



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA  
DE MÉXICO**

---

---

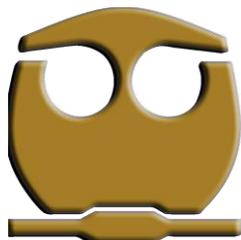
**FACULTAD DE QUIMICA**

**EVALUACIÓN DEL DESEMPEÑO TÉCNICO Y  
ECONÓMICO DE PLANTAS DE TRATAMIENTO  
DE AGUAS RESIDUALES INDUSTRIALES**

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

**PRESENTA**

**GLORIA ERIKA RUIZ ROMÁN**



**México D.F. 2015**



Universidad Nacional  
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

**Biblioteca Central**



**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: JOSÉ ANTONIO ORTIZ RAMÍREZ  
VOCAL: ALFONSO DURÁN MORENO  
SECRETARIO: FEDERICO CARLOS HERNÁNDEZ CHAVARRÍA  
1er. SUPLENTE: JOSÉ AGUSTÍN GARCÍA REYNOSO  
2do. SUPLENTE: GEMA LUZ ANDRACA AYALA

Sitio donde se desarrolló el tema:

Unidad de Proyectos y de Investigación en Ingeniería Ambiental, Facultad  
de Química, 3er. Piso, Ala Sur Torre de Ingeniería, Ciudad de México

ASESOR DEL TEMA:

\_\_\_\_\_

Dr. Alfonso Durán Moreno

SUSTENTANTE:

\_\_\_\_\_

Gloria Erika Ruiz Román





## Abreviaturas

BANXICO	Banco de México
DAF	Sistema de Flotación por Aire Disuelto
DBO	Demanda Biológica de Oxígeno
DQO	Demanda Química de Oxígeno
INPC	Índice Nacional de Precios al Consumidor
NA	No aplica
ND	No disponible
NOM	Norma Oficial Mexicana
pH	Potencial de Hidrógeno
PPI	Producer Price Index
ppm	Partes por millón
PTAR	Planta de Tratamiento de Aguas Residuales
SD	Sin dato
SEMARNAT	Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales
SMG	Salario mínimo General
SNR	Sistema Nacional de Refinación
TB	Tasa Base
TC	Tipo de Cambio
TI	Tasa de Interés
TT	Técnica de Tratamiento



# Evaluación del desempeño técnico y económico de plantas de tratamiento de aguas residuales industriales

## ÍNDICE

1. Resumen.....	9
2. Introducción.....	10
2.1. Justificación .....	10
2.2. Objetivo General .....	11
2.3. Objetivos específicos .....	11
2.4. Alcances .....	12
3. Marco teórico .....	13
3.1. Usos del agua en la industria.....	13
3.2. Parámetros de calidad de agua y de aguas residuales.....	15
3.3. Marco normativo en materia de agua y de aguas residuales.....	17
3.4. Plantas de tratamiento de aguas residuales .....	19
3.4.1. Pretratamiento .....	20
3.4.2. Tratamiento Primario .....	21
3.4.3. Tratamiento Secundario .....	21
3.4.4. Tratamiento Terciario o avanzado .....	22
3.4.5. Tratamiento de lodos .....	24
3.4.6. Eficiencia de los procesos .....	27
3.5. Problemas comunes de operación en PTAR .....	30
4. Evaluación técnica de PTAR.....	33
4.1. Revisión documental y de campo .....	33
4.1.1. Balances de materia .....	34
4.1.2. Eficiencias de tratamiento etapa por etapa.....	39
4.1.3. Consumo de reactivos .....	41
4.1.4. Consumo energético.....	42
4.1.5. Instalaciones principales.....	43
4.1.6. Equipos electromecánicos .....	44
4.1.7. Instrumentación y control.....	48
4.1.8. Residuos.....	49
4.2. Comparación de condición actual contra diseño.....	50





## Evaluación del desempeño técnico y económico de plantas de tratamiento de aguas residuales industriales

---

4.3.	Metodología para la evaluación técnica .....	51
5.	Evaluación ambiental de PTAR.....	54
5.1.	Revisión documental.....	54
5.1.1.	Propuestas de mitigación .....	59
5.2.	Metodología para la evaluación ambiental.....	60
6.	Evaluación de los costos de la PTAR .....	62
6.1.	Revisión documental.....	62
6.1.1.	Tarifa de Inversión (TI) .....	63
6.1.2.	Tarifa Financiera (TF).....	65
6.1.3.	Tarifa de Operación Fija (TO).....	66
6.1.4.	Tarifa de Operación Variable (TV).....	68
6.2.	Complemento de la evaluación.....	69
6.3.	Indicadores de la PTAR .....	70
6.4.	Metodología para la evaluación de costos .....	72
7.	Caso de estudio .....	74
7.1.	Evaluación técnica .....	75
7.2.	Evaluación ambiental .....	78
7.3.	Evaluación de los costos.....	80
8.	Análisis.....	84
9.	Conclusión .....	86
10.	Bibliografía .....	87
11.	Anexos .....	90





**Índice de Tablas**

Tabla 1.	Parámetros para la caracterización del agua (Jiménez, 2001) .....	17
Tabla 2.	Clasificación según la medida del contaminante (Jiménez, 2001).....	17
Tabla 3.	Normatividad de México (SEMARNAT, 2012) .....	18
Tabla 4.	Función del tratamiento preliminar (Rojas, 2002) .....	21
Tabla 5.	Tratamientos para la estabilización de lodos (Comisión Estatal del Agua de Jalisco, 2013) (Donate, s.f.).....	26
Tabla 6.	Eficiencia de los procesos de tratamiento de aguas residuales (Pintado, 2014)	28
Tabla 7.	Consideraciones para la revisión documental de una PTAR .....	34
Tabla 8.	Balance general del ejemplo de la PTAR .....	37
Tabla 9.	Normas Oficiales Mexicanas aplicables a equipos electromecánicos en PTAR	47
Tabla 10.	Matriz de identificación de problemas.....	53
Tabla 11.	Lista de indicadores de impacto (AMCA Sistemas, 2010) (SEMARNAT, 2014) .....	58
Tabla 12.	Actualización de la Tarifa Financiera .....	65
Tabla 13.	Actualización de la Tarifa de Operación Fija .....	67
Tabla 14.	Consumo de energía eléctrica en la PTAR (PEMEX, 2014).....	76
Tabla 15.	Residuos generados por la PTAR (PEMEX, 2014).....	77
Tabla 16.	Evaluación de los factores en la PTAR.....	79
Tabla 17.	Monto de las tarifas durante el funcionamiento de la PTAR (PEMEX, 2014)	82



## Índice de Figuras

Figura 1. Consumo de agua en la industrial (Cisneros, 2012).....	14
Figura 2. Variación del caudal en aguas tratadas (m <sup>3</sup> /s) (INEGI, 2013).....	15
Figura 3. Esquema general de tren en PTAR (Rojas, 2002) .....	20
Figura 4. Clasificación típica de los procesos de tratamiento de aguas residuales	23
Figura 5. Esquema general de un sistema de tratamiento de lodos (Comisión Estatad del Agua de Jalisco, 2013) .....	24
Figura 6. Inventario de PTAR en México (SEMARNAT, 2014) .....	31
Figura 7. Diagrama de Bloques de proceso (ejemplo) .....	36
Figura 8. Curva de eficiencia para el conjunto bomba-motor .....	47
Figura 9. Metodología para la identificación y solución de problemas técnicos de una PTAR.....	52
Figura 10. Esquema para la evaluación del impacto ambiental (Cisneros, 2012) .	56
Figura 11. Metodología para la identificación y solución de problemas ambientales de una PTAR.....	61
Figura 12. Composición del capital de la PTAR (Silvenses, 2009).....	64
Figura 13. Comparación de tarifas en PTAR (Vanrolleghem, 1996) .....	69
Figura 14. Comportamiento del consumo eléctrico al cambiar el volumen tratado	71
Figura 15. Comportamiento de la energía eléctrica por m <sup>3</sup> tratado al modificar el volumen tratado.....	72
Figura 16. Metodología para la identificación y solución de problemas en los costos de una PTAR (Instituto Mexicano de Tecnología del Agua).....	73
Figura 17. Ubicación de la PTAR .....	74
Figura 18. Datos históricos del flujo de la PTAR (PEMEX, 2014) .....	75
Figura 19. Parámetros fuera de lo especificado (PEMEX, 2014) .....	77
Figura 20. Históricos anuales de de las Tarifas establecidas (PEMEX, 2014) .....	81
Figura 21. Análisis de los costos de la PTAR (PEMEX, 2014) (Vanrolleghem, 1996) .....	83



### **1. RESUMEN**

---

En el presente trabajo de tesis se elaboró una estrategia para llevar a cabo una evaluación de plantas de tratamiento de aguas residuales industriales, mediante el uso de metodologías de evaluación de proyectos, evaluación diagnóstica de procesos y evaluación de impacto ambiental para definir el esquema más adecuado de funcionamiento; considerando las problemáticas más frecuentes y las normatividades vigentes de nuestro país. Esto surge de la importancia en la reutilización de aguas residuales como fuente alternativa de recursos en la industria, la cual ha ido en aumento con el paso del tiempo.

Para el análisis del caso de estudio se utiliza la metodología presentada a continuación, considerando una planta de tratamiento de aguas residuales, la cual se encarga de tratar agua proveniente de una refinería de petróleo.

Aplicando conceptos básicos de Ingeniería de Proyectos y Tratamiento de Aguas, se evaluó el tren de tratamiento considerando aspectos técnicos, ambientales y económicos.

La metodología a seguir incluyó visitas de campo y datos de la planta, para estos últimos tomando en cuenta tanto datos de diseño como de operación actual, con el fin de obtener un diagnóstico del estado con el que opera la planta, reconociendo deficiencias dentro de la misma.



---

## **2. INTRODUCCIÓN**

---

---

### **2.1. Justificación**

---

El agua potable es un recurso indispensable cuya disponibilidad ha disminuido en los últimos años debido al incremento de la población, la cual únicamente para el caso de México ha crecido cinco veces; en 1950 había 25.8 millones de personas, mientras que en 2010 contaba con un total de 112.3 millones (INEGI, 2014); debido a esto, los esfuerzos para que no se agote se han incrementado a nivel mundial. Hoy en día, gran parte del agua potable destinada a los seres humanos es consumida por la industria; ya que requiere cantidades variables tanto para la fabricación de productos como para la eliminación de los contaminantes que produce.

Debido a las especificaciones necesarias de calidad en aguas residuales generadas por las industrias, se han implementado plantas de tratamiento con la finalidad de disminuir el impacto ambiental y las problemáticas asociadas a sus efluentes; además dichas plantas generan un beneficio económico, ya que el agua proveniente de ellas puede ser reutilizada; sin embargo, en muchos casos estas plantas no operan eficientemente, lo cual deriva en incumplimiento en la calidad de agua tratada, en gastos de operación excesivos debido a una mala operación y/o mantenimiento inadecuado, entre otros.

El uso de agua tratada debe ser una prioridad en las industrias mexicanas tanto por cuestiones de tipo económico como ambiental. La normatividad mexicana en materia de descarga de aguas residuales obliga a que las industrias tengan un sistema de tratamiento de aguas residuales para su descarga o reúso.



## Evaluación del desempeño técnico y económico de plantas de tratamiento de aguas residuales industriales

---

Actualmente no existe una metodología que conjunte todas las evaluaciones que se deben llevar a cabo durante el diagnóstico de una PTAR, en las cual se involucren los aspectos técnicos, ambientales y económicos; debido a lo que las evaluaciones realizadas tienen divergencia en los procedimientos aplicados; por tal motivo se plantea una propuesta que contenga elementos mejor soportados.

La implementación de una metodología para la evaluación del desempeño de una Planta de Tratamiento de Aguas Residuales (PTAR) permite detectar áreas de oportunidad con el fin de incrementar el tiempo de operación de la planta, eficiencia de los tratamientos y mejorar su rentabilidad con un cuidado al medio ambiente.

La finalidad del presente trabajo es establecer una metodología de evaluación de plantas de tratamiento de aguas residuales industriales, con la intención de que las plantas diagnosticadas disminuyan los impactos ambientales negativos de la industria y al mismo tiempo generen beneficios económicos.

---

### **2.2. Objetivo General**

---

Elaborar una estrategia de evaluación para Plantas de Tratamiento de Aguas Residuales industriales, mediante el establecimiento de metodologías que involucren aspectos técnicos, ambientales y económicos; con el fin de optimizar su operación en términos de la eficiencia, cumplir con la normatividad ambiental aplicable y mejorar la rentabilidad.

---

### **2.3. Objetivos específicos**

---

- Llevar a cabo una investigación en medios especializados sobre la normatividad actual de una PTAR para establecer las mejores prácticas.





## Evaluación del desempeño técnico y económico de plantas de tratamiento de aguas residuales industriales

---

- Elaborar metodologías técnicas, ambientales y económicas por medio de los parámetros clave de operación.
- Analizar la situación actual de una Planta de Tratamiento de Agua Residual, por medio de la metodología propuesta, para validar la operación de la planta.

---

### 2.4. Alcances

---

Por medio de la revisión bibliográfica en medios especializados se identifica la normatividad aplicable en materia de tratamientos de agua residual en la industria, identificando las secretarías responsables, para establecer las mejores prácticas.

El propósito de la revisión de plantas que se encuentran registradas en nuestro país, es identificar los factores clave de la operación considerando aspectos técnicos, ambientales y económicos, con el fin de proponer una metodología para el diagnóstico general de una PTAR.

El diagnóstico integral de una PTAR que se encuentra operando actualmente se realiza por medio de las metodologías de evaluación propuestas para la validación de su operación.





---

### **3. MARCO TEÓRICO**

---

#### **3.1. Usos del agua en la industria**

---

El agua potable es un recurso limitado cuya disponibilidad es cada vez menor. El volumen existente de este recurso llega a provocar, en zonas con escasez, problemáticas debidas a la necesidad de satisfacer la demanda hídrica tanto de la industria como de la población. En la industria se llevan a cabo una gran variedad de procesos, los cuales utilizan cantidades variables de agua. El volumen de agua utilizada depende de los tipos de procesos que se llevan a cabo y de la capacidad de cada una de las plantas existentes.

El agua puede ser utilizada por la industria de manera indirecta en operaciones de la limpieza, en servicios auxiliares, para la transportación de sustancias o partículas, en cuestiones de seguridad; o bien, puede ser utilizada de forma directa como parte esencial del proceso, lo cual sería el caso de utilizarla como materia prima o disolvente; en la Figura 1 se muestran las industrias que presentan mayor consumo de agua.



## Evaluación del desempeño técnico y económico de plantas de tratamiento de aguas residuales industriales

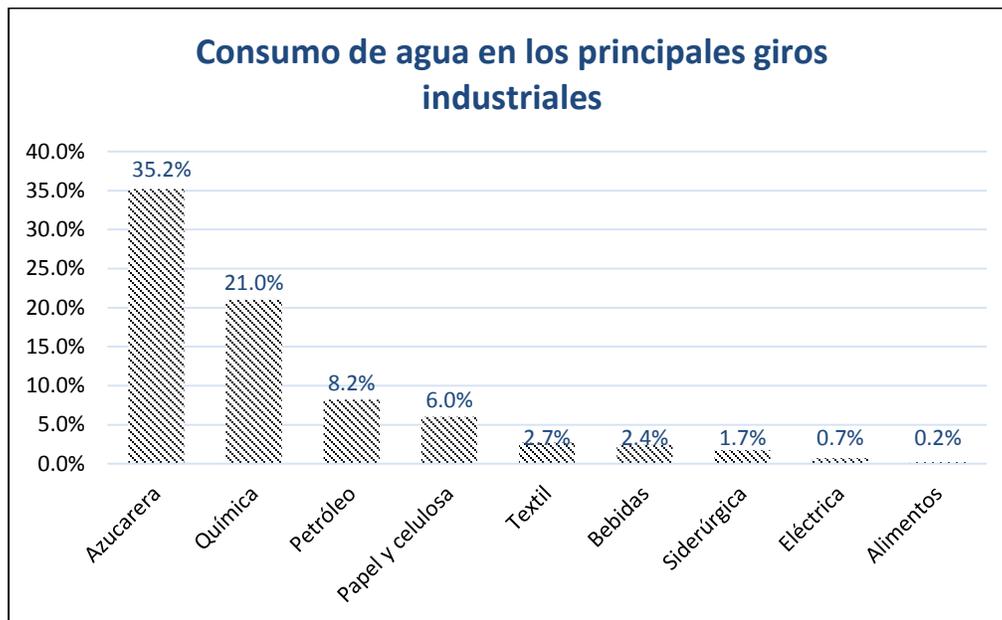


Figura 1. Consumo de agua en la industrial (Cisneros, 2012)

Estudios realizados por UNESCO, revelan que el volumen anual de agua utilizada por la industria aumentará de los  $752 * 10^9$  m<sup>3</sup>/año en 1995 a unos  $1.17 * 10^9$  m<sup>3</sup>/año en 2025, lo cual representaría el 24% del total de extracciones de agua dulce. (Consejo Consultivo del agua, A.C., 2014).

Además de utilizar grandes volúmenes de agua, la industria genera efluentes con contaminantes peligrosos (por ejemplo: fenoles y metales pesados), que deben ser removidos para evitar ocasionar impactos negativos en los cuerpos receptores de agua y en su caso, permitir el reúso de este recurso.

La operación de PTAR se considera una necesidad para controlar y disminuir la contaminación del agua, reduciendo a su vez el volumen del líquido consumido; de esta manera se logra una reducción de los costos para entidades gubernamentales y al mismo tiempo se reduce el impacto ambiental negativo.



## Evaluación del desempeño técnico y económico de plantas de tratamiento de aguas residuales industriales

El tratamiento de aguas residuales se ha convertido en una prioridad dentro de las políticas en México, ya que por medio de estas plantas se lograron avances importantes dentro de la economía del país. En la Figura 2 se muestra el incremento del caudal tratado diariamente en los estados de la República Mexicana.

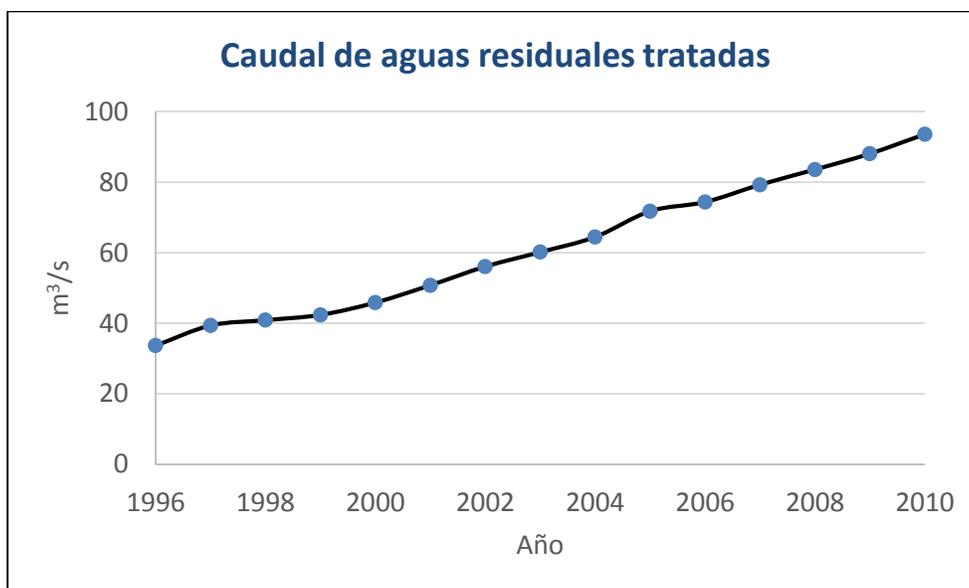


Figura 2. Variación del caudal en aguas tratadas (m<sup>3</sup>/s) (INEGI, 2013)

Algunos de los usos que se puede dar al agua proveniente de PTAR para el consumo industrial, son el 50% para enfriamiento, 35% en proceso, 10% en servicios y 5% en calderas (Cisneros, 2012); sin embargo en la mayoría de los casos el agua es tratada únicamente con el propósito de cumplir con la normatividad para su descarga en cuerpos de agua (esteros, lagunas, ríos, arroyos, etc.) (Humberto Romero Álvarez, 2011).

### 3.2. Parámetros de calidad de agua y de aguas residuales

Los parámetros de la calidad del agua permiten realizar una descripción cuantitativa desde condiciones naturales, hasta descargas de aguas residuales municipales o



## Evaluación del desempeño técnico y económico de plantas de tratamiento de aguas residuales industriales

---

industriales, y se encuentra definida por parámetros físicos, químicos y biológicos; dependiendo de los valores que se obtengan por medio de dichos parámetros, se valora si el agua cumple o no con los requerimientos para los cuales será utilizada.

Los contaminantes químicos, son de origen natural o sintético y llegan a formarse por la reacción de diferentes compuestos con el agua, su procesamiento o simplemente son desechos presentes de forma natural.

Los parámetros biológicos que provocan contaminación en el agua son ocasionados por medio de las heces fecales de humanos o animales, lo cual provoca una fuente de microorganismos patógenos, como bacterias, virus, protozoos y helmintos. Los parámetros biológicos se utilizan como índices de calidad de aguas, en donde dependiendo de la predominación y el tipo de ciertos seres vivos presentes se determina si el agua puede ser reutilizada. Entre estos organismos se consideran aquellas bacterias que provocan enfermedades en otros seres vivos o bien ciertas especies de algas.

Por otro lado, los contaminantes físicos son alteraciones en las propiedades físicas del agua, como pueden ser los sólidos suspendidos, turbidez, olor y temperatura.

En la Tabla 1 se mencionan los principales parámetros utilizados para la caracterización del agua.



## Evaluación del desempeño técnico y económico de plantas de tratamiento de aguas residuales industriales

Tabla 1. Parámetros para la caracterización del agua (Jiménez, 2001)

Físicos	Químicos	Materia Orgánica	Biológicos
<ul style="list-style-type: none"><li>• Olor</li><li>• Temperatura</li><li>• Turbidez</li><li>• Conductividad</li><li>• Sólidos suspendidos</li><li>• Sólidos disueltos</li><li>• Sólidos totales</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>• Alcalinidad</li><li>• Oxígeno disuelto</li><li>• pH</li><li>• No metales</li><li>• Metales</li><li>• Nutrientes (N y P)</li><li>• Dureza</li><li>• Cloro residual</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>• Demanda química de oxígeno (DQO)</li><li>• Demanda biológica de oxígeno (DBO)</li><li>• Carbono orgánico total (COT)</li><li>• Grasas y aceites</li><li>• Fenoles</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>• Bacteriológico (Coliformes totales y fecales, etc.)</li><li>• Parasitológicos</li><li>• Viroológicos</li></ul>

Los parámetros del agua deben adecuarse a los límites permisibles establecidos según el propósito que tendrá posterior a su tratamiento, por ejemplo: agua para consumo humano, agua para riego, agua para uso industrial, entre otros; por lo que no existe una división precisa que defina si el agua se encuentra contaminada o no; este calificativo se atribuye en función del uso, las exigencias requeridas y el grado de avance de la tecnología que se ocupa (Jiménez, 2001).

La materia presente en el agua también puede clasificarse por su tamaño, los cuales se muestran en la Tabla 2.

Tabla 2. Clasificación según la medida del contaminante (Jiménez, 2001)

Tipo de materia	Descripción
<b>Materia disuelta</b>	Moléculas o iones disueltos con diámetro de $10^{-5}$ a $10^{-3}$ $\mu\text{m}$
<b>Materia coloidal</b>	Materia suspendida con características similares a la materia disuelta, su diámetro va de $10^{-3}$ a $1$ $\mu\text{m}$ . Se caracteriza por su lenta sedimentación
<b>Materia suspendida</b>	Moléculas en fase dispersa con diámetro de $1$ a $100$ $\mu\text{m}$

### 3.3. Marco normativo en materia de agua y de aguas residuales

Las Normas Oficiales Mexicanas (NOM) en materia de agua, establecen los límites máximos permisibles de contaminantes para descargas de aguas residuales, con el fin de evitar riesgos a la población, a los animales y al medioambiente; en la Tabla





## Evaluación del desempeño técnico y económico de plantas de tratamiento de aguas residuales industriales

3 se mencionan las NOM que deben tomarse en cuenta para las PTAR; cada una hace referencia a los métodos de prueba para que las autoridades correspondientes verifiquen la calidad del agua tratada en cada planta (Banco Interamericano de Desarrollo, 2013).

Tabla 3. Normatividad de México (SEMARNAT, 2012)

Título de la Norma	Objetivos
NOM-001-SEMARNAT-1996	Establece los límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales en aguas o bienes nacionales
NOM-002-SEMARNAT-1996	Define los límites máximos permisibles de contaminantes en la descarga de aguas residuales a los sistemas de alcantarillado urbano o municipal
NOM-003-SEMARNAT-1997	Que establece los límites máximos permisibles de contaminantes para las aguas residuales tratadas que se reúsen en servicios públicos
NOM-004-SEMARNAT-2002	Hace referencia a las especificaciones y límites máximos permisibles de contaminantes en lodos y biosólidos para su aprovechamiento y disposición final

Además al inicio de cada nueva administración del Gobierno en México, se formula un Programa Nacional Hídrico alineado al Plan Nacional de Desarrollo, el Programa Nacional de Infraestructura, entre otros, los cuales buscan la preservación y aprovechamiento sustentable de los recursos hídricos.

De acuerdo con esto, se planteó la necesidad de elevar el nivel de cobertura a fin de restaurar la calidad del agua en las corrientes del país, fomentándose la ampliación de plantas de tratamiento con el propósito de incrementar la calidad del agua proveniente de la industria; se estableció como meta alcanzar el 36% de tratamiento de las aguas residuales recolectadas en las redes de alcantarillado para 2006, lo cual significaba incrementar la cobertura de tratamiento en más de 13 puntos porcentuales; situación que se alcanzó satisfactoriamente, alcanzando un 36.1% (CONAGUA, 2001).





## Evaluación del desempeño técnico y económico de plantas de tratamiento de aguas residuales industriales

---

La preocupación por las descargas de aguas residuales y los efectos que traen al medio ambiente ha dado lugar a la promulgación de leyes como la Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente publicada el 28 de enero de 1988 y la Ley de Aguas Nacionales publicada el 1 de diciembre de 1992, que establecen la necesidad de prevenir y controlar la contaminación del agua y proteger los recursos hídricos.

Actualmente la Ley Federal de Derechos, en Materia de Aguas Nacionales, establece que las industrias están obligadas a pagar el derecho por uso o aprovechamiento de bienes del dominio público de la Nación como cuerpos receptores de las descargas de aguas residuales, además de cumplir con lo establecido en las Normas Oficiales Mexicanas; de igual manera la Comisión Nacional del Agua deberá instalar medidores de flujo, a fin determinar la cantidad de agua descargada por las plantas, de lo que dependerá el monto a pagar (Ley Federal de Derecho, 2014).

---

### **3.4. Plantas de tratamiento de aguas residuales**

---

Una PTAR, tiene el propósito de retirar los contaminantes, para hacer de ella un agua sin riesgos a la salud y/o medio ambiente al disponerla o bien, para su reúso.

La implementación de dichas plantas en la industria, surge de la necesidad de proteger al medio ambiente y la salud, en donde a menudo ciertos contaminantes de origen industrial presentes en las aguas residuales requieren procesos de tratamiento especializado.

La importancia del control del impacto ambiental y el cumplimiento de las normas gubernamentales, hacen necesario el manejo y desarrollo de diversas tecnologías





## Evaluación del desempeño técnico y económico de plantas de tratamiento de aguas residuales industriales

para el control de los residuos industriales, que aseguren el mantenimiento del equilibrio ecológico y el cumplimiento de las normas.

El tratamiento convencional de aguas residuales se centra en los tratamientos primario, secundario y terciario principalmente; sin embargo puede incluir un pretratamiento, en donde se retiran los sólidos de gran tamaño, arenas y/o grasas, que se encuentren presentes en el agua a tratar (Figura 3).

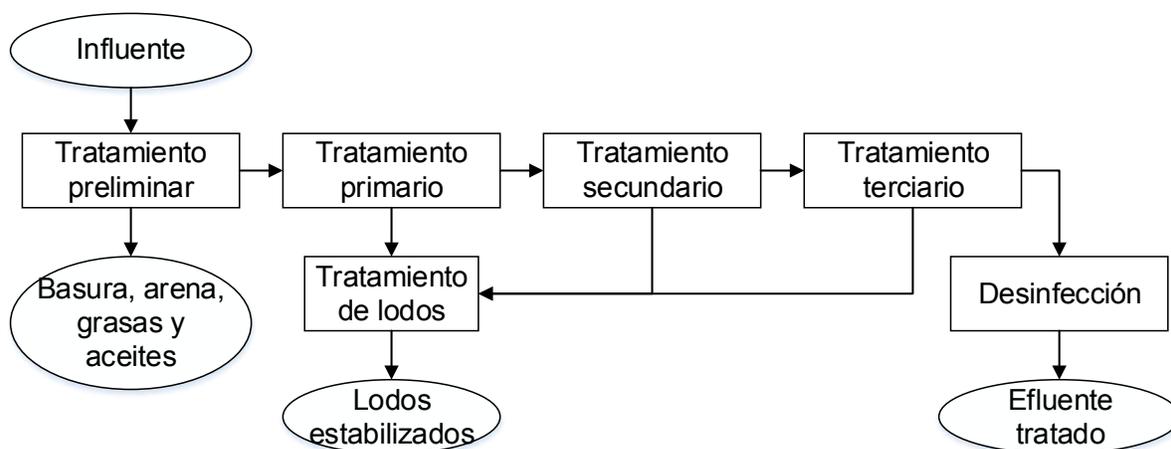


Figura 3. Esquema general de tren en PTAR (Rojas, 2002)

Los lodos que son puestos a disposición en cada tratamiento se tratan por separado, ya que la materia que contienen es diferente, por lo que el tratamiento que reciben es específico para cada uno.

### 3.4.1. Pretratamiento

El pretratamiento está destinado a la preparación o acondicionamiento de las aguas residuales con el objetivo de proteger equipos posteriores. Los principales procesos y objetivos de tratamiento de las unidades preliminares se muestran en la Tabla 4.



Tabla 4. Función del tratamiento preliminar (Rojas, 2002)

Proceso	Objetivo
Desbaste o Cribado	Eliminación de sólidos gruesos
Trituradores	Desmenuzamiento de sólidos
Tamizado	Remoción de sólidos difíciles
Desarenadores	Eliminación de arenas y gravilla
Desengrasadores	Eliminación de aceites y grasas
Preaireación	Preparación para un mejor tratamiento primario

### 3.4.2. Tratamiento Primario

El objetivo del tratamiento primario es la remoción de materia sedimentable o flotantes, por medios físicos o mecánicos; por lo que este tratamiento tiene la capacidad de eliminar una fracción importante de la carga orgánica, la cual por lo general representa entre el 25% y el 40% de la DBO y entre el 50% y el 65% de los sólidos suspendidos.

Los principales tratamientos que se llevan a cabo en el tratamiento primario son: sedimentación, flotación por aire disuelto (DAF), precipitación, filtración, oxidación química y/o coagulación-floculación; sin embargo alguno de ellos como la filtración se pueden encontrar en el tratamiento terciario, lo cual dependerá de las tecnologías y la calidad del influente presentes en la PTAR.

### 3.4.3. Tratamiento Secundario

El tratamiento secundario, también conocidos como biológicos, reduce o convierte la materia orgánica finamente dividida y/o disuelta en sólidos sedimentables floculados que puedan ser separados por sedimentación en tanques de decantación. Los procesos biológicos más utilizados son los lodos activados y filtros percoladores; existen diversas tecnologías en el mercado basadas en estos procesos. Asimismo, dentro de este grupo se incluyen a las lagunas de



estabilización y aireadas. Los tratamientos biológicos tienen una eficiencia en remoción de DBO de entre el 85% al 95% (Enrique Valdez, 2003).

Los tratamientos secundarios más comunes dentro de una PTAR son: lodos activados, lagunas de estabilización, zanjas de oxidación, filtros percolados, biodiscos, sistema biológico de membrana y clarificadores.

---

### 3.4.4. Tratamiento Terciario o avanzado

---

El tratamiento terciario, tiene como objetivo complementar los procesos anteriores para lograr efluentes con una menor carga de materia en el agua; entre los más comunes se encuentran: filtración, adsorción, intercambio iónico, microfiltración, ultrafiltración, osmosis inversa y desinfección.

En la Figura 4, se muestra un resumen de la clasificación de los tratamientos más comunes en una planta de tratamiento de aguas residuales. Cabe mencionar que no se utilizan todos para la remoción de contaminantes, sino únicamente los necesarios para obtener las calidades requeridas, o bien dependiendo de las tecnologías sucesoras a cada uno de ellos, cumpliendo con el propósito de no dañarlas.



## Evaluación del desempeño técnico y económico de plantas de tratamiento de aguas residuales industriales

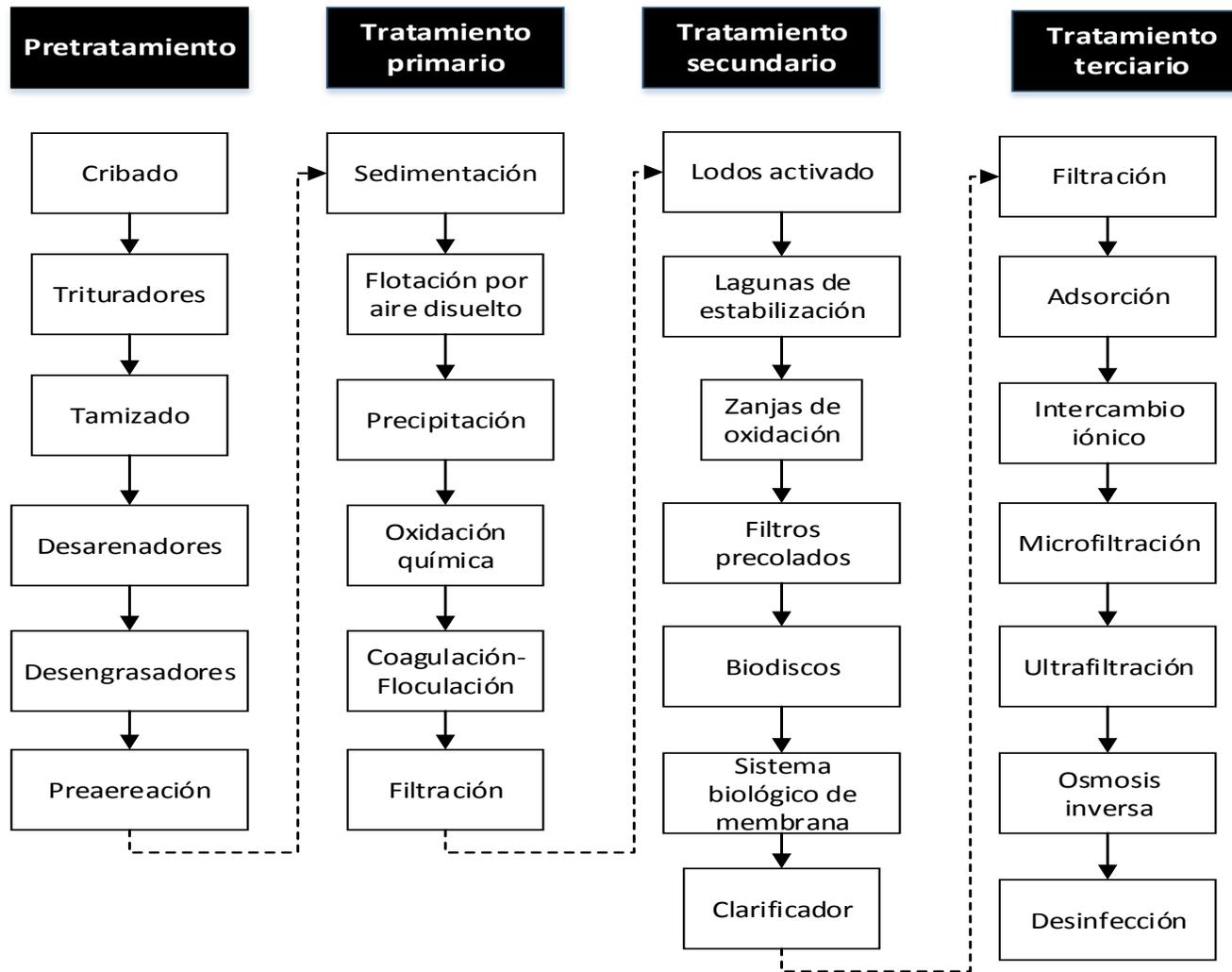


Figura 4. Clasificación típica de los procesos de tratamiento de aguas residuales





## Evaluación del desempeño técnico y económico de plantas de tratamiento de aguas residuales industriales

La selección de los tratamientos que se llevan a cabo dentro de una PTAR, se condiciona principalmente a los requerimientos y exigencias de las leyes ambientales y a los fines que se les dará a las aguas residuales; para ello se incluyen aspectos tales como: objetivo de calidad del efluente; requerimiento de equipos y energía; tratamiento y disposición de lodos; grado de dificultad de la operación y mantenimiento; requerimiento de terreno; costos de inversión inicial; impacto ambiental; sostenibilidad (tarifas, capacidad de gestión, disposición a pagar).

### 3.4.5. Tratamiento de lodos

De acuerdo a la naturaleza de los lodos que son generados dentro de una PTAR, se selecciona el tratamiento adecuado para su disposición.

Los lodos constituyen el mayor volumen eliminado, debido a que pueden ser peligrosos es necesario que se traten dentro de la planta antes de ser puesto a disposición; el tratamiento que se le da a los lodos se muestra en la Figura 5.

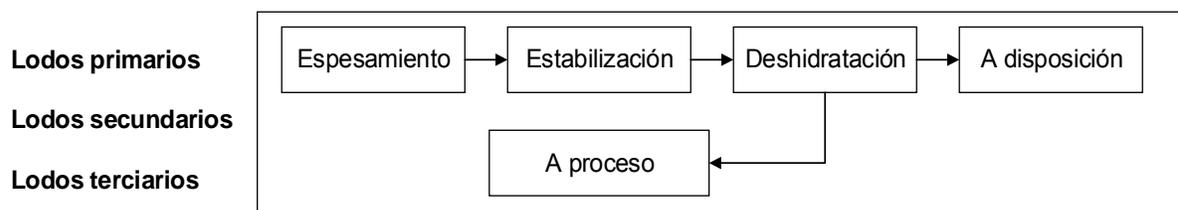


Figura 5. Esquema general de un sistema de tratamiento de lodos (Comisión Estatal del Agua de Jalisco, 2013)

El espesamiento de lodos, consiste en reducir su volumen por medio de un sedimentador, para hacerlo más denso y manejable.



## Evaluación del desempeño técnico y económico de plantas de tratamiento de aguas residuales industriales

---

Los objetivos de la estabilización son: evitar la descomposición de la materia orgánica contenida en los lodos, disminuir el contenido de microorganismos patógenos presentes en los lodos y evitar la atracción de insectos y organismos que produzcan enfermedades; existen cuatro tratamientos para llevar a cabo la estabilización, en donde al menos uno de ellos se debe llevar a cabo para que los lodos sean puestos a disposición; en la Tabla 1 se mencionan los tratamientos principales. (Comisión Estatal del Agua de Jalisco, 2013)





## Evaluación del desempeño técnico y económico de plantas de tratamiento de aguas residuales industriales

Tabla 5. Tratamientos para la estabilización de lodos (Comisión Estatal del Agua de Jalisco, 2013) (Donate, s.f.)

Tecnología	Descripción	Ventajas	Eficiencia de reducción		
			Patógenos	Putrefacción	Olores
Estabilización alcalina	Se añade cal para elevar el pH arriba de 12 por dos horas	Simple, bajos costos de inversión, mejoradores de suelos ácidos	Buena	Aceptable	Aceptable
Digestión anaerobia	Consiste en una serie de procesos microbiológicos, dirigidos a la digestión de la materia orgánica con producción de metano	Instalaciones menos costosas que la aerobia, no necesita suministrar oxígeno menor requerimiento energético por su producción de gas, puede ser utilizado como abono y mejorador de suelos	Aceptable	Buena	Buena
Digestión aerobia	Consiste en la transformación bioquímica de materia orgánica de los lodos en presencia de oxígeno	Menor área requerida, pocas variables a controlar (oxígeno), mayor aceptación de bacterias a tratar	Aceptable	Buena	Buena
Producción de composta	Reduce la concentración de bacterias y huevos de helminto	Proceso económico, fácil de utilizar, mejora composición del suelo y plantas	Aceptable	Buena	Mala





La deshidratación consiste en la extracción del agua presente en los lodos, lo que se lleva a cabo con el fin de formar una masa manejable del sólido; se puede lograr por medio de lechos de secado, filtros banda o decantadores centrífugos. La calidad del lodo dependerá del tamaño y la firmeza de los aglomerados, en ocasiones es necesario el uso de floculantes.

---

### 3.4.6. Eficiencia de los procesos

---

Como ya se mencionó, las plantas de tratamiento de aguas residuales se encuentran conformadas por una serie de tratamientos secuenciales, en donde cada proceso del tratamiento tiene una eficiencia particular para disminuir la concentración de ciertos parámetros.

Los procedimientos de tratamiento seleccionados dependerán de las características físicas, biológicas y químicas que contenga el agua a tratar, y de la calidad que se desea obtener. Por tal motivo es importante identificar la eficiencia de remoción de cada tratamiento, para determinar si los equipos se encuentran operando de acuerdo a la función para lo que fueron instalados; en la Tabla 6, se describe la remoción que tiene cada tratamiento.



## Evaluación del desempeño técnico y económico de plantas de tratamiento de aguas residuales industriales

Tabla 6. Eficiencia de los procesos de tratamiento de aguas residuales (Pintado, 2014)

Tratamiento preliminar						
Tipo de tecnología	Contaminantes inorgánicos	Contaminantes Orgánicos	Grasas y aceites	Sólidos disueltos	Sólidos suspendidos	Biológicos
Cribado	Sí	No	No	No	Sí (materiales grandes)	No
Trituradores	Sí	No	No	No	No	No
Tamizado	Sí	No	No	No	No	No
Desarenadores	Sí	No	No	No	Sí	No
Desengrasadores	No	No	Sí	No	No	No
Preaireación	No	Sí	Sí	Sí	No	No
Tratamiento primario						
Tipo de tecnología	Contaminantes inorgánicos	Contaminantes Orgánicos	Grasas y aceites	Sólidos disueltos	Sólidos suspendidos	Biológicos
Sedimentación	Sí (metales pesados)	Sí	Sí	No	Sí (arena y limo)	No
DAF	Sí (metales pesados)	Si (DBO y DQO)	Si (adición de químicos)	No	Sí (adición de químicos)	No
Precipitación	Sí (metales pesados, cianuros, fluoruros y fosfatos)	No	Sí	Sí	Sí (alcalinidad y dureza)	No
Oxidación química	Sí (NH <sub>3</sub> , CN <sup>-</sup> , sulfuros, mercaptanos)	Si (fenoles, hidrocarburos)	No	Si (DBO, DQO, COT)	No	Si (patógenos, bacteria, virus)j
Coagulación-floculación	Sí	Sí	Sí	No	Sí	No
Filtración	Sí (precipitados insolubles)	Si (DBO y DQO)	Sí	No	Sí	Si (bacterias y algas)





## Evaluación del desempeño técnico y económico de plantas de tratamiento de aguas residuales industriales

Tratamiento secundario						
Tipo de tecnología	Contaminantes inorgánicos	Contaminantes Orgánicos	Grasas y aceites	Sólidos disueltos	Sólidos suspendidos	Biológicos
Lodos activados	Sí	Sí	No	No	No	Sí
Lagunas de estabilización	No	Sí	No	No	Sí	Sí
Zanjas de oxidación	No	No	No	Sí	Sí	Sí
Filtros percoladores	Sí	Sí	No	Sí	Sí	Sí
Biodiscos	Sí	Sí	No	No	Sí	Sí
Sistema biológico de membrana	No	Sí	No	No	Sí	Sí
Clarificador	Sí	No	Sí	No	Sí	No
Tratamiento terciario						
Tipo de tecnología	Contaminantes inorgánicos	Contaminantes Orgánicos	Grasas y aceites	Sólidos disueltos	Sólidos suspendidos	Biológicos
Filtración	No	Sí	No	Sí	Sí	Sí
Adsorción	Sí (algunos metales pesados)	Sí (aromáticos, orgánicos clorados)	Sí	Sí	Sí	No
Intercambio iónico	Sí (aniones y cationes)	Sí (DBO y DQO)	Sí	Sí	No	No
Microfiltración	Sí	Sí	Sí	Sí	Sí	No
Ultrafiltración	Sí	No	No	Sí	Sí	Sí
Osmosis inversa	Sí (metales pesados, aniones)	Sí (aceites)	Sí (mediano y alto peso molecular)	Sí (depende del tamaño)	Sí	Sí (bacterias y virus)
Desinfección	No	No	No	No	No	Sí





### 3.5. Problemas comunes de operación en PTAR

---

De acuerdo con el Inventario Nacional de Plantas de Tratamiento de Aguas Residuales, actualizado por la Comisión Nacional de Agua, se determina que el 98.7% de las plantas se encuentra en operación; por medio de una revisión de 20 plantas, se determina que las principales causas de ineficiencia de operación o de que se encuentren fuera de servicio es debido a que el 45% de ellas carecen de recursos financieros, el 30% presenta errores conceptuales en su diseño y el 25% restante carece de personal capacitado (Humberto Romero Álvarez, 2011).

En el 2011 México contaba con un total de 3, 033 plantas de tratamiento de aguas provenientes de la industria, de las cuales únicamente 2, 995 se encontraban operando; en donde además los tipos de planta construidos representan otro problema, ya que en la mayoría se ha optado por métodos convencionales de tratamiento, en los cuales se requiere de un uso intensivo de productos químicos y de energía en el proceso, genera emisiones de contaminantes al aire (como amoníaco) y tiene como residuo grandes cantidades de lodos tóxicos para los que no se tienen sitios seguros de disposición final; en la Figura 6 se presenta el Inventario realizado en el ejercicio del 2011, en donde se muestran los tratamientos de remoción en cada una de ellas.



## Evaluación del desempeño técnico y económico de plantas de tratamiento de aguas residuales industriales

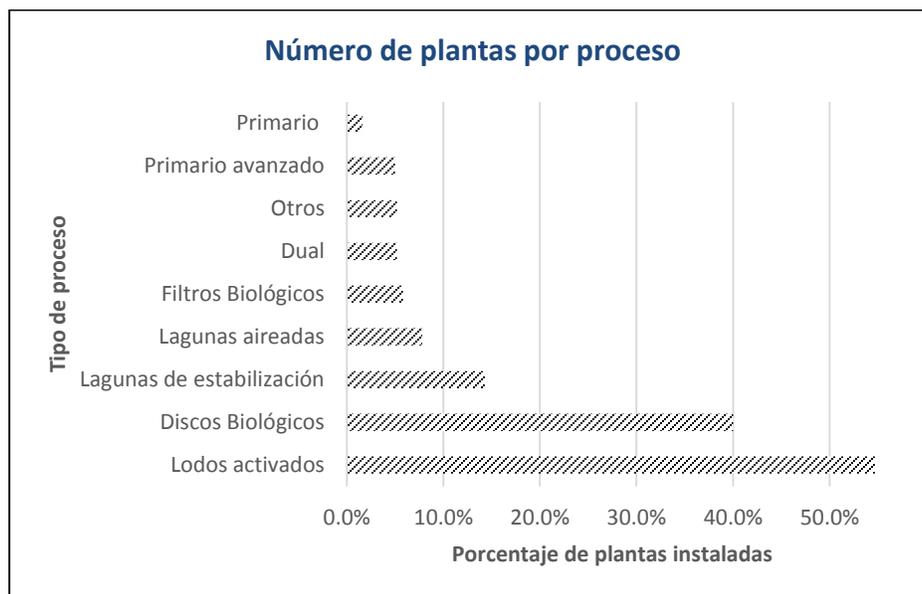


Figura 6. Inventario de PTAR en México (SEMARNAT, 2014)

Además se establece que los diseños que se encuentran sobredimensionados en los que además, se observa una excesiva mecanización, instrumentación y automatización, que encarece y complica, tanto la operación y el mantenimiento, como la amortización de las inversiones.

En algunas plantas, se descargan sustancias de tóxicos sin tratamiento previo, por medio de una combinación con el agua de lluvia, lo cual entorpece las operaciones en el tratamiento.

Asimismo, se prescribe que en ocasiones las calidades en el efluente no son las esperadas, lo cual es debido a que la capacidad de la planta es insuficiente, la infraestructura que ha llegado al término de su vida útil y sigue dando servicio, no cuentan con los de equipos auxiliares suficientes, o bien sus estructuras civiles se encuentran deterioradas.



## Evaluación del desempeño técnico y económico de plantas de tratamiento de aguas residuales industriales

---

Además las plantas no reciben el mantenimiento de los equipos y la calibración en los instrumentos de forma periódica; lo que genera un problema debido a que la materia removida por los tratamiento no es la esperada y las lecturas de los instrumentos no son confiables (SEMARNAT, 2011).

La problemática en relación con los aspectos económicos y financieros se debe principalmente a que la construcción y operación de las PTAR tiene menor prioridad cuando una región se encuentra en crisis económica; además de que el pago por los servicios de alcantarillado y tratamiento no ha sido implantado de manera universal y regular.

Para que los problemas mencionados anteriormente que se presenten en la PTAR, es necesario hacer una evaluación, tomando en cuenta aspectos técnicos ambientales y económicos que se encuentre involucrados en la planta. Dicha evaluación cumple con la finalidad de determinar si la PTAR cumple con las condiciones mínimas de operación, las calidades requeridas, además de si es rentable.





---

## **4. EVALUACIÓN TÉCNICA DE PTAR**

---

El propósito del diagnóstico técnico es establecer medidas correctivas e identificar áreas de oportunidad dentro de las plantas proporcionando una mayor eficiencia.

Las evaluaciones técnicas de la planta se llevan a cabo principalmente por medio del diagnóstico de equipos principales y centrales eléctricas, debido a que alguna falla podría detener el tratamiento totalmente; sin embargo, también es importante verificar el estado de la infraestructura, equipos electromecánicos e instrumentación, además de las calidades en el efluente de la planta así como los residuos y biosólidos producidos, de esta manera es posible determinar la eficiencia de los tratamientos tanto para sus descargas, puestas a disposición o/y reúso (Secretaría de la Función Pública, 2009).

---

### **4.1. Revisión documental y de campo**

---

Para realizar la evaluación de una PTAR es necesario analizar diversos documentos, con el fin de organizar y controlar las operaciones propias de la planta de proceso químico o bien en la generación de energía y servicios auxiliares, asegurando que se cumplan los planes de producción y manteniendo las condiciones de seguridad, calidad y ambientales establecidas; para el diagnóstico es importante considerar el mantenimiento de los equipos, máquinas e instalaciones. Los documentos que se deben tomar en cuenta para dicho análisis se muestran en la Tabla 7.



## Evaluación del desempeño técnico y económico de plantas de tratamiento de aguas residuales industriales

Tabla 7. Consideraciones para la revisión documental de una PTAR

Documento	Información obtenida
Balance de materia	Descripción del proceso general de tratamiento del agua residual tal como se concibió en el diseño
Eficiencia etapa por etapa (históricos de la planta)	Calidades en los efluentes de cada tratamiento
Consumo de reactivos	Comparación entre el consumo actual de la planta y lo especificado en el diseño
Consumo energético	Comparación entre el consumo actual de la planta y lo especificado en el diseño
Instalaciones principales	Evaluación del personal en cada una de las áreas y vida útil de los tratamientos
Equipos electromecánicos	Funcionamiento, vida útil y mantenimientos realizados
Instrumentación y control	Funcionamiento, vida útil y mantenimientos realizados
Residuos	Calidad de residuos obtenidos en el proceso y disposición adecuada según lo establecido por la ley
Especificaciones de diseño	Desviaciones de operación dentro del proceso, equipos y productos
DFP, DTI, PLG de la planta	Conocimiento del funcionamiento de los equipos e instrumentación; distribución de la misma y espacios disponibles para implementaciones
Manuales y procedimientos de mantenimiento a los equipos	Conocimiento de los procedimientos que se deben llevar a cabo, así como su aplicación

Dicha información es necesaria para el diagnóstico de la planta, ya que en caso de no contar con toda la información la evaluación no estará bien soportada.

### 4.1.1. Balances de materia

Con base en las condiciones de diseño de cada tratamiento, como son temperaturas, presiones, flujos, parámetros en las calidades del agua, entre otros, se prepara un diagrama de flujo del proceso, con el fin de especificar cada una de las líneas en los trenes de tratamiento, para posteriormente pasar al balance de sólidos.

Dichos balances deben efectuarse considerando los gastos, lo cual consiste en determinar las cantidades de sólidos que entran y salen de cada operación o





## Evaluación del desempeño técnico y económico de plantas de tratamiento de aguas residuales industriales

---

proceso unitario; estos datos son importantes tanto para el diseño de las instalaciones, el procesamiento de los lodos y la operación con la que cuenta la planta; en caso de presentarse calidades no deseadas dentro de la planta, por medio de dicho balance es posible identificar el equipo que este provocando irregularidades en el proceso.

De igual manera el diagrama de flujo o de bloques del proceso se utiliza como complemento del balance de materia, con el fin de identificar cada una de las corrientes, en la Figura 7 se muestra un ejemplo del diagrama de bloques para un proceso de una PTAR; mientras que en la Tabla 8 se muestra el balance de materia, en donde se establecen los principales parámetros de calidad del agua; tomando en cuenta el influente de la planta, parámetros en cada uno de los equipos de tratamiento, tanques de almacenamiento y efluentes.

El balance de materia debe contener el nombre y número de la corriente, coincidiendo con el diagrama de flujo o de bloques; el parámetro medido en cada corriente y las unidades consideradas.



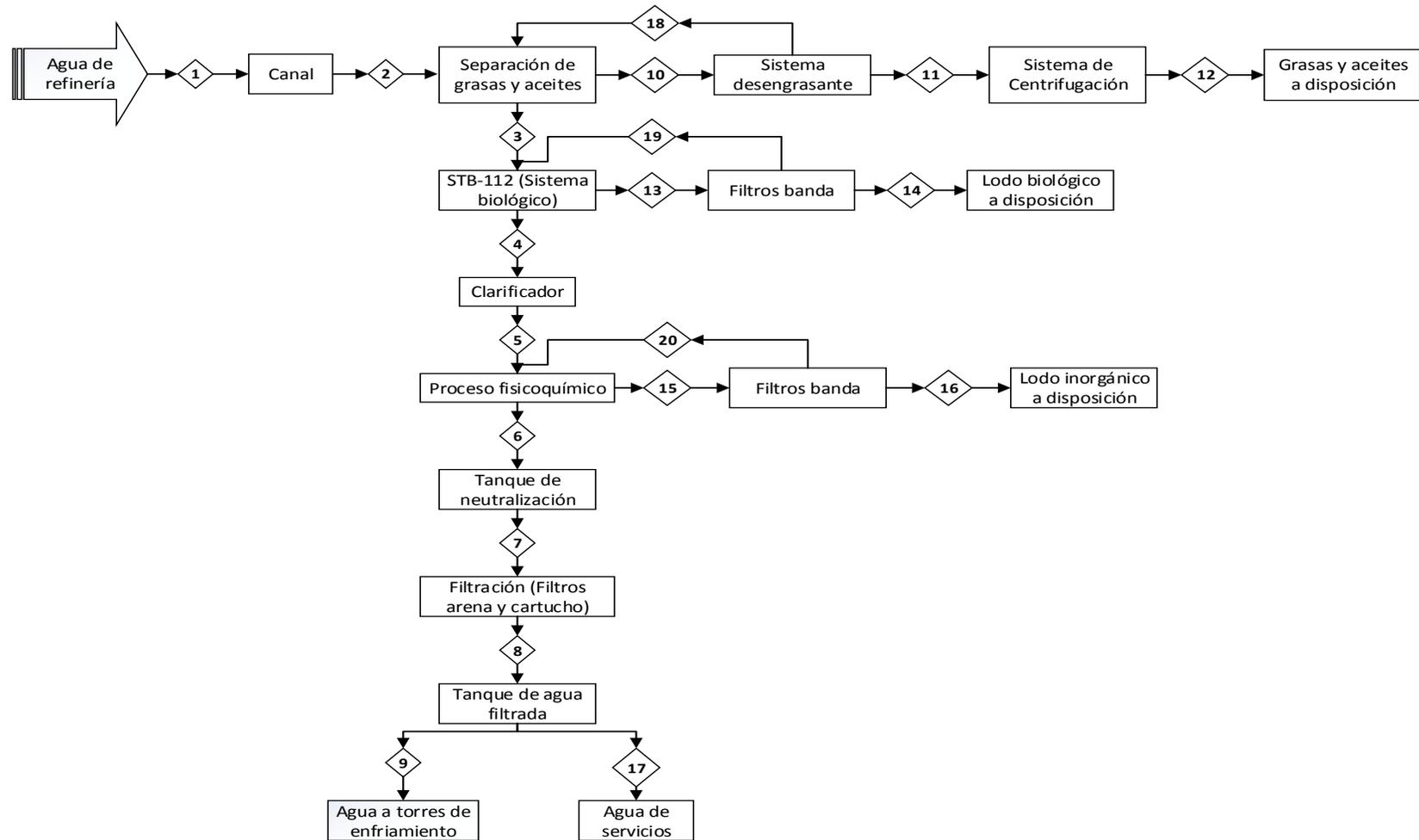


Figura 7. Diagrama de Bloques de proceso (ejemplo)



Tabla 8. Balance general del ejemplo de la PTAR

Corriente		1	2	3	4	5	6	7	8	9
Parámetro	Unidad	Influyente a PTAR *	A tanques DAF	A sistema biológico	Salida de sistema biológico	Agua clarificada a fisicoquímico	De físico-químico a recarbonatación	Agua recarbonatada a filtros	Agua de filtros a tanque de almacenamiento	Agua torres de enfriamiento
Flujo	L/s	230.17	230.17	230.17	230.17	230.17	230.17	230.17	230.17	142.95
pH	Unidades de pH	8	8	8	8	8	8	8	8	8
Temperatura	°C	19	19	19	19	19	19	19	19	20
Conductividad	μS/cm	3167	3167	3167	3167	3167	3167	3119	3119	3119
DBO <sub>5</sub>	mg/L	195	195	195	20	20	20	20	20	20
DQO	mg/L	582	582	582	62	62	62	62	62	62
Fosfatos	mg de PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup> /L	1	1	1	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5
Nitrógeno Total	mg/L	53	53	53	35	35	35	35	35	35
SST	mg/L	29	29	29	29	29	29	29	5	5
STD	mg/L	1584	1584	1584	1584	1584	1584	1584	1560	1560
SS	mg/L	100	100	100	100	100	100	100	< 0.1	< 0.1
Grasas y aceites	mg/L	14	14	1	1	1	1	1	1	1
Cloro residual	mg/L	SD	SD	SD	SD	SD	SD	SD	SD	0.4
Alcalinidad a la fenoltaleína	mgCaCO <sub>3</sub> /L	61	61	61	61	61	14	14	14	14
Alcalinidad total	mg de CaCO <sub>3</sub> /L	383	383	383	383	383	148	148	148	148
Dureza total	mg CaCO <sub>3</sub> /L	481	481	481	481	481	414	414	414	414
Dureza de Calcio	mg CaCO <sub>3</sub> /L	320	320	320	320	320	300	300	300	300
Dureza de Magnesio	mg CaCO <sub>3</sub> /L	162	162	162	162	162	114	114	114	114
Sílice	mg SiO <sub>2</sub> /L	60	60	60	60	60	43	43	43	43
Fenoles	mg/L	5	5	5	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1
Turbidez	NTU	129	129	129	129	129	129	129	7	7
Color	U/Pt-Co	25	25	25	25	25	25	25	9	9





## Evaluación del desempeño técnico y económico de plantas de tratamiento de aguas residuales industriales

Corriente		10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
Parámetro	Unidad	Natas a sistema. desengrasante	A sistema de centrifugación	G Y A a disposición	Lodos biológicos a filtros banda	Lodo biológico a disposición	Lodos inorgánicos a filtros banda	Lodo inorgánico a disposición	Agua clarificada a preparación de químicos	Agua a recirculación	Agua recuperada a biológico	Agua recuperada a fisicoquímico
FLUJO	L/s	SD	86.52	SD	SD	0.065	SD	0.2166	0.4184	SD	SD	SD
pH	Unidades de pH	SD	SD	SD	SD	SD	SD	SD	8	SD	SD	SD
Temperatura	°C	SD	SD	SD	SD	SD	SD	SD	20	SD	SD	SD
Conductividad	µS/cm	SD	SD	SD	SD	SD	SD	SD	3119	SD	SD	SD
DBO <sub>5</sub>	mg/L	SD	SD	SD	SD	SD	SD	SD	20	SD	SD	SD
DQO	mg/L	SD	SD	SD	SD	SD	SD	SD	62	SD	SD	SD
Fosfatos	mg de PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup> /L	SD	SD	SD	SD	SD	SD	SD	0.5	SD	SD	SD
Nitrógeno Total	mg/L	SD	SD	SD	SD	SD	SD	SD	35	SD	SD	SD
SST	mg/L	SD	SD	SD	SD	SD	SD	SD	5	SD	SD	SD
STD	mg/L	SD	SD	SD	SD	SD	SD	SD	1560	SD	SD	SD
SS	mg/L	SD	SD	SD	SD	SD	SD	SD	< 0.1	SD	SD	SD
Grasas y aceites	mg/L	SD	SD	SD	SD	SD	SD	SD	1	SD	SD	SD
Cloro residual	mg/L	SD	SD	SD	SD	SD	SD	SD	0.4	SD	SD	SD
Alcalinidad a la fenolftaleína	mgCaCO <sub>3</sub> /L	SD	SD	SD	SD	SD	SD	SD	14	SD	SD	SD
Alcalinidad total	mg de CaCO <sub>3</sub> /L	SD	SD	SD	SD	SD	SD	SD	148	SD	SD	SD
Dureza total	mg CaCO <sub>3</sub> /L	SD	SD	SD	SD	SD	SD	SD	414	SD	SD	SD
Dureza de Calcio	mg CaCO <sub>3</sub> /L	SD	SD	SD	SD	SD	SD	SD	300	SD	SD	SD
Dureza de Magnesio	mg CaCO <sub>3</sub> /L	SD	SD	SD	SD	SD	SD	SD	114	SD	SD	SD
Sílice	mg SiO <sub>2</sub> /L	SD	SD	SD	SD	SD	SD	SD	43	SD	SD	SD
Fenoles	mg/L	SD	SD	SD	SD	SD	SD	SD	0.1	SD	SD	SD
Turbidez	NTU	SD	SD	SD	SD	SD	SD	SD	7	SD	SD	SD
Color	U/Pt-Co	SD	SD	SD	SD	SD	SD	SD	9	SD	SD	SD

Fuente: elaboración propia

Nota: algunos de los valores del balance no presentan los datos debido a que no se miden esos parámetros en las salidas de los equipos (SD)





### 4.1.2. Eficiencias de tratamiento etapa por etapa

---

Por medio del balance de materia, es posible llevar a cabo una evaluación de las eficiencias de remoción en cada tratamiento por medio de una comparación entre el estado actual y lo especificado en el diseño; es importante que se verifique el cumplimiento de las normas, tanto para efluentes de agua como de residuos generados por medio de la PTAR.

Por medio de la evaluación de las eficiencias para cada etapa, se revisa de manera parcial cada una de las unidades, en donde se pueden optimizar los tratamientos, rentabilidad de la planta, así como establecer criterios para una posible expansión de la PTAR.

La evaluación se lleva a cabo por medio de la revisión e identificación de los parámetros críticos en el influente y efluente, en cada uno de los tratamientos de la PTAR; por medio de mediciones en el caudal y calidades del agua. Para lo cual deben considerarse los siguientes aspectos:

- Ciclos internos durante el proceso (variaciones de caudal y concentración de contaminantes), así como unidades de servicio.
- Interrupciones o fallas en el funcionamiento normal del proceso.
- Capacidad del diseño (gasto y carga de diseño).

Para la revisión en las calidades de remoción en cada tratamiento se utilizan los históricos de la planta; en caso de no tenerlos se efectúan muestreos periódicos, en donde por medio del análisis en un laboratorio certificado, se determinen aquellos que no cumplan con lo especificado dentro del balance de materia; esto con el fin de reducir el grado de incertidumbre hacia el funcionamiento de cada sistema.



## Evaluación del desempeño técnico y económico de plantas de tratamiento de aguas residuales industriales

---

Los muestreos deben establecer puntos representativos en entradas y salidas de cada unidad, considerando eliminar los días que no son representativos, como son el caso de días en los que se presentaron fallas en el funcionamiento del sistema, en los cuales se deben anotar por separado las causas y la frecuencia con que se presentaron, para tomar las medidas correctivas correspondientes; así como los días que se presentan lluvias extremas.

El grado de eficiencia de una planta de tratamiento puede ser calculado por medio de la Ecuación 1.

**Ecuación 1.**  $\eta = \frac{C_i - C_e}{C_i} * 100$

En donde:

$\eta$ : Eficiencia de remoción en %

$C_i$ : Concentración en el influente

$C_e$ : Concentración en el efluente

Para los días no representativos, se considera la desviación estándar y el coeficiente de variación, lo cual se calcula por medio de la Ecuación 2.

**Ecuación 2.**  $V = \frac{S}{\eta} * 100$

En donde:

V: Coeficiente de variación en %

S: Desviación estándar de los niveles de eficiencia

$\eta$ : Eficiencia de remoción

La eficiencia de cada tratamiento dependerá de diversos factores, tal como fallas en los equipos, mantenimiento que recibe la planta, personal que la opere, o bien que la vida útil de alguno de los equipos ha llegado a su término; para el caso de esta última es posible determinarla por medio del documento "Guía de Vida Útil Estimada





y Porcentajes de Depreciación”, el cual es publicado por el Diario Oficial de la Federación (ANEXO 1).

---

### 4.1.3. Consumo de reactivos

---

Los reactivos químicos requeridos en una PTAR varían dependiendo principalmente de los tratamientos que se llevan a cabo, la capacidad de la planta (diseño), la carga en operación normal, el estado físico de los equipos y el estado de instrumentación.

Algunos de los tratamientos que se llevan a cabo en una PTAR, no utilizan reactivos químicos, sin embargo los que sí los utilizan se deben tomar en cuenta, ya que en muchas ocasiones de ellos dependerá la calidad del agua obtenida.

Para cualquier tratamiento dentro de la PTAR que utilice reactivos, es necesario llevar a cabo un análisis periódico, en donde se haga referencia a la cantidad de reactivo que ocupa por cada  $m^3$  de agua tratada en cada uno de los tratamientos, así como las calidades de agua que se obtiene en cada uno de ellos.

Para la evaluación del consumo de reactivos se lleva a cabo una revisión de las bitácoras de operación, de esta manera se conocerá los históricos de consumo de cada reactivo, seguida por una evaluación de lo que se debería estar consumiendo; esto último se lleva a cabo por medio de las cantidades establecidas durante el diseño, la estequiometría de las reacciones o bien, por medio de datos de operación encontrados en la literatura; sin embargo, los datos de literatura no son muy utilizados debido a que es necesario que los datos sean de una planta con el mismo diseño y las calidades del agua tratada sean similares.



### 4.1.4. Consumo energético

---

La eficiencia energética de una planta de tratamiento de aguas residuales, es un factor clave para el éxito en la operación rentable; el cual depende de la capacidad de la planta, la tecnología de tratamiento, su equipamiento (como son la seguridad con que cuenta, aterrizaje eléctrico, entre otros), buen funcionamiento de los equipos y de otros factores locales específicos.

Dentro de una PTAR existen cuatro componentes que consumen la mayor cantidad de energía, los cuales son: aireación superficial o mezcla mecánica de superficie, sopladores de aire para alimentación a difusores sumergidos, bombas: (flujo del efluente y recirculación de lodos), calentamiento (sólo para digestión anaerobia) y tratamiento de lodos (bombas para deshidratación, filtros prensa o filtros banda).

Para realizar el diagnóstico de eficiencia energética se deben llevar a cabo:

1. Una recopilación de: los datos de facturación eléctrica, planos de sistemas de conducción hidráulica, datos de equipo de bombeo, información proveniente de las bitácoras de mantenimiento en cuanto a la antigüedad y cantidad de rebobinado de motores y bitácoras de operación de la planta.
2. Mediciones en campo: parámetros eléctricos (consumo de energía en cuantos de control) e hidráulicos (flujo y presión).
3. Levantamiento de datos: placas de equipos, estado de las instalaciones, diagramas unifilares, observaciones de prácticas de operación y mantenimiento.

Por medio de los pasos establecidos se lleva a cabo un análisis de información obtenida tal como, la eficiencia de motores, bombas, pérdidas de líneas de conducción, costos de energía, balances de energía, así como prácticas de operación y mantenimiento.





## Evaluación del desempeño técnico y económico de plantas de tratamiento de aguas residuales industriales

---

Además se realiza un análisis por medio de indicadores, en los cuales se representa la relación exacta entre la energía utilizada por los equipos de bombeo para producir el volumen total del agua suministrada a la red de distribución; el índice energético se representa por medio de la Ecuación 3. .

$$\text{Ecuación 3. } \text{Índice Energético} = \frac{\text{Energía consumida (kWh/año)}}{\text{Volumen total de agua producida en captaciones (m}^3\text{/año)}}$$

El índice energético calculado debe ser comparado con aquellos que se presentan en industrias o plantas similares y cuyos índices se puedan encontrar en literatura especializada para determinar que este se encuentre dentro de los intervalos aceptables de operación, el cual dependerá del tratamiento que se lleve a cabo y la cantidad de equipos presentes en la planta.

Los índices de energía pueden ser mejorados a través de sistemas de cogeneración para mejorar la valoración en el manejo de corriente, así como el aprovechamiento de los insumos de la planta; como ejemplo de ello, un proceso de tratamiento anaerobio produce biogás (biometano), el cual puede ser utilizado para la producción de la energía eléctrica o calorífica.

Además el mantenimiento de los equipos y el buen uso de operación ayudarán a que el consumo eléctrico no incremente, así como la implementación de nuevas tecnologías.

---

### 4.1.5. Instalaciones principales

---

Una planta de tratamiento de aguas residuales, por lo general cuenta con las siguientes instalaciones: oficinas administrativas, área de proceso, cuarto de control, laboratorio de análisis químico, subestación eléctrica, taller y almacén de materia prima, reactivos y lubricantes.





Dichas áreas son necesarias en toda planta de proceso, para un adecuado funcionamiento, en donde cada una de ellas debe de estar perfectamente identificada, equipada y contar con el personal adecuado para su supervisión y buen desempeño.

Además es importante conocer la vida útil de cada una de las instalaciones debido a que requieren mantenimiento; dicha información puede ser obtenida por medio del documento “Guía de Vida Útil Estimada y Porcentajes de Depreciación”, el cual es publicado por el Diario Oficial de la Federación (ANEXO 1).

---

### 4.1.6. Equipos electromecánicos

---

Los equipos electromecánicos se encuentran expuestos a factores tales como: polvo, grasa, temperaturas extremas, tensiones mecánicas y vibraciones; por lo que se deben emplear mantenimientos programados para su revisión y mantenimiento temprano; los cual serán dependientes de la exposición que tengan a los elementos mencionados.

La implementación de programas y/o procedimientos de tipo preventivo o correctivo, son empleados como medida provisoria de posibles averías tanto para dichos sistemas, como para que la planta en general se encuentre trabajando de manera eficiente; ya que de ellos depende el funcionamiento de la PTAR, por lo que las verificaciones periódicas en los equipos proveen información sobre su estado y posible deterioro, ayudando a predecir fallas, con lo que se conseguirá prolongar la vida operativa de dicha instalación y de sus elementos.



## Evaluación del desempeño técnico y económico de plantas de tratamiento de aguas residuales industriales

Dentro de los equipos electromecánicos más comunes dentro de una PTAR se encuentran los motores eléctricos, válvulas con accionadores eléctricos, compresores de aire y sopladores.

La determinación del flujo, carga, potencia y frecuencia de rotación son necesarias para la elaboración de la curva de operación de la bomba, misma que debe servir para verificar los parámetros garantizados por el fabricante de la eficiencia con la que cuenta el equipo. Para la determinación de eficiencia se realizan mediciones de: flujo, carga, presión, velocidad de rotación y potencia de entras a la bomba.

La eficiencia de la bomba ( $\eta_b$ ) se calcula por medio de la potencia hidráulica de salida ( $P_h$ ) y la potencia mecánica absorbida ( $P_m$ ), representada por la Ecuación 4:

$$\text{Ecuación 4. } \eta_b = \frac{\text{potencia hidráulica de salida } (P_h)}{\text{potencia mecánica absorbida } (P_m)} * 100$$

Debido a la dificultad de medir la potencia mecánica por separado y de ahí medir la eficiencia de la bomba, se recomienda evaluar la eficiencia electromecánica del conjunto bomba-motor por medio de los siguientes pasos (en el caso de manejar agua):

1. Se calcula la potencia hidráulica de salida (Ecuación 5).

$$\text{Ecuación 5. } P_h = \frac{H_b * Q * \rho * g}{1000}$$

Donde:

- $P_h$  = Potencia hidráulica de salida (kW)
- $H_b$  = Carga hidráulica de bombeo (m.c.a.)
- $Q$  = Caudal que pasa por la tubería, a la descarga de la bomba ( $m^3/s$ )
- $\rho$  = Peso específico del agua ( $kg/m^3$ )
- $g$  = Aceleración de la gravedad en ( $m/s^2$ )





## Evaluación del desempeño técnico y económico de plantas de tratamiento de aguas residuales industriales

---

El valor de caudal (Q) es un dato obtenido de las mediciones de campo, los valores  $\rho$  y  $g$  son datos casi constantes en el rango típico de temperaturas de operación y generalmente se toman los valores de 1000 y 9.81, respectivamente.

2. La eficiencia electromecánica final, se obtiene por medio de la potencia hidráulica ( $P_h$ ) calculada y la potencia eléctrica medida ( $P_e$ ), por medio de la Ecuación 6. :

**Ecuación 6.**  $\eta_{em} = \frac{P_h}{P_e}$

Donde:

- $\eta_{em}$  = Eficiencia electromecánica
- $P_h$  = Potencia hidráulica de salida (kW)
- $P_e$  = Potencia eléctrica medida (kW)

3. Una vez calculada la  $\eta_{em}$ , se sustituye en la ecuación de eficiencias (motor, bomba) y se determina despejando la eficiencia de la bomba  $b$  por medio de la Ecuación 7. :

**Ecuación 7.**  $\eta_b = \frac{\eta_{em}}{\eta_m}$

Los valores determinados de la eficiencia electromecánica de la planta deben ser comparados con los valores recomendados por las NOM mencionadas en la Tabla 9; las cuales establecen los valores mínimos recomendables para las eficiencias de equipos electromecánicos, así como los métodos de prueba para cada una; esto servirá como base para considerar la sustitución de equipos (Comisión Nacional del Agua, 2012).





## Evaluación del desempeño técnico y económico de plantas de tratamiento de aguas residuales industriales

Tabla 9. Normas Oficiales Mexicanas aplicables a equipos electromecánicos en PTAR

Título de la Norma	Descripción
NOM-001-ENER-2000	Eficiencia energética de bombas verticales tipo turbina con motor externo eléctrico vertical
NOM-006-ENER-1995	Eficiencia energética electromecánica en sistemas de bombeo para pozo profundo en operación
NOM-010-ENER-2004	Eficiencia energética de bombas sumergibles

Por medio de la curva de la bomba en donde se lleva a cabo una relación entre la carga y el flujo, se determinan las desviaciones que se presentan en relación a lo especificado en el diseño. En la Figura 8 se muestra un ejemplo de dicha curva (Comisión Nacional del Agua, 2014).

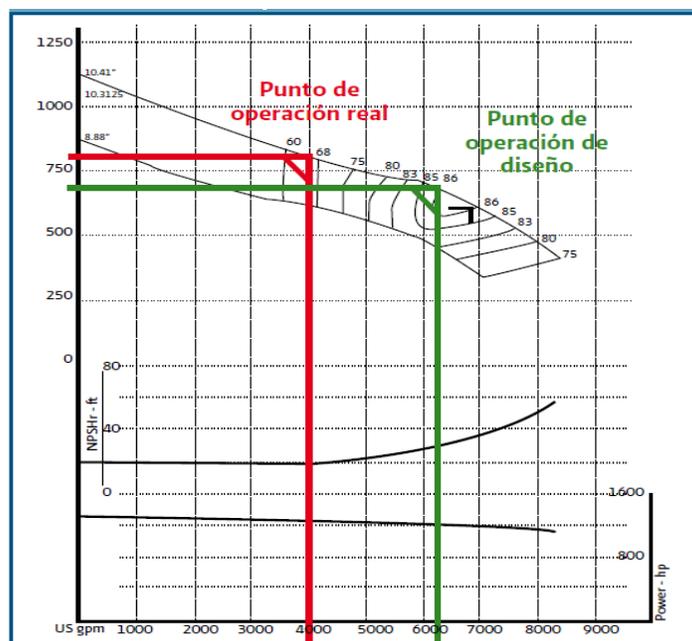


Figura 8. Curva de eficiencia para el conjunto bomba-motor





### 4.1.7. Instrumentación y control

---

La supervisión y mantenimiento de los equipos de instrumentación y control dentro de una PTAR, son un factor importante, que sin duda afecta al funcionamiento de toda la planta, ya que esta depende la eficiencia del proceso, seguridad del personal; un control inadecuado de la planta; puede generar desviaciones en el tratamiento del agua, ya sea a corto o largo plazo.

La evaluación de la instrumentación se lleva a cabo por medio de la inspección visual de los equipos presentes en la PTAR; considerando los siguientes aspectos:

- Que el equipo se encuentre operando
- Características generales del instrumento
- Que el estado físico sea el adecuado
- Las lecturas en cuarto de control deben ser continuas y los parámetros que midan no rebasen los valores permitidos o especificado en el diseño
- Las conexiones se encuentren acopladas adecuadamente
- La instrumentación presente completas sus piezas
- Verificación en la calibración de instrumentos según lo establecido por medio del fabricante
- Identificación en los equipos

Las variables que se deben considerar dentro de la instrumentación de una PTAR incluyen: flujo, presión, temperatura, niveles y parámetros de análisis (pH, turbidez, dureza, entre otros), lo cual dependerá de los tratamientos que se lleven a cabo en ella.



### 4.1.8. Residuos

---

Según la capacidad con la que cuente la planta y de donde provenga el agua que se va a tratar, se obtendrán diferentes cantidades de residuos, los cuales deberán quedar a disposición, considerando lo establecido por la ley. Además los residuos obtenidos, dependerán de los tipos de tratamientos que se lleven a cabo y las calidades de agua requeridas.

Para conocer si los residuos y productos dentro de la planta no presentan desviaciones, se lleva a cabo una revisión tanto del balance de materia, como de la bitácora de control de lodos y biosólidos; de esta manera es posible identificar situaciones inusuales de su producción.

Además se realizan pruebas de laboratorio para determinar el peso volumétrico; así como la cuantificación de coliformes fecales, *Salmonella spp.*, huevos de helmintos, en lodos y biosólidos, y metales pesados para biosólidos, con el propósito de determinar que no rebasen los niveles máximos permisibles especificados en la NOM-004-SEMARNAT-2002, para su posible aprovechamiento o disposición final.

Debido a que la PTAR trata agua proveniente de la industria, es necesario que se aplique un análisis CRETIB a los residuos generados de manera periódica por medio de un laboratorio certificado; dicho análisis es el código de características que contienen los residuos peligrosos: corrosivo, reactivo, tóxico, inflamable y biológico infeccioso.

Por lo general, los residuos que se obtienen en una PTAR son: basura del pretratamiento, arena, grasas y aceites, biogás y diferentes tipos de lodo.



Los residuos recolectados pueden ser enterrados en rellenos sanitarios, incinerados o molidos y digeridos biológicamente, previo al tratamiento que se lleva a cabo dentro de la planta; en caso de que la PTAR genere biogás, puede ser reutilizado en la planta o bien venderse.

---

### **4.2. Comparación de condición actual contra diseño**

---

Las especificaciones de diseño son la base de operación de cualquier planta; sin embargo, durante el diseño suelen determinarse desviaciones a los equipos para que el proceso tenga cierta flexibilidad.

Es importante considerar que las condiciones de una planta dependerán de la vida útil de los equipos, en donde el uso de los mismos genera su deterioro lo que provoca que las condiciones con las que opera una planta en relación con las especificaciones de diseño cambien, esto sin importar que se tenga un mantenimiento constante.

Además es recomendable que el personal de operación, cuente con la capacitación correspondiente para la operación de cada uno de los equipos, ya que el uso inadecuado de ellos también puede llegar a generar variaciones o interrupciones no esperadas.

En caso de que la variación especificada en el diseño de los equipos sea mayor al margen de error permitido, se busca el origen así como la frecuencia que presenta, por medio de una revisión de la vida útil de los equipos, mantenimiento realizados a cada uno de ellos, así como la capacitación del personal de operación.



### 4.3. Metodología para la evaluación técnica

---

Para la evaluación técnica de una PTAR, es necesario que se establezca el uso que tendrá el agua tratada, con el fin de determinar las calidades mínimas requeridas; seguida por la revisión de documentos de la planta, tal como el balance materia, bitácoras de operación, planos de las instalaciones y hojas de datos de equipos, de proceso y electromecánicos; de la igual manera se lleva a cabo una inspección visual y un diagnóstico operativo de los equipos.

Por medio de una base de datos se lleva a cabo una comparación entre el diseño y estado actual del consumo energético, consumo de reactivos, calidades de agua en el efluente de la PTAR, calidades y cantidades de los residuos generados, funcionamiento de equipos e instrumentación y los factores claves de cada tratamiento; de esta manera es posible identificar desviaciones en el proceso, así como eficiencia desfavorable para la planta.

En caso de encontrar desviaciones es necesario realizar una matriz causa – efecto; en la cual se lleve a cabo un estudio de posibles alternativas, se establezcan las medidas correctivas o recomendaciones necesarias para la implementación dentro de la planta.

En la Figura 9 se muestra el esquema simplificado de la metodología técnica aplicable a una PTAR.



## Evaluación del desempeño técnico y económico de plantas de tratamiento de aguas residuales industriales

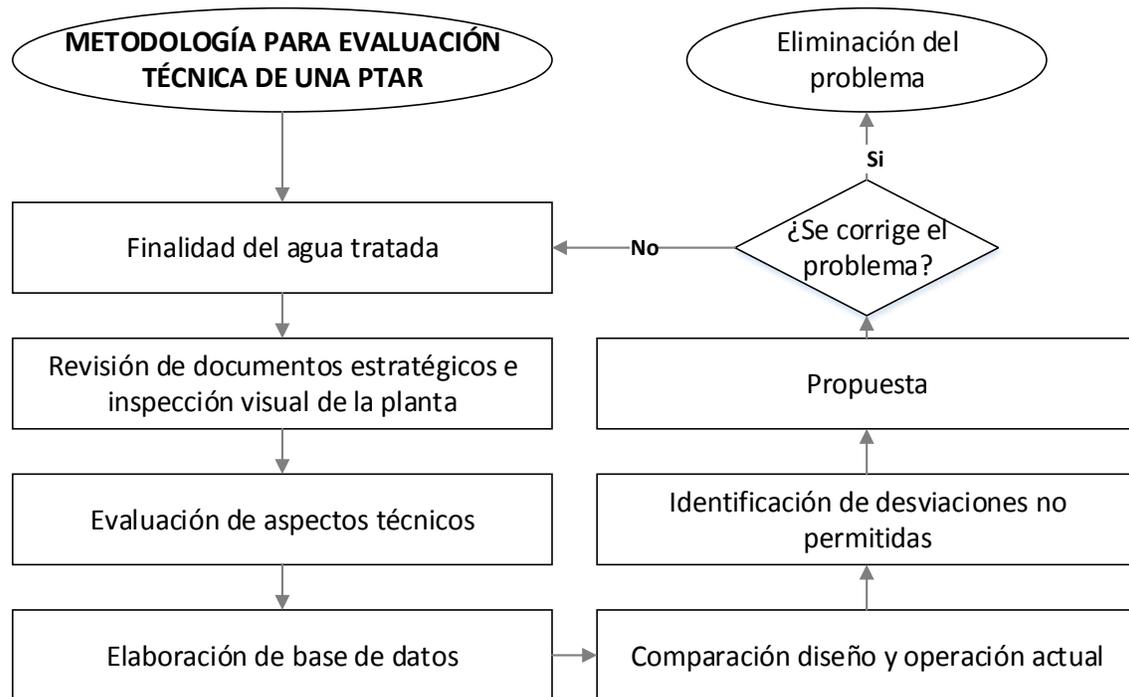


Figura 9. Metodología para la identificación y solución de problemas técnicos de una PTAR

En la matriz de solución de problemas generados dentro de la planta, se lleva a cabo una identificación de los problemas, las posibles causas que los originan y de esta manera se genera una lista de acciones que pueden tomarse para eliminar dicha situación. En la Tabla 10 se muestra el ejemplo de una matriz de solución de problemas.



## Evaluación del desempeño técnico y económico de plantas de tratamiento de aguas residuales industriales

Tabla 10. Matriz de identificación de problemas

Tratamiento	Causa de afectación	Observación	Acción correctiva
Primario	Fallas en bombas de operación	Las bombas no cuentan con la capacidad suficiente para el flujo requerido	Rediseño de bombas para el aumento de su capacidad
Secundario	Ineficiencia en la remoción de DBO	La concentración de lodos en el tratamiento no cumplen con las especificaciones	Aumento de flujo en la recirculación de los lodos provenientes de sedimentador secundarios
Terciario	Agotamiento anticipado en las resinas	El contenido del agua en el tratamiento cuenta con gran cantidad de sales	Implementación de proceso de filtración para disminuir las sales

La elaboración de la matriz debe ser realizada por personal que tenga el suficiente conocimiento del proceso, para poder establecer las acciones correctivas que generen el beneficio más factible.



---

## **5. EVALUACIÓN AMBIENTAL DE PTAR**

---

La finalidad de la evaluación ambiental, es hacer una previsión de las afectaciones e impactos que se puedan o estén generados por medio de la mala operación de la planta.

La evaluación ambiental considera la magnitud del impacto sobre sectores específicos del medio ambiente teniendo en cuenta el grado, tamaño, o escala; por lo que se establecen acciones dependiendo de las características y condiciones ambientales específicas, para que de esta manera el impacto no se propague. La magnitud del impacto puede ser evaluada en base a hechos de forma cuantitativa; sin embargo, la importancia del impacto se basa generalmente en un juicio cualitativo.

---

### **5.1. Revisión documental**

---

La identificación de los impactos producidos sobre el ambiente en una PTAR, son fundamentales en la evaluación de la planta (Jiménez, 2001); es necesario llevar a cabo una revisión de los documentos con los que cuenta para determinar si cumple con funciones que benefician tanto a la planta como a la sociedad; considerando para ello:

1. La reutilización del agua tratada.
2. Eliminación de la contaminación generada por la industria.
3. Cumplimiento de la normatividad ambiental, tanto para descargas de agua y la disposición de los residuos generados.

El análisis de impactos es esencial para la evaluación ambiental, por ello se han desarrollado técnicas que pretenden proporcionar métodos estandarizados para



## Evaluación del desempeño técnico y económico de plantas de tratamiento de aguas residuales industriales

---

evaluar los efectos y ayudar a tomar decisiones. Con estos procedimientos es posible decidir sobre la conveniencia de innovaciones de tecnología limpia dentro de la planta.

Por medio de la Ley Federal de derecho, modificada en nuestro país, se implementa la aplicación de muestreos, así como un análisis de la calidad del agua descargada; el análisis debe ser realizado por un laboratorio acreditado ante la entidad autorizada por la Secretaría de Economía y aprobado por la Comisión Nacional del Agua.

Las plantas de tratamiento de aguas residuales en las industrias, deben contar con autorizaciones oficiales para poder realizar llevar a cabo sus operaciones.; entre estas autorizaciones se encuentran:

- Licencia de uso de suelo.
- Licencia de funcionamiento.
- Licencia Ambiental Única.
- Certificado de calidad de agua, trimestral.
- Cédula de operación anual, primer cuatrimestre del año.
- Registro Federal ambiental.
- Dictamen de impacto Ambiental.
- Registros de generador de residuos peligrosos.
- Manifiestos de entrega, transporte y recepción.
- Reporte semestral de residuos peligrosos y de manejo especial.
- Bitácora de residuos peligrosos.
- Certificado de no peligrosidad de lodos.
- Análisis de riesgo.
- Autorización de riesgo.
- Reporte de accidentes ambientales.
- Acta de constitución de Comisión de seguridad e higiene.





## Evaluación del desempeño técnico y económico de plantas de tratamiento de aguas residuales industriales

- Programa de prevención de accidentes.
- Estudio de equipos de protección personal NOM-017-STPS-01.
- Estudio contra incendio NOM-002-STPS-2010.
- Estudio de ruido NOM-011-STPS-01.
- Estudio de ruido perimetral.
- Certificados de calibración de medidores de flujo.
- Autorización de calderas y recipientes sujetos a presión.

Dichos tramites se otorgan o niegan dependiendo de la ubicación de la planta, dimensiones, características o alcances que puedan producir, impactos ambientales significativos, causas en desequilibrios ecológicos y condiciones establecidos en las disposiciones jurídicas referidas a la conservación del equilibrio ecológico y la protección al ambiente.

Para la evaluación ambiental, no existe un formato específico, ya que cada una de ellas involucra diferentes aspectos, sin embargo en la Figura 10 se presenta un esquema general de lo que debe considerarse para llevarlo a cabo.

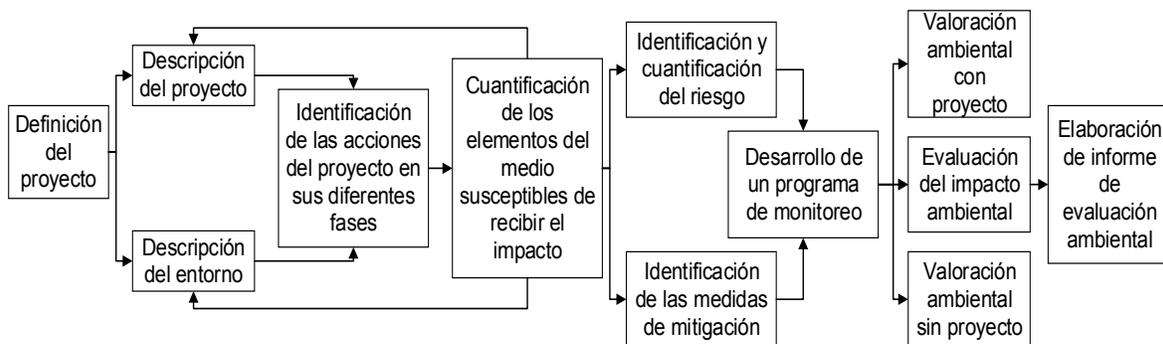


Figura 10. Esquema para la evaluación del impacto ambiental (Cisneros, 2012)

En la identificación de los elementos susceptibles a un impacto se agrupan en diferentes acciones como son:





## Evaluación del desempeño técnico y económico de plantas de tratamiento de aguas residuales industriales

---

- Las que modifican el uso de suelo.
- Las que emiten contaminantes.
- Las que sobreexplotan los recursos.
- La provocación de efectos de magnificación.

Por medio de la evaluación ambiental, se realiza una estimación cualitativa de los impactos que pudiesen generarse debido a las desviaciones que presenta la planta con respecto al diseño por medio de una matriz de interacción causa-efecto.

Los criterios que permitirán evaluar la magnitud de los impactos se clasifican en: relación causa-efecto, carácter, magnitud, permanencia (temporalidad o persistencia), relevancia, recuperabilidad, significancia; de esta manera es posible llevar a cabo una mitigación de cada uno de ellos.

En la Tabla 11 se mencionan los principales indicadores considerados para llevar a cabo dicha evaluación, así como la normatividad aplicable en materia de cada indicador.





## Evaluación del desempeño técnico y económico de plantas de tratamiento de aguas residuales industriales

Tabla 11. Lista de indicadores de impacto (AMCA Sistemas, 2010) (SEMARNAT, 2014)

Factor	Indicadores	Norma	Objetivo	
Aire	Emisiones: polvos y gases	NOM-156-SEMARNAT-2012	Establecimiento y operación de sistemas de monitoreo de la calidad del aire	
	Ruido	NOM-081-SEMARNAT-1994	Establece los límites máximos permisibles en emisión de ruido de las fuentes fijas y su método de medición	
	Generación de malos olores	-	Actualmente no existe una norma que regule lo regule	
	Calidad		NOM-020-SSA1-1993	Criterio para evaluar el límite permisible para la concentración de ozono.
			NOM-021-SSA1-1993	Criterio para evaluar la calidad del aire con respecto al monóxido de carbono.
			NOM-022-SSA1-1993	Criterio para evaluar el límite permisible para la concentración de dióxido de azufre
Suelo	Modificación de propiedades físicas y químicas	NOM-138-SEMARNAT-2003	Límites máximos permisibles de Hidrocarburos en suelos y las especificaciones para su caracterización y remediación	
	Calidad			
Agua	Drenaje	NOM-002-SEMARNAT-1996	Define los límites máximos permisibles de contaminantes en la descarga de aguas residuales a los sistemas de alcantarillado urbano o municipal	
	Infiltración	NOM-001-SEMARNAT-1996	Establece los límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales en aguas o bienes nacionales	
	Calidad			
Biota	Alteración de la cobertura vegetal	NOM-019-SEMARNAT-2006	Establece los lineamientos técnicos de los métodos para el combate y control de insectos descortezadores	
	Generación de fauna nociva			





## Evaluación del desempeño técnico y económico de plantas de tratamiento de aguas residuales industriales

---

Debido a que cada planta es diferente, no se tiene una metodología para la evaluación de los impactos ambientales generados, sino que dependerá de la experiencia profesional, el juicio crítico y la interpretación de resultados.

El propósito de proponer una metodología para dicha evaluación, es asegurar que se tomen en cuenta los factores ambientales que afectan al medio ambiente.

---

### 5.1.1. Propuestas de mitigación

---

Una vez establecidos los impactos ambientales que genera la planta de tratamiento de aguas residuales, es necesario llevar a cabo una serie de propuestas de mitigación; en las cuales se contrarresten o minimicen impactos negativos generados por la planta.

Como medidas de mitigación se encuentran las del control de la contaminación (equipos) o muestreos periódicos de manejo y el monitoreo las cuales se enfocan a: evitar el impacto, reducirlo o eliminarlo por medio de la rehabilitación de lo que se haya afectado.

Una vez identificadas, se procede a analizar su factibilidad técnica y económica para seleccionar aquellas que el proyecto pueda afrontar; ya que el control de contaminación puede conducir a la instalación de equipos o bien, al cambio de proceso de producción.

Las medidas de manejo se basan en reconocer el grado de tolerancia que puede soportar el medio, las cuales involucran el conocimiento de las condiciones de operación del proceso, con el fin de ajustar las necesidades ambientales y el monitoreo de los niveles de impacto aceptables.





### **5.2. Metodología para la evaluación ambiental**

---

Para la evaluación ambiental, es necesario haber llevado a cabo la evaluación técnica; de esta manera se tendrán el conocimiento de los aspectos técnicos de la planta, en la cual se deben revisar que los documentos gubernamentales de la PTAR, como es el caso de licencias, permisos, cédulas, entre otros, cumplan con el marco legal de la región en donde se encuentre establecida la planta.

Es necesario llevar a cabo una revisión de las Normas Oficiales Mexicanas, con el fin de que la planta no rebase los niveles máximo permisibles en materia de descarga de aguas, así como el aprovechamiento o disposición de los biosólidos o lodos generados durante el tratamiento.

Asimismo se realiza una revisión de las Normas aplicables en materia de cada uno de los indicadores mencionados en la Tabla 11; de esta manera se realiza una estimación de los impactos ocasionados, así como la gravedad causada al medio ambiente (grado, tamaño, escala), por medio de los residuos que se producen durante el proceso, o bien los equipos con los que se cuenta.

Para que los lodos inorgánicos sean puestos a disposición es necesario que se tomen muestras para aplicarle un análisis CRETIB, los cuales deben ser analizados por un laboratorio certificado.

En la Figura 11, se muestra el proceso propuesto para la evaluación de impacto ambiental, realizado a una PTAR.



## Evaluación del desempeño técnico y económico de plantas de tratamiento de aguas residuales industriales

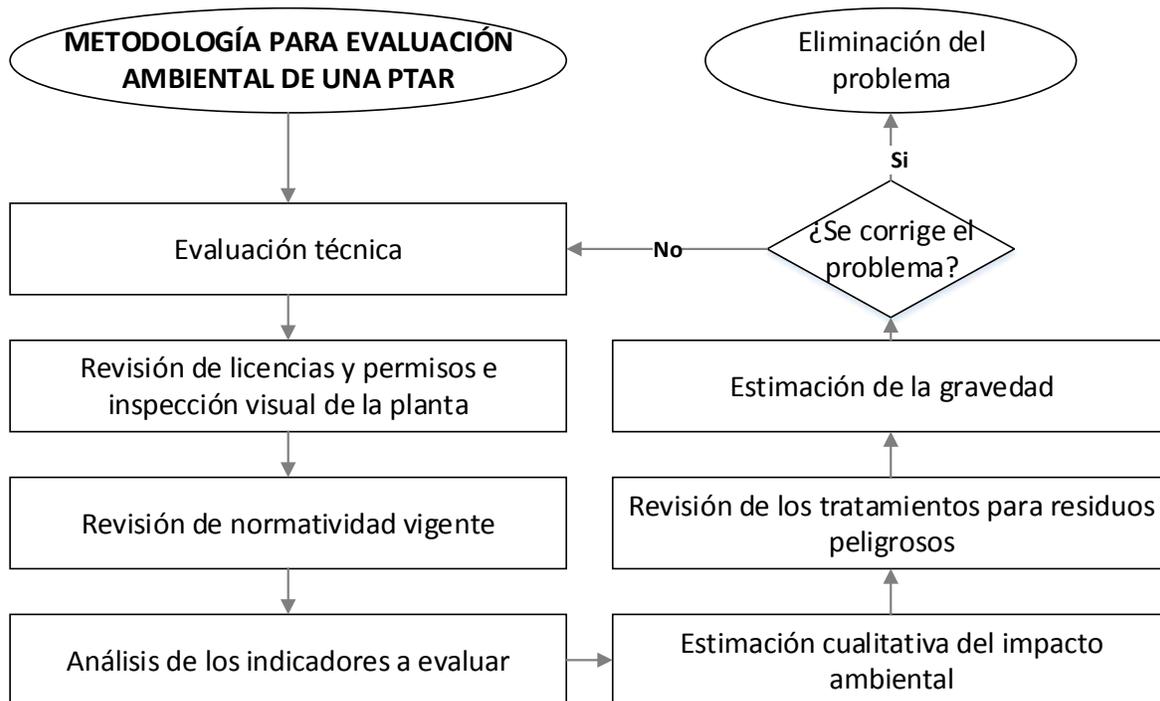


Figura 11. Metodología para la identificación y solución de problemas ambientales de una PTAR



---

## **6. EVALUACIÓN DE LOS COSTOS DE LA PTAR**

---

### **6.1. Revisión documental**

---

Una evaluación económica se utiliza como una técnica de ayuda en la definición de la mejor alternativa desde el punto de vista económico, identificando ventajas y desventajas por medio de la definición de costos, lo cual se representa por medio de cantidades de dinero ordenadas en el tiempo.

Su principal objetivo es identificar la utilidad generada por medio de la PTAR; con el propósito de conocer y administrar los costos derivados de las actividades en cada etapa de proceso, proveer un criterio adecuado para la toma de decisiones, y en caso de requerir una inversión, definir el esquema más adecuado; de esta manera es posible establecer un control sobre el flujo de efectivo de la planta.

La evaluación económica permite conocer la rentabilidad de la inversión; el cálculo de se basa en relación de las inversiones, costos y gastos realizados por medio de la planta, además de la rentabilidad esperada.

Una evaluación económica bien definida permitirá establecer medidas que para maximizar la rentabilidad de las inversiones; así como corregir desviaciones de los costos de la PTAR, amortiguar los efectos por la inflación y/o tipo de cambio y modificar las tarifas por cambios en la planta.

En este trabajo no se pretende realizar una evaluación económica como tal de la operación de la planta, debido a que en la mayoría de los casos los equipos no operan las 24 horas, ya sea porque se encuentran fuera de operación o en



mantenimiento; por lo que se lleva a cabo una revisión de las tarifas pactadas en el contrato, verificando el cumplimiento de los criterios establecidos para la actualización de las tarifas, tanto de escalamiento como la precisión de su cálculo, ya que al considerarse como un servicio no se toma en cuenta como costo si no como importes, los cuales deben ser actualizados. La selección de los índices considerados para dichas tarifas dependerá de variables financieras, de riesgo y el acceso que se tenga de los financiamientos. Los importes considerados para el cobro de las tarifas se dividen en: inversión, financiera, operación fija y operación variable; representados en la Ecuación 8.

**Ecuación 8.**  $Tarifa_{total} = TI + TF + TO + TV$

En donde:

- TI: Tarifa de Inversión
- TF: Tarifa Financiera
- TO: Tarifa de Operación Fija
- TV: Tarifa de Operación Variable

A continuación se describe cada una de las tarifas utilizadas por una PTAR.

---

### 6.1.1. Tarifa de Inversión (TI)

---

La tarifa de inversión incluye las erogaciones presentes en el sistema de tratamiento de aguas residuales, entre ellas se encuentran las mostradas en la Figura 12.



## Evaluación del desempeño técnico y económico de plantas de tratamiento de aguas residuales industriales

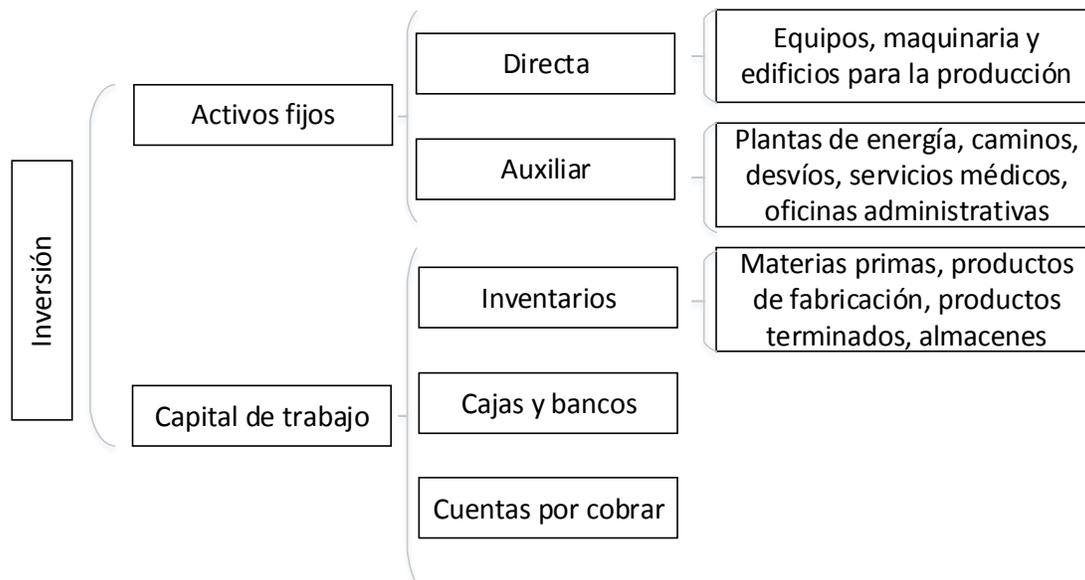


Figura 12. Composición del capital de la PTAR (Silvenses, 2009)

El importe de esta tarifa es independiente del volumen de agua tratada, y debe ser actualizada para cada año por medio del incremento en el Índice Nacional de Precios al Consumidor de la fecha de cotización a la fecha del mes de la presentación del servicio.

La TI puede ser considerada en moneda nacional o extranjera, dependiendo a lo que se establezca en el contrato; puede ser actualizada por medio de la Ecuación 9. :

$$\text{Ecuación 9. } TIMNA = TIMN_n * \frac{INPC_n}{INPC_o}$$

En donde:

- TIMNA: Tarifa de Inversión en Moneda Nacional Actualizada
- TIMN<sub>n</sub>: Tarifa de Inversión en Moneda Nacional correspondiente al mes “n” de operación, a precios de la fecha de cotización
- INPC<sub>n</sub>: Índice Nacional de Precios al Consumidor correspondientes al mes “n” de operación
- INPC<sub>o</sub>: Índice Nacional de Precios al Consumidor de la fecha de cotización



## Evaluación del desempeño técnico y económico de plantas de tratamiento de aguas residuales industriales

Para amortizar el financiamiento en moneda extranjera su actualización estará en función del tipo de cambio para solventar operaciones denominadas en moneda extranjera a la fecha de pago en donde se utilizan la Ecuación 10. para su cálculo.

**Ecuación 10.**  $TIMEA = TIME_n * TC_n$

En donde:

- TIMEA: Tarifa de Inversión en Moneda Extranjera Actualizada (pesos)
- TIME<sub>n</sub>: Tarifa de Inversión en Moneda Extranjera correspondiente al mes “n” de operación (dólares)
- TC<sub>n</sub>: Tipo de Cambio de la fecha de pago

La Tarifa de Inversión Total Actualizada, es el importe actualizado de cada uno de sus componentes (moneda nacional y moneda extranjera).

### 6.1.2. Tarifa Financiera (TF)

La tarifa financiera es independiente al volumen de agua tratado por la PTAR; en ella se consideran erogaciones obligatorias por cubrir, las cuales se mencionan en la Tabla 12.

Tabla 12. Actualización de la Tarifa Financiera

Concepto	Factores a utilizar	
	Moneda nacional	Moneda Extranjera
Obligaciones Fiscales	INPC	-
Costo del Financiamiento	TI	TC y TB
Utilidad de Inversionistas	INPC	TC

La TF puede ser considerada en moneda nacional o extranjera y dependiendo del caso la actualización se realiza por medio de los siguientes criterios.





## Evaluación del desempeño técnico y económico de plantas de tratamiento de aguas residuales industriales

---

Ecuación 11. para Moneda Nacional:

$$\text{Ecuación 11. } TFA = TFC * \frac{IN}{IB}$$

Ecuación 12. para Moneda Extranjera:

$$\text{Ecuación 12. } TFA = TFC * TC * \frac{Tasa_n}{Tasa_o}$$

En donde:

- TFA: Tarifa Financiera Actualizada
- TFC: Tarifa Financiera Cotizada
- IN: Índice de la fecha de prestación del servicio
- IB: Índice de la fecha Base
- TC: Tipo de Cambio
- Tasa<sub>n</sub>: Tasa de interés correspondiente al mes “n” de operación
- Tasa<sub>o</sub>: Tasa de interés de las corridas financieras

La Tarifa Financiera Total Actualizada, es el importe actualizado de cada uno de sus componentes (moneda nacional y moneda extranjera).

---

### 6.1.3. Tarifa de Operación Fija (TO)

---

Considera todas aquellas erogaciones no financieras que son necesarias para la operación y mantenimiento de los equipos e independientes del volumen de agua tratada; entre ellos se encuentran: renta, obligaciones fiscales, licencias, registros, gastos administrativos, terreno, obras civiles, maquinaria y equipos, permisos, patentes, impuestos, costos financieros, capacitación.

Esta tarifa es calculada con base a la operación, considerando la capacidad de diseño; para ello se toma en cuenta que el mantenimiento y funcionamiento que presenta es el adecuado.





## Evaluación del desempeño técnico y económico de plantas de tratamiento de aguas residuales industriales

El consumo de energía eléctrica considera el consumo de kWh al momento de facturación, en donde se realiza una actualización del importe a cada uno de los conceptos a considerar, por medio de los índices establecidos; en la Tabla 13, se muestran los índices por medio de los cuales se llevara a cabo la actualización de la tarifa de operación fija.

Tabla 13. Actualización de la Tarifa de Operación Fija

Concepto	Factores a utilizar	
	Moneda nacional	Moneda Extranjera
Operación	SMG	-
Energía eléctrica	Índice de generación, transmisión y distribución de energía eléctrica (BANXICO)	TC y PPI
Administración	SMG	-
Mantenimiento	INPC	-
Seguros y fianzas	INPC	-
Imprevistos	INPC	-

El importe de la Tarifa de Operación Fija Total Actualizada es el importe actualizado de cada uno de sus componentes (moneda nacional y moneda extranjera); dependiendo de la moneda utilizada se puede utilizar la Ecuación 13. o la Ecuación 14. , considerando los siguientes criterios.

Ecuación 13. para Moneda Nacional:

**Ecuación 13.**  $TOMN_n = TO_c * \frac{IN}{IB}$

Ecuación 14. para Moneda Extranjera:

**Ecuación 14.**  $TOME_n = TO_c * TC * \frac{PPI_N}{PPI_B}$

En donde:

- TOMN<sub>n</sub>: Tarifa de Operación Fija Actualizada al mes n de operación en moneda nacional
- TO<sub>c</sub>: Tarifa de Operación cotizada
- IN: Índice de la fecha de prestación del servicio
- IB: Índice de la fecha Base





## Evaluación del desempeño técnico y económico de plantas de tratamiento de aguas residuales industriales

- TOME<sub>n</sub>: Tarifa de Operación Fija Actualizada al mes n de operación en moneda extranjera (pesos)
- TC: Tipo de Cambio
- PPI: Producer Price Index publicado por United States Department of Commerce en Current Survey of Business correspondiente al mes de prestación de servicios contra el mismo índice correspondiente al mes de la propuesta.

### 6.1.4. Tarifa de Operación Variable (TV)

La tarifa de operación variable, comprende las erogaciones que se modifican en relación al volumen y calidades de agua tratada; considerando los flujos y calidades de diseño. Entre los costos generados por las tarifas de operación variables se consideran: el consumo energético, consumo de reactivos, disposición de lodos y residuos, mano de obra, entre otros.

Las fórmulas utilizadas para la actualización de la tarifa de operación variable son las siguientes:

Ecuación 15. para moneda nacional:

$$\text{Ecuación 15. } TVMN_n = GR * \sum n PUVAT * \frac{IN}{IB}$$

En donde:

- TVMN<sub>n</sub>: Tarifa Variable Actualizada al mes “n” de operación, en moneda nacional
- PUVAT: Precio Unitario por volumen de agua tratada por cada uno de los elementos de cada corriente
- IN: Índice Nuevo, correspondiente al mes “n” de operación
- IB: índice Base, correspondiente al de la fecha de cotización
- GR: Metros cúbicos procesados
- n: Número de elementos en cada corriente

Ecuación 16. para moneda extranjera:





## Evaluación del desempeño técnico y económico de plantas de tratamiento de aguas residuales industriales

**Ecuación 16.** 
$$TVMEn = GR * \Sigma (PUVAT * TC * \frac{PPI_N}{PPI_B})$$

- TVMEn: Tarifa Variable Actualizada al mes “n” de operación, en moneda extranjera
- PUVAT: Precio Unitario por volumen de agua tratada por cada uno de los elementos de cada corriente
- TC: Tipo de Cambio
- PPI: Producer Price Index
- GR: Metros cúbicos procesados

La Tarifa de Operación Variable Total Actualizada, es el importe actualizado de cada uno de sus componentes (moneda nacional y moneda extranjera).

### 6.2. Complemento de la evaluación

Por medio de la literatura se puede realizar una comparación determinando si las tarifas establecidas no exceden los importes comunes; en la Figura 13 se muestra una distribución de los importes en plantas donde se trata agua proveniente de la industria química e industria petroquímica.

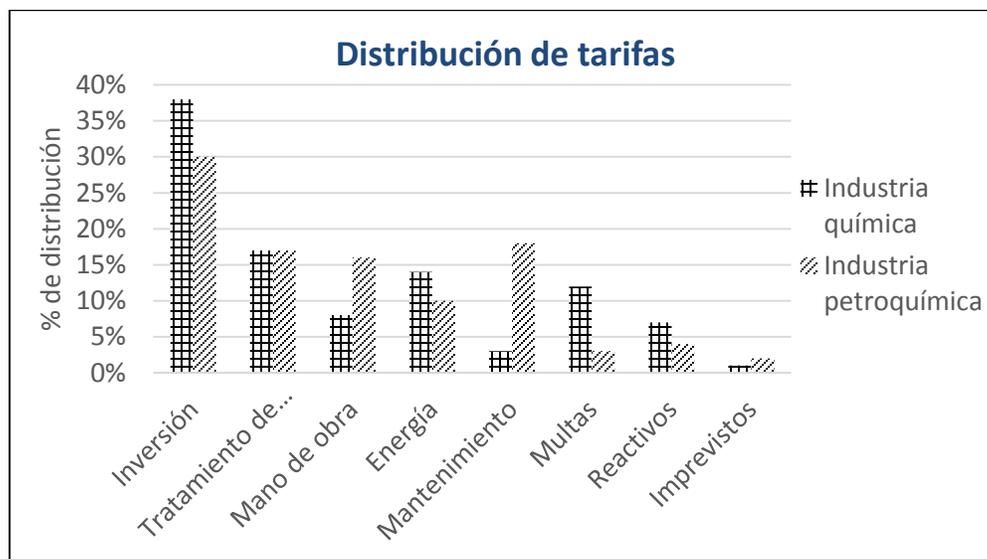


Figura 13. Comparación de tarifas en PTAR (Vanrolleghem, 1996)



La Figura 13 muestra que pueden existir diferencia en los importes, lo cual depende de donde proviene el agua que se va a tratar; un ejemplo de ello es el mantenimiento que se le debe dar al agua proveniente de la industria petroquímica que debido a la incrustación de sales en los equipos provoca su desgaste, por lo que el equipo no opera de la manera esperada; sin embargo la distribución puede variar según la tecnología utilizada.

---

### 6.3. Indicadores de la PTAR

---

Para la evaluación de la eficiencia de una PTAR, es necesario la recolección de históricos de operación; por lo general se toman en cuenta los siguientes aspectos para su evaluación:

- Consumo de reactivos.
- Flujos de efluentes.
- Consumo de energía en cada equipo y global de la planta.
- Volumen de agua tratada.
- Disposición de residuos.

En la Figura 14 se muestra un ejemplo de la evaluación de una PTAR por medio del precio de la electricidad en base al flujo tratado; esto con el fin de conocer la eficiencia de las bombas y equipos mecánicos



## Evaluación del desempeño técnico y económico de plantas de tratamiento de aguas residuales industriales

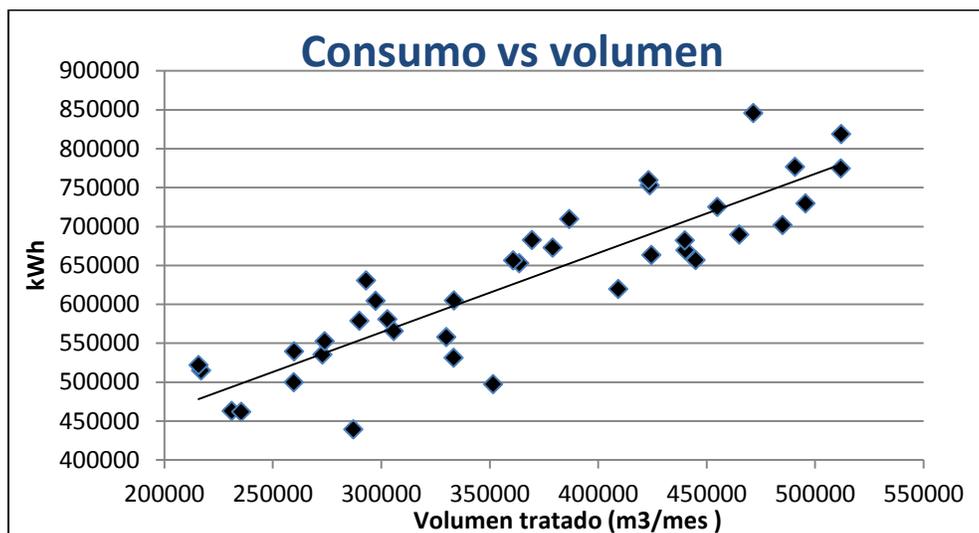


Figura 14. Comportamiento del consumo eléctrico al cambiar el volumen tratado

En la Figura 14 se observa que el consumo de energía eléctrica total aumenta al incrementar el volumen de agua tratado, siguiendo una tendencia lineal.

Por otro lado, en la Figura 15 se muestra otro ejemplo de cómo al aumentar el volumen tratado el precio por cada metro cúbico disminuye, esto debido a que se aprovecha de mejor manera el trabajo realizado por los equipos mecánicos. Al igual que en la Figura 14 se muestra un comportamiento lineal.

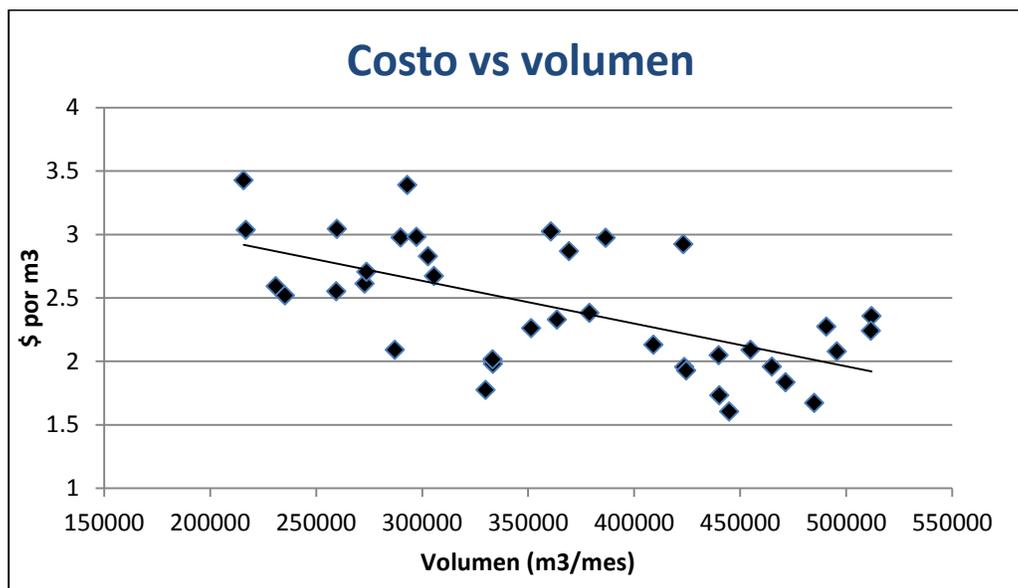


Figura 15. Comportamiento de la energía eléctrica por m<sup>3</sup> tratado al modificar el volumen tratado

La importancia de tomar en cuenta los indicadores, es debido a que por medio de ellos es posible que se detecten errores dentro de la planta, que por lo general provocan un gasto innecesario dentro de la misma; ya sea por cuestiones de un tratamiento inadecuado, riesgos al personal, al ambiente o las instalaciones de la planta.

#### 6.4. Metodología para la evaluación de costos

Para llevar a cabo la evaluación de los costos, se debe realizar una revisión de las tarifas que debe cubrir la PTAR en un periodo de tiempo; en dicha revisión se debe hacer una actualización de los costos por medio de los índices correspondientes; seguida por una comparación de las facturas emitidas por la planta, de esta manera se corrobora que los pagos sean los correctos; de esta manera se determina si alguno de los pagos presenta desviaciones.



## Evaluación del desempeño técnico y económico de plantas de tratamiento de aguas residuales industriales

En la Figura 16 se muestra el esquema simplificado de la metodología aplicable a la evaluación de costos en una PTAR.

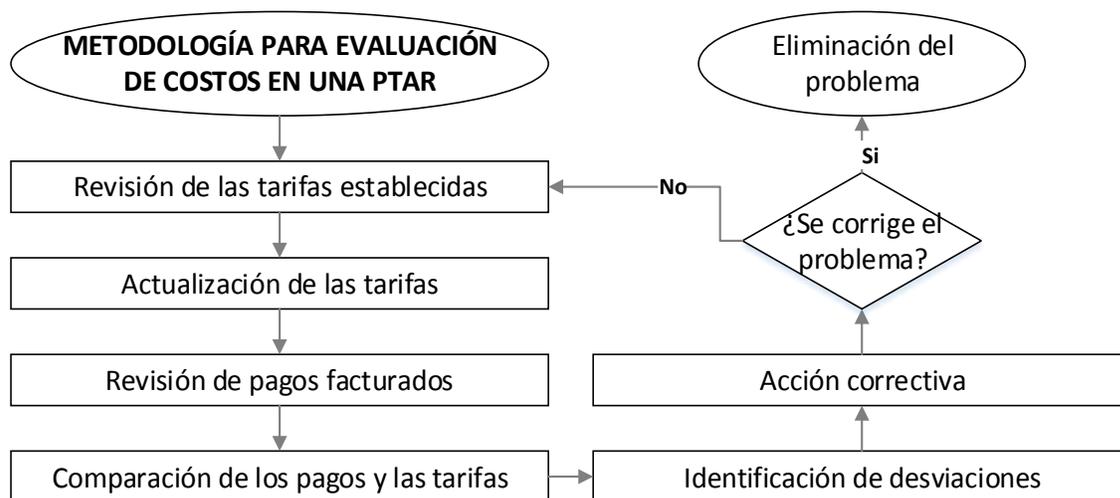


Figura 16. Metodología para la identificación y solución de problemas en los costos de una PTAR (Instituto Mexicano de Tecnología del Agua)



### 7. CASO DE ESTUDIO

Se consideró una Planta de Tratamiento de Aguas Residuales del SNR (Figura 17), con el fin de realizar un diagnóstico de la operación actual de la planta.



Figura 17. Ubicación de la PTAR

Se realizó un análisis del proceso y operación actual del tren de tratamiento de agua residual de la PTAR, en donde se efectuó una inspección visual, verificando las corrientes de influente, etapas de tratamiento, condiciones de operación y desviaciones respecto al diseño, dicha planta cuenta con una superficie total de 34,878.77 m<sup>2</sup>.

Además se realizó un análisis de documentación proporcionada por la PTAR, con el fin de llevar a cabo las evaluaciones técnicas, ambientales y económicas de la planta; los datos por medio de los cuales se realizaron dichos análisis provienen del proyecto Servicio de Evaluación de Escenarios para Garantizar la Continuidad de la Operación, Adecuaciones y Mantenimiento de la PTAR en la Refinería “Miguel Hidalgo”, en Tula, Hidalgo.



### 7.1. Evaluación técnica

En esta sección se evaluó el funcionamiento operativo, por medio de datos proporcionados por la PTAR. Dicha planta cuenta con una etapa de pretratamiento por flotación con aire disuelto, un sistema de tratamiento biológico y un sistema terciario de tratamiento que involucra suavización, recarbonatación, filtración y cloración para su desinfección; el diagrama de flujo se muestra en el ANEXO 2.

La PTAR fue diseñada con un flujo de tratamiento máximo de 288 L/s y con un influente promedio de 240 L/s; sin embargo, en los últimos dos años el agua tratada por la PTAR en promedio ha sido de 183.13 L/s, lo cual equivale a un 76.3% del valor promedio establecido en el contrato; además de que los valores no son constantes y existen fluctuaciones en el influente. En la Figura 18 se muestran los históricos de dicha planta y las variaciones que ha presentado.

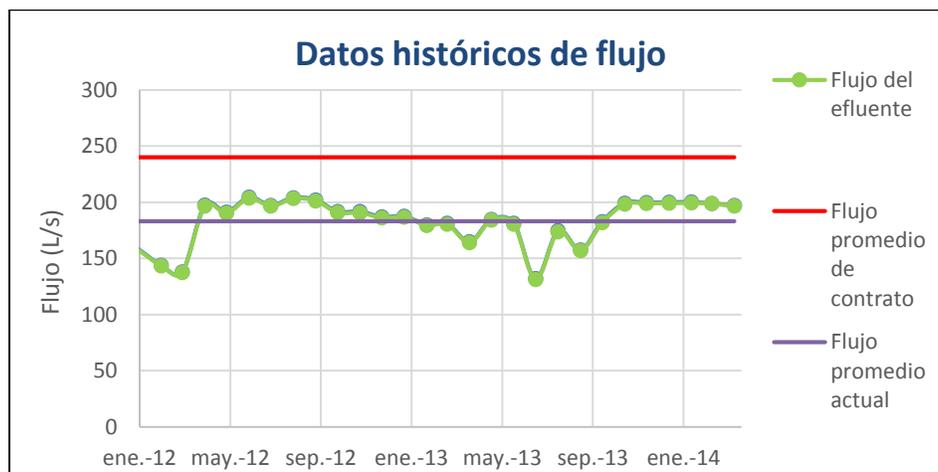


Figura 18. Datos históricos del flujo de la PTAR (PEMEX, 2014)



## Evaluación del desempeño técnico y económico de plantas de tratamiento de aguas residuales industriales

Debido al flujo inferior en el influente, la eficiencia de los equipos electromecánicos y los tiempos de retención hidráulicos en los tanques y reactores son diferentes a los contemplados durante el diseño.

Los reactivos utilizados por la PTAR son: carbonato de sodio, hidróxido de calcio, óxido de magnesio, polímeros catiónicos y aniónicos, sulfato de aluminio, dióxido de carbono, cloro gaseoso y ácido fosfórico.

El consumo promedio total de energía eléctrica de la PTAR es de 629,517 kWh/mes; representado en la Tabla 14, el cual se encuentra dividido en cada una de las áreas de tratamiento.

Tabla 14. Consumo de energía eléctrica en la PTAR (PEMEX, 2014)

Tren de tratamiento	Capacidad instalada (kW)	Consumo medio mensual (kW h)
Filtración y cloración y envío	812.51	225,391.03
DAF y lodos	195.67	53, 572.60
Suavización y neutralización	76.58	19,804.97
Reactivos	22.88	7,688.39
Biológico	458.04	278,053.86
Servicios	147.05	45,005.81
TOTAL	1,713	629,517

El consumo mensual que se presenta, fue tomado de datos proporcionados por la PTAR ya que algunos de los equipos no funcionan las 24 horas. El índice energético de diseño es de 2.81, sin embargo por medio de la operación actual de la planta se determinó que el índice actual es de 1.67.

Para la calidad de agua de la PTAR, se realizó un promedio de los datos que se tenían de dos años a la fecha, ya que los valores de esos años son similares, por lo que se concluye que la operación ha sido semejante, los cuales se muestran en el ANEXO 3; además se observa que el agua en el influente presenta calidades variables, lo cual no se encontraba contemplado en el diseño; en la Figura 19 se



## Evaluación del desempeño técnico y económico de plantas de tratamiento de aguas residuales industriales

muestran los parámetros que presentan una remoción menor a la establecida para el efluente.

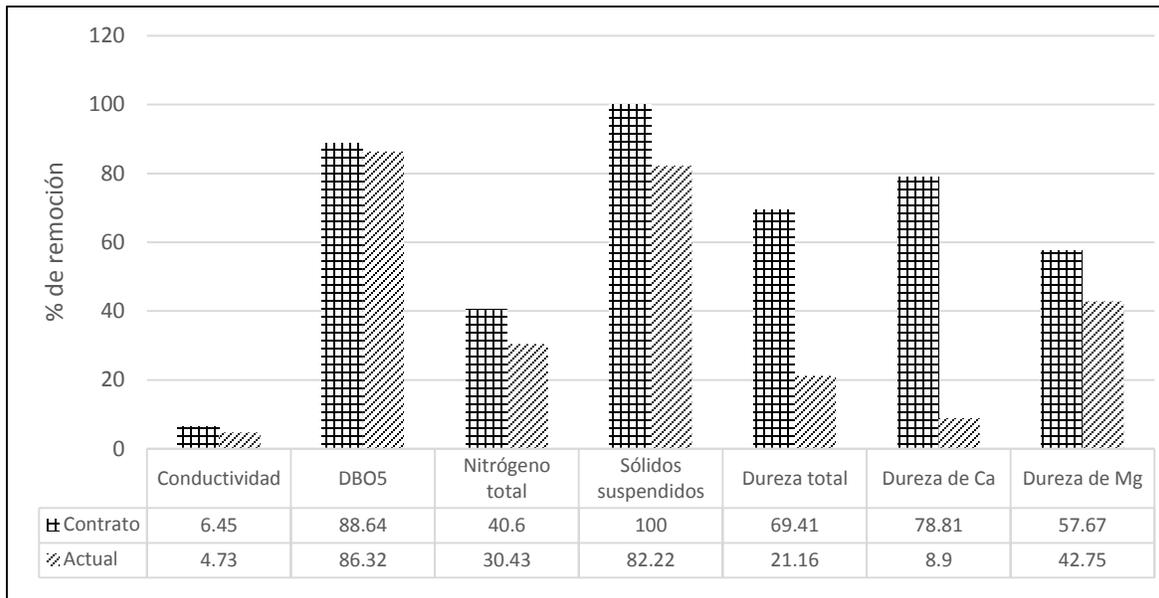


Figura 19. Parámetros fuera de lo especificado (PEMEX, 2014)

En la PTAR se obtienen diferentes tipos de residuos (Tabla 15), los cuales son puestos a disposición; sin embargo, las cantidades de la generación de residuos por  $m^3$  de agua tratada varían según el flujo que recibe la planta.

Tabla 15. Residuos generados por la PTAR (PEMEX, 2014)

Residuos	Cantidad	Tratamiento
Basura de cribas	Despreciable	Contratistas
Grasas y aceites	1.08 ton/día	Contratistas
Lodos biológicos	11.3 Ton/día	Deshidratación y contratistas
Lodos inorgánicos	46.2 Ton/día	Deshidratación y contratistas

Con el propósito de mejorar el desempeño de la planta se realizaron desviaciones en el diseño de la misma en donde:



## Evaluación del desempeño técnico y económico de plantas de tratamiento de aguas residuales industriales

---

- Se instaló un sistema de dosificación de Sulfato de Aluminio como coagulante, un tanque de sulfato de Aluminio, bombas dosificadoras de Sulfato de Aluminio y un sistema de paro-arranque de las bombas dosificadoras; en el caso de que la DQO en el efluente de la refinería presente valores altos.
- Los compresores de aire que alimentan al sistema DAF se encuentran fuera de servicio.
- Se instaló un equipo centrífugo para la deshidratación del lodo inorgánico y grasas provenientes del DAF.
- Los deshidratadores de natas, están fuera de operación.

---

### 7.2. Evaluación ambiental

---

La evaluación realizada a la PTAR, consistió en la revisión de permisos y licencias de la planta; determinando que la planta cuenta con los permisos y las licencias necesarias para poder llevar a cabo sus operaciones.

Por medio de las Normas aplicables para los factores ambientales mencionados en la sección 5, se llevó a cabo una evaluación de los diferentes factores que están siendo afectados por medio de la PTAR; en la Tabla 16 se muestran las observaciones para uno de los indicadores.





## Evaluación del desempeño técnico y económico de plantas de tratamiento de aguas residuales industriales

Tabla 16. Evaluación de los factores en la PTAR

Factor	Indicadores	Norma reguladora	Observación	
Aire	Emisiones de polvos	NOM-156-SEMARNAT-2012	No cuentan con estaciones de monitoreo	
	Emisiones de gases	NOM-156-SEMARNAT-2013	No cuentan con estaciones de monitoreo, sin embargo la planta no genera emisiones de gases	
	Ruido	NOM-081-SEMARNAT-1994	Los sopladores rebasan los límites permitidos (68-65dB), los cuales presentan niveles sonoros de 70dB las 24 horas	
	Generación de malos olores	NA	Se presentan malos olores dependiendo de la cantidad de contaminantes	
	Calidad		NOM-020-SSA1-1993	No se reportan concentraciones de ozono
			NOM-021-SSA1-1993	No se reportan concentraciones de monóxido de carbono
			NOM-022-SSA1-1993	No se reportan concentraciones de dióxido de azufre
		NA	Cambio en humedad y temperatura por aireación	
Suelo	Modificación de propiedades físicas	NOM-138-SEMARNAT-2003	Se presentan alteraciones en el entorno, ya que colinda con zonas agrícolas	
	Modificación de propiedades químicas	NOM-138-SEMARNAT-2003	Se hicieron las modificaciones necesarias durante la construcción, ya que se utilizaba para el cultivo de alfalfa	
	Calidad	NOM-138-SEMARNAT-2003	Se encuentra en buen estado	
Agua	Drenaje	NOM-002-SEMARNAT-1996	No se presentan fugas	
	Infiltración	NOM-001-SEMARNAT-1996	Falta de revestimiento y cuidado de los canales en la zona (en caso de derrame)	
	Calidad	NOM-001-SEMARNAT-1996	NA; El agua tratada es utilizada por la Refinería	
Biota	Alteración de la cobertura vegetal	NA	Eliminación de pastizal durante la etapa de construcción; existencia de vegetación inducida; sin embargo no se genera modificación	
	Generación de fauna nociva	NOM-019-SEMARNAT-2006	Presencia de vegetación en reactores; se lleva un control en proceso para evitarlo	





## Evaluación del desempeño técnico y económico de plantas de tratamiento de aguas residuales industriales

---

El personal que opera la planta es susceptible a riesgos al estar expuesto al agua sin tratar, así como materiales peligrosos, tal es el caso del cloro, cal y lodos biológicos; estos últimos pueden ser foco de infección si no se cumplen las medidas de seguridad requeridas; sin embargo cuenta con un plan de contingencia en caso de imprevistos.

Además se realizó un análisis CRETIB de los residuos generados por medio de los tratamientos; en donde se determinó que no presentan características de residuos peligrosos, por lo que pueden ser puestos a disposición (SEMARNAT, 1993).

---

### **7.3. Evaluación de los costos**

---

Se llevó a cabo la revisión y el análisis de la situación actual contable y fiscal del contrato para determinar si las tarifas corresponden a lo que se estableció en un inicio para dicha PTAR; sin embargo, dichas tarifas consideran que la planta opera a plena capacidad; excepto la tarifa variable, debido a la susceptibilidad de variaciones en cada periodo de facturación, se calculó conforme al volumen de agua tratada y por efectos del ajuste mensual con los índices establecidos en el contrato.

En la Figura 20 se presenta la variación de los costos de cada una de las tarifas, las cuales fueron actualizadas por medio de los índices presentados. Es importante mencionar que para la actualización de tarifas se utilizó el Índice de Productos Químicos Derivados del Petróleo, Caucho y Plástico desde el inicio de operaciones de la planta hasta el cese de la publicación del mismo, junio de 2012, por lo que se estableció el uso de un índice sustituto equivalente; Índice de Industria Química, que considera todas las sustancias químicas utilizadas para el tratamiento del agua en la planta.



## Evaluación del desempeño técnico y económico de plantas de tratamiento de aguas residuales industriales

Los montos que se presentan son anuales, y se consideraron desde que empezó a operar la planta, hasta la fecha de operación establecidos en el Contrato de Prestación de Servicios.

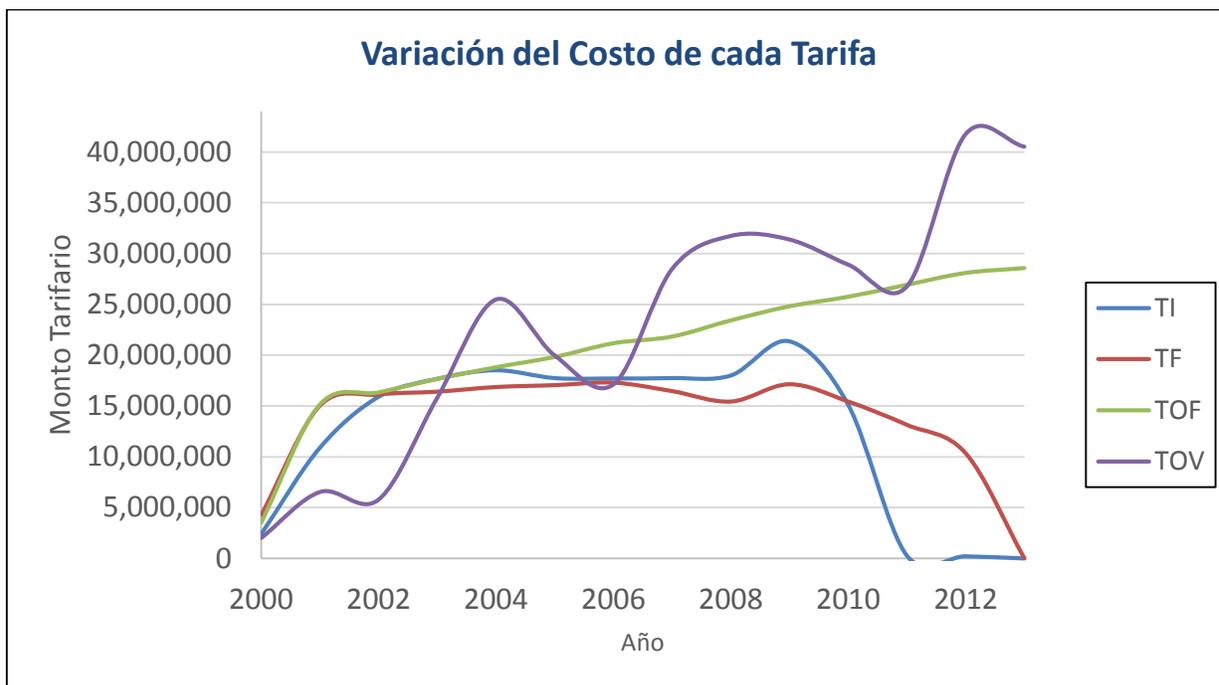


Figura 20. Históricos anuales de de las Tarifas establecidas (PEMEX, 2014)

Para la representación de la variación de la planta se tomaron en cuenta las tarifas especificadas para la evaluación; en la Tabla 17 se describen los aspectos considerados para cada una de ellas y el total pagado en los años de operación mencionados.



## Evaluación del desempeño técnico y económico de plantas de tratamiento de aguas residuales industriales

Tabla 17. Monto de las tarifas durante el funcionamiento de la PTAR (PEMEX, 2014)

Tarifa	Componente	Acumulado. Facturación (2000-2014)
TI	Capital de los accionistas	43,000,000
	Amortización principal de la deuda	131,000,000
	<b>Subtotal</b>	<b>174,000,000</b>
TF	Obligaciones fiscales (comp. Nacional)	62,000,000
	Costo del financiamiento	42,000,000
	Utilidad de los inversionistas	87,000,000
	<b>Subtotal</b>	<b>191,000,000</b>
TOF	Gastos de operación	150,000,000
	Energía eléctrica fija	74,000,000
	Gastos de administración	0
	Mantenimiento y conservación (moneda Extranjera)	47,000,000
	Mantenimiento y conservación (moneda Nacional)	7,000,000
	Primas de seguros y fianzas	9,000,000
	Gastos imprevistos	9,000,000
	<b>Subtotal</b>	<b>296,000,000</b>
TOV	Energía eléctrica variable	65,000,000
	Reactivos químicos (moneda Nacional)	95,000,000
	Reactivos químicos (moneda Extranjera)	53,000,000
	Imprevistos	8,000,000
	Tratamiento y disposición final de lodos y residuos.	110,000,000
	<b>Subtotal</b>	<b>331,000,000</b>
<b>Total</b>		<b>992,000,000</b>

Por medio de datos encontrados en la literatura se llevó a cabo una comparación contra los importes realizados por la PTAR; mostrados en la Figura 21.



## Evaluación del desempeño técnico y económico de plantas de tratamiento de aguas residuales industriales

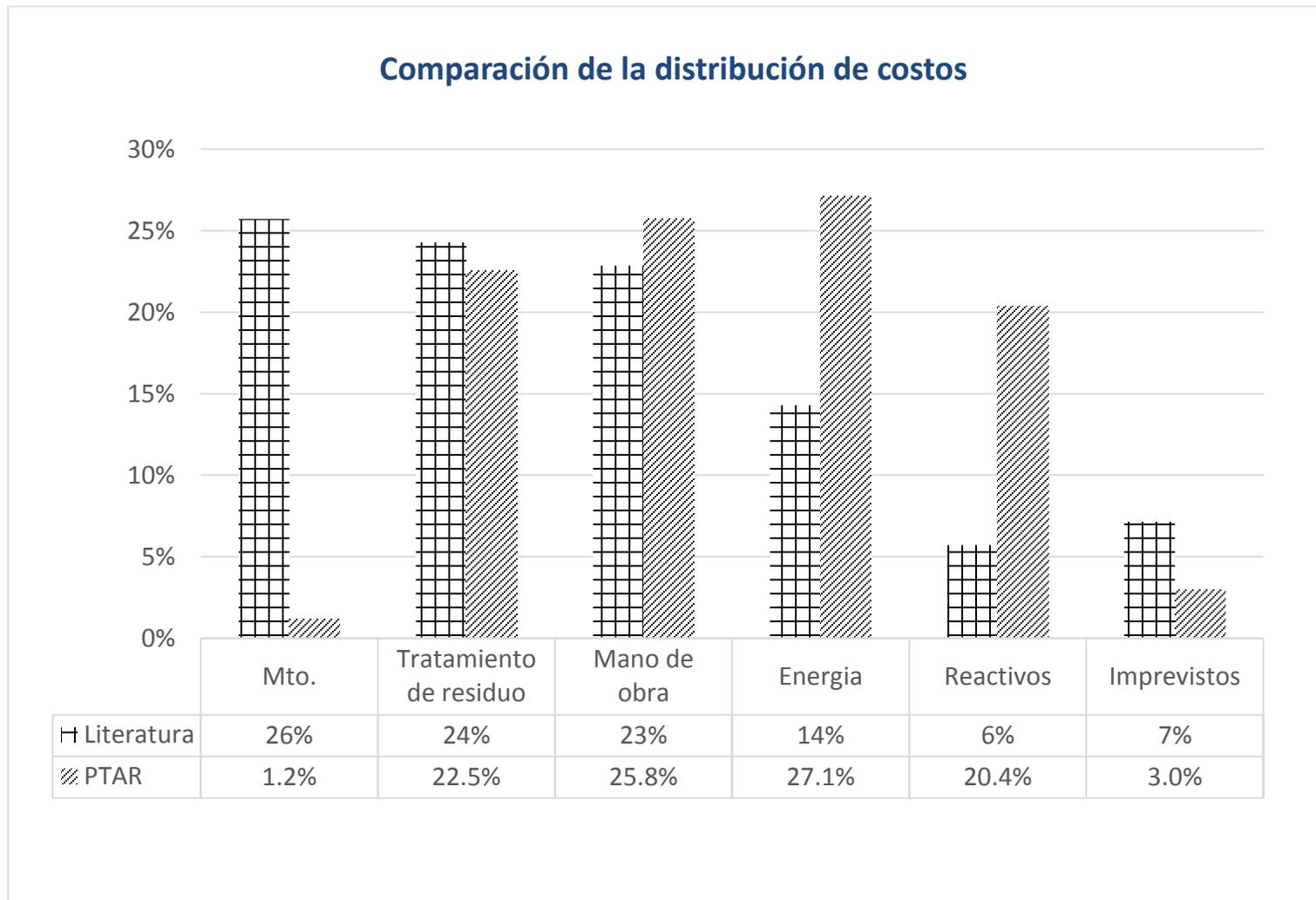


Figura 21. Análisis de los costos de la PTAR (PEMEX, 2014) (Vanrolleghem, 1996)





### **8. ANÁLISIS**

---

En México es común que una buena parte de las plantas de tratamiento de aguas presenten deficiencias dentro de sus operaciones y algunas otras se encuentran fuera de operación, por lo que un diagnóstico periódico de dichas plantas ayudaría a que las mismas operen de forma adecuada. Por lo cual es importante dar prioridad en la evaluación de las plantas identificadas, que funcionan con eficiencias menores de 50%, así como investigar las causas de plantas que se encuentran fuera de operación; por lo que un programa que incluya los diagnósticos presentados permitirá su rehabilitación o bien su operación eficiente. Además surge la importancia de estructurar programas de evaluación para PTAR y cursos de capacitación.

Durante el diagnóstico de la PTAR, se elaboró el inventario de los activos fijos que conforman la planta, en donde se verificó que los equipos se encuentren en buenas condiciones; debido a la implementación del plan de mantenimiento con el que cuentan, el 90% de los equipos planteados en el diseño se encuentran operando, mientras que el otro 10% fueron reemplazados o se encuentran fuera de operación, en su mayoría instrumentación y equipos electromecánicos.

La PTAR presenta un flujo inferior al contemplado durante el diseño, lo que provoca cambios en la operación y deficiencia en ciertos equipos; el incremento en el flujo del influente de la PTAR, haría que dichos problemas se solucionaran. Además los parámetros de diseño muestran que las calidades esperadas por la planta, no cumplen con lo especificado; esto se debe a que dichos parámetros en el influente de la PTAR no cumplen con lo especificado; en donde sí el agua proveniente de refinería cumpliera con las especificaciones requeridas, el agua en el efluente de la PTAR, también lo cumpliría.



## Evaluación del desempeño técnico y económico de plantas de tratamiento de aguas residuales industriales

---

La planta no se considera de riesgo a la salud y/o medio ambiente, ya que los impactos ocasionados por la planta son mínimos, sin embargo dichos impactos son inevitables y permanentes, pero en baja magnitud, debido a que el subsuelo es permeable y permite una rápida lixiviación.

El diagnóstico económico muestra que las tarifas que se cobran por parte de la PTAR se encuentran actualizadas correctamente según lo establecido; sin embargo por medio de la comparación realizada con la literatura se determinó que los importes del mantenimiento son muy bajos, mientras que los de consumo energético y reactivos son altos; por lo que se recomienda una mayor inversión para el mantenimiento de los equipos; de esta manera los consumos tanto de reactivos y energético disminuirían.





---

## 9. CONCLUSIÓN

---

Por medio de la investigación en medios especializados sobre la normatividad vigente en materia de PTAR se observó que actualmente no existe una norma que regule la presencia de malos olores generados por las plantas; la implementación de una norma contribuiría a mejorar el entorno de las PTAR ya que algunas de ellas presentan olores en ciertas temporadas del año.

Para las metodologías tanto técnicas, ambientales y económicas se determinó que los puntos clave para llevar a cabo la evaluación son los comparativos entre los parámetros de diseño y de operación; ésta última de al menos dos años anteriores a su diagnóstico, con el propósito de conocer las desviaciones que se han ido presentado. Por lo que contar con bitácoras de operación y de mantenimiento, estados financieros y facturas es de gran importancia para realizarla.

Por medio de la metodología realizada se determinó que la PTAR presentada en el caso de estudio opera de manera adecuada, debido a los mantenimientos y cambios en los equipos de diseño.



## 10. BIBLIOGRAFÍA

- AMCA Sistemas. (2010). *Manifestación de impacto ambiental*. León, Guanajuato.
- Asociación alemana de saneamiento. (1988). *Determinación del grado de eficiencia de plantas de tratamientos de aguas residuales*.
- Banco Interamericano de Desarrollo. (Mayo de 2013). *Tratamiento de aguas residuales en México*. Obtenido de <http://idbdocs.iadb.org/wsdocs/getdocument.aspx?docnum=37783778>
- CFE. (2014). Conoce tu tarifa.
- Cisneros, B. J. (2012). *Diagnóstico del Agua en las Américas*. México: IANAS.
- Comisión Estatal del Agua de Jalisco. (2013). *Operación y Mantenimiento de Plantas de Tratamiento de Aguas Residuales con el Proceso de Lodos Activados*. Jalisco.
- Comisión Nacional del Agua. (2012). *Manual de Incremento de Eficiencia Física, Hidráulica y Energética en Sistemas de Agua Potable*. México: Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales.
- Comisión Nacional del Agua. (Octubre de 2014). *Gerencia de estudios y proyectos de agua potable y redes de alcantarillado*. Obtenido de Eficiencia en Sistemas de Bombeo: <http://www.conagua.gob.mx/CONAGUA07/Noticias/EficienciaenSisdeBombeo2daEdic.pdf>
- CONAGUA. (2001). *Programa Nacional*. Obtenido de <http://www.colsan.edu.mx/investigacion/aguaysociedad/proyectorfrontera/Programa%20Nacional%20Hidr%C3%A1ulico.pdf>
- Consejo Consultivo del agua, A.C. (2014). *Temas relacionados con el agua*. Recuperado el 9 de 7 de 2013, de Agua e industria: <http://www.aguas.org.mx/sitio/03b05.html>
- Diario Oficial de la Federación. (2012). *Parámetros de Estimación de Vida Útil*. México.
- Donate, J. P. (s.f.). *Digestión aerobia*. Obtenido de Diseño de procesos en Ingeniería Ambiental: [http://www3.uclm.es/profesorado/giq/contenido/dis\\_procesos/tema6.pdf](http://www3.uclm.es/profesorado/giq/contenido/dis_procesos/tema6.pdf)
- Eddy, M. &. (1996). *Ingeniería de Aguas Residuales: Tratamiento, Viertido y Reutilización*. USA: Mc Graw Hill.
- Enrique Valdez, e. a. (Junio de 2003). *Ingeniería de los sistemas de tratamiento y disposición de aguas residuales*. México: Fundación ICA. Obtenido de <http://dSPACE.uah.es/dSPACE/bitstream/handle/10017/477/E.%20INTRODUCI%C3%93N.pdf?sequence=4>
- García, A. M. (2005). *Análisis y diseño de una planta de tratamiento de agua residual para el municipio de San Andrés Cholula*. Cholula, Puebla.
- García, R. V. (2010). *Diseño de una metodología para la evaluación y selección de tecnología para el tratamiento de aguas residuales municipales, considerando aspectos tecnológicos, ambientales y económicos*. México.



## Evaluación del desempeño técnico y económico de plantas de tratamiento de aguas residuales industriales

---

- Hernández, R. C. (2004). *Estrategia de evaluación diagnóstica para plantas de tratamiento de aguas residuales*. México.
- Humberto Romero Álvarez, e. a. (s.f.). *Las vicisitudes de las plantas de tratamiento de aguas residuales en México*. México: Comisión Nacional del Agua.
- Humberto Romero Álvarez, e. a. (2011). *Las vicisitudes de las Plantas de Tratamiento de Aguas Residuales en México*. Comisión Nacional del Agua.
- INEGI. (2013). *Capacidad de las plantas de tratamiento de aguas residuales, México*. Obtenido de [http://buscador.inegi.org.mx/search?q=tratamiento+de+aguas+residuales+en+mexico&site=BIINEGI&btnG=Buscar&proxystylesheet=INEGI\\_Default&client=INEGI\\_Default&entsp=a\\_\\_inegi\\_politica&getfields=\\*&ud=1&lr=lang\\_es%7Clang\\_en&proxylload=1&sort=date%3AD%3AL%3Ad1&](http://buscador.inegi.org.mx/search?q=tratamiento+de+aguas+residuales+en+mexico&site=BIINEGI&btnG=Buscar&proxystylesheet=INEGI_Default&client=INEGI_Default&entsp=a__inegi_politica&getfields=*&ud=1&lr=lang_es%7Clang_en&proxylload=1&sort=date%3AD%3AL%3Ad1&)
- INEGI. (2014). *Población*. Obtenido de Número de habitantes: <http://cuentame.inegi.org.mx/poblacion/habitantes.aspx?tema=P>
- Instituto Mexicano de Tecnología del Agua. (s.f.). *Metodología para la planeación y evaluación financiera de proyectos de inversión para estudios de reúso*. México, Morelos.
- Jiménez, B. E. (2001). *La Contaminación Ambiental en México*. México: Limusa. Obtenido de Merichem Unit: [http://ns15.webmasters.com/\\*ventechequipment.com/httpdocs/panama/MerichemUnitSpanish.htm](http://ns15.webmasters.com/*ventechequipment.com/httpdocs/panama/MerichemUnitSpanish.htm)
- Ley Federal de Derecho. (2014). *Disposiciones Aplicables en Materia de Aguas Nacionales*. Gobierno de la Republica.
- Mendez, C. (Julio de 2013). *Proceso para tratamiento biológico de aguas residuales industriales*. Cuba: Universitaria. Obtenido de <http://www.industriapetroleramexicana.com/2010/07/la-refinacion-en-mexico/>
- PEMEX. (2014). Datos operativos.
- Pintado, C. E. (2014). *Estrategias de uso eficiente de agua en el Sistema Nacional de Refinación*. México D.F.
- Rodríguez, A. (2006). *Tratamientos avanzados de aguas residuales industriales*. Madrid: CEIM.
- Rojas, I. R. (2002). Gestión Integral de Tratamiento de Aguas Residuales. *Sistemas de Tratamiento de Aguas Residuales* (pág. 19). Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria y Ciencias del Ambiente. Obtenido de Plantas Industriales: <http://sademex.mx/es/taxonomy/term/3/0>
- Secretaría de la Función Pública. (2009). *Procedimiento Técnico PT-MEH para la elaboración de trabajos valuatorios que permitan dictaminar el valor de maquinaria, equipo y herramienta*. México.
- Secretaría del Medio Ambiente, Recursos Naturales y Pesca. (1996). *NOM-001-ECOL*. México.
- SEMARNAT. (1993). *NOM-052-SEMARNAT-1993*. México.





## Evaluación del desempeño técnico y económico de plantas de tratamiento de aguas residuales industriales

---

- SEMARNAT. (2006). *El medio ambiente en México: En Resumen*. Obtenido de [http://app1.semarnat.gob.mx/dgeia/informe\\_resumen/pdf/7\\_info\\_resumen.pdf](http://app1.semarnat.gob.mx/dgeia/informe_resumen/pdf/7_info_resumen.pdf)
- SEMARNAT. (2011). *Inventario nacional de plantas municipales de potabilización y de tratamiento de aguas residuales en operación*. México: Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales. Obtenido de <http://www.conagua.gob.mx/CONAGUA07/Publicaciones/Publicaciones/SGAPDS-INVENTRIO%202011%20FINAL.pdf>
- SEMARNAT. (2012). *Normas Oficiales Mexicanas ordenadas por Materia*. Obtenido de <http://www.semarnat.mx/leyes-y-normas/noms>
- SEMARNAT. (2 de Octubre de 2014). *Inventario nacional de plantas municipales de potabilización y de tratamiento de aguas residuales en operación*. Obtenido de <http://www.conagua.gob.mx/CONAGUA07/Publicaciones/Publicaciones/SGAPDS-INVENTRIO%202011%20FINAL.pdf>
- SEMARNAT. (8 de Octubre de 2014). *Normas y Leyes*. Obtenido de NOM-Normas Oficiales Mexicanas ordenadas por materia: <http://www.semarnat.gob.mx/leyes-y-normas/noms>
- Servicio de Impuestos Internos. (30 de Septiembre de 2014). *Tabla de vida útil*. Obtenido de Tabla de vida útil de los bienes físicos del activo fijo o inmovilizado: [http://www.sii.cl/pagina/valores/bienes/bienes\\_f.htm](http://www.sii.cl/pagina/valores/bienes/bienes_f.htm)
- Silvenses, H. C. (2009). *Decisiones de inversión en Plantas Químicas*. México: Comité Editorial de la Facultad de Química.
- Vanrolleghem, P. A. (1996). *Integration of wastewater treatment plant design and operation*. Gran Bretaña: Pergamon.





## 11. ANEXOS

### ANEXO 1. Parámetros de Estimación de Vida Útil (Diario Oficial de la Federación, 2012)

Concepto	Años de vida útil	% de depreciación anual
<b>Bienes inmuebles, infraestructura y construcciones en proceso</b>		
Edificios No Habitacionales	30	3.3
Infraestructura	25	4
Otros Bienes Inmuebles	20	5
<b>Bienes muebles</b>		
<b>Mobiliario y Equipo de Administración</b>		
Muebles de Oficina y Estantería	10	10
Muebles, Excepto De Oficina Y Estantería	10	10
Equipo de Cómputo y de Tecnologías de la Información	3	33.3
Otros Mobiliarios y Equipos de Administración	10	10
<b>Mobiliario y Equipo Educacional y Recreativo</b>		
Equipos y Aparatos Audiovisuales	3	33.3
Cámaras Fotográficas y de Video	3	33.3
Otro Mobiliario y Equipo Educacional y Recreativo	5	20
<b>Equipo e Instrumental Médico y de Laboratorio</b>		
Equipo Médico y de Laboratorio	5	20
Instrumental Médico y de Laboratorio	5	20
<b>Equipo de Transporte</b>		
Automóviles y Equipo Terrestre	5	20





## Evaluación del desempeño técnico y económico de plantas de tratamiento de aguas residuales industriales

Concepto	Años de vida útil	% de depreciación anual
Carrocerías y Remolques	5	20
Otros Equipos de Transporte	5	20
<b>Maquinaria, Otros Equipos y Herramientas</b>		
Maquinaria y Equipo Industrial	10	10
Maquinaria y Equipo de Construcción	10	10
Sistemas de Aire Acondicionado, Calefacción y de Refrigeración Industrial y Comercial	10	10
Equipo de Comunicación y Telecomunicación	10	10
Equipos de Generación Eléctrica, Aparatos y Accesorios Eléctricos	10	10
Herramientas y Máquinas-Herramienta	10	10
Otros Equipos	10	10

Tipo de equipo	Vida útil en años	Tipo de equipo	Vida útil en años
Acumulador hidráulico	25	Equipo contra incendio (hidrantes, válvulas, etc.)	30
Agitador menor de 5hp	15	Equipo de instrumentación y control	15
Agitador mayor de 5hp	20	Equipos de lubricación	20
Alumbrado exterior	25	Eyector	15
Bombas	20	Fosa de sedimentación	25
Bombas manuales y dosificadoras	15	Generador eléctrico	20
Calderetas	25	Generadora de vapor	25
Calentador	25	Guardas cloro	25
Cambiador de calor	20	Instrumentación y control	20
Camiones de bomberos	25	Líneas y válvulas	25
Casa de bombas	40	Muros de contención de concreto (diques)	40
Casetas prefabricadas de lámina pintada	15	Pavimentos en general y patios	25





## Evaluación del desempeño técnico y económico de plantas de tratamiento de aguas residuales industriales

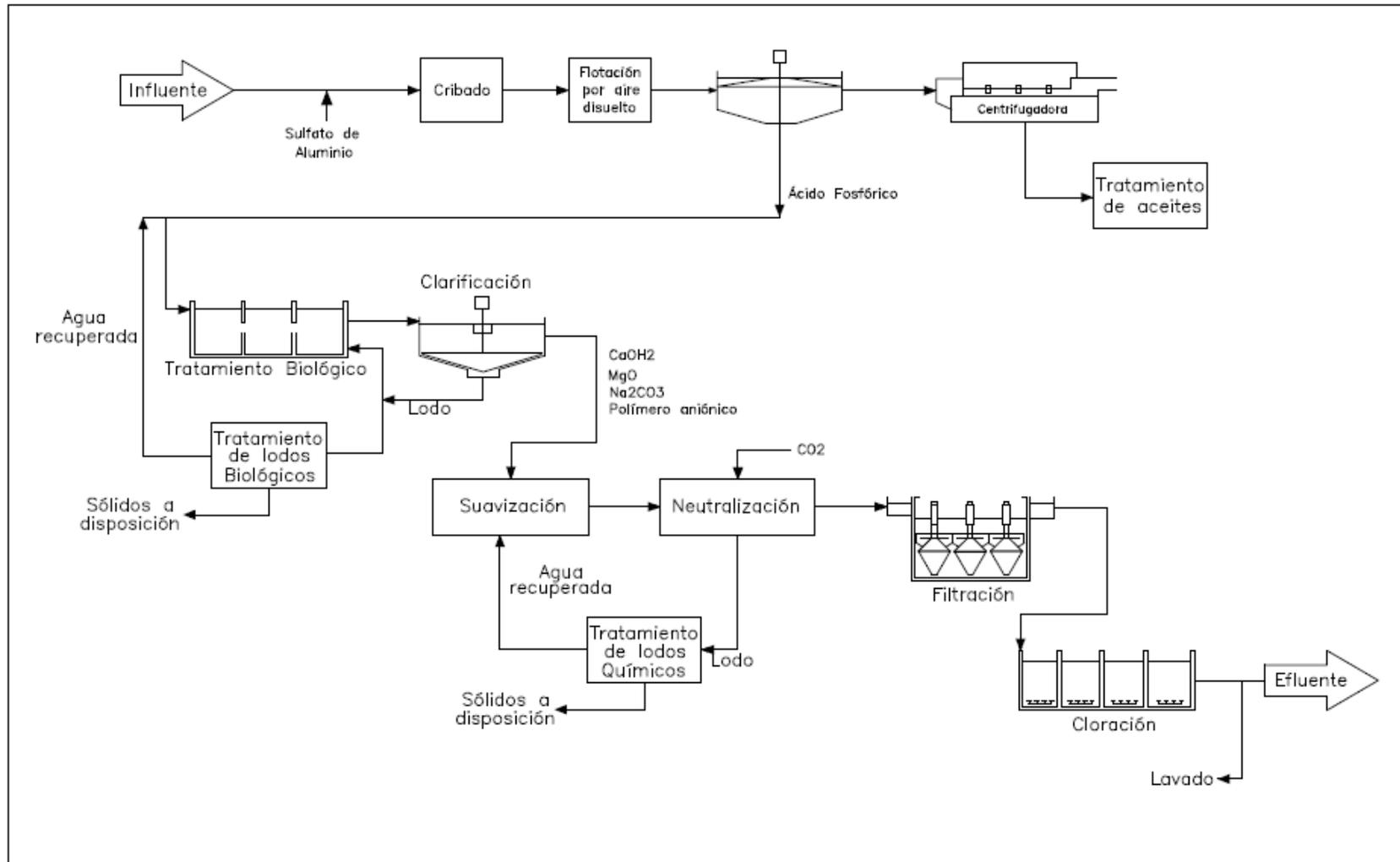
Casetas prefabricadas de multipanel	25	Reactor	25
Centro de control de motores	20	Recipientes a presión	20
Cercas o bardas perimetrales	35	Silo de catalizador	25
Cobertizos en general	25	Sistema de control distribuido	20
Compresor	20	Sistema de lubricación	20
Cuarto de controles eléctricos	50	Soplador de aire chicos	15
Drenajes exteriores en general	35	Soplador de aire grandes	30
Edificio de subestación eléctrica	25	Subestación eléctrica	25
Edificios de mampostería y concreto	50	Tanques para proceso	20
Eductor	15	Tanques para almacenamiento	25
Enfriador ( tipo cambiador de calor )	20	Tubería	30





## Evaluación del desempeño técnico y económico de plantas de tratamiento de aguas residuales industriales

### ANEXO 2. Diagrama de flujo de la PTAR (PEMEX, 2014)





## Evaluación del desempeño técnico y económico de plantas de tratamiento de aguas residuales industriales

### ANEXO 3. Calidades de agua en influente y efluente a LA PTAR (PEMEX, 2014)

Parámetro	Unidades	Influente a la PTAR	Estado actual	Efluente de la PTAR	Estado actual	% de remoción	
						Contrato	Actual
pH	Unidades de pH	6 a 9	7.72	8 Máx.	7.72	-	-
Temperatura	°C	12 a 20	19.97	12 a 20	<b>20.69</b>	-	-
Conductividad	µS/cm	3100 Máx.	<b>3197.88</b>	2900	<b>3046.73</b>	6.45	4.73
DBO <sub>5</sub>	mg/L	176 Máx.	170.65	20 Máx.	<b>23.35</b>	88.64	86.32
DQO	mg/L	870 Máx.	509.28	80 Máx.	70.74	90.80	86.12
Fosfatos	mg/L	0.08 Máx.	0.77	1.0 Máx.	0.15		
Nitrógeno total	mg/L	23 Máx.	<b>27.71</b>	16 Máx.	<b>16.46</b>	30.43	40.60
Sólidos suspendidos totales	mg/L	270 Máx.	25.87	0	<b>4.6</b>	100	82.22
Sólidos disueltos totales	mg/L	2302 Máx.	1600.67	2145 Máx.	1525.61	6.82	4.69
Sólidos sedimentables	mg/L	20 Máx.	<0.1	0	<b>&lt;0.1</b>		
Grasas y aceites	mg/L	60 Máx.	24.53	2.0 Máx.	1.05	96.67	95.72
Alcalinidad a la fenolftaleína	mgCaCO <sub>3</sub> /L	32 Máx.	4.79	15 Máx.	0.09	53.13	98.12
Alcalinidad total	mgCaCO <sub>3</sub> /L	330 Máx.	<b>344.07</b>	130 Máx.	103.05	60.61	70.05
Dureza total	mgCaCO <sub>3</sub> /L	425 Máx.	<b>543.07</b>	130 Máx.	<b>428.14</b>	69.41	21.16
Dureza de Calcio	mgCaCO <sub>3</sub> /L	236 Máx.	<b>366.59</b>	50 Máx.	<b>333.95</b>	78.81	8.90
Dureza de Magnesio	mgCaCO <sub>3</sub> /L	189 Máx.	164.51	80 Máx.	<b>94.19</b>	57.67	42.75
Sílice	mg/L	96 Máx.	54.23	40 Máx.	34.47	58.33	36.44
Fenoles	mg/L	4 Máx.	<b>7.84</b>	0.5 Máx.	0.08	87.50	98.98
Turbidez	NTU	N.D.	100.13	< 1.0	<b>4.52</b>	-	-

