>	kg _{SSV} /d	0.09	(3.40)
Producción de sólidos totales en todo el sistema biológico	<i>P_{X,SST}</i>	kg _{SST} /d	0.21	(3.41)
Sólidos suspendidos totales que se van al efluente	<i>W_{SST}</i>	kg _{SST} /d	0.10	
Sólidos suspendidos totales que se van a la purga	<i>W_{SST}</i>	kg _{SST} /d	0.11	(3.35)
Concentración de sólidos suspendidos volátiles en el reactor	<i>SSVR</i>	kg _{SSV} /m ³	1.26	
Velocidad de remoción de sustrato	<i>DQO_{removido}</i>	kg _{DQOb} /d	0.38	
	<i>DBO_{removido}</i>	kg _{DBO} /d	0.22	
Asimilación de fósforo orgánico por bacterias heterótrofas		kg/d	0.00	
Fósforo total efluente		kg/d	0.03	
Concentración de fósforo total efluente		kg/m ³	0.005	

El volumen del reactor se calcula de la siguiente manera:

$$V = \frac{P_X \cdot TRC}{X_{SST}} = \frac{0.21 \cdot 12.86}{3.00} = 0.9m^3 \quad (3.42)$$



Considerando una altura útil de 1.7m el área de la base queda de 0.53m², se tiene un reactor rectangular de 0.8m de ancho por lo que el largo queda de 0.66m.

Además del volumen es necesario calcular las condiciones de la recirculación del lodo. Se fija el valor de 7.0 kg_{SST}/m³ como la concentración de los lodos de recirculación (X_R). Para conocer la tasa de recirculación (R) se tiene la siguiente fórmula:

$$R = \frac{SSR}{X_R - SSR} = 0.75 \tag{3.43}$$

Considerando que R=Q_r/Q, el flujo de recirculación es de 3.92m³/d. Por último para el flujo de purga se utiliza la ecuación (3.44) que da como resultado un valor de 0.01m³/d.

$$Q_w X_R + (Q - Q_w) X_e = P_{X, TSS} \tag{3.44}$$

Por último, para la calidad del agua de efluente del reactor se tiene la información de la Tabla 3.18.

Tabla 3.18. Características del efluente

	Símbolo	Unidad	Valor
SST en el efluente	SST _e	kg/m ³	0.020
DQO en el efluente	DQO _e	kg/m ³	0.023
DQO efluente /DBO efluente	DQO _e /DBO _e		2.000
DBO total en el efluente	DBO _e	kg/m ³	0.011
Eficiencia oxidación de sulfuros	%E _{S₂^{-e}}		0.800
Sulfuros en el efluente	S ₂ ^{-e}	kg/m ³	0.001
Sulfatos en el efluente	SO ₄ ^{-2e}	kg/m ³	0.004
Nitrógeno total efluente (sin desnitrificación)	N _{te}	kg/m ³	0.008
Fósforo total efluente	P _e	kg/m ³	0.005

3.2.4 Clarificador secundario

Uno de los parámetros principales para el dimensionamiento de un clarificador es el área transversal. Para su cálculo se utiliza la fórmula 3.45.

$$A = \frac{(Q+Q_R)}{SRL} X \tag{3.45}$$

dónde:



SRL = carga orgánica, 4 kg/m²/h
 Q = Flujo de influente, 5.23 m³/d
 Q_R = Flujo de recirculación, 3.93 m³/d
 X = Concentración de sólidos del licor mezclado, 3 kg/m³

Esto da como resultado un área transversal de 0.28 m², siguiendo con la estructura del módulo del tratamiento biológico se escoge un ancho de 0.8 m, por lo que se estima un largo de 0.36 m. Con un factor de seguridad de 0.5 se estima un diámetro de diseño de 0.5 m.

Considerando que el clarificador tiene una altura menor a 10 cm que el reactor aerobio, da como resultado una altura de 1.60m.

La pendiente normal para un clarificador es de 30° pero para sedimentadores muy pequeños es necesario pronunciar un poco más la pendiente para poder llevar a cabo una correcta sedimentación, en este caso se considera una pendiente de 60°.

El volumen máximo del clarificador es de 0.64m³ y con el flujo de influente da como resultado un tiempo de residencia hidráulica máximo (TRH) de 2.93h.

3.3 Lista de equipos

Para el tratamiento del agua residual en la planta panificadora se requiere por lo menos de los equipos listados en la Tabla 3.19.

Tabla 3.19. Lista de equipos

No.	Etiqueta	Equipo	No.	Etiqueta	Equipo
PRETRATAMIENTO			TRATAMIENTO BIOLÓGICO		
	Equipo existente	Trampa de sólidos y grasas	8	CSS-01	Clarificador secundario
1	TAN-01	Tanque de homogenización	9	TAN-04	Contenedor de lodo
2	BNM-01	Bomba de alimentación a <i>UASB</i>	POSTRATAMIENTO Y DESINFECCIÓN		
TRATAMIENTO BIOLÓGICO			10	TAN-02	Tanque de agua para filtros
3	RAN-01	Reactor anaerobio tipo <i>UASB</i>	11	BCM-01	Bomba centrífuga
4	RAE-01	Reactor aerobio	12	HDN-01	Hidroneumático
5	DIF-01	Sistema de difusores para reactor aerobio	12	FMM-01	Filtro multimedia
6	SOP-01/01R	Soplador de aire a reactor	14	FCA-01	Filtro carbón activado
7	SOP-02	Soplador sistema tipo <i>Airlift</i>	15	TAN-03	Tanque de cloración



3.4 Diagrama de flujo de proceso y balance de masa

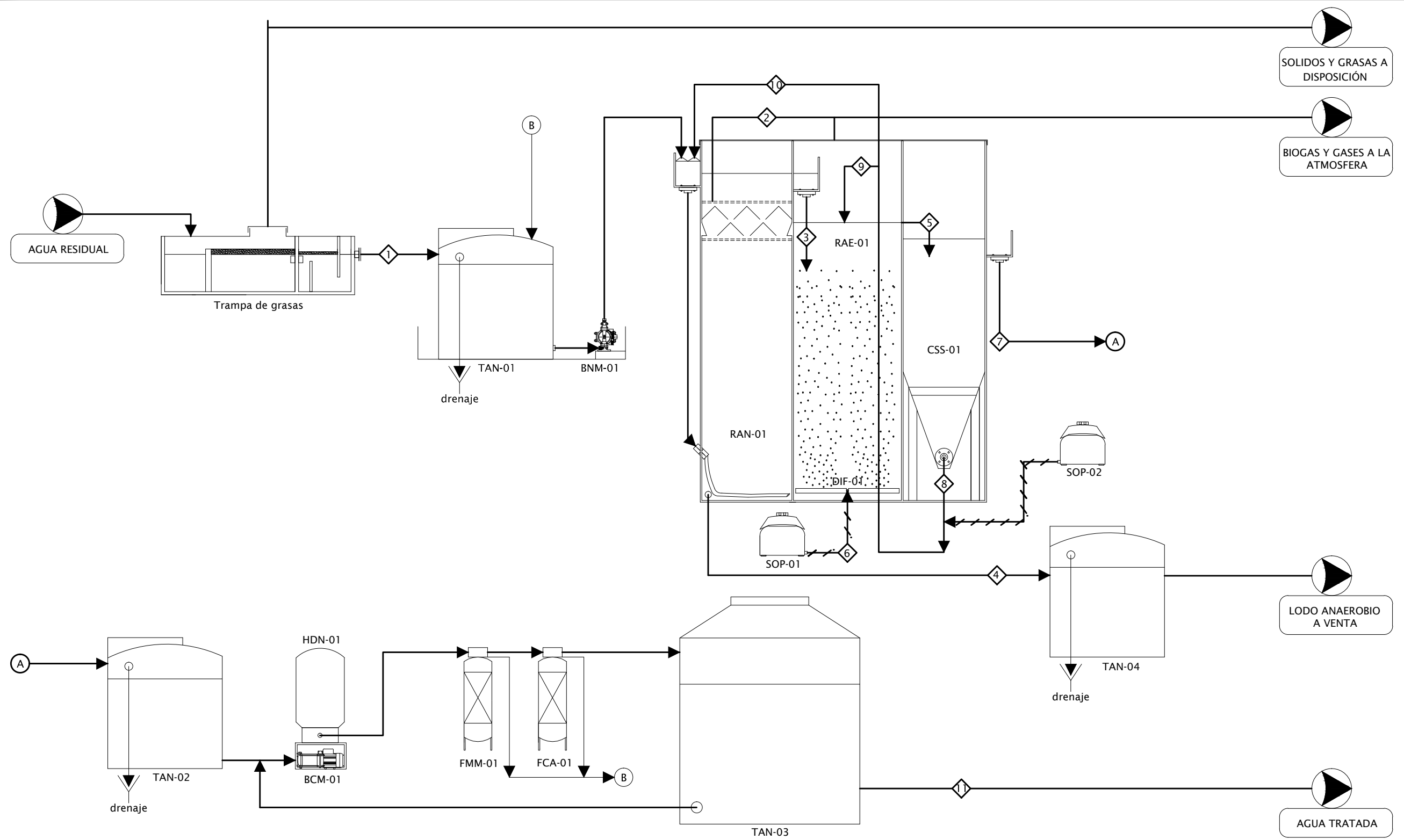
Las corrientes fueron definidas en el diagrama de flujo de proceso, DFP (Figura 3.4) y con ellas se ha definido el balance de masa de las Tablas 3.20 y 3.21.

Tabla 3.20. Balance de masa (1/2)

	Unidad	Agua Residual	Influente RAN-01	Biogás	Efluente RAN-01	Lodo anaero bio	Licor mezclado
		1	1+10	2	3	4	5
Flujo	(m ³ /d)	5.230	5.245	0.600	5.232	0.011	9.150
DBO	(kg/m ³)	0.124	0.128		0.043		
W_{DBO}	(kg/h)	0.027	0.028		0.009		
SST	(kg/m ³)	0.095	0.114		0.070	40.348	3.000
W_{SST}	(kg/h)	0.021	0.025		0.015	0.018	1.144
DQO	(kg/m ³)	0.247	0.261	0.032	0.087		
W_{DQO}	(kg/h)	0.054	0.057	0.001	0.019		
GyA	(kg/m ³)	0.056	0.055		0.034		
W_{GyA}	(kg/h)	0.012	0.012		0.007		

Tabla 3.21. Balance de masa (2/2)

	Unidad	Aire	Efluente CSS-01	Lodo aerobio	Lodo recirculación	Lodo purga	Efluente PTAR
		6	6	8	9	10	11
Flujo	(m ³ /d)	3.360	5.217	3.935	3.920	0.015	5.217
DBO	(kg/m ³)		0.011	1.990	1.990	1.990	0.010
W_{DBO}	(kg/h)		0.002	0.326	0.325	0.001	0.002
SST	(kg/m ³)		0.020	7.000	7.000	7.000	0.015
W_{SST}	(kg/h)		0.004	1.148	1.143	0.004	0.003
DQO	(kg/m ³)		0.023	4.170	4.170	4.170	0.022
W_{DQO}	(kg/h)		0.005	0.684	0.681	0.003	0.005
GyA	(kg/m ³)		0.020	0.019	0.019	0.019	0.015
W_{GyA}	(kg/h)		0.004	0.003	0.003	0.000	0.003



BALANCE DE MASA

Linea	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
FLUJO m ³ /d	5.230	0.600	5.232	0.011	9.150	3.360	5.217	3.935	3.920	0.015	5.217
DBO Kg/h	0.027		0.009				0.002	0.326	0.323	0.001	0.002
SST Kg/h	0.021		0.015	0.018	1.144		0.004	1.148	1.143	0.004	0.003
DQO Kg/h	0.054	0.001	0.019				0.005	0.684	0.681	0.003	0.005
GyA Kg/h	0.012		0.007				0.004	0.003	0.003	0.000	0.003

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO
FACULTAD DE QUÍMICA
Evaluación conceptual de una planta de tratamiento
de aguas residuales de una empresa de alimentos

DESCRIPCIÓN

DIAGRAMA DE FLUJO DE PROCESO
FUGURA 3.4

PROYECTO M.M.G.	DIBUJO /CAD/ M.M.G.	FECHA 20/02/14	ESCALA SIN	EDICIÓN FINAL
REVISO M.C.D.D.	APROBO M.C.D.D.	FECHA --/--/--	ACOT. SIN	No.

Capítulo 4. Filosofía de operación y diagrama de tuberías e instrumentación

Con apoyo del diagrama de tuberías e instrumentación (DTI) de las Figuras 4.1 y 4.2 a continuación se hará una descripción detallada del proceso.

1. El agua sale de la trampa de grasas existente y entra por la parte superior del tanque de homogeneización (TAN-01) en una tubería de 2" de diámetro. Se ha anexado una válvula de bola (VB-01) en caso de que la PTAR entre en mantenimiento. El tanque TAN-01 se encuentra en un subnivel del suelo de 20cm. En el tanque existe una tubería de 1" indicada como salida de demasías para evitar derrames, la tubería sale directamente al drenaje.
2. El agua sale del TAN-01 por una tubería de ½" succionada por una bomba neumática BNM-01 con flujo de 0-15 L/min, el aire que opera a dicha bomba es responsabilidad del cliente. La descarga de la bomba tiene un diámetro de ½" y es descargada en la caja de alimentación del reactor anaerobio (RAN-01).
3. El agua es depositada en una caja de distribución que distribuye a dos puntos inferiores del RAN-01, una vez adentro del reactor el agua pasa por un sistema de tubos acomodados para una distribución proporcionada.
4. El biogás se recolecta en un sistema de campanas y pasa a una cámara especial donde por una tubería de ½" el biogás es llevado afuera de las instalaciones de la panadería.
5. En la parte inferior del reactor está la válvula (VB-17) para la purga del lodo, aunque el tiempo de purga será prolongado se debe llevar a cabo esta acción para poder eliminar el lodo viejo. La purga de lodo anaerobio se llevará a cabo por periodos de tiempo intermitentes. Cuando se realice la purga el lodo será llevado al tanque de lodo TAN-04 para su venta.
6. El agua de salida del RAN-01 llega a una caja de distribución donde se realiza un sello hidráulico para mantener el nivel del reactor y mantener el biogás en la cámara destinada para eso. El agua pasa al reactor aerobio (RAE-01) por una tubería de 2" de diámetro.
7. Al reactor aerobio se le inyecta aire por medio de un soplador (SOP-01). La tubería es de ½" y el aire se distribuye dentro del reactor por un sistema de difusores tubulares (DIF-01) de 10" de largo nominal. El sistema cuenta con un soplador de relevo (SOP-01R) debido a que el sistema biológico no se puede quedar sin aire. Los sopladores tendrán un juego de relevo cada 24 horas para evitar una sobrecarga en cada soplador.
8. El agua pasa directamente por gravedad al clarificador secundario (CSS-01) donde, una vez separado el lodo, el agua pasa a la caja de distribución final para pasar al

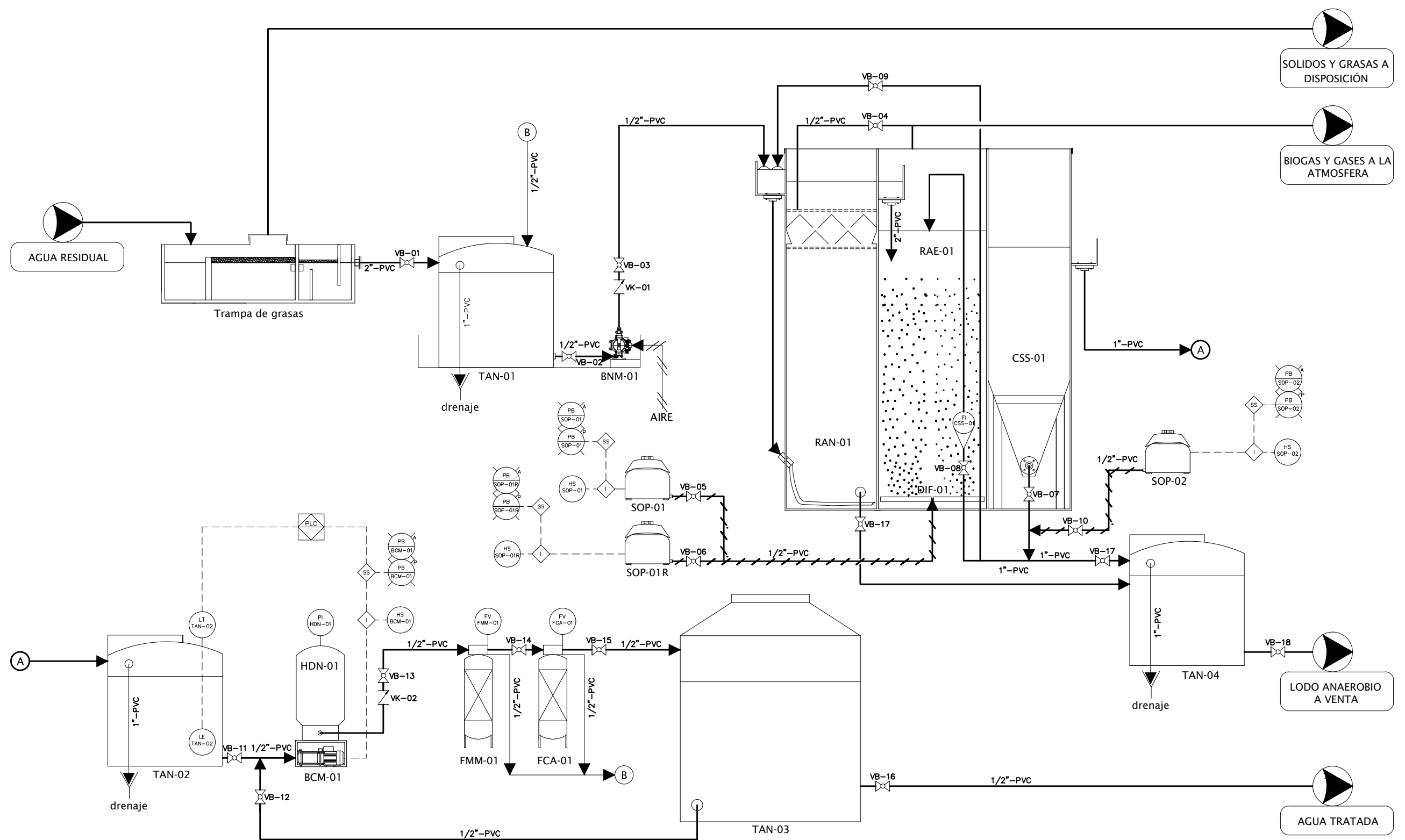


tratamiento terciario. Al fondo de la tolva se encuentra la válvula VB-07 que permanecerá normalmente abierta.

9. El lodo sedimentado es “absorbido” por un sistema “air-lift” y pasa a una tubería de 1” donde la válvula (VB-08) y la válvula (VB-09) controlan el flujo del lodo de recirculación y el lodo de purga. El flujo será controlado manualmente guiándose por el medidor de flujo (FI CSS-01) instalado en la tubería de retorno del lodo. Posteriormente el lodo de retorno entra al RAE-01 mientras que el lodo de purga entra a la caja de distribución del reactor anaerobio. En caso de emergencia el lodo será enviado al tanque de lodos (TAN-04) abriendo la válvula (VB-17) que permanecerá normalmente cerrada. En caso de que el lodo no pueda enviarse al reactor anaerobio de manera normal, el tiempo máximo calculado en condiciones extremas para que el tanque de lodos no desborde es de 12 días de operación.
10. El aire para el sistema “air-lift” es alimentado por el soplador (SOP-02). La tubería de ½” entra en una tee reducción a la tubería de lodo aerobio. La válvula VB-10 se encargará de regular el flujo de aire en caso de que la cantidad total del lodo a recircular tuviera que ser menor. Esta operación solamente es necesaria en caso de arranque o si existiera algún problema en el sistema biológico.
11. El agua proveniente del sistema biológico entra a un tanque de almacenamiento de un volumen de 250L.
12. Los filtros FMM-01 y FCA-01 operarán de manera intermitente. Se requiere que cada cierto tiempo los filtros salgan de operación para poder llevar a cabo el retrolavado con agua del TAN-03. El agua es succionada en una tubería de ½” por una bomba centrífuga (BCM-01) que se acciona cuando el nivel del sensor (LE TAN-01) es marcado como alto. La bomba con la ayuda de un hidroneumático (HDN-01) bombea el agua a un filtro multimedia (FMM-01) y posteriormente a un filtro de carbón (FCA-01). La bomba deja de funcionar cuando el nivel se marca como bajo. Los filtros, el hidroneumático, la bomba y el medidor de nivel se encuentran en un mismo tablero. El agua que se desecha en el periodo de limpieza de los filtros retorna al TAN-01 para regresar al sistema.
13. El agua proveniente del sistema de filtrado entra a un tanque de cloración (TAN-03) donde el cliente será responsable de la adición de pastillas de cloración cada cierto tiempo.⁵ Esta adición se hará en cuanto se acabe el periodo de retrolavado. La adición puede ser opcional.
14. En el tanque de cloración y almacenamiento (TAN-03) se puede disponer del agua tratada. Es responsabilidad del cliente el diseño y construcción del sistema de reutilización del agua tratada.

⁵ El cliente puede adicionar un sistema de cloración automático, lo cual no se considera en este momento para evitar elevar el costo de la planta de tratamiento de agua residual





NOTAS

1.

SIMBOLOGIA DE LINEAS

- LINEA DE PROCESO
- LINEA DE LODO Y SÓLIDOS
- LINEA DE AIRE DE PROCESO
- LINEA DE AGUA DE SERVICIOS
- LINEA DE BIOGAS



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO
FACULTAD DE QUÍMICA
Evaluación conceptual de una planta de tratamiento de aguas residuales de una empresa de alimentos



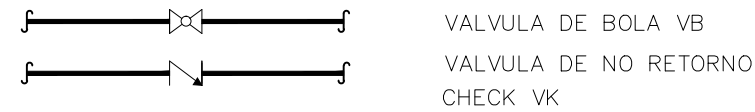
DESCRIPCIÓN
DIAGRAMA DE TUBERÍAS E INSTRUMENTACIÓN
FIGURA 4.1

PROYECTO M.M.G.	DIBUJO /CAD/ M.M.G.	FECHA 20/02/14	ESCALA SIN	EDICIÓN FINAL
REVISO M.C.D.D.	APROBO M.C.D.D.	FECHA --/--/--	ACOT. SIN	No.

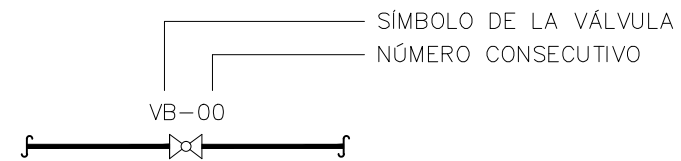
IDENTIFICACIÓN DE EQUIPOS

EQUIPO	TAG
BOMBAS	
BOMBA NEUMÁTICA	BNM
BOMBA CENTRÍFUGA	BCM
REACTORES	
REACTOR ANAEROBIO	RAN
REACTOR AEROBIO	RAE
FILTROS	
FILTRO MULTIMEDIA	BCM
FILTRO CARBÓN ACTIVADO	BSM
VARIOS	
TANQUE DE ALMACENAMIENTO	TAN
CLARIFICADOR SECUNDARIO	CSS
HIDRONEUMÁTICO	HDN

SÍMBOLOS DE VÁLVULAS



NUMERACIÓN DE VÁLVULAS



ACCIONES DE BOTONERAS

POSICIÓN	ACCIÓN	POSICIÓN	ACCIÓN
A	APAGADO	P	PRENDIDO

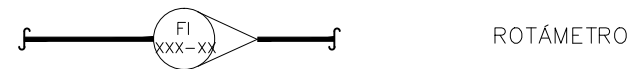
CODIFICACIÓN DE INSTRUMENTOS



ENTRADAS / SALIDAS

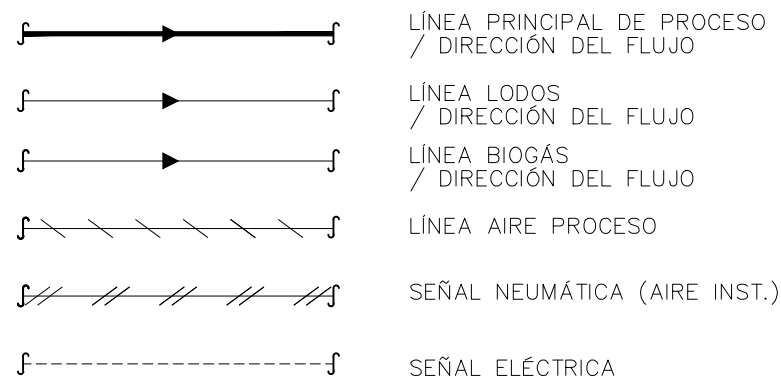


ELEMENTOS DE MEDICIÓN DE FLUJO

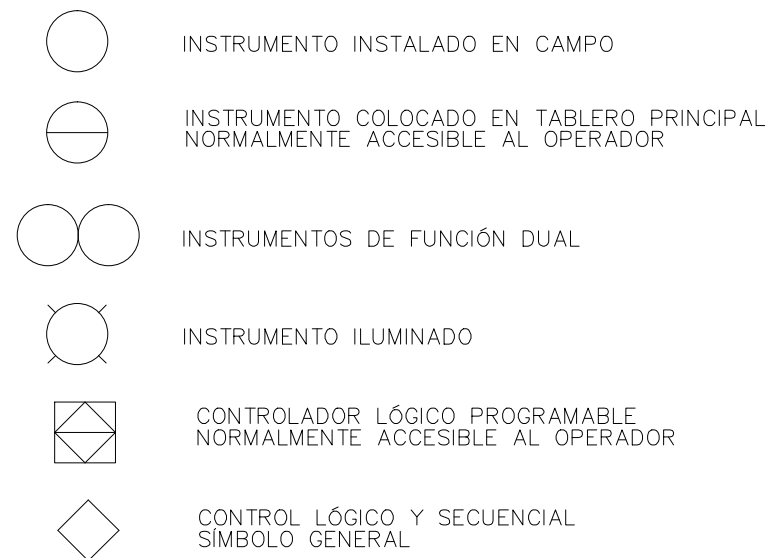


CÓDIGO DE INSTRUMENTOS

SIMBOLOGÍA DE TUBERÍAS Y LÍNEAS DE INSTRUMENTOS



SIMBOLOGÍA PARA INSTRUMENTOS



CÓDIGO	ACCIÓN
SS	SWITCH DE SEGURIDAD
I	CORRIENTE
HS	ARRANQUE MANUAL
PI	INDICADOR DE PRESIÓN
FI	INDICADOR DE FLUJO
LE	MEDIDOR DE NIVEL
LT	TRANSMISOR DE NIVEL
PB	BOTÓN
FV	CAMBIO DE VÁLVULA

NOTAS

1.



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO
FACULTAD DE QUÍMICA
Evaluación conceptual de una planta de tratamiento de aguas residuales de una empresa de alimentos



DESCRIPCIÓN

SIMBOLOGÍA DTI
FIGURA 4.2

PROYECTO	DIBUJO /CAD/	FECHA	ESCALA	EDICIÓN
M.M.G.	M.M.G.	20/02/14	SIN	FINAL
REVISO	APROBO	FECHA	ACOT.	No.
M.C.D.D.	M.C.D.D.	--/--/--	SIN	

Capítulo 5. Especificación y arreglo preliminar de equipos

5.1 Especificación de equipos

La información de accesorios y tubería se tomaron de la bibliografía (Spears, 2013).

5.1.1 Tanque igualación (Figura 5.1)

El tanque de igualación es un tanque de marca Rotoplás 250L con las adecuaciones para las entradas y salidas necesarias como es el influente proveniente de la trampa de grasas, las demasías para evitar derrames y el efluente hacia el reactor aerobio. Además el tanque se encuentra a un desnivel de 20cm por debajo del suelo, mientras que la bomba se encuentra a 15cm. La entrada del agua residual (2"-PVC) se encuentra a 64cm desde la base del tanque mientras que la salida de demasías se encuentra a 59cm (1"-PVC). Con esto se asegura que primero se vaya el agua al drenaje antes de regresarse a la trampa de grasas en caso de exceso de flujo. El agua proveniente del retrolavado de los filtros se descarga en este tanque por la parte superior.

5.1.2 Bloque de tratamiento biológico (Figuras 5.2 y 5.3)

El bloque de tratamiento biológico está compuesto por el RAN-01, el RAE-01 y el CSS-01. EL módulo completo es de 0.82m x 2.07m x 2.22m. Todo el módulo está construido con fibra de vidrio, los accesorios de la tubería son de PVC industrial CD 40 y los soportes metálicos son de acero al carbón. Se puede construir con acero todo el sistema pero debe estar forrado de fibra de vidrio para evitar la corrosión del equipo. Todo el módulo tendrá una tapa de fibra de vidrio con el mínimo de espesor, su función es evitar la difusión de malos olores dentro de la panificadora. A elección del cliente se puede optar por un sistema de extracción de aire.

En todo el sistema el paso de un módulo a otro se lleva a cabo por medio de la gravedad. Para el reactor anaerobio el influente entra a una caja de distribución donde se divide el flujo en dos para poder distribuir bien el flujo dentro del reactor. El agua es enviada por mangueras distribuidas de manera uniforme dentro del reactor, las mangueras deben tener un diámetro amplio para evitar taponamientos. El área de recolección de biogás está ubicado a 1.59 metros desde la base del reactor, son 5 campanas en total con 90° de apertura. La cámara de biogás tiene una altura de 24cm y sobresale 11 cm de la pared externa del reactor. La tubería del biogás recolectado se manda hacia la calle.



El agua sale a otra caja de distribución donde existe un sello de agua de 10cm para evitar salida de biogás. Este sello se logra con un tubo de 2" que sobresale de la base de la caja y que, en total, tiene una altura de 20cm. La tubería se sumerge 44cm por debajo del nivel del agua. El efluente del reactor aerobio pasa directamente al clarificador secundario.

Las dimensiones de la base del clarificador son de 50cm x 80cm. El clarificador, como es rectangular, la tolva tiene dos pendientes, una de 70° para la vista frontal y 60° para la vista trasera, la altura es de 60cm. La altura de tramo recto es de 79cm. La salida del lodo es de 1" y se conecta de una manera especial con una toma de aire para el sistema "air lift". (ver detalle en planos) El clarificador es empacado por lo que existe una pequeña base de metal forrada de fibra de vidrio para poder colocar el empaque.

El lodo que regresa al RAE-01 entra en una tubería de 1" al principio del reactor. El lodo de purga es llevado a la caja de distribución del reactor anaerobio.

5.1.3 Tanque de recolección de sólidos

En este equipo se confinará el lodo de purga proveniente del reactor anaerobio y del clarificador secundario en caso de emergencias. Es un tanque vertical de 250L tipo Rotoplás. El tiempo exacto para que se pueda disponer del lodo es de 12.5 días. Para todos los tanques, con objeto de evitar derrames, como una medida de seguridad se ha diseñado una tubería de demasías, que va al drenaje.

5.1.4 Tanque de almacenamiento de agua tratada

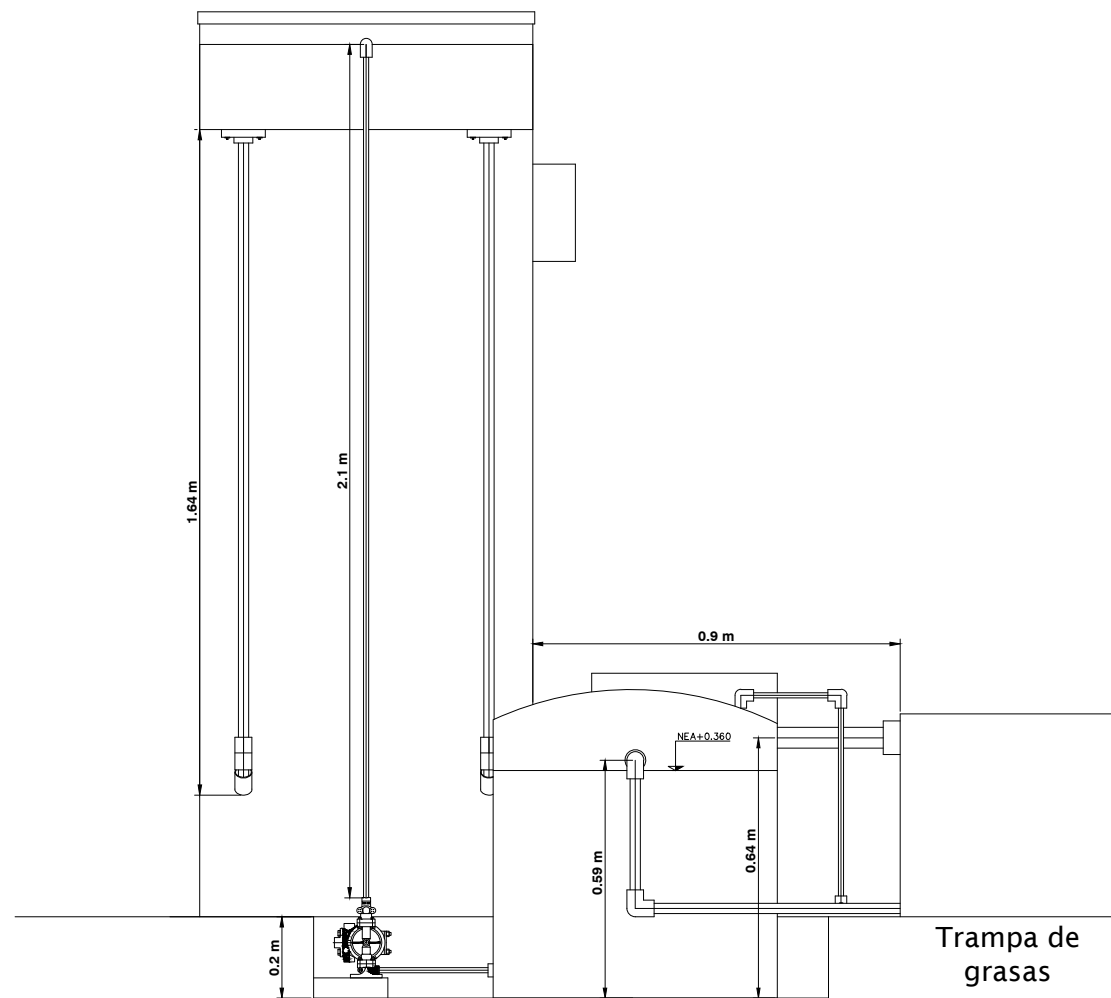
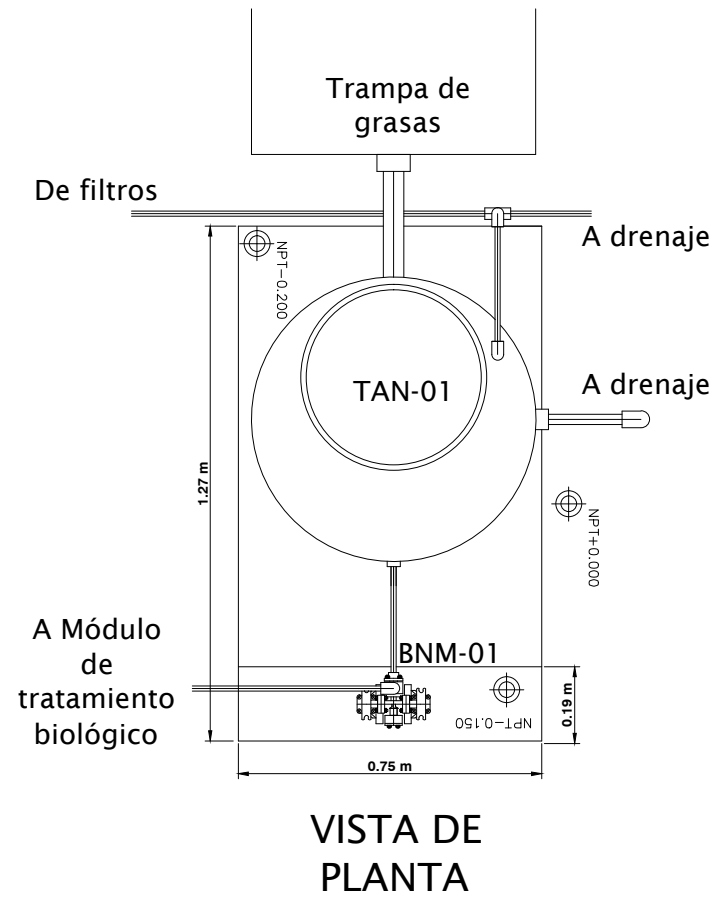
El volumen del tanque de almacenamiento de agua es de 1,100L, el tanque también contará con una tubería de demasías. La disposición del agua contenida en este tanque corre por cuenta de la panificadora.

5.2 Arreglo de equipos

En la Figura 5.4 se presenta el arreglo de equipo preliminar de los equipos más importantes para la depuración de las aguas residuales de la empresa en estudio.

Se propone un arreglo capaz de emplear la cantidad mínima de energía, así como el menor espacio posible.







VISTA LATERAL

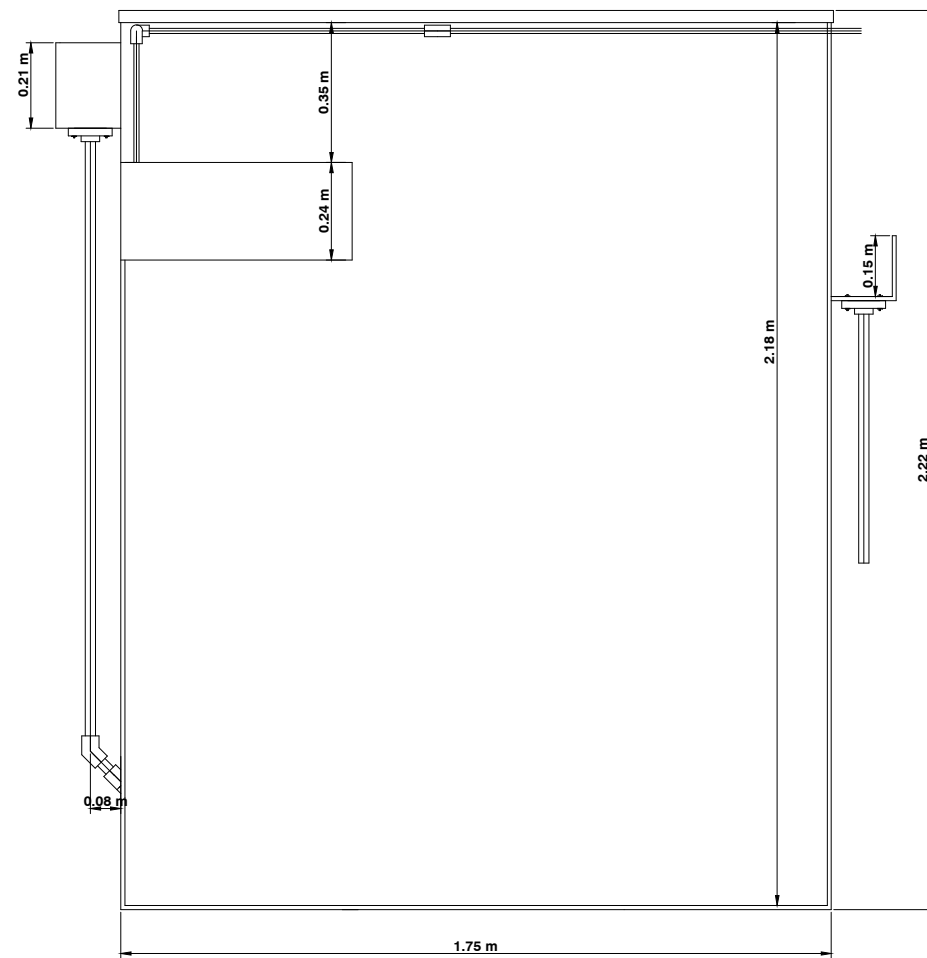
NOTAS

1.

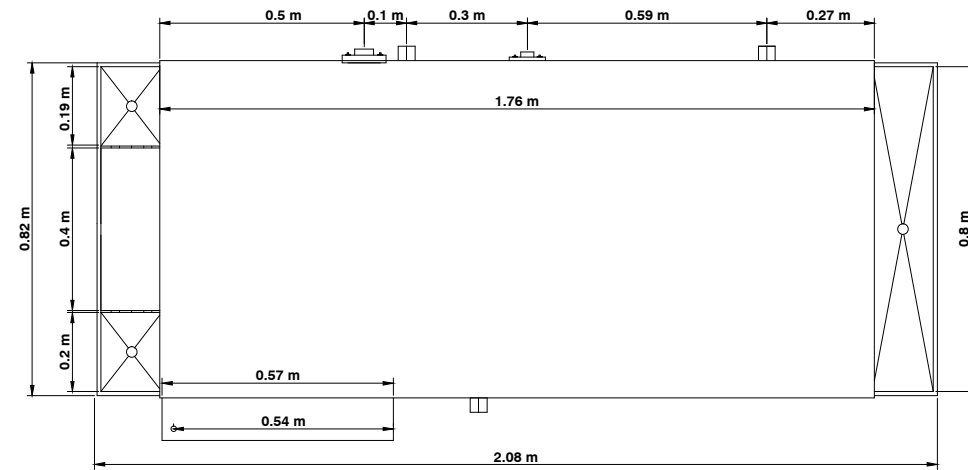
SIMBOLOGIA DE LINEAS

—	FIBRA DE VIDRIO
—	EQUIPO E INSTRUMENTACIÓN
—	COTAS
—	PVC
—	METAL

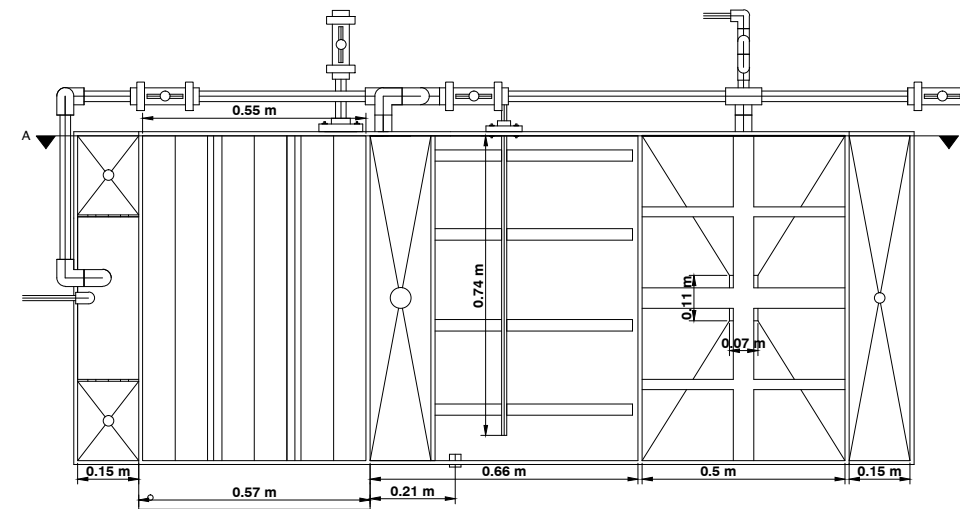
 UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO FACULTAD DE QUÍMICA Evaluación conceptual de una planta de tratamiento de aguas residuales de una empresa de alimentos				
				DESCRIPCIÓN
TAN-01 y BNM-01 FIGURA 5.1				
PROYECTO	DIBUJO /CAD/	FECHA	ESCALA	EDICIÓN
M.M.G.	M.M.G.	20/02/14	SIN	FINAL
REVISO	APROBO	FECHA	ACOT.	No.
M.C.D.D.	M.C.D.D.	--/--/--	SIN	



VISTA LATERAL



VISTA DE PLANTA



VISTA DE PLANTA S/TAPA

NOTAS

1.

SIMBOLOGIA DE LINEAS

- FIBRA DE VIDRIO
- EQUIPO E INSTRUMENTACIÓN
- COTAS
- PVC
- METAL



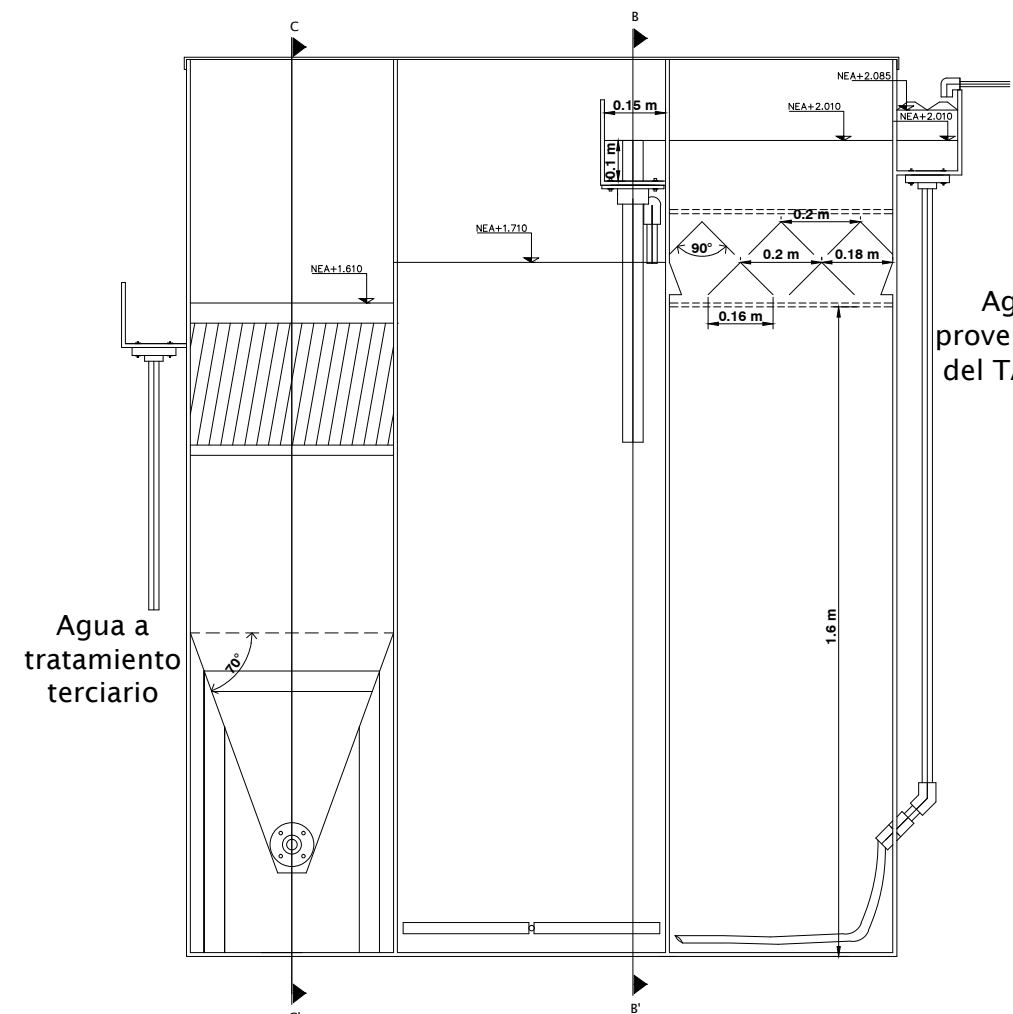
UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO
FACULTAD DE QUÍMICA
Evaluación conceptual de una planta de tratamiento
de aguas residuales de una empresa de alimentos



DESCRIPCIÓN

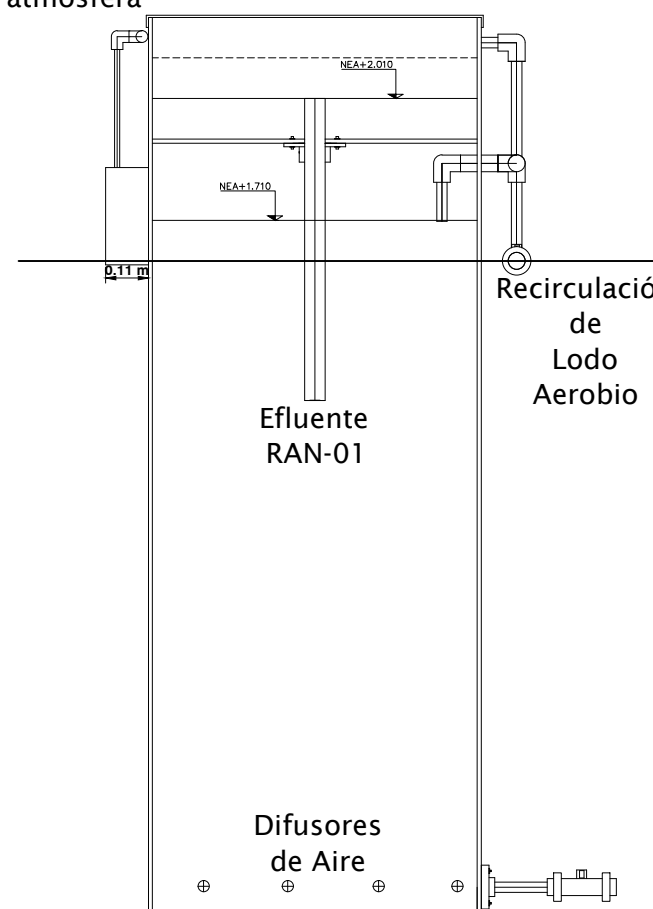
BLOQUE DE TRATAMIENTO BIOLÓGICO
(1/2) FIGURA 5.2

PROYECTO	DIBUJO /CAD/	FECHA	ESCALA	EDICIÓN
M.M.G.	M.M.G.	20/02/14	SIN	FINAL
REVISO	APROBO	FECHA	ACOT.	No.
M.C.D.D.	M.C.D.D.	--/--/--	SIN	

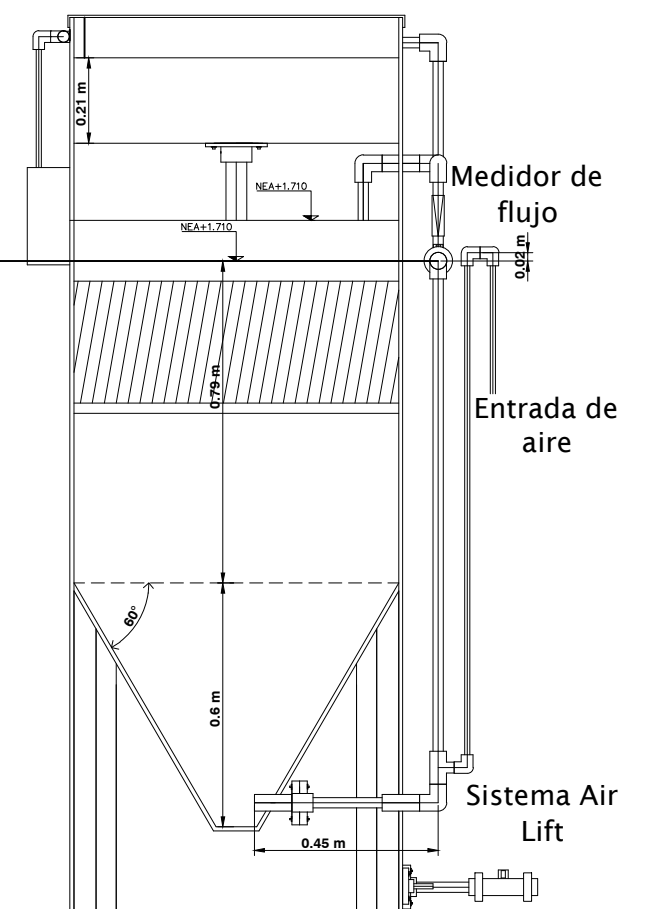


CORTE A-A'

Biogás a la atmósfera



CORTE B-B'





CORTE C-C'

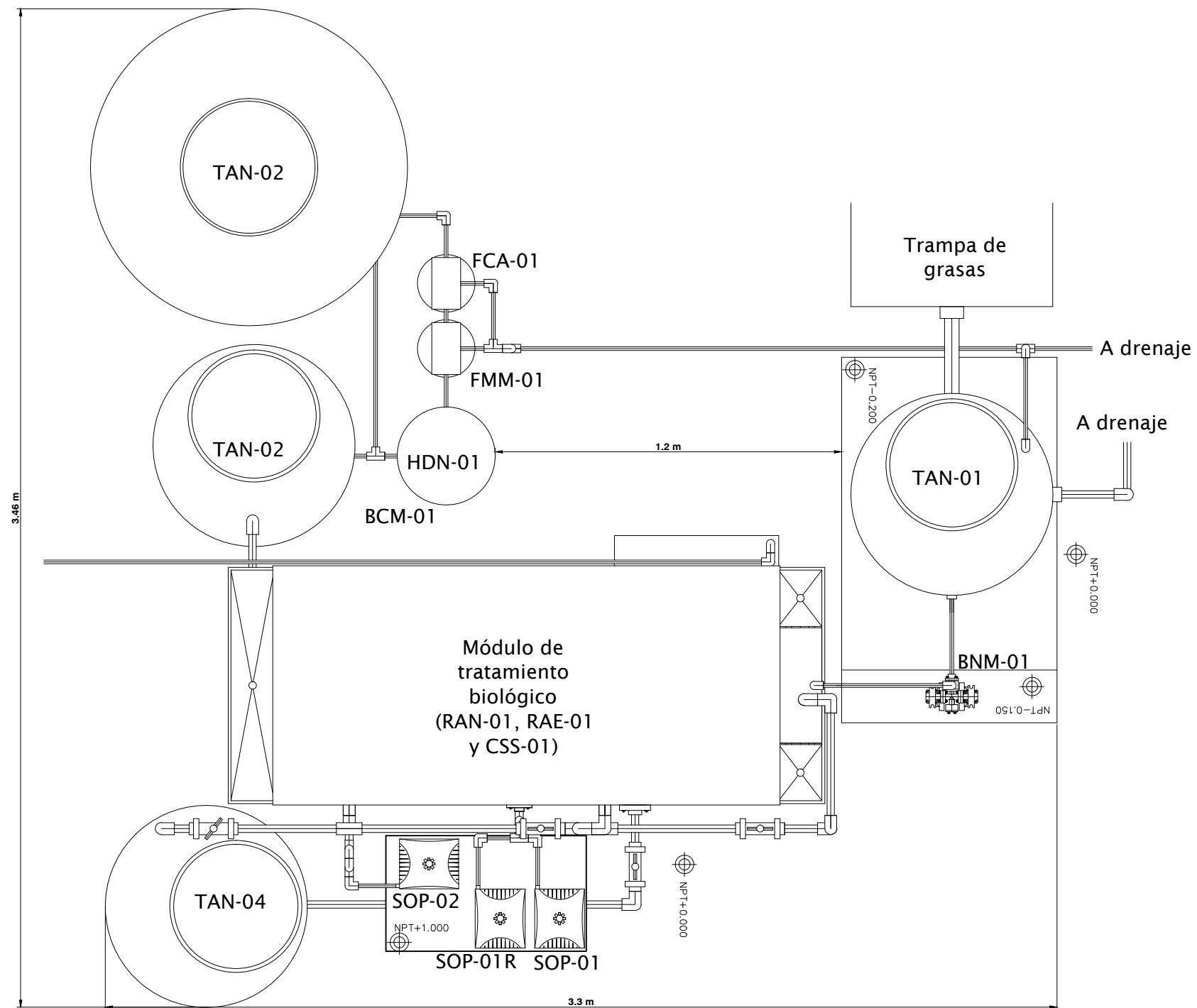
NOTAS

1.

SIMBOLOGIA DE LINEAS:

—	FIBRA DE VIDRIO
—	EQUIPO E INSTRUMENTACIÓN
—	COTAS
—	PVC
—	METAL

 UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO FACULTAD DE QUÍMICA Evaluación conceptual de una planta de tratamiento de aguas residuales de una empresa de alimentos				
DESCRIPCIÓN				
BLOQUE DE TRATAMIENTO BIOLÓGICO (2/2) FIGURA 5.3				
PROYECTO	DIBUJO /CAD/	FECHA	ESCALA	EDICIÓN
M.M.G.	M.M.G.	20/02/14	SIN	FINAL
REVISO	APROBO	FECHA	ACOT.	No.
M.C.D.D.	M.C.D.D.	--/--/--	SIN	



NOTAS

1.

SIMBOLOGIA DE LINEAS

- FIBRA DE VIDRIO
- EQUIPO E INSTRUMENTACIÓN
- COTAS
- PVC
- METAL



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO
FACULTAD DE QUÍMICA
Evaluación conceptual de una planta de tratamiento
de aguas residuales de una empresa de alimentos



DESCRIPCIÓN

ARREGLO GENERAL DE PLANTA
FIGURA 5.4

PROYECTO	DIBUJO /CAD/	FECHA	ESCALA	EDICIÓN
M.M.G.	M.M.G.	20/02/14	SIN	FINAL
REVISO	APROBO	FECHA	ACOT.	No.
M.C.D.D.	M.C.D.D.	--/--/--	SIN	

Capítulo 6. Evaluación económica preliminar del proyecto

6.1 Evaluación de inversión inicial preliminar

El costo total de la planta de tratamiento de agua se hará a partir del costo de equipo. Para el costo de equipo se tienen valores de diferentes años (2008, 2011 y 2013) por lo que se tiene que realizar una actualización basándose en los valores de INPC (Índice Nacional Precios al Consumidor) de cada año (Tabla 6.1).

Tabla 6.1. Valor de INPC para los años de estudio (SAT, 2013)

INPC 2008	89.093
INPC 2011	101.0416
INPC actual	109.328

El precio investigado para el soplador de aire marca Alita (ALITA, 2013) de 0.6HP es de \$1095.00 MNX, por lo que la actualización del precio se lleva de la siguiente manera:

$$Valor\ Presente = Valor\ original \cdot \frac{INPC_{actual}}{INPC_{pasado}} \quad (6.1)$$

$$Valor\ Presente = \$1095 \cdot \frac{109.328}{89.093} = \$1343.69 \quad (6.2)$$

De esta manera se obtiene la actualización de precios para los equipos encontrados con precios en moneda nacional. Para los equipos en que se encontró el precio es dólares se utilizaron los siguientes tipos de cambio para poder aplicar la fórmula 6.1 (Tabla 6.2).

Tabla 6.2. Tipo de cambio por año. (SAT, 2013)

Precio Dólar 2008	11.14MNX
Precio Dólar 2011	12.43MNX
Precio Dólar Octubre 2013	13.1024MNX

Sumando todos los precios actuales de los equipos a utilizar en la PTAR (Tabla 6.3), se tiene una inversión total de \$44,659.75 MNX.

Además del costo de equipo se considera también la fabricación del módulo de tratamiento biológico. Se calcula el área superficial total (Tabla 6.4) y se cotiza el valor de la fibra de vidrio en \$643.51/m² (Costonet, 2013).



Tabla 6.3. Precio de equipo

Equipo	Características principales	Precio	Unidad	Año	Precio (MXN)	Precio actual (MXN)
TAN-01	Tanque rotoplás 250L	699.00	MN	2013	699.00	699.00
TAN-02	Tanque rotoplás 250L	699.00	MN	2013	699.00	699.00
TAN-04	Tanque rotoplás 250L	699.00	MN	2013	699.00	699.00
BNM-01	Bomba neumática 0-15 L/min	541.00	USD	2011	6724.63	7276.12
SOP-01	Soplador Alita 0.06HP	1095.00	MN	2008	1095.00	1343.70
SOP-01R	Soplador Alita 0.06HP	1095.00	MN	2008	1095.00	1343.70
SOP-02	Soplador Alita 0.06HP	1095.00	MN	2008	1095.00	1343.70
DIF-01	8 Difusores tubulares 10"	192.00	USD	2008	2138.88	2624.67
BCM-01	Bomba centrífuga 1HP	400.00	USD	2008	4456.00	5468.06
HDN-01	Hidroneumático 24L	2346.00	MN	2013	2346.00	2346.00
FMM-01	Filtro multimedia	754.00	USD	2008	8399.56	9088.41
FCA-01	Filtro carbón activado	810.00	USD	2008	9023.40	9763.41
TAN-01	Tanque rotoplás 1100L	1965.00	MN	2013	1965.00	1965.00

Tabla 6.4. Medición del área superficial del módulo de tratamiento biológico

medidas m				m2	medidas m			m2
A	B	C	A		B	C		
Caja de distribución 1				0.273	Reactor aerobio			5.234
0.21	0.16	0.82	0.8		0.66	2.22		
Reactor anaerobio				6.539	Tolva			0.78
0.8	0.57	2.22	0.5		0.8	0.6		
Cámara de biogás				0.315	Pared clarificador secundario			3.996
0.57	0.11	0.24	0.8		2.22	0.5		
Tapa				1.598	Caja de distribución final			0.296
1.76	0.82	0.03	0.15		0.8	0.16		
Caja de distribución 2				0.375	Campanas			0.88
0.17	0.8	0.21	0.11		0.8	2		

En total son 20.29m². Utilizando un factor de 1.5 para contemplar el costo del empaque y del flete da como resultado un valor de \$19,585.23.

Para el cálculo total de la PTAR se utilizarán los factores de la Tabla 6.5 para considerar la instalación de equipo, tuberías, excavaciones, costos indirectos, etc., utilizando como referencia el costo total del equipo. Al valor calculado se le agregará el costo del módulo del tratamiento biológico.



Tabla 6.5. Cotización de la PTAR (Perry et al., 1997)

Partidas	Factor	Factor propuesto	Costo \$
Equipo entregado	1.00	1.00	44659.75
Instalado	0.27-0.47	0.27	12058.13
Tubería	0.66-1.20	0.66	29475.44
Instalación eléctrica	0.09 - 0.11	0.09	4019.38
Instrumentos	0.13	0.13	5805.77
Excavación	0.10	0.10	4465.98
Auxiliares	0.70	0.70	31261.83
Ingeniería	0.33	0.33	14737.72
Gastos indirectos	0.21	0.21	9378.55
Contingencias	0.42	0.42	18757.10

$$\text{Costo TOTAL} = \$174,619.62 + \$19,585.23 = \$194,204.85 \quad (6.3)$$

6.2 Estado financiero anualizado

Aspectos considerados en la operación de la planta:

- La planta operará 365 días al año. No se necesitará que exista una persona asignada especialmente para la operación, el trabajo puede ser realizado por las mismas personas que se encargan de la caldera y de los equipos de purificación del agua de proceso.
- Debido a que son procesos biológicos se requieren los servicios de un ingeniero químico para dar revisiones periódicas del funcionamiento de la planta. Los periodos de revisión serán bimestrales.
- Para los gastos considerados para mantenimiento y contratiempos se considerará el 5% del costo total de los equipos electromecánicos y del módulo de tratamiento biológico.
- El energético empleado es la electricidad para los sistemas de aire y de bombeo.

Costos fijos

$$1 \text{ ingeniero} = 6 \frac{\text{bimestres}}{\text{año}} \cdot \$1500 \frac{\text{consulta}}{\text{bimestre}} = \$9,000 \quad (6.4)$$



Contratiempos y mantenimiento. Se considera el 5% del costo de los equipos SOP-01, SOP-01R, SOP-02, HDN-01, BCM-01, FMM-01, FCA-01 y el módulo de tratamiento biológico.

$$\text{Contratiempos} = \$50,282.21 \cdot 0.05 = \$2,514.11 \quad (6.5)$$

Energía eléctrica. Se considera que la bomba y los filtros solamente trabajan 1/3 de jornada de 24 horas

$$\text{Consumo} = kW_{BCM-01} + kW_{SOP-01} + kW_{SOP-02} + kW_{filtros} = 0.3531 kWh \quad (6.6)$$

La tarifa para tensión baja es de \$1.741/kWh (CFE, 2013) por lo que el gasto anual de energía eléctrica sería el siguiente:

$$\text{Gasto anual} = 0.3531 \frac{KW}{h} \cdot \$1.741 \frac{\text{precio}}{KW} \cdot \frac{24h}{d} \cdot \frac{365d}{año} = \$5,385.18 \quad (6.7)$$

El gasto total anual que genera la PTAR es de \$16.899.29.

6.3 Evaluación económica del proyecto

Se ha considerado la tarifa de \$25.82/m³ (SACM, 2013) por lo que el ahorro máximo que genera la PTAR es de \$47,121.50 al año.

$$\text{Ahorro libre} = \text{Ahorro total} - \text{Costos de operación} = \$30,222.21 \quad (6.8)$$

$$\text{Recuperación de inversión} = \frac{\text{Costo total de la PTAR}}{\text{Ahorro libre anual}} = \frac{\$194,204.85}{\$30,222.21} = 6.4 \text{ años} \quad (6.9)$$



Capítulo 7. Seguridad en la planta

La seguridad debe tener una alta consideración en el diseño de plantas. La poca atención en el aspecto de la seguridad puede ser el causante de pérdidas tanto humanas como materiales. Por consiguiente se debe tener en mente el aspecto de la seguridad y diseñar todas las instalaciones con base en los principios que permitan una alta confiabilidad en la operación de todos los equipos.

7.1 Riesgos en plantas de proceso

Una evaluación de riesgo para una planta de proceso ocasionado por fuego, explosión y otros peligros requiere un estudio detenido de muchos factores como el sitio, estructura, distribución de la planta, materiales, procesos, manejo de materiales, capacitación de operadores, equipos y programas de prevención. Es necesario obtener información sobre los aspectos de la operación de la planta que contribuyan a situaciones peligrosas con el fin de llevar una buena apreciación de los problemas involucrados y de los métodos confiables de operación.

Los peligros que deben considerarse en el diseño de cualquier planta de proceso son de tres tipos: inflamables y explosivos, higiénicos y mecánicos.

La mayor parte de las plantas de proceso son peligrosas ya que en su funcionamiento están presentes una serie de equipos electromecánicos que ponen en riesgo a los operadores. Otro de los riesgos latentes en las plantas de proceso son el combustible, el aceite y aditivos para los equipos que son flamables. Cuando las plantas de proceso utilizan sustancias químicas el riesgo aumenta ya que varias de estas sustancias pueden ser explosivas además de flamables.

Es importante que las personas sepan que los sistemas anaerobios emiten no sólo sustancias flamables como es el metano sino que se obtienen por el proceso de degradación de la materia gases tóxicos como los sulfuros y el dióxido de carbono. La tubería que proviene de la cámara de biogás debe salir forzosamente a la intemperie y mediante un sistema seguro para que las personas no estén directamente expuestas al biogás.

Un cuidadoso diseño, combinado con un sistema de prevención de accidentes puede producir excelentes resultados de seguridad.



Las consideraciones de seguridad generalmente requeridas serán observadas tales como proceso, mecánica, instrumentación, eléctrica, civil y calentamiento, ventilación y aire acondicionado.

7.2 Factores de peligro en la planta de proceso

Los principales factores de peligrosidad en las plantas de proceso pueden resumirse así:

a) Problemas de localización de la planta

La planta está localizada en la parte posterior de la planta panificadora, su acceso es un poco complicado y la ventilación en el lugar es deficiente. En cuanto a la proximidad de servicios como agua potable no se tiene ningún problema por lo que de ser necesario se puede recurrir a este recurso sin ningún problema en caso de accidente.

b) Inadecuada distribución de la planta y de espacios

Debido al poco espacio con el que se cuenta, los equipos han tenido que quedar lo más cercano posible entre ellos, evitando así la colocación de pasillos amplios. Debido al tamaño de la planta esto no significa un problema mayor, pues se ha procurado dejar un espacio de trabajo en los lugares donde se requiere maniobras como la acción de válvulas y la instalación de equipos como bombas y sopladores.

c) Estructura e instalaciones en desacuerdo con el uso requerido

Los aspectos que tratan este punto pueden producirse bien sea por un desvío de los requerimientos de los códigos y normas con relación a las edificaciones, a los equipos, a las facilidades eléctricas, a los drenajes, etc. También es aplicable en carencia de soportes estructurales contra incendio en donde fuesen requeridos.

Aplicado propiamente al proceso planteado, por ningún motivo nadie puede utilizar los equipos como andamio, escalón o banco principalmente el módulo de tratamiento biológico.

d) Inadecuada evaluación de materiales

Éste es un aspecto común causante de accidentes y es mera responsabilidad del diseño de la planta. En este caso antes de llevar a cabo el proyecto es necesario revisar que el grosor de las paredes del módulo de tratamiento biológico es el adecuado. Así como se especificó en el diseño el equipo el material que se ha seleccionado es anticorrosivo para evitar fugas o en el peor de los casos derrames.



e) Fallas operacionales

Aunque en todos los proyectos debe contemplarse la elaboración de manuales de operación de la planta, no dejan de surgir inconvenientes por la falta de descripciones detalladas de operación de cada una de las secciones de la planta de proceso. Actualmente, la operación de las plantas de proceso es relegada a los sistemas computacionales y eléctricos, teniendo con esto apagadores de emergencia que evitan varios accidentes. Ahora los problemas operacionales están más relacionados con un mal mantenimiento de los sistemas eléctricos y una mala inspección y reposición de repuestos. Para este proyecto, además de los problemas inminentes como la función de bombas y sopladores, la mala operación de los sistemas biológicos pueden traer condiciones no deseadas en el producto final y con esto se puede poner en riesgo a cada una de las personas que harán uso del agua tratada.

f) Temperatura y presión

La temperatura es un factor de importancia en reacciones de proceso, en todo tipo de plantas industriales. Es regla general que un incremento en la temperatura ocasionará un aumento en la capacidad de la reacción. Esto mismo aplica para los sistemas biológicos. El mayor peligro se encuentra en el reactor anaerobio donde a mayor temperatura los sistemas biológicos aumenta su eficiencia (34°C y 55°C) y con esto aumenta la producción de biogás. La presión puede aumentar y con ello la cámara puede ceder en el mejor de los casos con fugas de biogás o con una violenta explosión. Para controlar lo expuesto se deben suministrar de manera adecuada los suficientes controles de presión en la planta y mantenerse en continuo control, con espesores suficientes y con sistemas de alivio incorporados que puedan absorber la sobrepresión en un momento dado. En este proyecto no se llegaron a dimensionar los equipos de acuerdo a los códigos de seguridad. Se deben realizar los cálculos de códigos como el ASME, ANSI y otros, en el ámbito de diseño de tanques a presión, así como la instrumentación y accesorios requeridos para el alivio de la presión de la cámara de biogás. Así mismo, no se especificó ningún sistema de seguridad para la tubería de biogás, que de manera correcta debe llevar al menos un arrastra-flama para evitar explosiones y un mechero para garantizar su conversión a CO₂, cuyo efecto invernadero es 20 veces menor que el del metano. No se plantea su reutilización porque el caudal obtenido es muy bajo.

Debe recordarse que el registro de seguridad de una planta depende de la distribución de sus diversas unidades y de la localización de los equipos dentro de ellas.



Los principales requerimientos de la implantación de plantas de procesos, desde el punto de vista de seguridad, pueden ser las siguientes:

1. Los elementos independientes, incluyendo unidades de proceso y áreas de almacenamiento, deberán ser lo suficientemente espaciados, para hacer que el fuego o una explosión en un elemento tenga un mínimo efecto en las unidades vecinas.
2. Un sistema de bloque rectangular o en manzanas, como en las ciudades, es recomendado para plantas de proceso, así como el diseño de vías entre unidades de la planta, tanques de almacenamiento y edificaciones. Es aconsejable evitar calles cerradas que impidan el acceso de cualquier parte de la planta por dos vías diferentes.
3. Es conveniente diseñar el sistema de agua para suministrar una adecuada protección contra el fuego en todas las zonas de la planta. En plantas pequeñas, un ramal grande cerrado de líneas de tubería, puede recorrer la totalidad de la planta con conexiones cruzadas que pasen por entre las unidades que deben ser protegidas.
4. Los elementos críticos e importantes de la planta, es decir, las unidades de proceso, las plantas de potencia o cuartos de control, pueden diseñarse con el máximo de protección a través de una especial localización con espacio extra y una construcción resistente a la explosión o con adecuadas barricadas.
5. Los servicios tales como vapor, gas, electricidad y agua, deberán protegerse debidamente para que puedan ser siempre utilizados aún en casos de emergencia.

Por último hay que mencionar que una planta de proceso debe contener una adecuada señalización ya que va de la mano de un buen diseño y una buena capacitación. Para cada una de las señalizaciones existen normas para tamaños y colores.



Capítulo 8. Conclusiones y recomendaciones

8.1 Conclusiones

Considerando el objetivo del proyecto, que era el de realizar un diseño económicamente factible, compacto y versátil de una planta de tratamiento de las aguas residuales de proceso de una empresa panificadora cooperante, buscando que el diseño fuera técnicamente el adecuado para el tratamiento específico de ese tipo de agua residual, ocupando la menor cantidad de equipos posibles y considerando, tanto su funcionalidad como un bajo costo de operación, a continuación se presentan las conclusiones de esta investigación.

Es importante crear en las personas una conciencia sobre la situación mundial del agua. Muchas veces las empresas solamente buscan beneficios económicos sin importar los agravios ambientales que puedan provocar con los procesos que realizan. Sin embargo, un tema poco explotado es que muchas veces la protección al ambiente puede generar ahorros significantes a las empresas.

En este proyecto se ha desarrollado una PTAR con sistemas biológicos a fin de evitar que los gastos de operación sean altos, al utilizar un sistema combinado anaerobio-aerobio se reduce la demanda de aire para el sistema aerobio generando un ahorro y, de esta manera, la planta ha resultado una inversión factible para la panificadora cooperante recuperando el costo de inversión en poco más de 6 años.

Además de la reutilización del agua tratada para beneficio de la propia empresa se tiene aún como aporte económico del lodo anaerobio que con su apropiada estabilización puede ser vendido como inóculo para otros reactores. En caso de tener mayores excedentes pueden venderse como fuente proteínica para peces (Durán-Domínguez et al., 1991) o como mejorador de suelo, lo cual se considera un nuevo ingreso para la planta panificadora y un beneficio al ambiente. Otro beneficio que no se ha contabilizado pero que significa un gran ahorro es el pago de multas pues el parámetro de grasas y aceites, G y A, siempre está fuera de rango.

Este tipo de proyectos pocas veces quedan al alcance de las pequeñas y medianas empresas por no tener la facilidad de obtener un enfoque costo-beneficio satisfactorio. Si este tipo de proyectos se expandieran para las demás empresas se podrían dar a conocer los beneficios ambientales y económicos que se generarían dando como resultado una mejor conciencia del cuidado del agua con beneficio para ambas partes.



La mayor ventaja que se generaría de ser construida la PTAR en la planta panificadora cooperante no sería solamente el ahorro económico sino también la disminución de una fuente contaminante en la Ciudad de México.

8.2 Recomendaciones

Si la empresa cooperante considera un beneficio la inversión en una planta de tratamiento de agua residual para su agua de proceso, se requiere la contratación de un equipo especializado que lleve a cabo la ingeniería de detalle y la construcción de la misma.

Durante el periodo de construcción es importante mantener el área de trabajo limpia debido a la cercanía de la PTAR con el área de manufactura de los productos alimenticios. Debido a esto se recomienda que las bases de metal y el módulo de tratamiento biológico sean construidos en un taller ajeno a las instalaciones de la panificadora y que en el área reservada solamente se lleven a cabo labores de instalación.

Una vez finalizada la construcción e instalación de la planta es necesario llevar a cabo pruebas con agua limpia⁶ para verificar que no existan fugas y que se lleve de manera correcta el funcionamiento de los equipos electromecánicos. Si no se lleva a cabo este periodo de pruebas y de existir fugas o fallas será más difícil poder repararlas una vez que empiece a operar la PTAR.

Ya finalizado el periodo de pruebas y solucionadas todas las posibles fallas se puede comenzar con la operación de la planta. Las plantas de tratamiento de agua residual que tienen unidades biológicas tienen un periodo de arranque en donde se alcanza la cantidad óptima de microorganismos (lodo) y a su vez estos se acondicionan al sustrato. El tiempo que dure esta etapa dependerá de la inversión que se esté dispuesto a realizar.

Se puede comenzar a operar la planta desde cero, mientras los microorganismos se van reproduciendo y acondicionando. El flujo se va suministrando de manera paulatina y, cuando se obtengan las condiciones de operación necesarias, el flujo de agua a tratar será el de diseño. Por otro lado, se puede invertir en cierta parte del lodo de inóculo de

⁶ El término de agua limpia es usado para diferenciar el agua residual del agua potable o el agua tratada. Se recomienda que el agua a utilizar en las etapas de pruebas sea agua tratada a fin de evitar el desperdicio de agua potable



cada reactor y de esta manera acortar el tiempo de arranque. Esta última recomendación está enfocada principalmente al sistema anaerobio debido a que los microorganismos se reproducen con menor rapidez que los aerobios.

El control de la fase de arranque se tiene que llevar por medio de análisis de laboratorio, su interpretación y decisiones referentes a la operación de la PTAR serán exclusivas de algún experto. Este mismo experto evaluará cuando la PTAR opera de manera normal y estable, dado el visto bueno a la operación de la PTAR pudiendo entonces pasar la responsabilidad al personal, previamente capacitado, de la empresa cooperante. El experto deberá realizar revisiones de manera periódica sobre el adecuado funcionamiento de la planta.



Bibliografía

- ALITA. 2013. Alita Industries – Linear air pumps and vacuum pumpsPágina electrónica: <http://www.alita.com/>
- CASTRO-GONZÁLEZ, A., DURÁN-DE-BAZÚA, C. 2002. Procesos de separación: Aplicaciones para la cuantificación de biogases producidos en reactores anaerobios. *Tecnol. Ciencia Ed. (IMIQ)*, 17(2):84-94.
- CFE. 2013. Comisión Federal de Electricidad. Página electrónica: www.cfe.gob.mx
- CHEN, Y., CHENG, J. J., CREAMER, K.S. 2008. Inhibition of anaerobic digestion process: A review. *Bioresource Technology*. 99(10):4044-4064.
- Conagua. 2011. Página electrónica: www.cna.gob.mx
- CostoNet: Sistema de Información de costos. 2013. Página electrónica: www.costonet.com.mx
- DOF. 1992. Norma Mexicana NMX-F-521-1992. Alimentos – productos de panificación – clasificación y definiciones.
- DOF. 1996. Norma Oficial Mexicana NOM-001-SEMARNAT-1996. Que establece los límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales en aguas y bienes nacionales.
- DOF. 1996. Norma Oficial Mexicana NOM-002-SEMARNAT-1996. Que establece los límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales a los sistemas de alcantarillado urbano o municipal.
- DOF. 1997. Norma Oficial Mexicana NOM-003-SEMARNAT-1997. Que establece los límites máximos permisibles de contaminantes para las aguas residuales tratadas que se “reúsen” en servicios al público.
- DOF. 2002. Norma Oficial Mexicana NOM-004-SEMARNAT-2002. Especificaciones y límites máximos permisibles de contaminantes para su aprovechamiento y disposición final.
- DURÁN-DOMÍNGUEZ, M.C., PEDROZA-ISLAS, R., ROSAS-VÁZQUEZ, C., LUNA-PABELLO, V.M., SÁNCHEZ-ZAMORA, A., CAPILLA-RIVERA, A., PAREDES-GÓMEZ, L., VALDERRAMA-HERRERA, S.B., VÁZQUEZ-CEDEÑO, I. 1991. Producción de alimentos para peces. Utilización de subproductos del tratamiento de aguas residuales. En *Premio Nacional Serfin El Medio Ambiente*. José Juan De Olloqui, Ed. Pub. Futura Eds., Pp. 79-106. Villa Nicolás Romero, Méx., México.
- HERNANDEZ-MUÑOZ, A. 1990. Depuración de aguas residuales. Colegio de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos. Demarcación de Andalucía. España.



- HERNÁNDEZ-MORALES, M. R. 2005. Evaluación técnico-económica y de factibilidad para la instalación de una planta de tratamiento de aguas residuales de una empresa que produce masas y harinas de maíz nixtamalizado. Tesis profesional. UNAM, Facultad de Química. México D.F. México
- INEGI. 2011. Página electrónica: www.inegi.gob.mx
- MARIN R. 1995. Análisis de aguas y ensayo de tratamiento: principios y aplicaciones. GEPESA Barcelona. España.
- METCALF & EDDY INC. 2003. Wastewater Engineering. Treatment, disposal, reuse. McGraw-Hill, USA.
- ORTIZ, J.A. 2008. Apuntes de la clase de Ingeniería de proyectos. UNAM, Facultad de Química. D.F. México.
- PERRY, R. H.; GREEN, D.W.; MALONEY, J.O. 1997. "Manual del ingeniero químico", 6ª ed., McGraw-Hill, México.
- RAMALHO, R. S. 1991. Tratamiento de aguas residuales. Editorial Reverté, S.A. Barcelona, España.
- ROTOPLÁS. 2013. Página electrónica: <http://www.rotoplas.com>
- SAT. 2013. Sistema de Administración Tributaria. Página electrónica: www.sat.gob.mx
- SHARMA, A. 2014. Design operation of UASB reactors. Página electrónica: <http://es.scribd.com/doc/19374700/Design-Operation-of-Uasb-Reactor>
- SACM. 2013. Sistema de Aguas de la Ciudad de México. Página electrónica: <http://www.sacm.df.gob.mx>
- SPEARS. 2013. Spears Manufacturing, PVC & CPVC plastic pipe fittings & valves. Página electrónica: www.spearsmfg.com
- UNESCO. 2011. Water Development Report, 2006. Página electrónica: www.unesco.org
- WEF. 1998. WATER ENVIROMENT FEDERATION. Biological and Chemical Systems for Nutrient Removal. USA.

