



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO

**FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES
" Z A R A G O Z A "**

9
Zej

**" SISTEMA EXPERTO PARA
TRATAMIENTO DE AGUAS
RESIDUALES "**

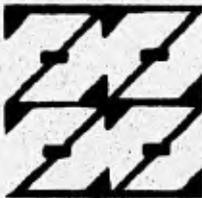
T E S I S

Que para obtener el Título de:

INGENIERO QUIMICO

P r e s e n t a :

RENE RAFAEL ECHANIZ ROJAS



LO HUMANO
E/É
DE NUESTRA REFLEXION

Acompañado de un diskette 3 1/2

MEXICO, D. F. 1996.

**TESIS CON
FALLA DE ORIGEN**

**TESIS CON
FALLA DE ORIGEN**



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

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

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

TESIS

COMPLETA



UNIVERSIDAD NACIONAL
AVENIDA DE
MEXICO

FACULTAD DE ESTUDIOS
SUPERIORES *ZARAGOZA*

JEFATURA DE LA CARRERA
DE INGENIERIA QUIMICA

OF/IQ/JU/082/058/95

SR. RENE RAFAEL ECHANIZ ROJAS
P R E S E N T E.

En respuesta a su solicitud de asignación de jurados para el Examen Profesional, les comunico que la Jefatura a mi cargo ha propuesto la siguiente designación:

PRESIDENTE: ING. ALEJANDRO ROGEL RAMIREZ
VOCAL: ING. EDUARDO VAZQUEZ ZAMORA
SECRETARIO: ING. JOSE BENJAMIN RANGEL GRANADOS
SUPLENTE: ING. ANDRES AQUINO CANCHOLA
SUPLENTE: ING. GABRIEL CRUZ ZEPEDA

A T E N T A M E N T E
"POR MI RAZA HABLARA EL ESPIRITU"

México, D.F., 14 de diciembre de 1995


ING. JOSÉ BENJAMIN RANGEL GRANADOS
JEFE DE LA CARRERA

<IEM

Dedicatoria:

A mis Padres y Hermanas, quienes con su apoyo, confianza y cariño, me han impulsado para seguir siempre hacia adelante.

A mi Asesor y Amigo Ing. Eduardo Vázquez Zamora, por la gran ayuda y herramientas brindadas para el desarrollo de este trabajo.

Agradecimiento:

A mi Amigo Ing. Rodolfo A. Islas Garcia por todas las facilidades y apoyo otorgado y a todas las personas que contribuyeron en la realización de este trabajo.

INDICE

	Página
Resumen	i
Introducción	ii
 CAPITULO 1	
Generalidades	
Introducción	1
Características de las aguas residuales	2
Características físicas	5
Características químicas	9
Características biológicas	18
Tipos de desechos industriales	17
Desechos líquidos industriales	18
Desechos sólidos y gaseosos	19
Que es un sistema experto	20
 CAPITULO 2	
Inteligencia artificial	24
Sistemas Expertos	27
Tipos de sistemas expertos	32
Construcción de un sistema experto	34
Representación del conocimiento	38
Adquisición de conocimiento	40
Base de conocimiento	44
Motor o dispositivo de inferencia	45
Aplicaciones de los sistemas expertos	50
 CAPITULO 3	
Técnicas de separación de las aguas residuales	53
Separación de sólidos suspendidos	54
Separación de sólidos coloidales	54
Separación de sólidos inorgánicos disueltos	54
Separación de grasas y aceites	55
Separación de materia orgánica biodegradable	55
Separación microorganismos patógenos	55
Separación de nutrientes	58
Tratamiento de compuestos tóxicos	58
Tratamiento de Plaguicidas	58
Tratamiento de metales pesados	57
Tratamiento de compuestos fenólicos	58
Tratamiento de algunos compuestos tóxicos específicos	59

Principales desechos producidos por la industria	
Industria Química de proceso	
Química Básica	63
Petroquímica básica	64
Petroquímica secundaria	64
Industria Química de producto	
Resinas sintéticas	65
Hule sintético y hulequímicos	65
Adhesivos	65
Plaguicidas	66
Fertilizantes	66
Jabones y detergentes	66
Farmacoquímica	66
Farmacéutica	66
Curtiduría	67
Establecimientos que prestan atención médica	67
Propuesta de tratamiento de efluentes producidos por la industria	
Industria Química de proceso	
Química Básica	69
Petroquímica básica	69
Petroquímica secundaria	70
Industria Química de producto	
Resinas sintéticas	70
Hule sintético y hulequímicos	71
Adhesivos	71
Plaguicidas	72
Fertilizantes	72
Jabones y detergentes	73
Farmacoquímica	73
Alimentos	74
Curtiduría	74
Establecimientos que prestan atención médica	75
Matanza de animales y empaques camicos	75
Norma Mexicana para el control de efluentes	
Industria de actividades agroindustriales, de servicios y tratamiento de aguas residuales	
76	
Industria Química de proceso.	
Química Básica	77
Petroquímica básica	77
Petroquímica secundaria	78
Industria Química de producto.	
Industria de las resinas sintéticas	78
Industria del hule sintético	79
Industria de los adhesivos.....	79
Industria de los Plaguicidas	80
Industria de los fertilizantes	80

	Página
Industria de los colorantes y los pigmentos	81
Industria de los jabones y los detergentes	81
Industria farmacéutica	82
Industria farmoquímica.....	82
Industria de la curtiduría.....	82
Establecimientos que prestan atención médica.....	83
Matanza de animales y empaques carnicos.....	83
Aguas residuales tratadas para riego agrícola.....	84

CAPITULO 5

Procesos de tratamiento de aguas residuales	
Introducción	88
Tratamiento preparatorio o preliminar	88
Factores de importancia	89
Topografía del terreno	89
Obra de toma	89
Area requerida	90
Tratamiento físico o primario	90
Cribado	90
Pulverizado o desmenuzado	93
Desarenadores	93
Tanques separadores de grasas	96
Igualación de flujo y bombeo.....	97
Mezclado	98
Floculación	99
Sedimentación	99
Flotación	107
Filtración	107
Osmosis inversa	108
Procesos biológicos o secundarios	110
Procesos aerobios convencionales	121
Procesos anaerobios	122
Adaptación de microorganismos	122
Proceso de lodos activados	123
Tratamiento químico	133
Precipitación Química	134
Transferencia de gases	135
Desinfección	136
Decoloración	136
Desinfección con ozono	137
Adsorción	137
Tratamientos fisicoquímicos.....	138
Osmosis y presión osmótica	138
Oxidación química	139
Oxidación del fenol y de otros orgánicos	141
Oxidación de compuestos sulfurados	142
Intercambio iónico	142

Elección del método o sistema de tratamiento	
Introducción	149
Consideraciones generales para la selección	149
Tipo del agua residual por tratar	149
Gasto	150
Disponibilidad de mano de obra, material, equipo y terreno	150
Condiciones topográficas y climatológicas	151
Desarrollo futuro, municipal, industrial o agropecuario	151
Recursos económicos y técnicos	152
Usos del agua tratada y calidad	152
Tratamiento conjunto o separado	153
Manual de Usuario	
Introducción	155
Como correr el programa	155
Agregar datos para actualizar archivo de datos	156
Normas Oficiales para el Control de efluentes	156
Listado de parámetros diarios calculados	156
Módulo de unidades centrifugas y sedimentadoras ..	156
Operación de preguntas y respuestas	157
Listado de datos de archivo en el disco	157
Menu II	157
Módulo de probabilidad	158
Módulo de estudios MICROSLIDE	158
Módulo de impresion	158
Módulo de promedios simples, máximos y mínimos..	158
Ejecución de promedios por periodo.....	158
Listado de la relación FM y MCRT	159
Módulo guía de productos químicos	160
Módulo de principales desechos producidos por la Industria	160
Módulo editor de archivos de datos	161
Módulo de nomenclatura y bibliografía	161
Regresar al módulo principal	161
Módulo de tratamiento de Efluentes	162
Salir del programa	162
Conclusiones	165
Bibliografía	166

INDICE DE TABLAS

		Página
Tabla 1	Características físicas, químicas y biológicas de las aguas residuales.	3
Tabla 2	Características físicas, químicas y biológicas de las aguas residuales y sus fuentes	4
Tabla 3	Composición típica del agua residual doméstica	5
Tabla 4	Estimación de los componentes de sólidos totales en agua residual.	6
Tabla 5	Contaminantes de importancia en el tratamiento de aguas residuales.	18
Tabla 6	Programación en IA Vs Programación convencional.	24
Tabla 7	Elementos más importantes que intervienen en un sistema experto.	33
Tabla 8	Ventajas e inconvenientes de los tipos de sistemas.	33
Tabla 9	Métodos convencionales para el tratamiento de aguas residuales.	53
Tabla 10	Operaciones y procesos con que se remueven la mayoría de los contaminantes presentes en las aguas residuales.	61
Tabla 11	Norma Oficial Mexicana NOM-CCA-031-ECOL/1993 para aguas residuales provenientes de la industria actividades agro...	76
Tabla 12	Limites máximos permisibles para las aguas residuales provenientes de la industria química inorgánica básica.	77
Tabla 13	Limites máximos permisibles para las aguas residuales provenientes de la industria petroquímica básica.	78
Tabla 14	Limites máximos permisibles para las aguas residuales provenientes de la industria petroquímica secundaria.	78
Tabla 15	Limites máximos permisibles para las aguas residuales provenientes de la industria de las resinas sintéticas.	79
Tabla 16	Limites máximos permisibles para las aguas residuales provenientes de la industria del hule y hulequímicos.	79
Tabla 17	Limites máximos permisibles para las aguas residuales provenientes de la industria de los adhesivos.	80
Tabla 18	Limites máximos permisibles para las aguas residuales provenientes de la industria de los plaguicidas.	80
Tabla 19	Limites máximos permisibles para las aguas residuales provenientes de la industria de los fertilizantes.	81
Tabla 20	Limites máximos permisibles para las aguas residuales provenientes de la industria de los colorantes y pigmentos.	81
Tabla 21	Limites máximos permisibles para las aguas residuales provenientes de la industria de los jabones y detergentes.	81
Tabla 22	Limites máximos permisibles para las aguas residuales provenientes de la industria Farmacoquímica.	82
Tabla 23	Limites máximos permisibles para las aguas residuales provenientes de la industria Farmacéutica.	82
Tabla 24	Limites máximos permisibles para las aguas residuales provenientes de la industria de la curtiduría.	83
Tabla 25	Limites máximos permisibles para las aguas provenientes de Establecimientos que prestan atención médica	83
Tabla 26	Limites máximos permisibles para las aguas residuales provenientes de la industria de la matanza de animales y empacados cármicos.	84

	Página
Tabla 27 Límites máximos permisibles para uso de aguas residuales tratadas en riego agrícola NTE-CCA-033-1993	84
Tabla 28 Algunos de los problemas que se presentan en los clarificadores y sus correcciones.	104
Tabla 29 Resumen de los procesos físicos para el tratamiento de aguas residuales.	109
Tabla 30 Los tres reinos de los microorganismos.	111
Tabla 31 Algunos microorganismos patógenos presentes en las aguas residuales.	115
Tabla 32 Características de algunos microorganismos.	124
Tabla 33 Resumen de los procesos biológicos para el tratamiento de aguas residuales.	133
Tabla 34 Agentes Oxidantes	140
Tabla 35 Secuencia de tratamiento de aguas residuales.	144
Tabla 36 Procesos específicos aplicados al tratamiento de aguas residuales	145
Tabla 37 Características típicas de los efluentes.	145
Tabla 38 Resumen de los procesos químicos para el tratamiento de aguas residuales	146
Tabla 39 Valores máximos y mínimos existentes en la base de datos de SISTEMA	163
Tabla 40 Nomenclatura de SISTEMA	164

INDICE DE FIGURAS

		Página
Figura 1	Clasificación e Intervalo de tamaño de partícula presentes en el agua residual.	7
Figura 2	Clasificación de los sólidos presentes en un agua residual de intensidad media.	8
Figura 3	Componentes de un sistema experto	27
Figura 4	Sistema Experto Genérico.	31
Figura 5	Ejemplo de Reglas.	45
Figura 6	Reglas encadenadas.	45
Figura 7	Ilustración del "Modus Ponens".	46
Figura 8	Encadenamiento hacia Adelante.	49
Figura 9	Encadenamiento hacia Atras.	49
Figura 10	Tren de tratamiento para Industria química de proceso: Química básica.	68
Figura 11	Tren de tratamiento para Industria química de proceso: Petroquímica básica.	69
Figura 12	Tren de tratamiento para Industria química de proceso: Petroquímica secundaria.	70
Figura 13	Tren de tratamiento para Industria química de producto: Resinas sintéticas.	70
Figura 14	Tren de tratamiento para Industria química de producto: Hule sintético y hulequímicos.	71
Figura 15	Tren de tratamiento para Industria química de producto: Adhesivos	71
Figura 16	Tren de tratamiento para industria química de producto: Plaguicidas	72
Figura 17	Tren de tratamiento para Industria química de producto: Jabon y Detergentes.	73
Figura 18	Tren de tratamiento para Industria química de producto: Farmacoquímica	74
Figura 19	Tren de tratamiento para Industria química de producto: Alimentos	74
Figura 20	Tren de tratamiento para Industria química de producto: Curtiduría	74
Figura 21	Tren de tratamiento para Establecimientos de atención medica	75
Figura 22	Tren de tratamiento para Industria de la matanza de animales y empacados cármicos	75
Figura 23	Clasificación general de los sistemas de tratamiento de las aguas residuales.	86
Figura 24	Diagrama de flujo de una planta de tratamiento de aguas residuales	88
Figura 25	Reja de limpieza mecánica.	92
Figura 26	Desarenador de velocidad constante	94
Figura 27	Crecimiento relativo de microorganismos en el curso de la estabilización de un residuo orgánico en un medio líquido.	116
Figura 28	Tasa de utilización del sustrato por unidad de masa de microorganismos en relación con la concentración del nutriente	118
Figura 29	Proceso de Lodos Activados.	127

RESUMEN

El uso del agua para consumo humano cada vez cuesta más y es más difícil obtenerla para consumo sin darle un tratamiento previo. En la actualidad el problema de la contaminación del agua es creciente, y llegará un punto en el cual se tendrán que tomar medidas drásticas con respecto a las emisiones contaminantes de las industrias en sus diferentes facetas. De los efluentes que son desechados por todas las industrias y en general todos los efluentes contaminados que son vertidos al ser tratados, no toda el agua tratada puede ser rehusada, dado las características de cada efluente. Pero, si se tomara conciencia, de que cada industria o establecimiento en general cumpliera perfectamente con las normas y antes de desechar el agua contaminada se le diera un tratamiento la inversión en tratamiento para agua de rehuso disminuiría. Las aguas residuales son fundamentalmente las aguas de abastecimiento de una población, de una industria, de un servicio, etc, después de haber sido contaminadas por diferentes usos, y dichas aguas al ser tratadas o no son enviadas primero a los sistemas de drenaje y después a diferentes cuerpos receptores como son ríos, lagos, mares o algún otro cuerpo receptor. La importancia de un tratamiento de las aguas radica en el hecho de que hay que preservar el ambiente del peligro latente de una total contaminación de las aguas naturales.

El desarrollo de un sistema experto para tratamiento de aguas residuales puede ayudar a las diferentes industrias que se manejan en este trabajo a darle un tratamiento a sus efluentes así como a llevar un control en su planta de tratamiento.

El sistema experto desarrollado en el presente trabajo tiene sus ventajas, ya que cuenta con diferentes módulos de información tales como propuesta de trenes de tratamiento, Normas Oficiales Mexicanas para el control de efluentes, principales desechos producidos por la industria, cuenta además con módulos donde podemos saber el estado actual de algunos de los procesos de la planta de tratamiento (tratamiento biológico) donde es posible obtener gráficos que nos auxilian en el tratamiento, siendo posible llevar un monitoreo de la planta con datos diarios almacenados en el sistema que son ingresados por el usuario, cuenta también con un módulo de posibles problemas que se pueden presentar en el tratamiento, que químicos se pueden emplear y donde emplearlos para corregir el problema. Las desventajas y limitaciones que tiene el sistema es que no hace cálculos para diseño de equipos involucrados en los trenes de tratamiento, las unidades de las variables que se ingresan al sistema deben ser consistentes y las que se manejan en él, en algunas variables si se ingresan ceros pueden causar error en el programa, las variables como temperatura, presión y densidad del agua permanecen constantes, el sistema tiene la limitante de que en los módulos de información como son el de trenes de tratamiento, normas oficiales, principales desechos, sólo se limitan a las industrias que se manejan en ellos y el módulo de guía de tratamiento químico se limita a los problemas presentados en él.

Lo presentado en el presente trabajo y en el sistema en algunos casos puede ponerse a discusión, algunos casos son teóricos y empíricos por lo que no han sido debidamente comprobados a niveles macro, es decir no se sabe si resulten perfectamente bien en la vida real, por lo que se recomienda antes de tomar una decisión hacer pruebas de tratabilidad a nivel laboratorio.

INTRODUCCIÓN

En los años recientes, los efectos acumulativos de la contaminación han llevado a una mayor preocupación y a una legislación más estricta con respecto a las emisiones contaminantes de las industrias.

Los métodos de tratamiento, conforme han transcurrido los años, van mejorando para dar una mejor calidad del agua tratada, ya sea para riego o para reutilizarla para el hombre, pero independientemente de su origen, el agua, una vez que ha sido usada y en consecuencia, transformada en agua residual, puede ser tratada y dependiendo de su calidad se puede seleccionar para ser reutilizada.

A principios de siglo se generaron operaciones y procesos, cuya característica fundamental es la de acelerar los procesos naturales de purificación en varios ordenes de magnitud, a todos ellos en conjunto se les denomina tratamiento de aguas residuales. Dentro de esta disciplina, a los que sólo hacen uso de operaciones físicas se les denomina tratamiento primario, a los que hacen uso de procesos químicos y biológicos se les denomina tratamiento secundario y tratamiento terciario a los que hacen uso de los tres tipos de proceso.

La tecnología del tratamiento de las aguas residuales tiene como propósito, eliminar las sustancias indeseables, éstas existen tanto en las aguas naturales como en las residuales solo que en diferentes concentraciones, tales como:

- Compuestos orgánicos solubles: causan disminución del oxígeno disuelto en los cuerpos receptores.
- Sólidos suspendidos: éstos se depositan en el fondo de los cauces cuando la corriente es tranquila, perjudicando por consecuencia la vida acuática.
- Compuestos orgánicos: cuando las aguas receptoras se van utilizar para abastecimiento de agua potable, algunos compuestos como los fenoles causan olor y sabor desagradable al agua.
- Metales pesados, cianuros y compuestos orgánicos tóxicos.
- Color y Turbiedad: ocasionan problemas estéticos
- Nitrógeno y fósforo: cuando los efluentes se descargan a lagos, lagunas y otras áreas, la presencia de estos elementos o sus compuestos es indeseable ya que favorece el crecimiento de algas indeseables.
- Sustancias no biodegradables: estas sustancias son indeseables para ciertos requerimientos de calidad del agua. Por ejemplo el bencensulfonato de aquilo de los detergentes, el cual es sustancialmente no degradable y frecuentemente ocasiona espuma persistente en los cuerpos de agua.
- Aceite y material flotante: ocasionan condiciones indeseables, y en muchos casos se restringe por la autoridad reguladora
- Material volátil: El sulfuro de hidrógeno y otras sustancias orgánicas volátiles, crean problemas con la contaminación del aire.

Las aguas residuales, dependiendo de su origen tienen diferente cantidad y tipos de desechos, además de composición diferente, ya sean residuos industriales, domésticos, aguas negras, municipales, etc., de ello depende la cantidad y composición. Para su

tratamiento por consiguiente debemos saber el tipo de industria de la cual proviene, así como la zona y tipo de población.

Un sistema experto es un programa para computadora inteligente que usa conocimiento y procedimientos de Inferencia para resolver problemas que requieren de un experto humano para su resolución.

Los papeles que pueden realizar los sistemas expertos son muy variados y corresponden fundamentalmente a los que juegan normalmente los expertos humanos. Entre ellos puede destacarse:

1. Como suministradores de información
2. Resolviendo problemas
3. Explicando

Los objetivos planteados para este trabajo de tesis fueron el de desarrollar un sistema experto que actuara como suministrador de información en diferentes módulos para darnos una idea de como tratar un efluente proveniente de una industria en particular, cuales son sus límites máximos permisibles, cuales son los principales desechos que son producidos por dicha industria, así como módulos en los que se pudiera apreciar el comportamiento diario de una planta de tratamiento y así poder calcular las condiciones de operación y poder llevar un monitoreo de dicha planta en sus principales procesos.

El conocimiento de todas las consideraciones aquí discutidas, se espera coadyuven al mejoramiento del criterio de selección, operación, mantenimiento de los sistemas de tratamiento que se estudian en la presente tesis.

CAPITULO 1

GENERALIDADES

INTRODUCCIÓN

En México la falta de agua es un problema grave y se manifiesta en las zonas geográficas donde hay mayor población. Paradójicamente, esas zonas son las que tienen volúmenes importantes de aguas residuales. Aprovechar esas aguas como recurso disponible es de gran importancia, ya que además de reducir la necesidad de traer más agua a la cuenca, minimiza el problema de disponer de ella.

En el país existen 320 cuencas hidrológicas en las que, de una u otra forma, descansa la actividad que sobre los recursos hidráulicos se ejerce en el país; sin embargo existen algunas sobre las que la actividad ha sido mucho más intensa, debido en parte a la magnitud de las mismas y a la importancia que ellas tienen. De las cuencas existen 11 sumamente explotadas y por consecuencia, con altos niveles de contaminación y 43 con un nivel medio de explotación, pero se encuentran en proceso de deterioro, y las restantes son de menor importancia.

La industria química es una de las grandes contaminadoras en lo que se refiere a efluentes, debido a que en su seno se procesan productos que utilizan el agua como servicio en diferentes etapas del proceso. Esta industria es fundamental para la economía de cualquier país, de ahí la preocupación consciente de que se tiene en cuanto al tratamiento de los efluentes que contaminan las aguas de los ríos, mares, manantiales, lagos y algunas que son los principales suministros de agua para consumo humano.

La mayoría de las industrias químicas cuentan con plantas de tratamiento de efluentes, con diferentes tipos de tratamiento de acuerdo al tipo de proceso.

El grado de tratamiento que requiere un desecho industrial o agua residual, depende de la dilución y características estabilizadoras de la corriente receptora. La calidad y concentración debe quedar reducida al mínimo en la planta industrial.

Independientemente de su origen, el agua, una vez que ha sido usada y, en consecuencia, transformada en agua residual, es vertida a los sistemas de drenaje y coacción para ser finalmente descargada en algún río o cuerpo receptor, en donde al entrar en contacto con factores propios del cuerpo receptor, que pueden ser factores físicos, químicos y biológicos, empieza a sufrir una serie de transformaciones que son independientes de la actividad humana, las cuales han dado como resultado final, hasta hace relativamente poco tiempo, la purificación natural del agua.

El fenómeno anteriormente mencionado es conocido como la autopurificación de las corrientes y es resultado de la acción conjunta de fenómenos físicos (dilución, mezclado, sedimentación, adsorción), fenómenos químicos (difusión con reacción química, precipitación) y fenómenos biológicos (degradación aerobia y anaerobia).

Sin embargo, esta capacidad de autopurificación tiene un límite (capacidad de asimilación), por encima de dicho límite del cuerpo receptor ya no recupera sus

condiciones originales, lo que da lugar a la contaminación del mismo y que es a su vez el resultado de la gran cantidad de contaminantes que se agregan al agua.

Lo anteriormente origina una transformación paulatina de los ríos en drenaje a cielo abierto, como en el río de los Remedios, el río Tula, el río Lerma, etc.

Como alternativa para resolver dichos problemas y poder eliminar del agua los contaminantes, se generaron a principios de siglo operaciones y procesos naturales, denominados así a todos ellos en conjunto tratamiento de aguas residuales.

Dentro de esta disciplina, a los que hacen uso de operaciones físicas se les denomina "tratamiento primario", los que hacen uso de los procesos químicos y biológicos se les ha llamado "tratamiento secundario" y "tratamiento terciario o avanzado", a los que hacen uso de los tres tipos de proceso. Obviamente la calidad del agua obtenida en cada caso es diferente, razón por la que el objeto de cada uno de los tratamientos es resolver algunos de los contaminantes en forma selectiva.

En México son pocas las plantas de tratamiento construidas hasta el momento, comparadas con la cantidad de agua residual producida en todo el país, ya que ésta llega a ser $100 \text{ m}^3/\text{seg.}$, lo que indica el enorme déficit que existe y que origina los problemas de contaminación que vivimos todos los días.

Si bien son muchos los sistemas que se han desarrollado, el número que de ellos se emplea en la práctica se ha visto restringido por algunas de las siguientes razones: eficiencia, volumen y tipo de desecho, infraestructura humana, el material disponible, costo y, en general, las condiciones socioeconómicas que prevalecen en la localidad donde se va a instalar determinada planta.

De las plantas construidas en nuestro país, los sistemas biológicos de tratamiento son los más económicos y los que menor volumen de lodo residual producen, ya que se caracterizan por aumentar la velocidad de autopurificación que se lleva a cabo en la naturaleza e incorporando con ello la mayor cantidad de nutrientes a los ciclos biogeoquímicos. Las lagunas de estabilización y los lodos activados son los principales en el diseño de dichas plantas.

CARACTERÍSTICAS DE LAS AGUAS RESIDUALES.

El comprender la naturaleza de las características físicas, químicas y biológicas de las aguas residuales es imprescindible para el proyecto y funcionamiento de las instalaciones, de una planta de tratamiento.

Los principales parámetros que se emplean para caracterizar el agua residual se citan en la tabla 1 y 2. Algunos de los parámetros están relacionados entre sí, por ejemplo la temperatura es un parámetro físico, que afecta tanto la actividad biológica del agua residual como la cantidad de gases disueltos en ellas, considerando a estos gases como parámetros químicos.

En cuanto a la composición de las aguas residuales, ésta se refiere a los constituyentes físicos, químicos y biológicos que se encuentran presentes en ellas.

dependiendo de la cantidad de estos componentes, el agua residual se puede clasificar como fuerte, media o débilmente, como se indica en la tabla 3. para aguas residuales industriales.

Respecto a lo anterior es pertinente mencionar que tanto la composición como la concentración del agua residual varía con respecto a la hora, el día, el mes del año y los hábitos particulares del proceso industrial.

Tabla 1 Características físicas, químicas y biológicas del agua residual.

Parámetro	Origen
Físicas	Físicas
Sólidos	Suministro de agua, * residuos industriales y domésticos
Temperatura	Residuos industriales y domésticos
Color	Residuos industriales y domésticos
Olor	Agua residual en descomposición, residuos industriales
Químicas	Químicas
Orgánico:	
Proteínas	Residuos industriales y domésticos
Carbohidratos	Residuos industriales y domésticos
Grasas animales, aceites y grasas minerales	Residuos industriales, comerciales y domésticos
Agentes tensoactivos	Residuos industriales y domésticos
Fenoles	Residuos industriales
Pesticidas	Residuos agrícolas
Inorgánico:	
pH	Residuos industriales
Cloruros	Suministro de agua doméstica, residuos industriales, infiltración de agua subterránea
Nitrógeno	Residuos agrícolas y domésticos
Fósforo	Residuos industriales y domésticos, derrame natural
Azufre	Suministro de agua doméstica y residuos industriales
Compuestos tóxicos	Residuos industriales, infiltración de agua subterránea
Metales pesados	Residuos industriales
Gases:	
Oxígeno	Suministro de agua doméstica, infiltración de agua de superficie
Sulfuro de hidrógeno	Descomposición de las aguas domésticas
Metano	Descomposición de las aguas domésticas
Biológicas	Biológicas
Protistas	Residuos domésticos, plantas de tratamiento
Virus	Residuos domésticos
Plantas	Corrientes de agua al descubierto y plantas de tratamiento
Animales	Corrientes de agua al descubierto y plantas de tratamiento

* Se refiere al suministro doméstico.

Tabla 2. Características Físicas, Químicas y biológicas de las Aguas Residuales y sus fuentes.

CARACTERÍSTICA	FUENTE
Propiedades físicas:	
Color	Desechos domésticos e industriales. Decaimiento natural de materia orgánica.
Olor	Descomposición del agua residual. Desechos industriales.
Sólidos	Sistema de abastecimiento doméstico. Desechos domésticos e industriales. Erosión del suelo e infiltración
Temperatura	Desechos domésticos e industriales.
Constituyentes químicos orgánicos:	
Carbohidratos	Desechos domésticos, comerciales e industriales.
Grasas y aceites	Desechos domésticos, comerciales e industriales.
Pesticidas	Desechos agrícolas.
Fenoles	Desechos industriales.
Proteínas	Desechos domésticos y comerciales
Surfactantes	Desechos domésticos e industriales.
Otros	Decaimiento natural de materia orgánica.
Constituyentes químicos inorgánicos:	
Alcalinidad	Desechos domésticos, sistema de abastecimiento. Infiltración de agua subterránea.
Cloruros	Sistema de abastecimiento, desechos domésticos Infiltración subterránea y ablandadores.
Metales pesados	Desechos industriales
Nitrógeno	Desechos domésticos, agrícolas
pH	Desechos industriales
Fósforo	Desechos domésticos y agrícolas. Escumientos naturales.
Azúfre	Sistema de abastecimiento, desechos domésticos e industriales.
Compuestos tóxicos	Desechos industriales.
Gases:	
Ácido sulfhídrico	Descomposición de desechos domésticos.
Metano	Descomposición de desechos domésticos
Oxígeno	Sistema de abastecimiento, infiltración de agua superficial
Constituyentes biológicos:	
Animales	Cuerpos de agua abiertos y plantas de tratamiento
Plantas	Cuerpos de agua abiertos y plantas de tratamiento
Protistas	Desechos domésticos, plantas de tratamiento
Virus	Desechos domésticos.

Tabla 3. Composición típica de agua residual doméstica. (todos los valores excepto los sólidos sedimentables se expresan en mg/L).

Constituyente	Concentración		
	Fuerte	Media	Débil
Sólidos en total	1200	700	350
Disueltos en total	850	500	250
Fijos	525	500	250
Volátiles	325	200	105
Suspendidos, en total	350	200	100
Fijos	75	50	30
Volátiles	275	150	70
Sólidos sedimentables (ml/L)	20	10	5
DBO ₅ , ° (20 C)	300	200	100
Carbono orgánico total (COT)	300	200	100
Demanda química de oxígeno (DQO)	1000	500	250
Nitrógeno (Total como N)	85	40	20
Orgánico	35	15	8
Amoníaco libre	50	25	12
Nitritos	0	0	0
Nitratos	0	0	0
Fósforo (Total como P)	20	10	6
Orgánico	5	3	2
Inorgánico	15	7	4
Cloruros **	100	50	30
Alcalinidad (como CaCO ₃) **	200	100	50
Grasa	150	100	50

* Demanda bioquímica de oxígeno, 5 días a 20 C

** Los valores se aumentaran con la cantidad presente en el agua de suministro

Características físicas.

La característica física más importante del agua residual es su contenido total de sólidos, el cual está compuesto por materia flotante y materia en suspensión, en dispersión coloidal y en disolución. Otras características físicas son temperatura, color y olor.

Sólidos totales.- Los sólidos totales del agua residual proceden del agua del abastecimiento, del uso industrial, doméstico y subterráneas. En la tabla 4, se indican datos típicos sobre cantidades diarias per capita de material sólido seco.

Análíticamente, el contenido total de sólidos en el agua residual se define como toda la materia que queda como residuo de evaporación a 103-105°C. La materia que tenga una presión de vapor significativa a dicha temperatura se elimina durante la evaporación y no se definen como sólidos. Los sólidos totales o residuos de evaporación, pueden clasificarse como sólidos suspendidos y sólidos filtrables, a base de hacer pasar un volumen conocido a través de un filtro. Por lo general, el filtro se elige de modo que el diámetro mínimo de los sólidos suspendidos sea aproximadamente una micra (μm); la fracción de sólidos suspendidos incluye los

sólidos sedimentables que se depositaran en el fondo de un recipiente en forma de cono (llamado Imhoff) durante un periodo de 60 minutos. Los sólidos sedimentables son una medida aproximada de la cantidad de fango que se eliminara por sedimentación. La fracción de los sólidos suspendidos incluyen los sólidos sedimentables.

Tabla 4. Estimación de los componentes de sólidos totales en agua residual.

Componente	Peso seco, gms/hab. y día
Agua de suministro y agua subterránea, que se supone tiene poca dureza	12,7
Heces (sólidos, 23%)	20,5
Orina (sólidos, 3,7%)	43,3
Inodoros (Incluyendo papel)	20,0
Pilas, baños, lavaderos y otras fuentes domésticas de lavado	86,5
Basura del suelo	30,0
Ablandadores de agua	.
Total para agua residual doméstica de sistema de alcantarillado separativo, excluyendo la aportación de ablandadores de agua	213,0
Residuos industriales	200,0**
Total para aguas residuales industriales y domésticas de un sistema de alcantarillado separativo	413,0
Aguas pluviales	25,0***
Total para aguas residuales industriales y domésticas de un sistema de alcantarillado unitario	438,0

* Variable.

** Variara según el tipo y tamaño de la industrias.

*** Variara según la estación.

La determinación por separado de los sólidos sedimentables nos da una estimación de la cantidad de lodo que se eliminará durante la sedimentación. La fracción de sólidos filtrables se compone de sólidos coloidales y disueltos. La fracción coloidal consiste en partículas con un diámetro aproximado que oscila entre 10^{-3} y 1 (μ m) milimicron (ver figura 1). Los sólidos disueltos, se componen de moléculas orgánicas e inorgánicas e iones que se encuentran presentes en disoluciones en el agua. La fracción coloidal no puede eliminarse por sedimentación. Por lo general se requiere de una coagulación u oxidación biológica seguida de sedimentación para eliminar estas partículas en suspensión.

A su vez los sólidos suspendidos, coloidales y disueltos pueden clasificarse de nuevo, de acuerdo a su volatilidad a 600°C. La fracción orgánica se oxidará y será expulsada como gas a diferente temperatura, permaneciendo la fracción inorgánica como cenizas, de acuerdo a lo anterior por ejemplo los términos "sólidos suspendidos volátiles" y "sólidos suspendidos fijos" se refiere respectivamente, al contenido orgánico de los sólidos suspendidos. La determinación de sólidos volátiles se aplica

* Estos datos son requeridos en el SISTEMA experto y su forma de determinarlos se mencionan con más detalle en la bibliografía.

frecuentemente a los lodos del agua residual para medir su estabilidad biológica. El contenido de sólidos de un agua residual de intensidad media puede clasificarse aproximadamente como lo indica la figura 2.

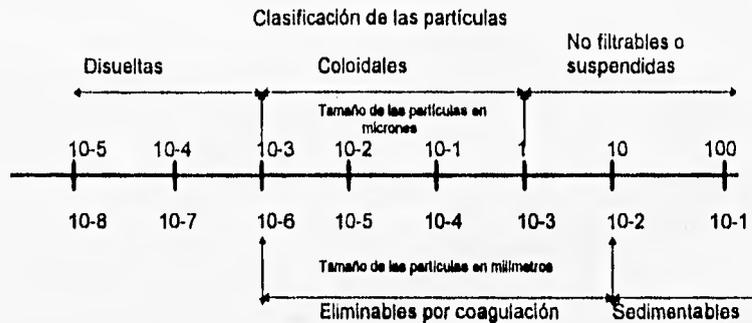


Figura 1 Clasificación e intervalo de tamaño de las partículas presentes en el agua.

Temperatura.- La temperatura del agua residual es generalmente más alta que la de abastecimiento, debido a la adición de agua caliente procedente de las casas y de actividades industriales. Como el calor específico del agua es mucho mayor que el del aire las temperaturas de las aguas residuales observadas son más altas que las temperaturas locales del aire durante la mayor parte del año y sólo son más bajas durante los meses cálidos del verano.

La temperatura del agua es un parámetro importante por su efecto en la vida acuática, en las reacciones químicas y velocidades de reacción y en la posibilidad de usar el agua. Por otro lado el oxígeno es menos soluble en el agua caliente que en la fría, finalmente, la temperatura anormalmente elevada puede dar lugar a un crecimiento indeseable de plantas acuáticas y hongos.

Color.- El color es un parámetro, que entre otras cosas nos indica, por ejemplo, que un agua residual reciente suele ser gris; sin embargo, como los compuestos orgánicos son descompuestos por las bacterias, y el oxígeno disuelto en el agua se reduce a cero, el color cambia a negro. En esta condición se dice que el agua residual es séptica. Algunas aguas residuales de tipo industrial añaden color al agua residual doméstica cuando se mezclan.

Olor.- Los olores son debido, entre otras cosas, a los gases producidos por la descomposición de la materia orgánica. El agua residual reciente tiene olor algo desagradable, pero más tolerable que el agua residual séptica. El olor más característico del agua residual séptica es el sulfuro de hidrógeno producido por los microorganismos anaerobios que reducen los sulfatos a sulfuros. Las aguas residuales contienen a veces gases olorosos o capaces de producir olores en el proceso de tratamiento.

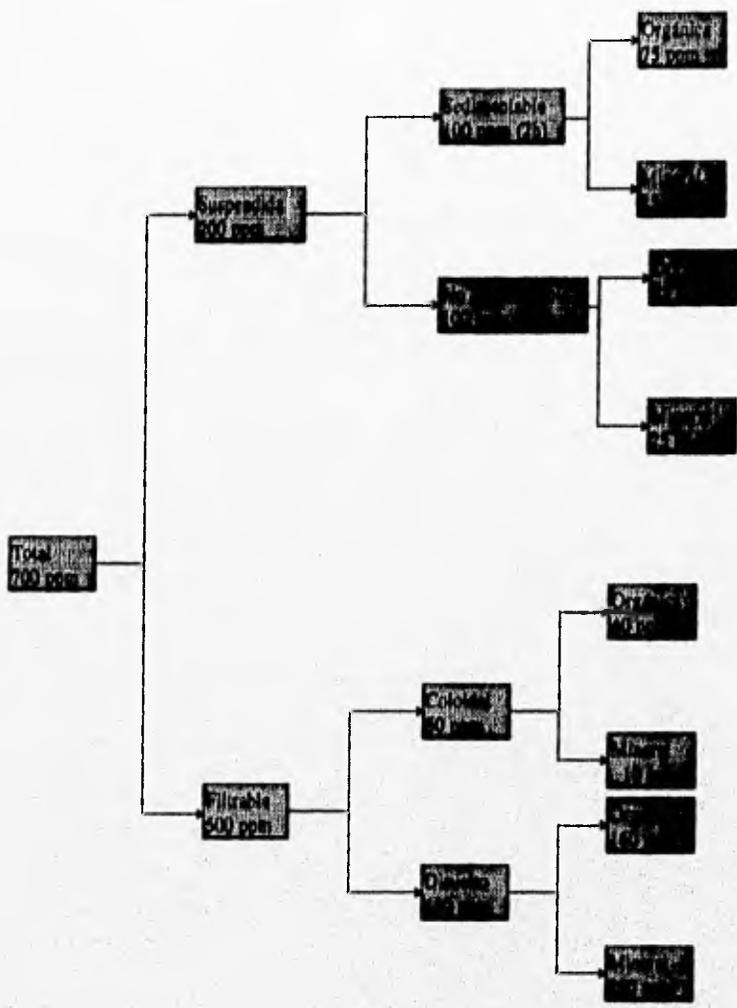


Figura 2. Clasificación de los sólidos presentes en un agua residual de intensidad media

Conductividad.- La conductividad es la expresión numérica de la capacidad o habilidad de una solución acuosa de conducir una corriente eléctrica. Se define como la distancia que existe entre dos electrodos de área conocida entre el producto de la resistencia que ofrece el conductor a el paso de la corriente, y el área de los electrodos en la disolución electrolítica.

Mediante esta determinación, permite conocer rápidamente las variaciones de las concentraciones de los minerales disueltos en las aguas residuales.

Turbiedad.- La turbiedad es una medida de la obstrucción óptica de la luz que pasa a través de una muestra de agua. Esta se debe a la presencia de una amplia variedad de materia finamente dividida, desde partículas macroscópicas como arcilla, hasta microscópicas como materia orgánica, microorganismos, etc..

La turbiedad puede interferir, por ejemplo con la eficiencia de los agentes desinfectantes, ya que algunos de los organismos patógenos pueden estar contenidos en las partículas y de esta manera protegerse del desinfectante.

pH .- La concentración del ion hidrógeno es un parámetro importante de la calidad de las aguas residuales. El intervalo de concentración idóneo para la existencia de la mayoría de la vida biológica es muy estrecho y crítico. El agua residual con una concentración adversa de iones hidrógeno es difícil de tratar por medios biológicos, a no ser que se realice una neutralización previa.

Características químicas.

Este punto se divide en tres categorías generales que son: 1) Materia orgánica, 2) Materie Inorgánica, 3) Gases que se encuentran en las aguas residuales.

1. **Materia orgánica.**- En un agua residual de intensidad media, aproximadamente un 75% de los sólidos suspendidos y un 40% de los sólidos son de naturaleza orgánica.

Los compuestos orgánicos están formados generalmente por una combinación de carbono, hidrógeno y oxígeno, junto con nitrógeno en algunos casos. Otros elementos importantes tales como el azufre, fósforo y hierro también pueden estar presentes.

Los principales grupos de sustancias orgánicas hallados en las aguas residuales son las proteínas (40 a 60%), carbohidratos (25 a 50%), grasas y aceites (10%). La urea principal constituyente de la orina, es otro importante compuesto. Además de estos compuestos, las aguas residuales contienen pequeñas cantidades de compuestos orgánicos sintéticos, ejemplos típicos son: surfactantes, fenoles y pesticidas agrícolas.

La presencia de estas sustancias se ha complicado en los últimos años el tratamiento de las aguas residuales, ya que muchas de ellas no pueden

descomponerse biológicamente o bien lo hacen muy lentamente. Este es un factor que justifica también el creciente interés por el uso de la precipitación química seguida de una adsorción por carbón activado para el tratamiento completo del agua residual. Dentro de los constituyentes de la materia orgánica tenemos:

- a) **Proteínas.**- Las proteínas son el principal constituyente del organismo animal presentándose en menor cantidad en las plantas. Toda sustancia alimenticia animal o vegetal contiene proteínas, variando de pequeños porcentajes en las frutas acuosas, a altos porcentajes en la carne y ciertos granos de plantas leguminosas.

Los elementos comunes a todas las proteínas son el carbono, hidrógeno y oxígeno. Además, como característica particular, contienen una alta y constante proporción de nitrógeno (aproximadamente 16%). En algunos casos se encuentran azufre, hierro y fósforo. La urea y las proteínas son las principales fuentes de nitrógeno, que en grandes cantidades producen olores fétidos debido a su descomposición.

- b) **Carbohidratos.**- Se encuentran ampliamente distribuidos en la naturaleza, así como en todas las aguas de desecho. Los carbohidratos incluyen a los azúcares, almidones, celulosa y fibra de madera, son compuestos formados de carbono, hidrógeno y oxígeno. La celulosa es el más importante carbohidrato encontrado en un desecho, debido a su resistencia a la descomposición.

- c) **Grasas y aceites.**- Las grasas y aceites son uno de los mayores componentes de las sustancias alimenticias. El término grasa comúnmente usado, incluye a las grasas, aceites, parafinas, y otros constituyentes afines encontrados en los desechos.

Las grasas y aceites son ésteres de alcoholes o gliceroles (glicerina) con ácidos grasos. Los glicéridos de ácidos grasos que son líquidos a temperaturas ordinarias se llaman aceites y los que son sólidos se llaman grasas, estos son similares químicamente y están formados de carbono, hidrógeno y oxígeno en varias proporciones.

Las grasas y aceites de desechos domésticos provienen de la manteca, mantequilla, margarina y aceites vegetales. La grasa es uno de los compuestos orgánicos más estables y difíciles de biodegradar.

El keroseno y aceites lubricantes son derivados del petróleo y el alquitrán de la hulla, los cuales se encuentran en las aguas negras en cantidad considerable proveniente de talleres, estacionamientos y calles. Estas sustancias también son solubles en hexano, y por lo tanto, se incluyen en la determinación de grasas y aceites. Gran parte de las partículas de grasas y aceites que se encuentran en las aguas de desecho flotan, formando una capa que tiende a cubrir la superficie e

interfiere con la acción biológica, causando además problemas de mantenimiento.

- d) **Sufractantes (Agentes tensoactivos).**- Los surfactantes o agentes de superficie activa son moléculas orgánicas muy grandes, ligeramente solubles en agua y causan la formación de espuma en la superficie del agua donde el desecho es vertido.

Su capacidad para formar espuma hace que interfiera en el proceso de lodos activados de una planta de tratamiento de aguas negras, ya que impide que el oxígeno se vea transferido, debido a que tienden a acumularse en la interface aire - agua. Además se forman gruesas capas de espuma muy estables, que son arrastradas por el viento y constituyen un peligro para la salud pública.

- e) **Fenoles.**- Los fenoles y otras trazas de compuestos orgánicos son también constituyentes importantes del agua. Los fenoles causan problemas de sabor en el agua potable, particularmente cuando el agua está clorada. Estos compuestos provienen principalmente de operaciones industriales y se encuentran en las aguas superficiales debido a descargas de este tipo. Los fenoles pueden ser biológicamente oxidados en concentraciones de hasta 500 mg/L.

- f) **Plaguicidas y productos químicos agrícolas.**- Trazas de compuestos orgánicos tales como plaguicidas, herbicidas y otros productos químicos utilizados en la agricultura son tóxicos para muchas formas de vida, y por lo tanto son contaminantes importantes en las aguas superficiales. Estos productos no son constituyentes comunes en las aguas de desecho, y provienen principalmente de escurrimientos agrícolas. Bajas concentraciones de estos elementos contaminan la carne de pescado y origina su muerte, causando además un deterioro de las fuentes de suministro de agua.

2. **Materia inorgánica.**- Varios componentes inorgánicos de las aguas residuales y naturales tienen importancia para el establecimiento y el control de la calidad del agua. Las concentraciones de las sustancias inorgánicas en el agua aumenta por la formación geológica con la que el agua entra en contacto y también por las aguas residuales, tratadas o sin tratar, que también se descargan de ellas. Las aguas naturales disuelven parte de las rocas y minerales con las que están en contacto. Las aguas residuales a excepción de aguas residuales industriales, raramente tratadas para la eliminación de los constituyentes inorgánicos que se añaden en el ciclo de su utilización. Las concentraciones de los constituyentes inorgánicos aumenta igualmente debido al proceso natural de evaporación que elimina parte del agua superficial y deja la sustancia inorgánica en el agua. Puesto que las concentraciones de los diferentes constituyentes inorgánicos pueden afectar muchos a los usos del agua, conviene examinar la naturaleza de algunos de aquellos especialmente los añadidos al agua superficial por el ciclo de su utilización. A continuación se citan características químicas del agua.

- a) pH.- La concentración del ion hidrógeno es un parámetro importante de la calidad de las aguas naturales y de desechos. El rango de concentración adecuado para la existencia de gran parte de la vida biológica es pequeño y crítico. Las aguas de desecho con concentraciones adversas del ion hidrógeno son difíciles de tratar por medios biológicos y si la concentración no se altera antes de la evacuación, el efluente puede alterar la concentración de las aguas naturales.
- b) Cloruros.- Otro parámetro de calidad importante es la concentración de cloruros. Los cloruros que se encuentren en el agua natural proceden de la disolución de suelos y rocas que los contienen y que están en contacto con el agua y, en las regiones costeras, de la intrusión del agua salada. Otra fuente de cloruros es la descarga de aguas residuales domésticas, agrícolas e industriales en las aguas superficiales.

Es uno de los aniones inorgánicos que en mayor concentración se presenta en las aguas naturales y de desecho. Puesto que los métodos convencionales de tratamiento no eliminan cantidades importantes de cloruros, concentraciones de cloruros mayores que lo usual nos indican que un cuerpo de agua es usado para disposición de desechos.

- c) Alcalinidad.- La alcalinidad en el agua residual se debe a la presencia de hidróxidos, carbonatos y bicarbonatos de elementos tales como calcio, magnesio, sodio, potasio o amoníaco. De estos, los más frecuentes son los bicarbonatos de magnesio y calcio. El agua residual es generalmente alcalina, recibiendo su alcalinidad del agua de suministro, del agua subterránea y de las materias añadidas durante el uso doméstico.
- d) Nitrógeno.- El nitrógeno y el fósforo son esenciales para el crecimiento de protistas y plantas, se conocen como nutrientes o bioestimulantes. Vestigios de otros elementos, tales como el hierro son necesarios para el crecimiento biológico, pero el nitrógeno y el fósforo son en muchos casos, los principales elementos nutritivos.

El nitrógeno es esencial para la síntesis de proteínas y su presencia es importante en el tratamiento de los desechos domésticos e industriales, por procesos biológicos. Cuando se controlan los crecimientos de algas en las aguas receptoras con el objeto de proteger sus usos benéficos, será necesario eliminarlo o reducirlo en las aguas de desecho antes de descargarlas.

El nitrógeno, presente en las aguas negras frescas, se encuentra en la materia proteinada y la urea principalmente, la bacteria les descompone fácilmente formando amoníaco. El envejecimiento de las aguas de desecho domésticas nos indica la cantidad de amoníaco presente. En un medio aeróbico, la bacteria oxida el nitrógeno amoniacal a nitritos y nitritos. El predominio del nitrógeno del nitrato en las aguas de desecho, indica que el desecho se estabilizo con respecto a la demanda de

oxígeno. Los nitratos sin embargo, son utilizados por las algas y otras plantas acuáticas las cuales a su vez son aprovechadas por los animales para formar sus proteínas respectivamente. La muerte y descomposición de las proteínas animales y vegetales por las bacteria produce de nuevo amoniaco. Por tanto, si el nitrógeno en forma de nitratos puede reutilizarse por las algas y otras plantas para formar proteínas, puede ser necesario eliminar o reducir el nitrógeno que haya presente para evitar esos crecimientos.

El nitrógeno amoniacal existe en solución acuosa bien como ion amonio o como amoniaco, dependiendo del pH de la solución, según la siguiente ecuación de equilibrio:



A niveles de pH superior a 7, el equilibrio se desplaza hacia la izquierda; a niveles inferiores, el ion amonio es predominante.

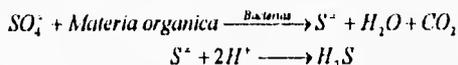
El nitrógeno de nitrato es la forma más oxidada del nitrógeno en las aguas de desecho. Los nitratos varían de 0 a 20 mg/L como nitrógeno en los efluentes de desechos domésticos con un rango típico de 15 a 20 mg/L como nitrógeno.

El nitrógeno de nitritos tiene poca importancia en estudios de contaminación de aguas y aguas de desecho, debido a que es inestable y fácilmente oxidado a nitratos, además rara vez excede de 1 mg/L en las aguas de desecho domésticas o de 0.1 mg/L en las aguas superficiales o subterráneas.

- e) Fósforo.- El fósforo es también esencial para el crecimiento de las algas y de los organismos biológicos. Debido a lo dañino del crecimiento de algas que ocurre en las aguas superficiales, existe gran interés en controlar la cantidad de estos compuestos provenientes de las descargas de desechos domésticos, industriales y escumientos naturales. Los desechos municipales presentan concentraciones que varían de 6 a 20 mg/L de fósforo como P (véase tabla 3.).

La forma usual del fósforo en soluciones acuosas es de ortofosfatos, polifosfatos y fosfato orgánico. Los ortofosfatos son utilizados directamente por el metabolismo biológico sin precisar posterior ruptura. Los polifosfatos incluyen moléculas con dos o más átomos de fósforo, átomos de oxígeno y, en algunos casos, átomos de hidrógeno combinados en una molécula compleja. Los polifosfatos sufren la hidrólisis en soluciones acuosas y vuelven a sus formas de ortofosfato; sin embargo, esta hidrólisis es generalmente de menor importancia en la mayoría de las aguas residuales domésticas, pero puede ser un importante constituyente de las aguas residuales industriales y fangos de aguas residuales domésticas.

- f) Azufre.- Los sulfatos son componentes naturales de las fuentes de suministro de agua y de las aguas de desecho domésticas. El azufre es requerido en la síntesis de proteínas y se elimina en su degradación. Los sulfatos son reducidos a sulfuros y sulfuro de hidrógeno (H_2S) por las bacterias en condiciones anaerobias, como se muestra en las siguientes reacciones:



El H_2S puede ser oxidado biológicamente a ácido sulfúrico, el cual es corrosivo para las tuberías del alcantarillado.

Los sulfatos son reducidos a sulfuros en los digestores de lodos y pueden alterar el proceso biológico si la concentración de sulfuro sobrepasa 200 mg/L. El gas H_2S que se desprende y se mezcla con los gases de las alcantarillas (CH_4 y CO_2), es corrosivo para las conducciones de gas y, si se quema en motores de gas, los productos de la combustión podrían dañar el motor y corroer gravemente el equipo de recuperación térmica de los gases de escape, especialmente si se les deja enfriar por debajo del punto de condensación. Un destacado fabricante de motores limita el contenido de H_2S a 21 g/m³. El empleo de depuradores de gas reducen el contenido de H_2S a 17 g/m³.

- g) Compuestos tóxicos.- La toxicidad de ciertos cationes es de gran importancia en el tratamiento y disposición de las aguas de desecho. El arsénico, boro, cobre, cromo, plata y plomo, son tóxicos en varios grados a los microorganismos, y por tanto deben tomarse en cuenta para el diseño de una planta de tratamiento biológico. Por ejemplo, en digestores de lodos el cobre es tóxico a concentraciones de 100 mg/L; el cromo y el níquel son tóxicos a concentraciones de 500 mg/L y el sodio es tóxico solo a altas concentraciones. Otros cationes como el potasio y el amonio son tóxicos a 4000 mg/L. La alcalinidad presente en los lodos de digestión precipitan al ion calcio antes de que alcance niveles tóxicos.

Algunos aniones tóxicos como los cianuros y cromatos están presentes en algunos desechos industriales, se encuentran particularmente en los desechos de las industrias de la galvanoplastia. Estos se eliminan con pretratamiento antes de mezclarlos con los desechos municipales. Los compuestos orgánicos presentes en algunos desechos son tóxicos.

- h) Metales pesados.- Vestigios de muchos metales tales como el cobre, cromo, plata, plomo, manganeso, níquel, cadmio, cinc, cobalto, mercurio, hierro, son importantes constituyentes de las aguas residuales. Algunos de estos metales son necesarios para el desarrollo de la vida biológica y su ausencia en cantidades suficientes podría por ejemplo limitar el

crecimiento de algas. la presencia en exceso de estos metales interfiere con los usos benéficos del agua debido a su toxicidad, por lo tanto es deseable controlar las concentraciones de estas sustancias.

3. Gases.- Los gases más frecuentemente encontrados en el agua residual sin tratar son: nitrógeno, oxígeno, anhídrido carbónico, sulfuro de hidrógeno, amoníaco y metano. Los tres primeros son gases comunes en la atmósfera y se encuentran en todas las aguas que estén expuestas al aire. Los tres últimos proceden de la descomposición de la materia orgánica presente en el agua residual. Si bien no se encuentran en el agua residual sin tratar, otros gases con los que debe estar familiarizados son el cloro y el ozono (desinfección y control de olor), y los óxidos de azufre y nitrógeno (procesos de combustión). En algunos casos, el amoníaco está presente en las aguas de desecho no tratadas como ion amonio y debe tenerse en cuenta. La siguiente información se limita a los gases de interés en las aguas residuales sin tratar.

- a) Oxígeno disuelto.- El oxígeno disuelto es necesario para la respiración de los microorganismos aerobios así como para otras formas de vida aerobia. No obstante, el oxígeno es sólo ligeramente soluble en agua. La cantidad real de oxígeno (también de otros gases) que puede estar presente en la solución viene regida por:

- a) La solubilidad del gas;
- b) la presión parcial del gas en la atmósfera;
- c) la temperatura, y
- d) La pureza del agua (salinidad, sólidos suspendidos, etc.).

Puesto que la velocidad de las reacciones bioquímicas que utilizan el oxígeno se incrementa al aumentar la temperatura, los niveles de oxígeno disuelto tienden a ser más críticos en los meses de verano. El problema se complica en estos meses ya que los caudales de los ríos son generalmente menores y, por ello, la cantidad total de oxígeno disponible es también menor. La presencia de oxígeno disuelto en el agua residual es deseable porque evita la formación de olores desagradables.

- b) Sulfuro de hidrógeno.- Se trata de un gas incoloro, inflamable, que tiene el olor característico a huevos podridos. Se origina de la descomposición de la materia orgánica que contiene azufre o de la reducción de sulfitos y sulfatos minerales en ausencia de oxígeno. El ennegrecimiento del agua residual y del fango se debe generalmente a la formación de sulfuro de hidrógeno que se combina con el hierro presente para formar sulfuro ferroso. Aunque el sulfuro de hidrógeno es el gas formado más importante desde el punto de vista de los olores, pueden formarse otros compuestos volátiles, tales como el índol, escantol y mercaptanos durante la descomposición anaerobia que pueden producir olores peores que el del sulfuro de hidrógeno.
- c) Metano.- El principal producto de la descomposición anaerobia de la materia orgánica del agua residual es el gas metano. El metano es un

hidrocarburo combustible, incoloro e inodoro de gran valor como combustible. Normalmente no se encuentra en grandes cantidades en el agua residual, por que incluso pequeñas cantidades de oxígeno tienden a ser tóxicas para los organismos responsables de la producción del metano. Sin embargo, a veces se produce metano como resultado de una descomposición anaerobia en depósitos acumulados en el fondo. Debido a que el metano es sumamente combustible y que el peligro de explosión es considerable, los pozos de registro y empalmes de alcantarilla donde exista el riesgo de que se forme el gas, deberán estar ventilados con un ventilador portátil antes y durante los periodos de tiempo en que los operarios trabajen en ellos durante inspección, renovaciones o reparaciones. En las plantas de tratamiento, deberán fijarse avisos sobre el peligro de explosión y los operarios deberán estar instruidos sobre medidas de seguridad.

Características biológicas.

Los aspectos biológicos incluyen el conocimiento de los grupos principales de microorganismos que se encuentran en las aguas superficiales y residuales, así como aquellos que intervienen en el tratamiento biológico, también conocer de los organismos utilizados como indicadores de polución y su importancia, finalmente, de los métodos utilizados para valorar la toxicidad de las aguas residuales.

1. Microorganismos.- Los grupos principales de organismos que se encuentran en las aguas residuales y superficiales se clasifican en protistas, plantas y animales. La categoría de las proteínas incluyen las bacterias, hongos, protozoos y algas. Como plantas, se clasifican las semillas, helechos y musgo.
 - a) Protistas.- Las protistas son, en su clase, el grupo más importante de los organismos, especialmente las bacterias, algas y protozoos. Dado el amplio y fundamental papel jugado por la bacterias en la descomposición y estabilización de la materia orgánica, tanto en la naturaleza como en las plantas de tratamiento, deben conocerse bien sus características, funciones, metabolismo y síntesis. Del mismo modo las bacterias coliformes se utilizan como un indicador de polución. Las algas pueden presentar un serio inconveniente en las aguas superficiales, ya que cuando las condiciones son favorables pueden reproducirse rápidamente y cubrir ríos, lagos y embalses con grandes colonias flotantes, fenómeno que se conoce como crecimiento explosivo. A estos crecimientos explosivos se les conoce como lagos eutróficos, o un lago con gran contenido de los compuestos requeridos para el crecimiento biológico. Puesto que el efluente de las plantas de tratamiento de agua residual es rico en nutrientes biológicos, aumenta la eutroficación. Las algas pueden causar problemas de sabor y olor en las aguas de suministro. La solución puede implicar la eliminación del carbono, así como la de distintas formas de nitrógeno y fósforo y, posiblemente la eliminación de algunos elementos que se encuentran a nivel vestigios, tales como el hierro y el cobalto. Los protozoos de importancia son las amebas, los flagelados y los cilios libres y fijos. Estas protistas se alimentan de las bacterias y de

otras protistas macroscópicas y son básicas en el funcionamiento de los procesos biológicos de tratamiento así como en la purificación de los ríos porque mantienen un equilibrio natural entre los diferentes grupos de microorganismos.

- b) Virus.- Los virus excretados por los humanos pueden llegar a ser un peligro para la salud pública. Se sabe con certeza que algunos virus viven hasta 41 días en el agua o agua residual a 20 C y durante 6 días en un río normal. Se requiere de un estudio más detallado para determinar el mecanismo de transporte y eliminación de los virus en suelos, aguas superficiales y plantas de tratamiento de aguas.
 - c) Plantas y animales.- Las plantas y animales de importancia varían en tamaño desde rotíferos microscópicos y gusanos hasta crustáceos macroscópicos. El conocimiento de estos organismos es útil al valorar el estado de las corrientes y lagos, al determinar la toxicidad de las aguas residuales evacuadas al medio ambiente, y al observar la efectividad de la vida biológica en los procesos secundarios de tratamiento utilizados para destruir los residuos orgánicos.
2. Organismos coliformes.- El tracto intestinal del hombre contiene innumerables bacterias en forma de bastoncillo conocidas como coliformes. Cada persona evacua de 100 000 a 400 000 millones de organismos coliformes por día, además de otras clases de bacterias. Los organismos coliformes no son dañinos al hombre y, de hecho, son útiles para destruir la materia orgánica en los procesos biológicos de tratamiento de las aguas residuales. Dado que el número de organismos patógenos presentes en las aguas residuales y las aguas contaminadas son pocos y difíciles de aislar, el organismo coliforme, que es tan numeroso y de determinación más sencilla se utiliza como organismo indicador. La presencia de organismos coliformes se interpreta como una indicación de que los organismos patógenos también pueden estar presentes y su ausencia indica que se encuentra exenta de dichos organismos patógenos. Existen en la actualidad dos métodos aceptados para obtener los números de los organismos coliformes presentes en un volumen de agua dado.

TIPOS DE DESECHOS INDUSTRIALES.

El término de desechos industriales es sumamente amplio, pues incluye todos los desechos sólidos, líquidos y gaseosos que producen las industrias de transformación y otras. Algunos de los contaminantes de importancia se muestran en la tabla 5.

Estos desechos varían tanto en cantidad como en composición con los tipos de industria y con los procesos empleados en la misma. En muchas poblaciones, la cantidad de desechos líquidos excede a la de las aguas negras y el poder contaminante del desecho es con frecuencia mucho mayor que el de las aguas negras. El problema se presenta donde quiera, pero los desechos que tengan las mismas características son muy comunes. Se ha extendido mucho, y son muy numerosas las industrias con problemas de tratamiento y disposición de sus desechos.

Desde el punto de vista del industrial, los desechos que produce son de su responsabilidad y por ello deberá procurar disponer de ellos lo más rápidamente posible y al menor costo. Para el público, los desechos industriales también constituyen un riesgo porque pueden ocasionar perjuicios a las alcantarillas e instalaciones de las plantas de tratamiento, aumentar el costo de tratamiento y disposición de los desechos y contribuir a la contaminación de otras corrientes.

Se comprende también que el problema de recolección, tratamiento y disposición de los desechos industriales es de gran magnitud y complejidad, por lo que no puede ser resuelto tan fácilmente a no ser que se consideren todos los aspectos del problema. Los materiales de desecho son tan diversos y complejos, que cada industria, y posiblemente cada planta de producción constituye un problema específico.

Tabla 5. Contaminantes de importancia en el tratamiento de aguas residuales.

CONTAMINANTE	RAZÓN DE IMPORTANCIA
Sólidos suspendidos	Generan depósitos de lodo y condiciones anaerobias en los ambientes acuáticos.
Orgánicos biodegradables	Compuestos principalmente de proteínas, carbohidratos y grasas medidos como DBO, su estabilización biológica promueve el abatimiento de las fuentes naturales de oxígeno y la aparición de condiciones sépticas.
Patógenos	Riesgo de transmisión de enfermedades.
Nutrientes	Tanto el nitrógeno como el fósforo en combinación con el carbón son esenciales para el crecimiento, cuando se descargan a un ambiente acuático promueven el crecimiento de vida acuática indeseable, cuando se descargan en exceso sobre la tierra, llegan a contaminar el agua subterránea.
Orgánicos Refractarios	Tienden a resistir los métodos convencionales de tratamiento, ejemplo de ellos son los sufactantes, fenoles, pesticidas.
Metales pesados	Son acumulativos y dañan la salud al incorporarse a las cadenas alimenticias.
Sólidos inorgánicos disueltos.	Deben ser removidos si el agua se va a reusar

Desechos líquidos industriales.

Los desechos líquidos se producen en todas las industrias de procesos húmedos. Las aguas de desecho varían tanto en cantidad como en capacidad contaminante, tal es así que es posible asignar valores definidos a sus constituyentes comunes. Estos

desechos pueden ser descargados al sistema de alcantarillado, siempre que el volumen sea pequeño en comparación con el gasto normal de las aguas negras, o cuando han sido sometidas a un pretratamiento conveniente.

Muchas aguas residuales altamente contaminadas fluyen de las áreas de proceso y pueden contener una gran variedad de componentes como gases disueltos, partículas sólidas, coloidales y desechos líquidos. Además pueden ser excesivamente ácidas o alcalinas y tener baja o alta concentración de materia colorante. Estos desechos pueden contener materiales inertes, orgánicos o tóxicos y posiblemente con bacterias patógenas.

Los desechos inertes son los que no sufren cambios en los procesos químicos o biológicos. Ejemplos de tales desechos son los de las canteras, lavado de arenas y gravas, purga de calderas, así como ciertos tipos de lodos en las plantas de precipitación.

La mayoría de los desechos orgánicos son atribuidos a tratamientos biológicos, como lo son los desechos líquidos de las industrias lecheras, enlatadoras, textiles y papeleras.

Los desechos tóxicos son los que originan gases o vapores venenosos, o aquellos que contienen productos químicos o metales capaces de aniquilar el proceso biológico empleado en el tratamiento de las aguas negras. Esta clase de desechos también perturba la actividad biológica de las corrientes receptoras, y su acción puede persistir a grandes distancias. Tales desechos son tolerables cuando las concentraciones son bajas que no constituyen riesgo para el personal de las plantas de tratamiento de agua, ni la interferencia con su funcionamiento normal, así como tampoco la actividad biológica de las corrientes.

Desechos sólidos y gaseosos.

Los desechos sólidos, por regla general, no deben descargarse en el sistema de alcantarillado, porque resultan una carga innecesaria para los desarenadores y para los tanques de sedimentación y digestión. Ejemplo de esta clase de desechos son los residuos de las minas, las esboñas, el aserrín, las cenizas y los materiales de desecho de las empacadoras de alimentos. Estos sólidos, hasta donde sea posible deben excluirse del desecho líquido, porque su eliminación y disposición final son generalmente más fáciles y baratos en su forma original.

Una solución correcta para separar los sólidos de los desechos líquidos, requiere de un estudio económico cuidadoso para cada planta. En los casos en que los sólidos estén mojados o en suspensión, el líquido puede transferirse económicamente a una planta separadora, antes de su disposición final. Esto es particularmente verdadero en el caso del lavado del carbón y grava de los lodos de las industrias químicas y mineras y los productos en las plantas ablandadoras de aguas.

Los desechos gaseosos de muchas industrias contienen gases y polvos molestos. Usualmente estos desechos se dispersan directamente en la atmósfera, de no ser necesario un proceso especial de tratamiento.

En estos tiempos la contaminación del aire se ha vuelto un problema serio, por lo que se requieren medidas estrictas para el control de emisiones contaminantes. Para el control de la contaminación del aire es preciso un lavado o difusión de los gases de desecho con agua u otro líquido, que a su vez da lugar al proceso del tratamiento y disposición del líquido.

La contaminación atmosférica se origina a veces en un proceso de tratamiento de ciertos desechos líquidos. El tratamiento de desechos de cianuro con ácidos y aire, transforma los cianuros en ácido cianhídrico gaseoso, el cual pasa a la atmósfera. El amoníaco, los cianuros, los fenoles y otros desechos gaseosos pueden ser arrastrados a la atmósfera por el vapor y la evaporación originada de las plantas de coque. También resulta una contaminación atmosférica por la incineración de desechos orgánicos muy concentrados. Esto es especialmente cierto cuando los desechos contienen compuestos de azufre.

QUE ES UN SISTEMA EXPERTO.

Un sistema experto es un programa para computadora inteligente que usa conocimiento y procedimientos de inferencia para resolver problemas que requieren de un experto humano para su resolución.

Los papeles que pueden realizar los sistemas expertos son muy variados y corresponden fundamentalmente a los que juegan normalmente los expertos humanos. Entre ellos puede destacarse:

1. Como suministradores de información
2. Resolviendo problemas
3. Explicando

En muchos casos los expertos humanos no resuelven problemas directamente si no que se limitan a informar y orientar al cliente sobre: la forma de abordarlos, los aspectos a cuidar especialmente, las técnicas más utilizadas para su resolución, la experiencia personal que ellos tienen sobre casos análogos al planteado, etc. En otros casos, son ellos los que resuelven el problema desde su inicio, bien solos o acompañados por el cliente. Finalmente, a veces se limitan a explicar las causas de determinados resultados, comportamientos o problemas surgidos que son objeto de consulta al especialista.

La consulta a los sistemas expertos se hace por las mismas razones que a los expertos humanos, si bien hay algunas más, añadidas, que son exclusivas de los sistemas expertos. Entre las virtudes más importantes de los expertos humanos destacan: la efectividad, la eficiencia, sentido de las limitaciones.

La efectividad se refiere a que un problema dado a un experto humano tiene una alta probabilidad de ser resuelto con éxito. La eficiencia se refiere a que los problemas pueden ser resueltos con rapidez (la rapidez que da la experiencia y los conocimientos de los problemas con profundidad). Por último, el sentido de sus posibilidades hace referencia a que el experto humano tiene un conocimiento de sus posibilidades y sabe cuando se le presenta un problema que no es capaz de resolver, comunicándolo al

cliente para que este recurra a otros o sea consciente de los riesgos que va a incurrir. Por ello, es importante que un sistema experto controle también sus limitaciones.

En un principio se creyó que no sería posible un sistema experto sin la existencia y colaboración del experto humano. Sin embargo, hoy se sabe que son posibles sistemas expertos sin ni siquiera la existencia del experto humano.

Mucha gente se pregunta por las razones para utilizar un sistema experto como alternativa a un programa convencional. Entre las más importantes destacan:

1. Posibilidad de utilizar personal no especializado para resolver problemas que requieren especialidad.
2. Obtención de soluciones más rápidas.
3. Obtención de soluciones más fiables.
4. Eliminación de operaciones incómodas o monótonas
5. Reducción de costos.
6. Escasez de expertos humanos
7. Acceso del conocimiento a poblaciones más amplias,

La primera de ellas reporta grandes beneficios, no sólo porque pueden resolverse problemas sin la participación de los expertos humanos si no también porque se consigue un ahorro importante y se multiplican los posibles beneficiados del conocimiento.

En muchos casos, la rapidez de obtención de soluciones es totalmente necesaria ya que sin esa rapidez las soluciones obtenidas serían inútiles. Esto hace que los sistemas expertos (debido a su rapidez) sean válidos para resolver cierto tipo de problemas que no pueden resolver los expertos humanos.

El desarrollo de un sistema experto debe programarse muy cuidadosamente siguiendo un programa en el que, entre otras cosas, pueden figurar las siguientes etapas:

1. definición del problema a resolver
2. búsqueda de un experto o de los datos o experiencia
3. diseño del sistema experto
4. elección del grado de intervención del usuario
5. selección de la herramienta, concha o lenguaje de desarrollo
6. desarrollo de un prototipo
7. prueba del prototipo
8. refinamiento y generalización
9. mantenimiento
10. actualización

El comienzo consiste en definir correctamente el problema a resolver. No debe bajo ningún concepto, escatimarse tiempo a esta primera etapa en la que debe trabajarse con rigor y precisión, pues todo el tiempo empleado en este nivel será ahorrado con creces en lo que sigue. La experiencia demuestra que es una etapa muy importante en el diseño de un sistema experto y que se le dedica un tiempo muy por debajo del necesario.

Una vez que el problema está inicialmente definido, hay que buscar el experto humano que esté en condiciones de resolverlo con posibilidades de éxito. En algunos casos bastará con bases de datos o experiencias que jugarán el papel del experto humano.

La tercera parte es el diseño del sistema experto en el que se incluyen las estructuras para almacenamiento del conocimiento, el motor de inferencia, los sistemas de explicación, la interface con el usuario, etc.

Una vez hecho el diseño del sistema experto se está en condiciones de elegir el grado de intervención del usuario. En ese momento hay que decidir si se utiliza un experto llave en mano, una concha, una herramienta o un lenguaje de programación.

Con los medios decididos en la etapa anterior puede procederse ya al desarrollo de un prototipo y a la prueba del mismo, en un ciclo que se repite hasta que se consiguen los resultados apetecidos. A esta fase seguirá una de refinamiento y de generalización en la que se va puliendo defectos e incluyendo nuevos casos no contemplados en el diseño original.

Las dos últimas fases son de gran importancia si se requiere llegar a un producto de calidad.

CAPITULO 2

INTELIGENCIA ARTIFICIAL.

La inteligencia artificial (IA) ha sido caracterizada por diversas opiniones que han causado controversia. Las controversias se alinean a las preguntas básicas de la inteligencia acerca de la moral y los aspectos éticos. Sin embargo, a pesar de las controversias, la tecnología continúa generando resultados prácticos, aumentando los esfuerzos en investigación de IA.

La inteligencia artificial, también conocida como inteligencia de máquinas o programación heurística, es el estudio del comportamiento inteligente a través de maquinaria computacional. De manera simple, la inteligencia artificial se refiere al diseño de programas de computadora para aprovechar al máximo las capacidades de una máquina. De esto, la investigación de la inteligencia artificial se enfoca al desarrollo de sistemas computacionales con comportamiento inteligente. Los programas desarrollados involucran primariamente procesos simbólicos, con altos matices de complejidad y ambigüedad. Estos procesos generalmente no cuentan con algoritmos de solución, por lo que se requiere de investigación al respecto. La inteligencia artificial entonces dentro de este contexto, se enfrenta con la resolución de problemas y toma de decisiones en el ámbito humano cotidiano. La resolución de problemas en la IA difiere notablemente de los cálculos científicos e ingenieriles, los cuales son principalmente numéricos por naturaleza y proporcionan una solución satisfactoria. En contraste, los programas en IA muchas veces incluyen palabras y conceptos, y no garantizan una solución correcta, de la misma forma que el humano resuelve problemas con un cierto intervalo de tiempo para dar su respuesta de manera tolerante.

Para establecer una diferencia entre los programas de Inteligencia artificial y los programas convencionales, se establecen algunas características en la tabla 6.

Tabla 6. Programación en IA Vs Programación convencional

Programación en IA	Programación convencional
Procesos predominantemente simbólicos	Procesos predominantemente numéricos
Búsqueda heurística (pasos implícitos encaminados hacia la solución)	Algorítmicos (pasos explícitos hacia la solución)
Estructura de control separada del dominio de conocimiento	Información y control integrados conjuntamente
Fácil de modificar, actualizar y expandir	Difícil de modificar
Algunas respuestas incorrectas tolerables	Requiere de respuestas correctas
Respuestas aceptadas generalmente satisfactorias	Es perseguida la mejor solución posible
Programas exploratorios	Programas estructurados

La inteligencia artificial posee cinco componentes básicos. Cada uno de estos componentes posee características distintivas que permite el desarrollo de programas y técnicas eficientes en inteligencia artificial:

1. Búsqueda heurística.

Gran parte de los trabajos en IA se han enfocado en la derivación de programas que busquen soluciones a problemas dados. En IA, una manera común de representar la resolución de problemas es en términos de un árbol, indicando en la cima con una condición original y ramificando cada vez que se tome una decisión. Al ir descendiendo en el árbol, se pueden presentar muchas posibilidades de decisiones diferentes, llegando a ser muy grande en ocasiones la ramificación de la parte inferior del árbol. Por ello es necesario contar con estrategias eficientes de búsqueda eficiente en los árboles de decisión.

Inicialmente se contaba con métodos "ciegos" de búsqueda en los árboles de decisión, los cuales eran procedimientos ordenados que aseguraban que una misma ruta de solución no se intentara más de una vez. Sin embargo, para problemas complejos, estos procedimientos se hicieron inadecuados. Por ello, las reglas empíricas (heurísticas), fueron necesarias para auxiliaren la elección de las ramificaciones más viables y así estrechar el campo de búsqueda. Aunque la búsqueda heurística pudiera no encontrar la trayectoria óptima, reduce grandemente la búsqueda global y encamina los esfuerzos hacia el objetivo principal.

La resolución de problemas de IA puede verse entre varias alternativas. De esta forma es posible representar el espacio de búsqueda resultante como una estructura jerárquica llamada árbol, en la que se interconectan diversos estados o nodos mediante un cierto número de ramificaciones o trayectorias. La solución corre desde un nodo inicial a lo largo de las ramas del árbol y culmina en los nodos terminales, es decir metas u objetivos.

Para un problema complejo y grande, es evidentemente oneroso trazar de manera explícita tales árboles para todas las posibilidades y examinarlas directamente para hallar la mejor solución. Este proceso de búsqueda puede seguir un razonamiento progresivo (desde el nodo raíz hasta el nodo objetivo) o regresivo (desde un nodo objetivo particular hasta un nodo raíz). Para problemas típicos simples se emplea la llamada búsqueda ciega, que es un enfoque progresivo, pero consume demasiado tiempo. En esta búsqueda se elige algún esquema de ordenación y se aplica hasta que la respuesta es encontrada. Hay dos procedimientos comunes de búsqueda ciega: búsqueda de primera amplitud y búsqueda de primera profundidad. En la búsqueda de primera amplitud, los nodos del árbol de búsqueda se generan y examinan por nivel empezando con el nodo raíz. En la búsqueda de primera profundidad, se genere un nodo nuevo (en el siguiente nivel) e partir del que se está examinando; así la búsqueda continúe más profundamente cada vez hasta que es forzado a dar marcha atrás.

2. Representación del conocimiento.

El comportamiento inteligente no es resultado exclusivo de los métodos de razonamiento, sino también del conjunto de conocimientos sobre el cual se aplica tal razonamiento. Como ejemplo, puede mencionarse el perfeccionamiento en los métodos de razonamiento del ser humano e lo largo de su existencia, aunado a la cada vez más grande reserva de conocimientos. Así, cuando un conjunto sustancial

de conocimientos tiene que ser empleado en una situación dada, se necesitan métodos para modelar eficientemente este conocimiento y hacerlo fácilmente accesible. El resultado de este énfasis en el conocimiento es que su representación es una de las áreas de investigación más activas en IA. El conocimiento necesario no siempre es fácil de representar, o su mejor representación no es obvia pero una tarea específica.

3. Lenguajes y herramientas.

A lo largo del desarrollo de las ciencias de las computadoras se han creado lenguajes de alto nivel específicos para diferentes dominios de aplicación. Esto también ha sido el caso en IA, siendo LISP y PROLOG los principales lenguajes de programación en esta área, sirviendo ambos como base para la implementación de diversas herramientas de "software" en la expresión de conocimientos, formulación de sistemas expertos y ayudas de programación básicas.

4. Sentido común, razonamiento y lógica.

En íntima relación con la representación del conocimiento, se presentan dos elementos importantes en IA: representación de sentido común y lógica. El primer tópico ha sido clave en las investigaciones en IA, al grado de merecer atención particular de diversas corporaciones e instituciones en el ramo. Asociando a esta área se tiene el razonamiento bajo incertidumbre. El segundo tópico reviste su importancia en la necesidad de contar con formas de deducir eventos a partir de un conjunto de hechos, y de probar la correcta derivación de un juego de conclusiones a partir de una serie de premisas. En este contexto, la lógica computacional fue una de las grandes esperanzas en IA para obtener un método de resolución de problemas universal. Aunque el interés en la lógica computacional decayó un poco debido a la pobre convergencia de solución en problemas complejos, en los últimos años se ha renovado gracias a nuevas formulaciones y al uso de heurísticas para guiar la búsqueda de soluciones.

5. Aprendizaje de máquinas.

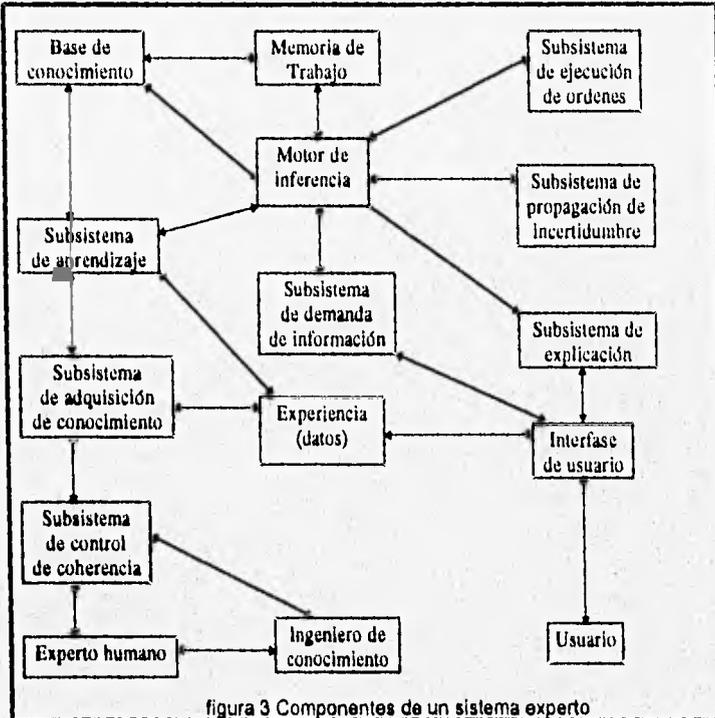
Esta área (aún en etapa de investigación) se ha convertido en uno de los principales temas de IA, partiendo de la premisa que muchas personas establecen, diciendo que una máquina no es inteligente si no puede aprender. Cuando el aprendizaje de una máquina se haya logrado, el ser humano se enfrenta a una nueva revolución. En la actualidad algunos sistemas de aprendizaje han producido resultados muy interesantes; algún día las máquinas serán capaces de aprender a lo largo de su periodo de vida, eligiendo la base del conocimiento necesaria para el razonamiento avanzado. Esto abrirá nuevas y espectaculares aplicaciones en oficinas, fábricas, escuelas e inclusive en hogares.

Las máquinas pueden actualizar su cúmulo de conocimientos mediante la lectura de material en lenguaje natural, así como mediante el aprendizaje por experiencia de la resolución de problemas a los que haya sido destinada tal máquina. Las computadoras también deben ser capaces de formular conclusiones a partir de la examinación de bases múltiples de datos, construyendo así conocimientos nuevos a partir de los ya existentes.

SISTEMAS EXPERTOS

Como se vio en el capítulo 1, un sistema experto es un programa para computadora inteligente que usa conocimiento y procedimientos de inferencia para resolver problemas que requieren de un experto humano para su resolución.

El conocimiento dentro de un sistema experto consiste de hechos y heurísticas. Los hechos constituyen un cuerpo de información abierto y totalmente conocido por los expertos de un cierto campo. Las heurísticas son algo más privadas, reglas de buen juicio es decir un razonamiento correcto o tener buenas suposiciones, que caracterizan la toma de decisiones a nivel de expertos en el campo. El grado de ejecución de un sistema experto es primariamente una función del tamaño y la calidad de la base de conocimiento que posea. En la figura 3 se muestra un diagrama en el que se han incluido las partes más importantes de un sistema experto y las relaciones entre ambos. En un principio se creyó que no sería posible un sistema experto sin la existencia y colaboración del experto humano. Sin embargo, hoy se sabe que son posibles sistemas expertos sin ni siquiera la existencia del experto humano.



De todas formas la mayoría de los sistemas expertos existentes en la actualidad nacen de la colaboración de *expertos humanos e ingenieros del conocimiento*. EL primero aporta el conocimiento en el área de interés y el segundo colabora poniendo ese conocimiento en forma tal que el sistema sea capaz de asimilarlo. En este trabajo en conjunto está la clave del éxito de muchos sistemas.

El *subsistema de control de la coherencia*, da una forma más ordenada y, por supuesto, más fiable el sistema, además, avisará de imperfecciones que detecte. Este elemento es bastante reciente por lo que forzosamente tendrá que estar en los sistemas expertos del futuro.

El *subsistema de adquisición del conocimiento* es el encargado de recibir los elementos de conocimiento que proceden del tandem experto-ingeniero, comprobar que son elementos nuevos, es decir, todavía no incluidos en la base del conocimiento y en su caso, transmitirlos a dicha base en forma por ella inteligible.

El *conocimiento almacenado* puede ser de tipo abstracto y concreto. El adjetivo abstracto se refiere al de validez general (reglas, espacios probabilísticos, etc.) y el concreto, al de validez particular. Así, en el caso de diagnóstico del estado del agua residual el conocimiento abstracto la constituyen los elementos que contiene el agua en sus diferentes formas, residuos, contaminantes, los tratamientos, etc. y el conocimiento concreto está constituido por los residuos en particular que contenga el agua en cada afluente. Mientras que el abstracto es permanente y forma parte esencial del sistema, el concreto es efímero, se destruye y no forma parte del sistema propiamente dicho.

La *base del conocimiento* es el elemento que almacena el conocimiento abstracto, y lo pone a disposición del motor de inferencia para su posterior tratamiento. La elección de la forma de almacenamiento es fundamental de cara al rendimiento del sistema. Por ello su elección y diseño requiere un estudio cuidadoso.

La *memoria de trabajo* es la que almacena el conocimiento concreto y todos los procedimientos de los diferentes sistemas y subsistemas. Su carácter es de tipo transitorio, es decir, cambiante.

El *motor de inferencia* es el corazón de todo sistema experto. Su función principal consiste en aplicar el conocimiento abstracto al conocimiento concreto para sacar conclusiones. Así, el diagnóstico de un efluente dado consiste en analizar que tipos de contaminantes contiene (conocimiento concreto), así como saber de donde proviene, y detectar el tipo de tratamiento a seguir mediante un análisis de diferentes tipo de efluentes-contaminantes (conocimiento abstracto). Durante este proceso puede ocurrir que el conocimiento concreto inicial sea muy limitado y que no puedan sacarse conclusiones fiables, por lo que el sistema experto debe disponer de un sistema de demanda de información que complete ese conocimiento para proceder de nuevo a su reelaboración y repetir el ciclo hasta llegar a conclusiones válidas.

En muchos casos esta demanda de nueva información se hace preguntando al usuario, por lo que debe existir una *interfase de usuario* que la haga posible. Es muy recomendable cuidar como mímimo esta interfase pues el reconocimiento de la bondad del sistema experto corre a cargo de los usuarios, que son los que a la postre, determinan si el sistema resulta útil o no. En esta interfase deben jugar papeles

preponderantes los nuevos elementos del hardware (ratones, pantallas gráficas, pantallas en color, etc.) y el software (menús, cuadros de diálogo, gráficos, etc.) introducidos ya hace varios años

Una vez sacadas las conclusiones pertinentes, el sistema experto puede realizar ciertas acciones mediante el *subsistema de ejecución de ordenes*. Por ejemplo, un sistema experto para controlar el funcionamiento de una planta nuclear, puede propiciar la apertura y el cierre de ciertas válvulas, la activación de ciertas alarmas el movimiento de barras, etc.

Una vez producidas las conclusiones, el usuario puede interesarse también por las razones que han conducido a las mismas. Por ello, debe existir un *subsistema de explicación*, que tras el análisis de los procesos seguidos por el motor de inferencia, comuniquen al usuario, en forma ordenada e Inteligible, los hechos determinantes que diferencian las distintas alternativas de decisión.

Es bastante frecuente que algunos de los hechos (conocimiento concreto) no sean conocidos con certeza. Pléñese, por ejemplo, en un usuario que no está seguro de sus afirmaciones. También puede ocurrir que el conocimiento abstracto no esté definido en forma determinista o con total certeza, sino que haya duda, componentes aleatorias o información de tipo difusa. En este caso se necesita una base de conocimiento especial que permita almacenar este tipo de información y es inevitable la existencia de un mecanismo capaz de realizar la propagación de la incertidumbre al encadenar los distintos elementos de conocimiento. Este elemento se conoce con el nombre de *subsistema de propagación de la incertidumbre*. Su complejidad es tal que probablemente el elemento más débil de los sistemas expertos que funcionan en la actualidad. Esto hay que entenderlo en el sentido de que la propagación de la incertidumbre es normalmente incorrecta y que, por lo tanto, las conclusiones que resultan son o pueden ser poco fiables.

Uno de los elementos que más recientemente se han incorporado a los sistemas expertos y que los hacen más sugestivos, es el *subsistema de aprendizaje*. No debe sorprendernos el oír que los sistemas expertos sean capaces de aprender. Hoy existen demostraciones palpables de que esto es ya una realidad. Se diferenciará entre el aprendizaje estructural y el aprendizaje paramétrico. El *aprendizaje estructural* se refiere a los aspectos relacionados con la estructura del conocimiento (reglas, espacios probabilísticos, etc.). Así, el descubrir que un contaminante ciava es relevante para un tipo de agua residual o la incorporación de una nueva regla a la base del conocimiento constituye aprendizaje de tipo estructural. El *aprendizaje paramétrico* se refiere a los parámetros de la base de conocimiento. Así, la determinación de las probabilidades o las frecuencias de aparición de las diferentes tipos de tratamientos de aguas o de los tipos de contaminantes de las aguas constituye un aprendizaje paramétrico. El primer tipo de aprendizaje es muy superior al segundo, aunque ciertos artificios pueden permitir que el segundo suplante al primero, al menos parcialmente. Esto ocurre, por ejemplo, cuando se incluyen, ante la duda, como contaminantes de un tipo de agua residual, algunos con una probabilidad nula y luego se permite su modificación, de esta forma si algunos contaminantes del agua son excluidos inicialmente (al darle una probabilidad nula) y luego, si la evidencia posterior pone de manifiesto que esta hipótesis no es correcta, una simple modificación de los parámetros (probabilidades) permite incluirlos. Este método suele ser muy útil en algunos casos.

Finalmente se incluye la *base de datos* y de experiencias que se encarga de almacenar los datos o la experiencia existente sobre el tema que se trata. Al principio se decía que era posible la existencia de un sistema experto sin la necesidad de la existencia del experto humano. Al hablar así se pretendía decir que se puede partir de datos o de experiencias recogidas por no expertos, en el sentido usual de la palabra, y desarrollar un sistema experto con las mismas garantías de calidad que pueden esperarse de la contribución de un experto humano en el sistema.

En este proceso juega un papel muy importante el *subsistema de aprendizaje*, que debe encargarse de realizar los aprendizajes estructural y paramétrico, bien conjuntamente o bien en fases escalonadas.

Los elementos anteriores sirven para definir claramente las funciones de un sistema experto, que es la mejor forma de entender lo que realmente hay detrás de estos sistemas y conocer sus posibilidades. Entre otras cosas, a modo de resumen, podrían destacarse las siguientes.

1. Adquirir conocimiento
2. Almacenar conocimiento
3. Razonar e inferir
4. Demandar nueva información
5. Aprender
6. Propagar incertidumbre
7. Asistir al experto a dar información coherente
8. Explicar las conclusiones
9. Realizar ciertas acciones como consecuencia del razonamiento
10. Controlar la coherencia del conocimiento del sistema.

A estas funciones podrán añadirse otras más, que resultarán de los avances que se produzcan en el futuro en el campo de los sistemas expertos. Recuérdese el carácter cambiante de la informática y en particular de los sistemas expertos evolucionan vertiginosamente, siendo impredecibles los límites a los que puede llegarse.

Es común en la actualidad caracterizar cualquier sistema de inteligencia artificial (IA) que use un dominio sustancial de conocimiento como un sistema experto. De esta forma, casi todas las aplicaciones a los problemas reales pueden ser consideradas dentro de esta categoría, aunque la designación de "sistemas basados en conocimiento" es más apropiada.

La figura 4 muestra una posible representación de un sistema experto. Los componentes encima de la línea punteada corresponden todos al sistema de cómputo. De bajo de esa línea se indican las capacidades de acceso para dos tipos de usuarios humanos. El primero es el ingeniero de conocimiento, quien es la persona responsable de colocar el conocimiento dentro de la base de conocimiento del sistema experto, a través de la interfase y el ajustador de reglas.

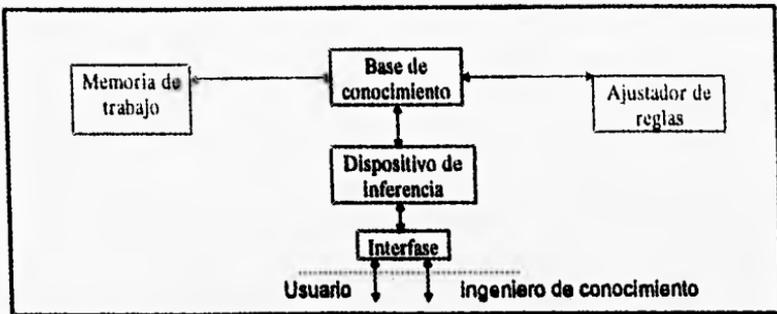


Figura 4. Sistema experto genérico.

El ingeniero de conocimiento también es el eslabón entre el experto humano (si lo hay) y el sistema experto; esto es, el ingeniero de conocimiento captura la experiencia del experto humano y luego expresa esta experiencia en un formato que pueda ser almacenado en la base de conocimiento y ser usado por el sistema experto. En el sistema experto ideal, no sería necesario el ingeniero de conocimiento; el experto en el dominio interactuaría directamente con el sistema experto, reemplazando al ingeniero de proceso en la figura.

El segundo tipo de individuo con acceso al sistema experto es el usuario, propiamente dicho, quien es cualquier persona que emplea el sistema experto como una herramienta en la toma de decisiones (como consultor). El ingeniero de conocimiento capaz de tener siempre en mente que la finalidad real del sistema experto es el beneficio del usuario y no del experto o del ingeniero de conocimiento del mismo.

La interfase maneja toda la entrada de datos e instrucciones a la computadora, controlando y dando formato a todas las salidas. Una interfase bien diseñada debe exhibir facilidad de uso (interfases amigables), aún para el usuario inexperto. La interfase también maneja toda la comunicación con el ingeniero de conocimiento (o experto en el tema) durante el desarrollo de la base de conocimiento del sistema experto. Otra propiedad que se exhibe algunas veces en los sistemas expertos es la explicación (como se mencionó anteriormente en el *subsistema de explicación*) las razones a cualquier pregunta del usuario, así como el razonamiento seguido para llegar a la conclusión. Una vez más, está función es responsabilidad de la interfase.

El dispositivo de inferencia se emplea durante una sesión de consulta. durante este proceso, ejecuta dos tareas primarias. Primero, examina el estado de la base de conocimiento y la memoria de trabajo para determinar qué hechos se encuentran disponibles. Segundo, procura el control de la sesión, determinando el orden en el que se hacen las inferencias. Una designación alternativa para el dispositivo de inferencia, y quizá la más apropiada, es la de "procesador de conocimiento". Como elemento de procesamiento del conocimiento en un sistema experto, el dispositivo de inferencia sirve para unir hechos y reglas a desarrollar, o inferir nuevos hechos.

Una base de conocimiento típica contiene dos tipos de conocimiento: hechos y reglas. Los hechos representan varios aspectos de un dominio específico que se conocen a priori durante la sesión de consulta del sistema experto. Las reglas son simplemente heurísticas. Si la base de conocimiento ha sido construida con la interacción de un experto humano, estas reglas representan la percepción del ingeniero de conocimiento sobre las reglas heurísticas empleadas por el experto en la toma de decisiones.

La memoria de trabajo de un sistema experto cambia de acuerdo con el problema específico que se maneje. La memoria de trabajo contiene hechos. Sin embargo, a diferencia de los hechos en la base de conocimiento, estos hechos se determinan por el problema específico bajo consideración, durante (y al final de) la sesión de consulta. de manera más específica, los resultados del proceso de inferencia son nuevos hechos que se almacenan en la memoria de trabajo.

En lo que respecta al ajustador de reglas, en la mayoría de los sistemas expertos existentes sirve como un editor de reglas, esto es, introduce las reglas especificadas por el ingeniero de conocimiento en la base de conocimiento durante la fase de desarrollo del sistema experto. También se usa para verificar estas reglas (consistencia, amplitud). En sistemas expertos más ambiciosos, el ajustador puede usarse en el intento de incorporar aprendizaje en el proceso. En estos casos, se le "enseña" al sistema experto dándole un conjunto de ejemplos para luego criticar su ejecución. Si ésta no es satisfactoria, el ajustador revisa automáticamente la base de conocimiento. Si es satisfactoria, el ajustador puede reforzar simplemente la base de conocimiento existente.

Un soporte de sistemas expertos, "coraza", incluye todos los componentes de la figura anterior, excepto la base de conocimiento. Usando el soporte, le corresponde al ingeniero de conocimiento desarrollar la base de conocimiento e insertarla en la arquitectura para formar un sistema experto completo, en su dominio específico. El soporte evita que el ingeniero de conocimiento desarrolle todos los elementos del sistema experto que contempla, permitiéndole concentrarse en el desarrollo de la base del conocimiento.

La arquitectura del sistema experto genérico mostrada en la figura anterior, sirve para indicar algunas de las diferencias entre este tipo de enfoque y el de los procedimientos algorítmicos y programas netamente heurísticos. En particular, debe advertirse que la base de conocimiento está separada del dispositivo de inferencia. En otras palabras, a diferencia de los algoritmos y los programas heurísticos, un sistema experto separa las reglas heurísticas del procedimiento de resolución. La base de conocimiento contiene una descripción o modelo de lo que se conoce" (derivación de la solución a un problema específico). El dispositivo de inferencia contiene una descripción de lo que se hace" para desarrollar realmente la solución. Mientras que la base de conocimiento cambia de dominio a dominio, el dispositivo de inferencia es el mismo.

Tipos de sistemas expertos

Entre los tipos de sistemas expertos destacan dos de ellos: los *basados en reglas* y los *basados en la probabilidad*. En la tabla 7 se muestran algunas de las bases de los elementos más importantes que intervienen en un sistema experto de los tipos anteriores

Tabla 7. Elementos más importantes que intervienen en los sistemas expertos.

ELEMENTOS	MODELO PROBABILISTICO	MODELO BASADO EN REGLAS
BASE DE CONOCIMIENTO	Abstracción: Estructura probabilística (sucesos independientes) Concreto: Hechos	Abstracción: Reglas Concreto: Hechos
MOTOR DE INFERENCIA	Evaluación de probabilidades condicionales (teorema de Bayes)	Encadenamiento hacia atrás y hacia adelante
SUBSISTEMA DE EXPLICACIÓN	Basado en probabilidades condicionales	Basado en reglas activas
ADQUISICIÓN DE CONOCIMIENTO	Espacio probabilístico Parámetros	Reglas Factores de certeza
SUBSISTEMA DE APRENDIZAJE	Cambio en la estructura del espacio probabilístico Cambio en los parámetros	Nuevas reglas Cambio en los factores de certeza.

En los sistemas basados en reglas la base del conocimiento está constituida por un conjunto de reglas y en los sistemas basados en la probabilidad, por el espacio probabilístico en el que se incluyen los sucesos y sus dependencias. En ambos casos el conocimiento concreto se identifica con los hechos. El motor de inferencia consiste en el encadenamiento de reglas (hacia adelante o hacia atrás) o bien en la determinación o evaluación de las propiedades condicionales. La explicación se basa en reglas activas o en valores relativos de las probabilidades condicionales. Finalmente, la adquisición del conocimiento y el aprendizaje consisten en la incorporación de nuevas reglas a la base, en la variación de los factores de certeza, en cambio de la estructura probabilística o en la variación de las probabilidades. La tabla 8 muestra una comparación de las ventajas e inconvenientes de ambos. En primer lugar se dirá que el motor de inferencia de los métodos probabilísticos es muy rápido, ya que en general todas las implicaciones están presentes en el modelo y sólo se trata de determinar con qué probabilidad se da determinada implicación. Por el contrario, el motor de inferencia en los métodos basados en reglas necesita encadenar las reglas, lo cual es muy costoso y puede producir problemas graves de memoria si se utilizan, como es habitual, los métodos recursivos. A veces se producen también problemas de tiempo de ejecución.

Tabla 8 Ventajas e inconvenientes de los tipos de sistemas.

	PROBABILISTICO	BASADO EN REGLAS
VENTAJAS	Motor de inferencia rápido Aprendizaje paramétrico fácil Propagación de incertidumbre fácil	Explicación fácil Sólo implicaciones deseadas
DEFECTOS	Elevado número de parámetros Implicaciones superfluas	Motor de inferencia lento Dificultad de propagación de la incertidumbre

En cuanto a la explicación puede decirse que es más fácil en los métodos basados en reglas, ya que se sabe perfectamente qué reglas están activas (han sido disparadas), mientras que en los métodos probabilísticos todas las reglas están activas

en un cierto grado y la explicación debe basarse en la medida de actividad, que no es otra cosa que la probabilidad.

Un inconveniente de los métodos probabilísticos, es el elevado número de parámetros que resultan, lo que lleva asociada la inclusión de reglas superfluas. Por el contrario, el aprendizaje paramétrico de estos modelos es muy sencillo y fácil de implementar.

Aún cuando entre los sistemas expertos existentes predominan los basados en reglas, no es porque sean superiores a los basados en la probabilidad. El principal defecto de los primeros es la propagación de la incertidumbre, que deja mucho que desear.

Constricción de un sistema experto.

El desarrollo de un sistema experto debe programarse muy cuidadosamente siguiendo un programa en el que, entre otras cosas, pueden figurar las siguientes etapas:

1. definición del problema a resolver
2. búsqueda de un experto o de los datos o experiencia
3. diseño del sistema experto
4. elección del grado de intervención del usuario
5. selección de la herramienta, concha o lenguaje de desarrollo
6. desarrollo de un prototipo
7. prueba del prototipo
8. refinamiento y generalización
9. mantenimiento
10. actualización

El comienzo consiste en definir correctamente el problema a resolver. No debe bajo ningún concepto, escatimarse tiempo a esta primera etapa en la que debe trabajarse con rigor y precisión, pues todo el tiempo empleado en este nivel será ahorado con creces en lo que sigue. La experiencia demuestra que es una etapa muy importante en el diseño de un sistema experto y que se le dedica un tiempo muy por debajo del necesario.

Una vez que el problema está inicialmente definido, hay que buscar el experto humano que esté en condiciones de resolverlo con posibilidades de éxito. En algunos casos bastará con bases de datos o experiencias que jugarán el papel del experto humano. En prácticamente todos los casos será necesario cambiar algunos aspectos de la primera fase a la luz de las orientaciones dadas por el experto.

La tercera parte es el diseño del sistema experto en el que se incluyen las estructuras para almacenamiento del conocimiento, el motor de inferencia, los sistemas de explicación, la interface con el usuario, etc.

Una vez hecho el diseño del sistema experto se está en condiciones de elegir el grado de intervención del usuario. En ese momento hay que decidir si se utiliza un experto llave en mano, una concha, una herramienta o un lenguaje de programación.

Con los medios decididos en la etapa anterior puede procederse ya al desarrollo de un prototipo y a la prueba del mismo, en un ciclo que se repite hasta que se consiguen los

resultados apetecidos. A esta fase seguirá una de refinamiento y de generalización en la que se va puliendo defectos e incluyendo nuevos casos no contemplados en el diseño original.

Las dos últimas fases son de gran importancia si se requiere llegar a un producto de calidad.

Se observa que desde un punto de vista científico, la razón más importante es la formalización y clarificación del conocimiento que resulta de tener la experiencia humana que hace su razonamiento explícito.

Los humanos expertos, tales como médicos, analistas, e ingenieros especialistas, tienen según el estado actual de la tecnología, métodos, basados en su experiencia, para solucionar problemas difíciles de especificar. Ellos raramente abstraen sus métodos de razonamiento y el como describirlos sistemáticamente, además de cuando y donde estos pueden ser aplicados.

En la construcción de sistemas expertos, se fomenta al humano experto a realizar una demostración de su experiencia práctica (prueba y error), de tal forma que esta pueda ser reproducida y probada por otros humanos más allá de los confines de su círculo inmediato.

Otras razones para la construcción de sistemas expertos son la posibilidad de combinar la experiencia humana dentro de una base del conocimiento de expertos que pueden emerger en el camino, el cual es nuevo y diferente. Por ello, se deben de desarrollar nuevos métodos para la comparación del razonamiento experto.

Una de las facetas de esto, es el de mejorar la clase de vida, previniendo los malos funcionamientos y proponer que las soluciones sean todas valiosos objetivos de los sistemas expertos. Sin embargo, se debe de preguntar a cerca del costo a realizar, y si hay caminos alternativos para la distribución de la experiencia de conocimientos humanos. En forma más amplia, se debe preguntar si un sistema experto es probable de ser buscado correctamente y si el potencial por el abuso de éste puede de alguna forma ser peor que la completa falta del mismo.

Hasta los 80's muchos sistemas expertos fueron prototipos desarrollados como proyectos de demostración puestos en movimiento en grandes y costosos aparatos, subsidiados por donativos de los gobiernos. Con el advenimiento de los microprocesadores y estaciones de trabajo personales, los sistemas expertos pueden aplicarse en estos y el costo de memoria y almacenaje hace posible proveer algunas de las más ambiciosas bases de conocimiento útiles para su construcción y prueba.

De este modo, no se puede esperar que los sistemas expertos reemplazan completamente a los humanos en muchas aplicaciones. los sistemas expertos más bien pueden servir como un interactivo inteligente de soluciones a problemas y sistemas consultivos que aumenten las capacidades del usuario.

Un experto puede tener diferentes tipos de información para proporcionar para la construcción de un modelo de razonamiento experto: Experiencia personal acerca de

solución de problemas, acerca de modelos para la solución de problemas, conocimiento personal acerca de las causas para la elección de métodos usados.

La experiencia humana en la relación individual de un problema con reglas abstractas, es raramente una tarea fácil para los humanos expertos. Muchas veces ellos carecen de recursos para describir una experiencia de una manera sistemática, generando sólo una forma de estructura racionalizada. El adquirir una unión con una aceptación generalizada y formal de conocimiento científico es frecuentemente una verdadera dificultad.

Varias etapas en el desarrollo de un sistema experto pueden ser abstraídas de las experiencias. Esto representa la pauta general y no deben ser tomadas en el curso del desarrollo necesario para todos los sistemas expertos.

Representación del conocimiento

La representación del conocimiento puede hacerse de muy diversas maneras. La que se consideran las más importantes son las siguientes:

- 1. Redes semánticas**
- 2. Temas objeto-atributo-valor**
- 3. Reglas**
- 4. Marcos (frames)**
- 5. Expresiones lógicas.**

Aunque puede manejarse cualquiera de ellos en el desarrollo de los sistemas expertos, la manera más común y utilizada hasta la fecha es el uso de las reglas de producción, de lo cual se deriva la denominación de "sistemas basados en reglas". El patrón general de las reglas es la famosa condicional SI - ENTONCES.

La representación del conocimiento basada en reglas tiene las siguientes ventajas con respecto a los otros modos de presentación:

- 1. La mayoría de los paquetes de desarrollo de sistemas expertos (en especial los soportes) emplean bases de reglas.**
- 2. Los paquetes de desarrollo de sistemas expertos basados en reglas son normalmente más baratos (en términos de costo inicial) que aquellos que emplean otros modos de representación. Además, requieren de hardware convencional y no necesitan exhaustivas sesiones de entrenamiento para los usuarios.**
- 3. Los diversos soportes de sistemas expertos basados en reglas permiten que el ingeniero de conocimiento se concentre en el desarrollo de la base de conocimiento, la parte más crítica del proceso de elaboración.**
- 4. Las reglas son un modo natural de representación del conocimiento, por lo que se minimiza el tiempo requerido para su desarrollo.**
- 5. Es mucho más fácil y rápido aprender a usar e implementar un sistema basado en reglas, que un sistema con cualquier otro tipo de representación.**

6. Las reglas son más transparentes que sus principales competidores: las estructuras y las redes neuronales. Esta transparencia permite que se les tenga mayor confianza a las soluciones obtenidas con los sistemas basados en reglas.
7. Las bases de reglas son relativamente fáciles de modificar. Los procesos de incorporación, eliminación y revisión de reglas son directos.
8. La validación del contenido de los sistemas basados en reglas (determinación de la amplitud y consistencia de la representación) es un proceso relativamente simple. Para las representaciones basadas en estructura y redes neuronales, un proceso de validación similar es virtualmente imposible.

Las reglas empleadas en la representación del conocimiento poseen algunas propiedades típicas, y sus aspectos más relevantes son:

1. **Nombre.**- Cada regla debe tener un nombre distinto, que además sea descriptivo con respecto al contenido y/o propósito de la regla.
2. **Premisa (la porción SI de la regla).**- Cada regla posee un o más cláusulas de premisa de la regla. Una premisa de regla puede contener cláusulas conjuntivas o disyuntivas.
3. **Conclusión (la porción ENTONCES de la regla).**Cada regla consiste de una o más cláusulas de conclusión. En el caso de las cláusulas de conclusión múltiples, deben ser todas conjuntivas. Existen dos tipos de conclusiones de regla: conclusiones intermedias y conclusiones finales. Las primeras son cláusulas de conclusión de una regla que sirven como cláusulas de premisas para otra regla. Considérese, por ejemplo, una base de reglas para clasificar animales. Algunas reglas pueden tener conclusiones finales, como "Entonces la especie es un león". Otras pueden tener conclusiones intermedias, usadas para conocer varias posibilidades, por ejemplo "Entonces el género de la especie es mamífero". Dos reglas representativas para esta situación son:

Regla mamífero. Si el animal nace vía placenta.

Entonces su género es mamífero.

Regla león

Si el género del animal es mamífero y su color es pardo rojizo y es carnívoro. Entonces es un león,

Nótese que la conclusión de la regla mamífero es intermedia, puesto que sirve como la premisa para la regla león. La conclusión a esta última regla, por su parte, es terminal para todo su conjunto.

4. **Notas y referencias.**- Es importante que una base de reglas esté documentada. Quizá la persona que desarrolla la base conozca la razón y el origen de las reglas, pero otras personas no. Inclusive al pasar el tiempo el desarrollo tendrá dificultades para recordar el origen y las especificaciones de cada regla. Muchos paquetes de desarrollo permiten la inclusión de notas y referencias, características que deben ser aprovechadas.

5. Factores de confianza (medida de la confiabilidad en la conclusión de la regla).- Cuando las reglas sean inciertas, se pueden asociar a ellas factores de confianza. El factor de confianza de una conclusión de regla es una función de los factores de confianza de una regla y su premisa.
6. Prioridad y costo.- En algunos paquetes de desarrollo es posible asignar una prioridad y/o un costo a cada regla. Tales propiedades se emplean normalmente para decidir, durante el procedimiento de inferencia, la regla específica que se relacionará a un caso particular. Comúnmente, el procedimiento inferencial elegirá la regla con la prioridad más alta o el más bajo.
7. Preferencia de encadenamiento.- El proceso de inferencia implica un procedimiento de búsqueda. En algunos casos la búsqueda se mueve hacia "adelante" (de las premisa o hechos a las conclusiones). En otros casos la búsqueda se mueve hacia "atrás" (de una conclusión hipotética a las premisas necesarias para inferir tal conclusión). Sin embargo, adicionalmente a estos modos normales de búsqueda (encadenamiento), algunos paquetes de desarrollo permiten el uso de una mezcla de métodos de búsqueda. En tales casos, pueden etiquetarse las reglas de acuerdo a su método de encadenamiento preferido o previamente establecido.
8. Estado.- Durante la consulta, el estado de cada cláusula y regla está sujeto a cambios. El seguimiento de estos cambios es una parte importante del proceso de inferencia. Un resumen de lo que esto implica es:
 - a) La premisa de una regla es cierta cuando se aplica una prueba y se determina que la premisa fué satisfecha.
 - b) La premisa de una regla es falsa cuando se aplica una prueba y se determina que la premisa no fue satisfecha.
 - c) Si la premisa de una regla es cierta, entonces esta regla está activada.
 - d) Si la premisa de la regla es falsa, entonces esta regla puede ser eliminada o desactivada.
 - e) Si una regla está encendida, significa que la acción tomada por la conclusión va a procesarse y los valores asociados a cada conclusión serán asignados.
 - f) Una regla que ha estado encendida ya no es activa. Se elimina o, en algunos casos, se desactiva.
 - g) Si una regla se va encender, debe estar activada antes.
 - h) Si una regla no se ha encendido o descartado, entonces es una regla activada.

En el desarrollo de una base de reglas, deben tomarse en cuenta los siguientes aspectos:

1. Agrupamiento de reglas:

Las bases de conocimiento evolucionan con el tiempo. Como resultado, pueden convertirse fácilmente en una especie de colección aleatoria de reglas no relacionadas, con una desorganización tal que sea difícil comprender y mantener esta colección. Por ello, se debe establecer algún grado de

organización de reglas, con el propósito de entender, mantener, validar y documentar fácilmente éstas. Es aconsejable agrupar reglas de acuerdo a atributos semejantes en las cláusulas de conclusión. Así, cada regla en el grupo tendrá un atributo particular en común. Esto facilita el apreciar las diferentes premisas que llevan a un mismo atributo de conclusión, así como la detección de errores en la formulación o modificaciones de las reglas.

2. Ordenamiento de los grupos de reglas.

Una vez que las reglas se han agrupado, debe ordenarse cada grupo. Típicamente, esta ordenación se determina de acuerdo a los atributos de conclusión. Esto es, el grupo más importante es aquel que llega a la conclusión del objetivo de la base del conocimiento. El siguiente nivel más alto se asigna al grupo de reglas que sirvan para concluir las premisas del grupo mayor. El proceso de ordenamiento continúa de esta manera

3. Evitar el uso de cláusulas de conclusión conjuntivas.

Las conclusiones con múltiples atributos pueden ocasionar un traslape en la ordenación de grupos de reglas, así como una ramificación evidente en la base de conocimiento. Por ello es aconsejable, aunque no coherente, evitar el uso de este tipo de cláusulas de conclusión.

4. Subgrupos de reglas.

Como se estableció anteriormente, las reglas pueden agruparse de acuerdo a la similitud en sus atributos de cláusulas de conclusión. También es posible formar subgrupos de reglas en cada grupo. Considérese, por ejemplo, una base de reglas para el diagnóstico de infecciones en la piel. Obviamente, el objetivo de esta base de reglas es la determinación de la enfermedad encontrada. Consecuentemente, pueden agruparse todas las reglas que tengan el atributo "enfermedad" en sus cláusulas de conclusión. Sin embargo, habrá diversas enfermedades identificadas. Así, una subagrupación natural es clasificar cada una de estas de acuerdo a la enfermedad específica identificada. De esta forma, dicho subgrupo de "enfermedades" podría llevar a la conclusión de que la enfermedad es la "psoriasis"

5. Ordenamiento de reglas dentro de los grupos de reglas

Es preferible, generalmente, enlistar primero las reglas más probables, es decir, las más viables de ser encendidas. Puesto que muchos procedimientos de inferencia se mueven de arriba hacia abajo en una lista de reglas, colocar las reglas más probables arriba resulta un ahorro de tiempo y reducción del número de interrogantes que se presenten al usuario.

Otras dos formas de imponer este ordenamiento de reglas son el uso de las propiedades de prioridad y costo. Esto es, puede asignarse una prioridad a cada regla y ordenarse dentro de su grupo. Alternativamente, puede asignarse un costo a cada regla y llegar también a un orden específico. Algunos paquetes de software incluyen las provisiones para una o ambas propiedades.

6. Evitar falsas economías.

En el desarrollo de ciertos modelos (matemáticos, de redes, etc.) es común "limpiar" estos modelos reduciendo detalles innecesarios y redundantes. El empleo de estas prácticas parece eminentemente lógico y pudiera pensarse que es apropiado aplicarlas en los sistemas expertos. Desafortunadamente, estos hábitos pueden llevar a falsas economías en el desarrollo de las bases de reglas.

7. Evitar contenidos de procedimiento.

Las reglas tienen la finalidad de capturar lo que se conoce y no incluir lo que se hace. Sin embargo, seguir esta guía particular puede ser difícil para las personas acostumbradas a los métodos algorítmicos, en los que las relaciones y los procedimientos van juntos. Los algoritmos se dejan como parte del dispositivo de inferencia o como rutinas externas, llamadas cuando se necesiten en el sistema experto. La clave para evitar este tipo de anomalía es que nunca debe construirse una base de reglas de forma que la solución correcta sólo pueda alcanzarse cuando las reglas estén en un orden determinado.

8. Usar símbolos donde sea posible.

Los sistemas expertos, son más apropiados para problemas donde los valores de los atributos son símbolos. Esto no significa que no puedan usarse en casos donde los valores de los atributos sean números, es posible, pero son menos eficientes. Existe otra razón para emplear símbolos y no números; los seres humanos tienden a relacionar más naturalmente los símbolos que los números.

Adquisición del conocimiento.

La adquisición del conocimiento, una de las fases más difíciles en el desarrollo de los sistemas expertos, puede efectuarse por dos diferentes formas: adquirir el conocimiento directamente del experto (o expertos) en el dominio, o adquirirlo a través del uso de registros históricos (inducción de reglas). Ambas formas se emplean extensamente, y algunas veces se combinan en los sistemas basados en reglas.

Con respecto al primer enfoque, parecería ser el más adecuado. Sin embargo, se tienen al menos cuatro razones por las cuales esto no puede funcionar bien:

1. Para algunos problemas, simple y sencillamente puede no haber ningún experto. Un ejemplo de esto es la inversión en la bolsa de valores. Algunos inversionistas consideran que no hay expertos, pues en ese caso no existirían las inversiones con resultados tan mediocres que se dan en ocasiones. Por otro lado, en el caso de existir los expertos, no serían tan tontos para revelar sus conocimientos.
2. Los supuestos expertos pueden ser "expertos" pobres o mediocres. Muchas veces, se le dice experto a alguien que simplemente deja hecho el trabajo. Evidentemente, no es una medida eficaz construir una base de conocimiento con reglas heurísticas exclusivas de este tipo de expertos.

3. Los expertos pueden no querer revelar sus conocimientos propios, sólo los generales y del dominio público. En algunos casos, los expertos simplemente niegan a colaborar. En otros casos se produce algo peor; el experto aparenta cooperar pero proporciona información intencionalmente falsa.
4. Finalmente, hay algunos expertos que no son capaces de articular el método que usan. Muchos expertos, de hecho, no comprenden realmente como toman sus decisiones. En este caso, cuando se le pide una explicación de cómo resuelven un problema, responden con una descripción de su percepción más reciente del proceso, que puede tener o no relación con el procedimiento empleado.

Con las dificultades enumeradas anteriormente, puede resumirse una breve guía para el desarrollo de la fase de adquisición del conocimiento, sino para su cumplimiento cabal punto a punto, si como una secuencia de recomendaciones para ayudar en la planeación de los esfuerzos realizados con respecto a esta tarea. Sus principales planteamientos son:

1. SELECCIÓN DEL DOMINIO

- a) El dominio debe ser tal que la aplicación del sistema experto sobre él sea realmente apropiada, proporcionando alguna ventaja distintiva con respecto a cualquier método alternativo.
- b) La toma de decisiones en el dominio debe ser suficientemente importante para las personas u organismos que tienen a bien proporcionar los recursos necesarios para el desarrollo y la implementación del sistema experto.
- c) El dominio debe ser relativamente estable; en particular, cambios drásticos durante el periodo de desarrollo no deben ser previstos.

2. SELECCIÓN DEL INGENIERO DEL CONOCIMIENTO

- a) Idealmente, se requieren dos ingenieros del conocimiento y por lo menos uno de ellos debe tener experiencia en el desarrollo e implementación de sistemas expertos exitosos.
- b) Los ingenieros de conocimiento no deben encerrarse en un solo enfoque, sino que deben estar al tanto de los esquemas alternativos para el análisis de decisiones.
- c) Las actividades primarias de los ingenieros del conocimiento se centran en las áreas de obtención del conocimiento y formación de la base de las reglas (modelo de conocimiento).

3. SELECCIÓN DEL EXPERTO.

- a) Investigar los nombres de los candidatos a experto en el dominio, esto es, aquellas personas que sean consideradas con la suficiente experiencia en el dominio de interés.
- b) Elegir un experto en el dominio cuyo nivel de ejecución sea generalmente reconocido como superior al de otros que realicen la misma tarea.
- c) Elegir un experto con una trayectoria exitosa durante cierto periodo de tiempo.

- d) Elegir un experto con disposición y capacidad para comunicar su conocimiento personal y que está relativamente articulado en esto.
- e) Elegir un experto con disposición y capacidad de destinar el tiempo necesario para apoyar los trabajos de desarrollo.
- f) Si no puede identificarse o disponerse de algún experto, considerar el desarrollo de la base de reglas a través de medios alternativos.

4. ENTREVISTA INICIAL CON EL EXPERTO.

- a) Antes de la entrevista, los ingenieros de conocimiento deben familiarizarse con el problema, el dominio y la terminología empleada.
- b) Realizar la entrevista en un ambiente apropiado. Limitar su duración.
- c) Conducir la entrevista de manera informal y relajada.
- d) Decir al experto cuales son los planes y objetivos del trabajo y explicarle los alcances, las limitaciones y la organización del sistema experto.
- e) Explicarle la evolución del sistema experto, en particular las decisiones iniciales desarrolladas para prototipos anteriores.
- f) Reforzar la discusión sobre sistemas expertos demostrando el uso de algún sistema existente. Sin embargo, debe evitarse la demostración del uso del sistema experto demasiado simple.
- g) Si se desea un registro audio visual, pedir permiso al experto, explicándole que estos materiales son para uso privado del equipo de ingenieros del conocimiento.

5. ANTECEDENTES.

- a) Donde sea apropiado, efectuar una visita de sitio (lo más pronto posible)
- b) Determinar si existen manuales, reportes u otros materiales escritos que describan el dominio, el problema y la terminología empleada
- c) Pedir al experto que presente una sesión informativa y tutorial sobre el tema. En esta sesión no se hacen preguntas, sólo se escucha y aprende.

6. ENTREVISTAS SECUENCIALES.

- a) Minimizar la posibilidad de interrupciones.
- b) Establecer una agenda formal para cada encuentro.
- c) Establecer metas y objetivos para cada encuentro.
- d) Una vez que se haya desarrollado un sistema experto prototipo, dar acceso al "software" y al "hardware" de apoyo para demostraciones del prototipo y su crítica.

7. CONDUCCIÓN DE ENTREVISTAS SECUENCIALES.

- a) Obtener las reglas mediante discusión y demostración.
- b) Intentar la identificación de todas las fuentes externas de datos e información usadas por el experto.
- c) Evitar críticas; buscar, en cambio, claridad.
- d) Recordar siempre que se construye un medio de la base de reglas del experto, no de la base de reglas del ingeniero de conocimiento.

- e) Si no se comprende algún punto hecho por el experto, pedir explicación, pero sin interrumpir.
- f) Usar casos de prueba para demostrar el proceso de toma de decisiones e identificar los límites de validez de la base de reglas.
- g) Familiarizar al experto en el dominio con las reglas en este formato.

8. DOCUMENTACIÓN.

- a) Documentar los resultados de la entrevista inmediatamente después de esta.
- b) Incluir en la documentación de cada encuentro los siguientes aspectos.
 - i) Fecha, hora y lugar del encuentro.
 - ii) Nombre del experto
 - iii) Lista y descripción de las reglas identificadas
 - iv) Lista de cualquier objeto, atributo y/o valor encontrado
 - v) Identificación de fuentes externas y referencias nuevas.
 - vi) Lista de nueva terminología y definiciones asociadas
 - vii) Lista y discusión de las discrepancias encontradas.
 - viii) Puntos para aclarar en las siguientes reuniones.
- c) La documentación de apoyo a todas las reglas de producción desarrolladas debe incluir:
 - i) Lista y descripción de todas las reglas.
 - ii) Lista y descripción de todos los objetos, atributos y valores.
 - iii) Lista de fuentes y referencias.
 - iv) Glosario de terminología del dominio.
 - v) Lista y discusión de los casos de prueba usados para evaluar el prototipo.

Dentro de la adquisición del conocimiento directamente del experto en el dominio, existen dos variantes para intentar suprimir las desventajas inherentes a este mecanismo. Estas variantes son: que el ingeniero de conocimiento sea también el experto en el dominio, o el caso inverso, que el experto en el dominio sea también el ingeniero de conocimiento.

Para el primer enfoque, la más importante ventaja es que el procedimiento de adquisición de conocimiento se simplifica, pues el ingeniero de conocimiento (ahora experto en el dominio) puede proceder directamente a verter sus conocimientos en el formato de reglas, de producción. Sin embargo, este mecanismo tiene una desventaja sensible: para que el ingeniero de conocimiento se convierta en experto en algún dominio específico, se requiere un largo periodo de aprendizaje y desarrollo.

El segundo enfoque está menos obstaculizado, si se parte de que el verdadero objetivo de los sistemas expertos es de generar un paquete de desarrollo que interactúe directamente con el experto en el dominio, eliminando la necesidad de contar con el ingeniero de conocimiento. Muchos detractores de esta alternativa establecen tres desventajas principales:

- 1) Requiere tiempo y fondos para el entrenamiento de los expertos,
- 2) los expertos entrenados tratarán de resolver sus problemas vía sistemas expertos, aun cuando éstos no representen la forma más apropiada y eficiente, y
- 3) el desarrollo de sistemas expertos bajo este mecanismo se limitaría a diseños pequeños y modestos, implementados básicamente en paquetes de soporte técnico.

Como contraparte, puede decirse que estas limitantes pueden aliviarse en buena medida con sesiones de entrenamiento eficientes, contando además con la relativa y mayor facilidad para que el experto se capacite como ingeniero de conocimiento, y no el proceso inverso.

En la segunda forma general de adquisición del conocimiento (vía inducción de reglas), se convierte una base de datos existente en un conjunto de reglas de producción. Esta base de datos apropiada, a su vez, debe contener datos que abarquen ejemplos pertenecientes al tipo de problema bajo consideración (ejemplos que reflejan la aplicación del buen juicio y razonamiento eficiente). Más específicamente, se necesitan ejemplos de buena tomo de decisiones. En algunos casos esto produciría resultados adecuados, mientras en otros, al menos podría guiar el desarrollo de un sistema prototipo confiable. De hecho, algunos soportes de sistemas expertos comerciales incorporan medios (programas de apoyo) para la realización de tal proceso.

Uno de los soportes para sistemas expertos más populares en el mercado es el paquete VP-Expert (Paperback Software). Otro paquete, ligeramente menos conocido, es XiPlus (Expertech Ltd.). Ambos paquetes emplean un procedimiento inductivo similar, cuyas etapas básicas son: 1) identificación de objetos atributos y valores, 2) establecimiento de un árbol de decisión, y 3) generación de reglas a partir de los árboles.

En resumen, el uso de datos para generar sistemas expertos basados en reglas es apropiado cuando se enfrenta con un problema de diagnóstico, esto es, un problema en el cual dados ciertos síntomas (datos), se desea encontrar un diagnóstico apropiado (clasificación). Este problema también se conoce como análisis de clasificación, análisis de discriminantes o reconocimiento de patrones.

Base del conocimiento

El centro de sistemas expertos basados en reglas, lo constituye el conjunto de reglas de la base del conocimiento, que forman la que se ha llamado conocimiento abstracto (ver ejemplo de la figura 5). Cuando las premisas de algunas reglas coinciden, en su totalidad o en parte, con las conclusiones de otras, se produce lo que se llama encadenamiento de reglas. La figura 6 muestra las reglas del ejemplo anterior encadenadas. Nótese que las dos reglas encadenadas (por ejemplo, la 1 y la 4) la conclusión de una coincide (en todo o en parte) con la premisa de la otra.

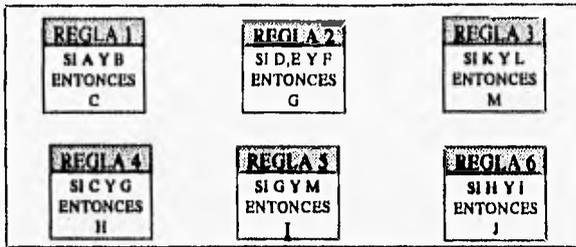


Figura 5 Ejemplo de reglas.

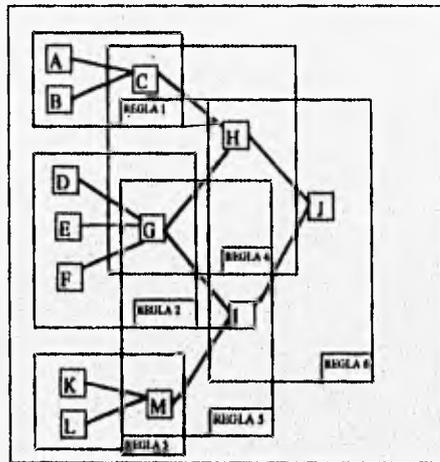


Figura 6 Reglas encadenadas

Motor o dispositivo de inferencia.

Las reglas sirven para obtener nuevos hechos o conclusiones a partir de verdades o hechos iniciales, ya que si el hecho representado por la premisa de una regla es cierto, el hecho representado por su conclusión también lo es. Se llamarán conclusiones simples a aquellas que resultan de la aplicación de una sola regla y conclusiones compuestas a las que resultan del encadenamiento de varias reglas. Tanto los hechos iniciales como los que resultan de la aplicación de las reglas forman el conocimiento concreto, que reside en la memoria de trabajo.

Para la obtención de conclusiones en los sistemas expertos se utilizan diferentes tipos de estrategias de inferencia y control de razonamiento.

Para las conclusiones simples existen dos tipos de estrategias:

- Modus ponens
- Modus tollens

El dispositivo de inferencia sirve como el mecanismo de inferencia y control para el sistema experto, y como tal, es una parte esencial del sistema, así como uno de los principales factores en la determinación de la efectividad y la eficiencia de estos sistemas. La inferencia, a su vez, es el proceso de trazar una conclusión (intermedia o final) por medio de un conjunto de reglas, para un conjunto específico de hechos en una situación dada. La inferencia es por tanto el elemento que procesa el conocimiento dentro de el sistema experto.

La estrategia de inferencia más comúnmente empleada en sistemas expertos se conoce como *modus ponens*. Esto significa que la premisa de una regla es verdadera, entonces su conclusión también es verdadera. Así, si A infiere a B y A es verdadera, entonces B es verdadera ($A \rightarrow B$). Nótese, sin embargo, que si B es verdadera, no puede decirse que A también lo sea (ver figura 7).

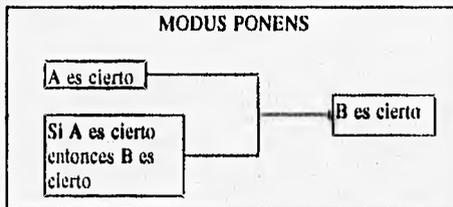


Figura 7 Ilustración del "Modus Ponens"

Las responsabilidades de control del dispositivo de inferencia son las que se emplean para determinar situaciones tales como:

- Como iniciar el proceso de inferencia.
- Cuál regla encender si hay más de una activada.
- La manera en la que se conduce la búsqueda para una solución.

Como la base de conocimiento, el dispositivo de inferencia contiene reglas y hechos. Sin embargo, las reglas y hechos de la base de conocimiento pertenecen al dominio específico del sistema, mientras que las reglas y hechos del dispositivo de inferencia pertenecen al control general y a la estrategia de búsqueda empleados por el sistema experto en el desarrollo de una solución. Estos dos conjuntos de reglas y hechos se mantienen separados premeditadamente en el sistema experto típico, lo cual, como ya se mencionó, es una de las características más importantes de dichos sistemas.

Esta separación produce diversas ventajas. Primero, permite hacer cambios en la base de conocimiento con impacto mínimo en el dispositivo de inferencia, y viceversa. Segundo, propicia el desarrollo y uso de los soportes para sistemas expertos. Estos, contienen todos los componentes necesarios de un sistema experto, con la excepción de la base de conocimiento. Siendo compatibles la estrategia de inferencia del soporte con la requerida por una base de conocimiento dada, el soporte puede usarse para acomodar esa base de conocimiento. De esta forma, se genera una arquitectura de "conexión", donde pueden insertarse varias bases de conocimiento y correrlas mediante un sistema anfitrión. Este esquema permite evitar gran parte del esfuerzo consumidor de tiempo requerido en la construcción de un sistema experto desde su principio.

Para entender el funcionamiento del dispositivo de inferencia, es necesario tener presente que el propósito de un sistema experto es desarrollar y recomendar una solución propuesta (o un conjunto de soluciones alternativas) a un problema dado. Para realizar esta tarea, el sistema experto debe efectuar una búsqueda de soluciones, y es responsabilidad particular del dispositivo de inferencia llevar a cabo esta búsqueda de manera eficiente. En el proceso de búsqueda, se enfrentan diversas alternativas (soluciones potenciales) y, típicamente, una variedad de restricciones. Por ejemplo, cuando se tiene el problema de determinar que automóvil conviene comprar, las alternativas incluyen, en teoría, todos los automóviles diferentes en existencia. Sin embargo, pueden manejarse algunas restricciones, tales como limitaciones presupuestarias, disponibilidad regional del vehículo, estilo, tiempo de compra, etc. Tales restricciones sirven para delimitar el número de automóviles potenciales sobre los cuales se hará la elección. Otros factores típicos usados para reducir el número de alternativas a un nivel razonable, incluyen el modelo del auto, el kilometraje recorrido, el fabricante y el distribuidor preferido, el color y otros. Al final, se pondrá atención solamente en algunos cuantos automóviles, de los cuales se derivará la elección final.

La estrategia de búsqueda implícita en la selección de un automóvil puede describirse, en términos más técnicos, como un encadenamiento hacia adelante (ver figura 8) con reducción, esto es, el proceso se inicia con ciertos datos referentes al tipo de automóvil deseado (estilo, costo, modelo, kilometraje, etc.), estos datos junto con las restricciones, sirve para reducir el número de alternativas potenciales y así llegar finalmente a unos cuantos autos para tomar una decisión. Desde el punto de vista de un sistema experto, el proceso de reducción disminuye el tamaño de la red de inferencia asociada, disminuyendo también los requerimientos de búsqueda. Tal proceso reductivo permite el desarrollo de soluciones a problemas que en otras circunstancias serían prácticamente imposibles de resolver.

El mismo problema de selección de un automóvil puede abordarse desde una dirección totalmente distinta, especificando primero un automóvil en particular para su compra, y luego determinando si cumple o no las necesidades del comprador. Este procedimiento se conoce como encadenamiento hacia atrás. Por ejemplo, puede considerarse primero la compra de un Porsche 944. Habiendo establecido esto como una decisión tentativa, se determina si es o no factible (satisfacción de las cláusulas de premisa asociadas en la base de conocimiento). Si se tiene una familia grande y se requiere un auto amplio y de cuatro puertas, el Porsche no califica obviamente. Sin embargo, si se desea un auto deportivo y rápido que sirva para infiar la imagen personal, el Porsche puede ser el candidato más atractivo.

En este contexto, las dos estrategias de búsqueda fundamentales que emplea un sistema experto son el encadenamiento hacia adelante y el encadenamiento hacia atrás (figuras 8 y 9). El primero se conduce desde las premisas (datos) a las conclusiones y se dice que es "orientado hacia datos". El segundo procede de una conclusión tentativa hacia las premisas (hacia atrás) para determinar si los datos confirman dicha conclusión. El encadenamiento hacia atrás conocido como un procedimiento "orientado hacia los objetivos". Ambos procesos llegan a una conclusión, pero su eficiencia de búsqueda depende de la naturaleza del problema que se enfrenta, es decir, de la naturaleza de la red de inferencia asociada al problema.

Específicamente, si se tienen pocas premisas y muchas conclusiones, el encadenamiento hacia adelante es generalmente la mejor estrategia de búsqueda. Por el contrario, con muchas premisas y relativamente pocas conclusiones, normalmente se aplica el encadenamiento hacia atrás.

No obstante, no siempre se emplean las estrategias descritas de manera individual y aislada para un problema específico; existen casos en los cuales se emplean ambos enfoques. Una combinación de encadenamientos hacia adelante y hacia atrás puede llegar a ser más apropiada para un problema, que un solo encadenamiento. Afortunadamente, algunos paquetes de "software" comerciales permiten el uso de tales combinaciones.

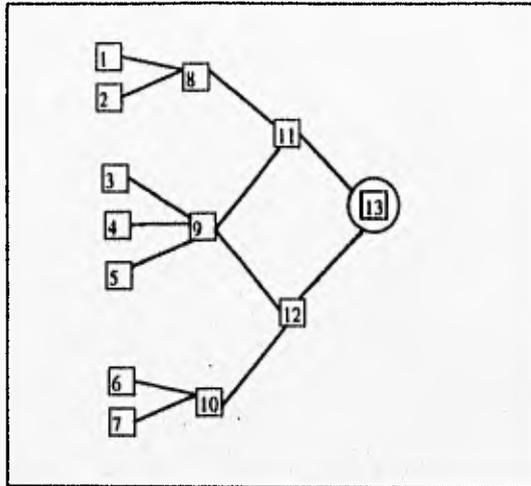


Figura 8 Encadenamiento hacia adelante.

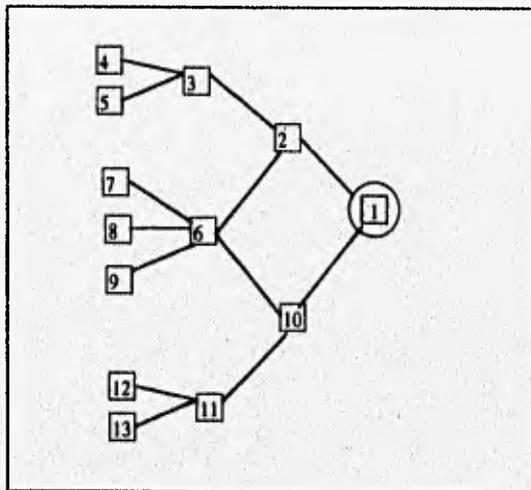


Figura 9 encadenamiento hacia atrás

APLICACIÓN DE LOS SISTEMAS EXPERTOS.

Los sistemas expertos pueden ser aplicados en muchos campos, pueden emplearse para la resolución de problemas cuyas características generales pueden ser las siguientes:

- Problemas cuyos dominios son conocidos por expertos humanos o están documentados con ejemplos de toma de decisiones eficiente.
- Problemas que requieren una base de conocimiento transparente, compatible con un idioma en particular.
- Problemas que requieran tomar decisiones en ausencia de información (valores de atributo desconocidos)
- Problemas con preponderancia de valores de atributo simbólicos opuestos a valores de atributo numéricos.
- Problemas con dominios de conocimiento relativamente estrechos y estables.
- Problemas en cuyos dominios prevalecen procedimientos heurísticos, opuestos a los procedimientos algorítmicos.
- Problemas que involucran una falta de experiencia necesaria para su resolución, acoplado al alto costo de contratar o entrenar a un nuevo experto.
- Problemas que presentan una significativa diferencia entre las conclusiones obtenidas por un experto y las obtenidas por un no experto, aunado a la negativa de aceptar las decisiones de este último.
- Problemas con explosión combinatoria, consumidores de tiempo cuando se atacan con procedimientos algorítmicos

En este punto, la mayoría de los problemas que han involucrado la aplicación de un sistema experto, descansan en las siguientes áreas generales:

- Interpretación (inferencia descriptiva de una situación a partir de registro de datos).
- Predicción (inferencia de consecuencias viables a partir de situaciones dadas).
- Diagnóstico (inferencia de la causa de un malfuncionamiento o derivación a partir de información disponible).
- Diseño (configuración de componentes bajo restricciones para cumplir las especificaciones globales del sistema).
- Planeación (desarrollo de secuencias de actividades y su cronometración para lograr un resultado deseado en un tiempo específico).
- Seguimiento (comparación de observaciones para plantear vulnerabilidades).
- Prescripción (recomendación de remedios para el malfuncionamiento de un sistema o su derivación con respecto a lo deseado).
- Control (combinación de algunas áreas anteriores, incluyendo monitoreo y prescripción).
- Instrucción (desarrollo de habilidades, experiencia o conocimiento para el usuario).

Al incluir las áreas generales mencionadas, los sistemas expertos han encontrado gran aplicación en administración financiera, planeación, mercadotecnia, ingeniería, ciencia aplicada, medicina, etc.

De interés particular son las aplicaciones que se han desarrollado en ingeniería química, las cuales incluyen:

- Diseño de procesos.
- Simulación de procesos y optimización.
- Desarrollo de "Lay-Out" de plantas de proceso (apoyo a toma de decisiones).
- Entrenamiento o capacitación.
- Diagnóstico en las fallas de un proceso.
- Control de procesos.
- Diseño mecánico y estructural.
- Planeación de proyectos.
- Análisis de operaciones de paro y arranque de plantas industriales.
- Revisión crítica de diseños para flexibilidad, eficiencia y seguridad.
- Seguimiento y evaluación de corrientes de proceso.
- Programación automática.

La utilización de sistemas expertos en lo mencionado anteriormente dentro de la ingeniería química es un proceso real, que de ninguna manera implica una visión futurista ideal, si no que, encuentra diversos ejemplos de apoyo en muchas partes del mundo. No obstante, esta visión futurista abandona los matices idealistas para indicar la enorme utilidad de los sistemas expertos en los próximos años.

CAPITULO 3

TÉCNICAS DE SEPARACIÓN DE LAS AGUAS RESIDUALES

El grado de tratamiento que requerirá un desecho industrial, depende de la dilución y las características estabilizadoras de la corriente receptora. La cantidad y concentración de los contaminantes debe quedar reducida al mínimo en la planta industrial.

Los procesos de tratamiento que se emplean dependen de las características del desecho. Antes de hablar de la tratabilidad de los contaminantes es necesario el plantear algunas consideraciones, como son:

1. Reducción de los desechos en las fuentes, mediante cambios o mejoras en los procesos industriales, de tal forma que se generen los mínimos posibles.
2. Separación, clasificación y concentración de los desechos con el propósito de evitar la mezcla.
3. Reciclar en la medida de lo posible los desechos industriales.
4. Destruir, destoxificar y neutralizar a formas inocuas a las sustancias tóxicas.
5. Disponer en forma segura a las sustancias tóxicas.

Al hablar de la contaminación generada por la industria química, se aprecian dos grandes aspectos: el primero es el hecho de que casi siempre se presenta contaminación convencional, es decir la demanda bioquímica de oxígeno (DBO), demanda química de oxígeno (DQO), grasas y aceites, sólidos en todas sus formas, etc., el segundo es que también se presenta en forma importante la contaminación por sustancias tóxicas, lo cual da una característica diferente al problema, ya que la tecnología disponible para remover la contaminación convencional no siempre funciona de manera eficiente para que las sustancias tóxicas sean eliminadas en su totalidad, lo cual obliga a analizar otros métodos de tratamientos, tanto convencionales como avanzados. Se consideran como métodos convencionales los de la tabla 9.

Tabla 9. Métodos convencionales para el tratamiento de aguas residuales.

MÉTODOS CONVENCIONALES PARA EL TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES
SEDIMENTACION
COAGULACIÓN
FLOCULACION
LODOS ACTIVADOS
LAGUNAS AEREADAS
LAGUNAS DE ESTABILIZACIÓN
FILTROS PERCOLADORES
DIGESTIÓN AEROBIA
DIGESTIÓN ANAERÓBIA

SEPARACIÓN DE SÓLIDOS SUSPENDIDOS

Los sólidos suspendidos en general son la materia insoluble de naturaleza tanto orgánica como inorgánica, que tiene la característica de poder ser separados por medios físicos simples y económicos.

Estos sólidos generalmente se encuentran en concentraciones que van desde 1 a 20% y representan de 20 a 40% de la contaminación total contenida en el agua.

La manera más sencilla de removerlos es por medio de sedimentación en tanques con flujo laminar cuando su densidad es mayor que la del agua, normalmente los tiempos de retención fluctúan entre 1 y 3 horas, aunque pueden llegar a ser hasta de 24 horas.

Otro método que ha sido usado con éxito es la floculación, que puede producir un lodo hasta 10 veces más concentrado que el original y eliminar el contenido de sólidos suspendidos de un 60 a un 90%.

Otros de los métodos que se emplean en la remoción de sólidos suspendidos son:

- * Filtración
- * Flotación
- * Coagulación - floculación

nota.- Las operaciones unitarias de separación se explican con más detalle en el capítulo 5 de procesos de tratamiento de las aguas residuales.

SEPARACIÓN DE SÓLIDOS COLOIDALES

Estos sólidos, cuyo tamaño fluctúa entre 1 y 200 micras son suficientemente pequeños para tener estabilidad, debido a la doble capa eléctrica que poseen, razón por la cual no pueden ser removidos por sedimentación simple, pues se requieren de tiempos de retención muy largos, por ello, se puede decir que los coloides no sedimentan a menos que la carga eléctrica que los mantiene estables sea neutralizada.

Lo anterior se logra mediante la adición de sustancias de carga contraria a la del coloide (generalmente negativa) y a dicho proceso se le denomina coagulación - floculación, ya que las partículas coloidales, forman coágulos grandes y suficientemente más densos que el agua, con lo cual sedimentan más fácilmente.

Los coagulantes son normalmente electrolitos con una fuerte carga positiva cuando se disuelven en agua, siendo los más usados sales de hierro y el aluminio.

En muchas ocasiones, los sólidos coloidales pueden representar del 30 al 50% de la demanda de oxígeno del agua residual.

SEPARACIÓN DE SÓLIDOS INORGÁNICOS DISUELTOS.

En muchas ocasiones, pese haber eliminado la carga orgánica del agua residual, se tiene una cantidad apreciable de sólidos inorgánicos disueltos, lo cual se refleja en altos

valores de conductividad eléctrica y que hacen el agua inadecuada casi para cualquier uso.

Con el propósito de bajar dicha conductividad a valores razonables, se ha usado el intercambio iónico, la osmosis inversa y la electrólisis.

SEPARACIÓN DE GRASAS Y ACEITES.

El término de grasas y aceites se refiere a una amplia gama de compuestos cuya característica principal es la de ser insolubles en el agua y en general de densidad menor. Generalmente están constituidos por lípidos, grasas, hidrocarburos aromáticos y aceites orgánicos.

Estos materiales tienden a flotar, y son removidos por medio de desnatadores o separadores, aunque también se ha usado en gran escala la flotación con aire, con el propósito de acelerar el proceso.

SEPARACIÓN DE MATERIA ORGÁNICA DEGRADABLE.

En general, la materia orgánica que permanece en el agua después de la separación de los compuestos insolubles, es materia orgánica soluble, que se encuentra en concentraciones lo suficientemente bajas (0.1 a 2 %) como para no hacer económica su recuperación y, por otro lado, representa una demanda de oxígeno lo suficientemente grande para poder ser descargada al agua sin causar problemas, ya que su demanda bioquímica de oxígeno fluctúa entre 1000 y 10 000 mg/l.

Esta materia orgánica puede ser removida por medios químicos o biológicos. Los primeros en general no se usan porque son incosteables, dejando como alternativa a los métodos de tratamiento biológico, los que además de ser suficientes, se consideran como una extensión de los métodos que normalmente se presentan en la auto purificación de las corrientes, siendo en consecuencia los que menos lodo residual producen.

De los sistemas que han sido usados con más éxito en la industria química, se tienen las lagunas aeradas y los lodos activados, aunque también son factibles de ser aplicados los filtros biológicos, las lagunas de estabilización, etc.

Si los sistemas se diseñan y operan de manera adecuada, las diferencias que normalmente se obtienen son mayores de 90%.

SEPARACIÓN DE MICROORGANISMOS PATÓGENOS.

Las aguas residuales de la industria química contienen también los efluentes de baños y sanitarios, los cuales pueden ser fuentes potenciales de organismos patógenos, que representan un serio problema para la salud.

Pese a lo anterior, y dada la naturaleza agresiva de los efluentes de la industria química, la supervivencia de los organismos patógenos es difícil, razón por la cual no

representan un problema serio de tratamiento. Sin embargo, de llegar a ser necesario existen métodos como la cloración o la ozonación para asegurar su eliminación.

SEPARACIÓN DE NUTRIENTES

Si bien el término nutriente abarca una gran cantidad de compuestos tanto a nivel macro como micro, en general este problema en el tratamiento de aguas residuales se centra en la presencia de nitrógeno y fósforo por la relación que estos elementos guardan con los problemas de la eutroficación de los cuerpos del agua, pues de ellos dependen en gran medida el crecimiento de los organismos fotosintéticos.

Para la remoción del nitrógeno se ha empleado grandemente el tratamiento biológico, aunque normalmente no es 100% eficiente, entonces, se usan tratamientos complementarios, como son la nitrificación/ desnitrificación, stripping para eliminar el amoníaco mediante cambios del pH y a veces el intercambio iónico.

Para la eliminación del fósforo se ha empleado el tratamiento biológico y la coagulación con cal.

TRATAMIENTO DE COMPUESTOS TÓXICOS.

Además de generar contaminantes convencionales, la industria química genera una gran cantidad de compuestos difíciles de degradar y/o tóxicos. Entre dichos compuestos se encuentra una gran cantidad de derivados de hidrocarburos y metales pesados procedentes de los catalizadores.

Los principales grupos que comprenden a los contaminantes tóxicos son: Plaguicidas, metales pesados, compuestos bifenílicos, alifáticos, halogenados, ésteres, ésteres del ácido ftálico, aromáticos, monocíclicos, fenoles, aromáticos, nitrosaminas y otros compuestos; a continuación se presentan características de tratabilidad más importantes.

a) Tratabilidad de plaguicidas.

La contaminación del agua por plaguicidas ocurre por la descarga de ríos y lagunas de residuos industriales y domésticos, así como los sobresalientes y agua de lavado de equipos, aplicación directa de plaguicidas al agua (larvicidas), el arrastre de plaguicidas por la lluvia hacia los cauces y la aplicación de área cercana a ríos y lagos.

En la actualidad, los plaguicidas organoclorados están siendo paulatinamente sustituidos por compuestos organofosforados, los cuales son menos persistentes en el ambiente y no se acumulan en los organismos, aunque su toxicidad es mayor.

La persistencia de los plaguicidas en agua dependen de un gran número de factores, solo algunos de ellos se pueden cuantificar o cualificar y estos solamente para algunos plaguicidas. Aquellos plaguicidas que persisten en el suelo, también persisten en el agua o en los sedimentos, los cuales se mezclan con la capa de agua en mayor o menor grado. La mayor persistencia de los plaguicidas es altamente dependiente de la solubilidad.

Los procesos de tratamiento de agua para remoción de plaguicidas, involucra en general operaciones como coagulación, sedimentación y filtración, removiendo de esta forma del 80 al 90% de DDT en agua conteniendo de 0.1 a 10 ppm.. La combinación de filtros de arena y coagulación remueve casi el 100% del DDT.

En forma cuantitativa, solo los compuestos relacionados al DDT fueron completamente removidos por tratamiento químico siendo el carbón activo el compuesto más efectivo, sin embargo, después de un uso prolongado del carbón, disminuye la eficiencia.

b) Tratabilidad de metales pesados.

Los organismos vivos no solo requieren compuestos orgánicos tales como carbohidratos, lípidos, aminoácidos y vitaminas, sino que también requieren cantidades de potasio, magnesio, manganeso, cobre, cobalto, zinc, calcio, selenio, y hierro. Un importante papel de estos elementos es el de ayudar en las reacciones catalíticas en vivo, como un resultado de su habilidad para formar enlaces covalentes coordinados.

Existen, sin embargo, otros elementos de transición que teniendo características similares, pueden interactuar con tejidos biológicos, ocasionando una secuela de toxicidad cuando alcanzan ciertas concentraciones.

Estos elementos son comúnmente llamados metales pesados, debido a que son metales o metaloides que tienen pesos atómicos más altos que los elementos esenciales.

El origen de estos elementos en el ambiente puede ser debido a fuentes naturales, o bien debido a efluentes o emisiones industriales que son las que en realidad más preocupan.

Las tecnologías de tratamiento y remoción de metales pesados pueden ser generales o específicos, es decir, existen procesos que pueden ser aplicados para la remoción de muchos de los metales y otros que son específicos para cierto tipo de ellos.

Cualquiera que sea el caso, la remoción de metales pesados requiere trenes de tratamiento y de acuerdo a la calidad, origen del efluente, concentraciones de metales, solubilidad, etc., los trenes más comunes son:

- Reducción química
- Precipitación química
- Coagulación/ floculación
- sedimentación
- Filtración
- Absorción

La reducción química ha sido usada para reducir el cromo hexavalente a cromo trivalente, el mercurio iónico a mercurio metálico, para la precipitación del plomo y para recuperar plata.

La precipitación química se ha usado para la remoción de los siguientes metales pesados: Aluminio, antimonio, arsénico, berilio, cadmio, cobalto, hierro, plomo, magnesio, mercurio, molibdeno, estaño, zinc y plata. Lo anterior ha permitido su aplicación en la industria química inorgánica y la farmacéutica.

c) Tratabilidad de los compuestos fenólicos.

El fenol y compuestos relacionados son considerados como compuestos tóxicos prioritarios, y en consecuencia, mucha atención ha sido puesta para la depuración de las aguas de desecho que los contienen.

Para comenzar, los tratamientos mecánicos o por coagulación no tienen efecto para la remoción de los compuestos fenólicos. Los lodos activados son el proceso por el que comúnmente se depuran las aguas contaminadas con compuestos fenólicos. No obstante, y muy recientemente, los investigadores han vuelto la mirada hacia los sistemas de tratamiento que utilizan los sistemas anaerobios para la remoción de los fenoles. Debido a que algunos compuestos fenólicos son vertidos, ya sea en forma accidental o deliberadamente, a las aguas superficiales, muchos trabajos de investigación se han enfocado hacia esa dirección, para caracterizar los mecanismos de biodegradación de los compuestos fenólicos en ese medio.

El fenol y compuestos relacionados, pese a su toxicidad, son de los compuestos que más han sido utilizados para la investigación de los fenómenos ocurridos durante la biodegradación.

Los procesos de tratamiento biológico que utilizan la vía aerobia para la remoción de los compuestos fenólicos han sido ampliamente estudiados y reportados. Estos métodos reducen apreciablemente la demanda bioquímica de oxígeno (DBO), carbón orgánico total (COT) y por supuesto, a los fenoles. Si embargo, las aguas de desecho relacionadas con los compuestos fenólicos normalmente contienen además de sus constituyentes una gran variedad de compuestos orgánicos tóxicos. Se ha observado la pobre remoción de las aminas aromáticas, tiofenos e hidrocarburos policíclicos cuando se utilizan procedimientos aeróbicos. Por si eso fuera poco el tiocianuro, cianuro y amoniaco, han sido considerados como inhibidores en los sistemas de lodos activados para la remoción del fenol.

Hoy la tendencia es intensificar la depuración, reemplazando los reactores de células inmobilizadas. En los nuevos reactores, las células se fijan sobre una capa gruesa de un soporte granular resistente a la abrasión. Se trata de un sólido, bien de origen mineral, como la arcilla expandida o las cenizas aglomeradas, bien de origen orgánico, como el carbón orgánico granular. El agua contaminada circula a través de la capa. Las bacterias están anidadas en las cavidades del soporte, preferentemente en los poros que tienen un diámetro comprendido entre uno y cinco veces su tamaño. En cuanto a los soportes, son fijos (lechos fijos), o bien en movimiento (lechos fluidizados). Esta segunda configuración favorece el contacto entre las células depositadas y los contaminantes.

A continuación se presentan algunas ventajas de los reactores anaeróbicos empleados con carbón activado para el tratamiento de agua de desechos relacionadas con el fenol son:

1. La velocidad de producción del lodo es baja y atribuida a la degradación anaeróbica de la materia. Esto es cierto sobre todo si se compara con los procesos aeróbicos.
2. Los sistemas de tratamiento aeróbico con crecimiento suspendido, tienden a desestabilizarse cuando se presentan las sobrecargas transitorias de los compuestos fenólicos. En el caso del carbón activado granular, este asimila tales sobrecargas y, consecuentemente, estabiliza el proceso durante el tratamiento de aguas de desecho que se caracterizan por poseer una concentración variada.
3. Los reactores anaeróbicos pueden producir un excedente de energía durante el proceso, mientras que un lodo activado en general, y uno de aereación extendida en particular, requieren de una cantidad de energía para poder funcionar

d) Tratabilidad de algunos compuestos tóxicos específicos

En forma general, los métodos de tratamiento de las aguas residuales que contienen compuestos tóxicos se pueden resumir en lo siguiente:

1. Tratamiento biológico.
2. Adsorción con carbón activado.
3. Tratamiento biológico con adsorción
4. Oxidación con ozono.

En forma particular para cada grupo de compuestos se tiene:

- **Compuestos aromáticos.**
Adsorción con carbón activado.
Adsorción con resinas
- **Compuestos alifáticos halogenados.**
Adsorción con carbón activado.
Adsorción con resinas
- **Eteres:**
Tratamiento biológico.
- **Fenoles:**
Adsorción con resinas.
Adsorción con carbón activado.
Tratamiento biológico.
Extracción líquido - líquido.
- **Compuestos aromáticos:**
Tratamiento biológico.
Adsorción con carbón activado.
- **Acronitrilos:**
Tratamiento biológico.
- **Metales pesados:**
Coagulación - floculación.
Adsorción con resinas.

De los métodos que más aplicación tienen en la remoción de contaminantes tóxicos prioritarios, es la adsorción con carbón activado granular combinado con lodos activados, este es el método que mayor cantidad de compuestos remueve, eliminando no solo la DBO sino también un alto porcentaje de DQO y compuestos tóxicos.

Las resinas poliméricas y sintéticas han sido encontradas muy eficientes para remover compuestos como:

- Fenoles
- Aromáticos
- Plaguicidas
- Alifáticos
- Alifáticos halogenados
- aromático policíclicos.

La oxidación química es otro medio que ha sido empleado para la remoción de tóxicos prioritarios, en particular por medio del uso de ferrato de potasio.

En el caso de los compuestos halogenados, se ha empleado los siguientes tratamientos:

- Decoloración
- Adsorción con carbón activado
- Tratamiento biológico
- Ozonación
- Extracción

En resumen la tabla 10 nos muestra las operaciones, métodos y procesos más comunes para el tratamiento de aguas residuales.

Tabla 10. Operaciones y procesos con que se remueven la mayoría de los contaminantes presentes en las aguas residuales.

CONTAMINANTE	PROCESO O TRATAMIENTO APLICABLE
SÓLIDOS SUSPENDIDOS	SEDIMENTACION CRIBADO Y DESMENUZAMIENTO FILTRACIÓN FLOTACIÓN ADICIÓN DE QUÍMICOS COAGULACIÓN/SEDIMENTACION TRATAMIENTO EN TIERRA
ORGÁNICOS BIODEGRADABLES	LODOS ACTIVADOS FILTROS ROCIADORES CONTACTORES BIOLÓGICOS SISTEMAS LAGUNARES FILTRACIÓN SISTEMAS FÍSICO - QUÍMICOS TRATAMIENTO EN TIERRA
PATÓGENOS	CLORACION HIPOCLORACION OZONACION TRATAMIENTO EN TIERRA SISTEMAS LAGUNARES
NUTRIENTES NITRÓGENO	NITRIFICACIÓN / DESNITRIFICACION ARRASTRE DE AMONIAO INTERCAMBIO IONICO CLORACION A PUNTO DE QUIEBRE TRATAMIENTO EN TIERRA
FÓSFORO	ADICIÓN DE SALES METÁLICAS COAGULACIÓN CON CAL REMOCIÓN BIOQUÍMICA TRATAMIENTO EN TIERRA
ORGÁNICOS REFRACTARIOS	ADSORCIÓN CON CARBÓN OZONACION TRATAMIENTO EN TIERRA
METALES PESADOS	PRECIPITACIÓN QUÍMICA INTERCAMBIO IONICO TRATAMIENTO EN TIERRA
SÓLIDOS DISUELTOS INORGÁNICOS	INTERCAMBIO IONICO OSMOSIS INVERSA ELECTRODIALISIS

CAPITULO 4

PRINCIPALES DESECHOS PRODUCIDOS POR LA INDUSTRIA

1. INDUSTRIA QUÍMICA DE PROCESO

a) Industria química básica

Los principales desechos producidos por este giro en forma resumida son:

- i) Fluorapatita
- ii) Ácido sulfúrico
- iii) Sulfato de calcio
- iv) Sílice
- v) Coque
- vi) Fósforo
- vii) Pentóxido de fósforo
- viii) Ácido fluorhídrico
- ix) Ácido fosfórico
- x) Flúor
- xi) Nitrato de sodio
- xii) Amoníaco
- xiii) Ácido nítrico
- xiv) NO_2 y NO
- xv) Azufre
- xvi) Bióxido de azufre y trióxido de azufre
- xvii) Pentóxido de vanadio
- xviii) Ácido clorhídrico
- xix) Mercurio
- xx) Cloro y Sodio
- xxi) Hidróxido de sodio
- xxii) Carbonato de sodio
- xxiii) Cloruro de sodio
- xxiv) Sulfato de sodio
- xxv) Trióxido de cromo
- xxvi) Ácido crómico

Como se aprecia de estos datos, son variados los aspectos que se tienen en el renglón contaminación:

- a) Presencia de ácidos o bases que pueden ocasionar problemas de pH y corrosión.
- b) Sales y compuestos relacionados, que pueden ocasionar problemas de conductancia específica y de sólidos totales y sólidos suspendidos totales.
- c) Descarga a alta temperatura.
- d) Presencia de metales pesados como cromo y mercurio.
- e) Descarga de materia orgánica proveniente de baños, comedor y servicios.

b) Industria petroquímica básica

La producción de este tipo de compuestos es superior a 15 millones de toneladas, lo que implica alrededor de 1 millón y medio de toneladas de residuos.

Los principales desechos producidos por este giro son:

- i) Hidrógeno
- ii) Nitrógeno
- iii) CO
- iv) CO_2
- v) Cobre
- vi) Metanol
- vii) Níquel
- viii) Amoniaco
- ix) Acetonitrilo
- x) Butano
- xi) Butilenos
- xii) n-metilpiridona
- xiii) Azufre
- xiv) Dimetilacetoamida
- xv) Metano
- xvi) Etano
- xvii) Propano
- xviii) Etileno
- xix) Isobutanol
- xx) Gasolinas
- xxi) Aceites
- xxii) Xilenos
- xxiii) Nafta

De dichos datos se aprecia que los principales aspectos cualitativos relacionados con la contaminación del agua son:

- a) Presencia de grandes cantidades de grasas y aceites.
- b) Materia orgánica insoluble.
- c) Compuestos tóxicos.
- d) Metales pesados.
- e) Descargas ácidas.

c) Industria petroquímica secundaria

La producción de los petroquímicos secundarios es de 1 355 000 toneladas, lo que implica una producción de residuos de aproximadamente 135 000 toneladas.

Los desechos producidos implica un mínimo de 300, cuyas características generales son:

- i) Presencia de grandes cantidades de grasas y aceites.
- ii) Materia orgánica soluble e insoluble.
- iii) Compuestos tóxicos.
- iv) Metales pesados.
- v) Lavados ácidos y/o alcalinos.

2. INDUSTRIA QUÍMICA DE PRODUCTO

a) Industria de las resinas sintéticas

La producción de este giro industrial es de poco más de 1 millón de toneladas al año, lo que implica una producción de desechos cercana a las 100 000 toneladas, los cuales presentan las siguientes características generales:

- i) Materia orgánica soluble
- ii) Materia orgánica insoluble
- iii) Bases
- iv) Ácidos
- v) Fenoles

b) Industria del hule sintético y hulequímicos.

La producción de este giro industrial es de alrededor de 181 000 toneladas, lo que implica una generación de desechos cercana a 18 000 toneladas, teniendo los residuos producidos las siguientes características:

- i) Materia orgánica insoluble
- ii) Materia orgánica soluble
- iii) Ácidos
- iv) Bases
- v) Tóxicos orgánicos
- vi) Metales pesados

c) Industria de los adhesivos.

La producción de los adhesivos es cercana a 55 000 toneladas, lo que implica una producción de desechos de aproximadamente 5000 toneladas, los cuales presentan las siguientes características:

- i) Materia orgánica soluble e insoluble
- ii) Ácidos
- iii) Sólidos totales
- iv) Sólidos suspendidos totales.

d) **Industria de los plaguicidas**

La producción de plaguicidas es cerca a 9000 ton. al año, lo que implica una producción aproximada de 900 toneladas de desechos, cuyas características generales son:

- i) Materia orgánica soluble
- ii) Tóxicos orgánicos
- iii) Plaguicidas

e) **Industria de los fertilizantes**

La producción de los fertilizantes es de alrededor de 1.5 millones de toneladas, lo que implica una generación de desechos de alrededor de 15000 toneladas, los principales presentan las siguientes características:

- i) Presencia de ácidos.
- ii) Gran cantidad de sales.
- iii) Materia orgánica.

f) **Industria de los jabones y detergentes.**

La producción de jabones y detergentes es del orden de 900 000 toneladas anuales, lo que implica una producción de desechos de 90000 toneladas, las cuales muestran las siguientes características:

- i) Uso de ácidos
- ii) Uso de bases
- iii) Materia orgánica
- iv) Sales
- v) Tóxicos
- vi) Detergentes

g) **Industria farmacoquímica.**

Las características principales de estos desechos son:

- i) Ácidos
- ii) Bases
- iii) Materia orgánica
- iv) Disolventes orgánicos

h) **Industria farmacéutica.**

Las principales características de los posibles contaminantes de esta industria son:

- i) Materia orgánica
- ii) Grasas y aceites

iii) Sales.

i) **Industria de la curtiduría**

Las principales características de los posibles contaminantes de esta industria son:

- i) **Materia orgánica**
- ii) **Grasas y aceites**
- iii) **Sales**
- iv) **Ácidos**
- v) **Bases**
- vi) **Detergentes**
- vii) **Cromo.**

3. ESTABLECIMIENTOS QUE PRESTEN ATENCION MEDICA.

a) **Clinicas, Hospitales, Laboratorios clínicos, Laboratorios de producción de agentes biológicos, de enseñanza e investigación y centros antirrábicos**

Los principales desechos producidos por los citados anteriormente son:

i) **La sangre**

- a) **Productos derivados de la sangre incluyendo plasma, suero y paquete globular**
- b) **Materiales con sangre o sus derivados, aun cuando se hayan secado, así como los recipientes que los contuvieron**

ii) **Los cultivos y cepas almacenadas de agentes infecciosos**

- a) **Los cultivos generados en los procedimientos de diagnóstico e investigación, así como los generados en la producción de agentes biológicos.**
- b) **Los instrumentos y aparatos para transferir, inocular y mezclar cultivos**

iii) **Los Patológicos**

- a) **Los tejidos, organos, etc.**
- b) **Los cadáveres de especies animales**

iv) **Los residuos no anatómicos derivados de la atención a pacientes y laboratorios**

- a) **Equipo y material**
- b) **Dispositivos desechables**

- v) Objetos punzocortantes usados o sin usar

PROPUESTA DE TRATAMIENTO DE EFLUENTES PRODUCIDOS POR LA INDUSTRIA.

Habiendo revisado de manera general la información relativa a la biodegradabilidad, tratabilidad y características de los efluentes que la industria en sus diferentes facetas produce; dicha información conduce a la generación de trenes de tratamiento de efluentes, por medio de los cuales la industria, desde un punto de vista teórico, podría resolver sus problemas de efluentes.

Algo importante que debe tener presente es que los trenes de tratamiento aquí generados deben ser respaldados por pruebas de tratabilidad a nivel laboratorio, con el propósito de afinarlos lo más posible, para obtener un diseño adecuado respecto a las características del efluente.

Es importante señalar que los trenes de tratamiento que se presentan a continuación no se presenta información específica, ya que para la generación de esto se requiere de estudios de tratabilidad, económicos, etc. y dichos estudios no se presentan completamente en este trabajo.

Dichos trenes de tratamiento están incluidos en el sistema experto proponiendo un tren de tratamiento de las diferentes industrias presentadas a continuación para dar orientación al usuario del tipo de tratamiento, cabe mencionar que se necesitan estudios más avanzados de los que el sistema hace para tomar la decisión totalmente correcta de proceso de tratamiento a seguir.

INDUSTRIA QUÍMICA DE PROCESO

a) Industria química básica

En este giro industrial se producen aproximadamente 13 productos de desecho principales, siendo principalmente ácidos bases y sales inorgánicas, así como algunos materiales tóxicos.

En la caracterización de esta industria se observa los parámetros mencionados, así como DBO y DQO, sólidos disueltos y algunos metales pesados, por lo que se propone el tren de tratamiento mostrado en la siguiente figura 10.

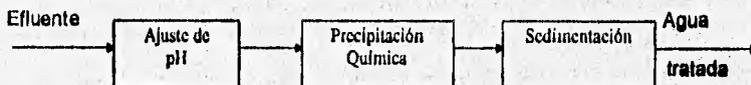


Figura 10.

En este tratamiento se propone un ajuste de pH con el propósito de evitar condiciones de trabajo que puedan dañar el equipo y hacer que disminuya la eficiencia en los pasos siguientes,

La razón de proponer la precipitación química es para remover la materia orgánica, sólidos disueltos y metales pesados.

El tren de tratamiento descarta un tratamiento biológico debido a que, si bien podría remover de manera eficiente metales y otros compuestos tóxicos, lo que genera operaciones adicionales. El tren de tratamiento está provisto de operaciones físicas y químicas para maximizar la eficiencia del tratamiento.

b) Petroquímica básica

Este giro industrial produce los compuestos por parte de PEMEX. Estos productos producen aproximadamente 69 desechos.

Estos desechos representan la presencia de cargas orgánicas altas, grasas, aceites y sustancias tóxicas por lo cual se propone el tren de tratamiento de la figura 11.

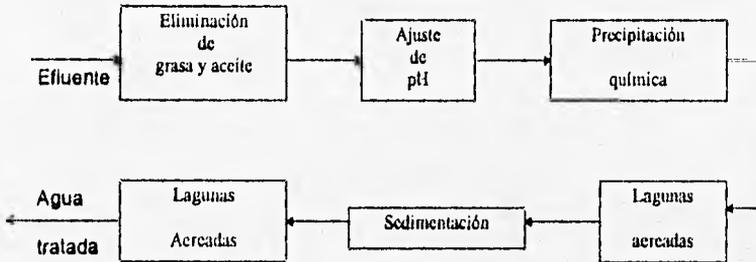


Figura 11.

El tren de empieza con la eliminación de grasas y aceites para evitar operaciones posteriores además da lugar a la recuperación de algunos productos.

La siguiente operación es un ajuste de pH, debido a que en el sistema se requiere de lavados ácidos o alcalinos de los productos de refinación.

La caracterización de este tipo de efluentes, es que hay la presencia de sustancias tóxicas y de materia orgánica en gran cantidad. Al igual que en el caso anterior la precipitación química elimina gran cantidad de sustancias tóxicas, lo que permite un tratamiento biológico para reducir la carga orgánica.

En este tratamiento se puede ver una combinación de tratamiento físico - químico - biológico.

c) Petroquímica secundaria

Esta giro industrial que fabrica un gran numero de productos, que en consecuencia, produce efluentes mucho más variados y complejos (aproximadamente 575 residuos). Dadas las características se propone el tren de tratamiento en la figura 12

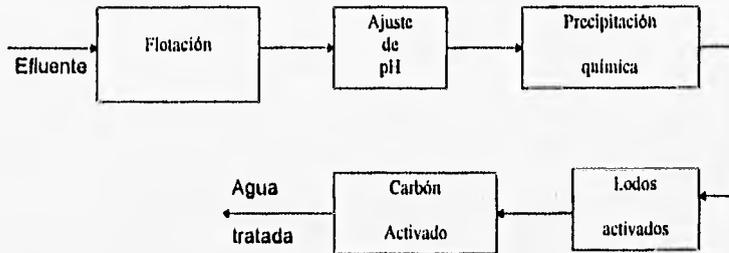


Figura 12.

En este caso se propone un ajuste de pH por condiciones similares a los casos anteriores, así como la precipitación química para adecuar el efluente para el tratamiento biológico a base de lodos activados. Se propone este sistema porque se requiere alta eficiencia de remoción y una alta producción de agua residual.

Después de este sistema se propone un sistema a base de carbón activado, el cual tiene por objeto remover compuestos tóxicos y color del agua.

Para este tratamiento se aplican los químicos y biológicos.

INDUSTRIA QUÍMICA DE PRODUCTO

a) Resinas sintéticas

La producción de resinas sintéticas implica la producción de unos 86 desechos que, en general, representan problemas de materia orgánica, sólidos suspendidos y tóxicos orgánicos, razón por la cual se propone el tren de tratamiento mostrado en la figura 13

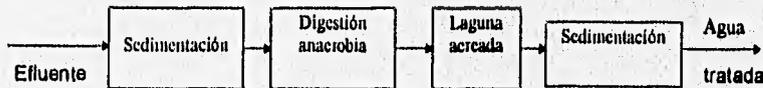


Figura 13

Dada la elevada carga orgánica de los efluentes, se propone de forma inicial una sedimentación que elimine los contaminantes suspendidos.

Enseguida se propone una combinación de digestión anaerobia y laguna aereada. La digestión anaerobia logra un abastecimiento importante de la carga orgánica, para

después dar un pulimiento al efluente por medio de la laguna aerada lo que producirá agua de una alta calidad.

Para este giro industrial el tren de tratamiento requiere de operaciones físicas y biológicas.

b) Hule sintético y hulequímicos

Este giro industrial produce aproximadamente 70 desechos, los cuales representan problemas de ajuste de pH, grasas, aceites y carga orgánica.

Por las características descritas anteriormente se propone el siguiente tren de tratamiento en la figura 14.

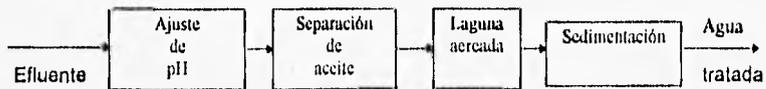


Figura 14.

Para este caso se propone el ajuste de pH para proteger tanto al equipo como al sistema biológico.

Enseguida se lleva a cabo una separación de grasas y aceites, para después pasar a un tratamiento biológico que en este caso se trata de lagunas aeradas, para abatir la carga orgánica y finalmente se lleva a cabo una operación de sedimentación.

También en este caso los tratamientos empleados en el sistema son físicos y biológicos.

c) Adhesivos

La producción de adhesivos implica una producción cercana a los 40 desechos, los cuales fundamentalmente presentan un problema de materia orgánica, razón por la cual se propone el siguiente tren de tratamiento en la figura 15.

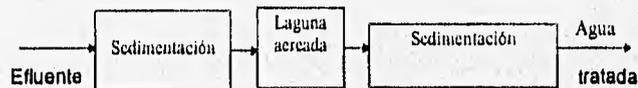


Figura 15.

Dado que el objetivo fundamental es remover la materia orgánica, que es lo que caracteriza los desechos, se propone eliminar la mayor cantidad de materia orgánica mediante una operación de sedimentación, para después pasar a un tratamiento biológico a base de lagunas de aereación, es también un sistema que elimina a los niveles deseados los contaminantes orgánicos presentes.

También en este caso los tratamientos empleados en el sistema son físicos y biológicos.

d) Plaguicidas

La producción de plaguicidas implica una producción de 52 desechos aproximadamente entre los que figuran metales pesados, detergentes y plaguicidas, desechos que generan agua residual con un alto contenido de materia orgánica tóxica, lo que dificulta el uso de un tratamiento biológico, por esta razón se propone el siguiente tren de tratamiento que se puede ver en la figura 16.

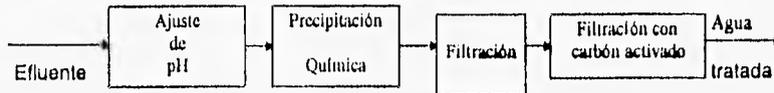


Figura 16

Por las condiciones que presenta el efluente, el objetivo de dicho tren de tratamiento es, en primer lugar, ajustar el pH para evitar problemas posteriores en las demás operaciones dentro del tratamiento. En seguida se propone la precipitación química que es una forma barata y eficiente de eliminar materia orgánica y tóxica.

La filtración que se propone en seguida tiene por objeto eliminar los sólidos suspendidos que hayan quedado después de la precipitación química. Finalmente se emplea un filtro de carbón activado que tiene como función retener las sustancias tóxicas residuales. Aquí los tratamientos empleados son físicos y químicos.

e) Fertilizantes.

En la industria de los fertilizantes surge una producción aproximada de 50 desechos. Aunque es importante señalar que los efluentes de estos procesos contienen concentraciones variables de materias primas y de los productos elaborados, es decir, compuestos nitrogenados y fosfatados, así como algunas impurezas como superfosfatos.

De acuerdo con lo anterior, las aguas residuales generadas en los procesos pueden ser recirculadas por los mismos. Sin embargo, en ocasiones es necesario reconcentrar o realizar un ajuste de pH para que esta pueda ser llevado a cabo.

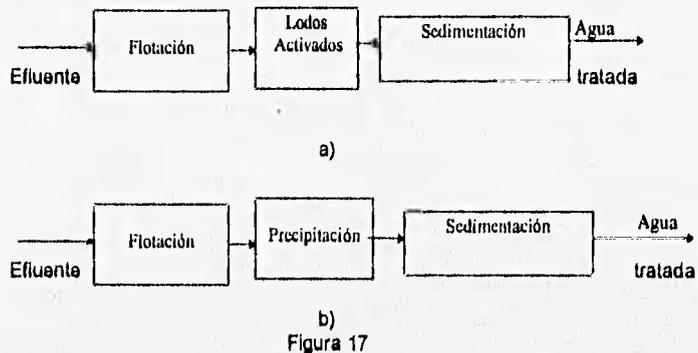
En aquellos casos en las características de las plantas no permite la recirculación, el agua generada puede ser neutralizada, concentrada y vendida como fertilizantes de menor calidad.

Por lo citado en los párrafos anteriores se evita la necesidad de tratar los residuos líquidos generados por este giro industrial.

f) Jabón y detergente

La producción de Jabones produce al rededor de 25 residuos, los cuales son principalmente ácidos grasos y otros compuestos de naturaleza orgánica y biodegradable y los producidos por la elaboración de detergentes, que son compuestos parcialmente biodegradables.

Por lo anterior, como primera estrategia a seguir, se requiere una separación de efluentes que permita el tratamiento de los residuos líquidos de los jabones en forma separada de los residuos de detergentes. Los trenes de tratamiento para unos y otros se muestran en la figura 17.



El tren de tratamiento del inciso a) propuesto para la industria del jabón tiene por objeto a primera instancia eliminar tensoactivos por medio de flotación. Enseguida pasar a un sistema de lodos activados cuyo objeto es el eliminar la materia orgánica con lo que se logra obtener agua de buena calidad.

Para el caso de la industria de los detergentes, se usa de manera similar la flotación como en el caso anterior, sin embargo, en lugar de continuar con un tratamiento biológico el sistema es dirigido hacia la eliminación de la materia orgánica biodegradable y no biodegradable, y para ello se emplea un sistema de precipitación química.

g) Farmoquímica.

En los procesos, los desechos generados por este giro industrial contiene gran cantidad de materia orgánica biodegradable, sólidos totales, sólidos volátiles, nitrógeno, sulfatos y fosfatos, los cuales se encuentran en concentraciones muy altas, lo que hace que sea una de las industrias más contaminantes del país.

Para el tratamiento de estos residuos líquidos se propone el tren de tratamiento de la figura 18.

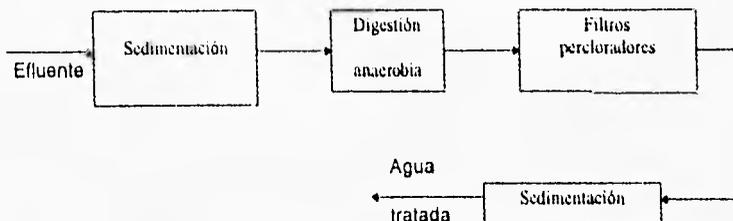


Figura 18.

En esta secuencia de proceso se elimina primero los sólidos sedimentables, posteriormente se disminuye la carga orgánica en un digestor anaerobio y se completa la degradación de esta en un filtro perclorado. Los sólidos que llegaron a permanecer son eliminados mediante una sedimentación.

h) Alimentos.

En el caso de envases de frutas y legumbres, así como en el de la producción de derivados lácteos, el agua residual proviene del lavado de las materias primas, el equipo y de los servicios. De aquí que los principales problemas son los generados por la presencia de materia orgánica, sólidos disueltos y suspendidos, grasas y aceites y la producción de derivados lácteos.

Para eliminar estos residuos se requiere establecer el tren de tratamiento que se ve en la figura 19.



Figura 19.

Este tren de tratamiento consiste en un sistema convencional para la degradación de materia orgánica mediante un sistema de tratamiento de lodos activados y la separación de sólidos generados mediante una operación de sedimentación.

l) Curtiduría

Los parámetros que son importantes de controlar en esta industria son cromo, grasas y aceites, sólidos suspendidos y sólidos totales. Por lo anterior se puede emplear el tren de tratamiento mostrado en la figura 20.

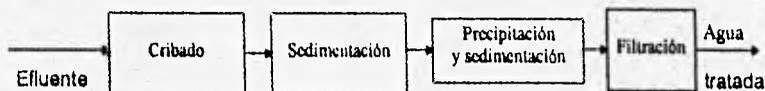


Figura 20

En este caso el cribado eliminara del agua las partículas gruesas como pesadas de carne, uñas, etc. La sedimentación eliminara la mayor cantidad del total de los sólidos sedimentables, los cuales representan un alto porcentaje de los sólidos totales.

La precipitación consiste en una transformación de sales solubles en insolubles, lo que permitirá el uso de una operación de sedimentación.

Finalmente se lleva a cabo una filtración para eliminar los sólidos que persisten hasta esta etapa.

ESTABLECIMIENTOS QUE PRESTEN ATENCION MEDICA.

a) Clínicas, Hospitales, Laboratorios clínicos, Laboratorios de producción de agentes biológicos, de enseñanza e investigación y centros antirrábicos

Los parámetros principales a controlar en este tipo de efluentes son principalmente desechos biológicos-infecciosos, equipo y material de desecho. Para controlar los residuos primero se propone disponer de todos los desechos sólidos de mayor tamaño para tal efecto se pueden envasar y etiquetar para su identificación, almacenándose en un lugar destinado para después transportarse y tratarse debidamente.

Los residuos deberán tratarse por medios físicos y químicos como se ve en la figura 21

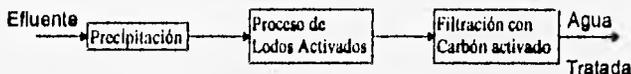


Figura 21

La precipitación permitira eliminar algunos compuestos orgánicos solubles, acompañado de un tratamiento de lodos activados para degradar la mayor parte de ña materia orgánica y por último una filtración con carbón activo para daría una mejor calidad al agua tratada.

MATANZA DE ANIMALES Y EMPACADOS CARNICOS

Los parámetros principales a controlar en este tipo de industrias son pH, DBO, Sólidos sedimentables, Sólidos suspendidos totales, grasas y aceites y nitrógeno amoniacal.

Esta industria desecha muchos organismos patógenos, además de sangre, cabellos, grasa, etc., por lo que se propone el siguiente tren de tratamiento.

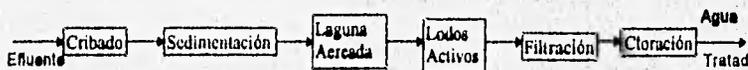


Figura 22

El cribado remueve la mayor parte de los sólidos gruesos, la sedimentación ayuda a la remoción de los sólidos sedimentables, la laguna aerada remueve gran cantidad de desechos orgánicos, grasas y aceites, y los lodos activos terminan con los desechos orgánicos y el nitrógeno amoniacal, la filtración quita todo sólido que llegue a prevalecer hasta esta etapa del proceso, y por último la cloración, que mata cualquier microorganismo nocivo, obteniendo un agua tratada de alta calidad.

NORMAS MEXICANAS PARA EL CONTROL DE EFLUENTES

Los criterios generales para el planteamiento de las Normas Técnicas Ecológicas que regula las descargas de agua residual que la industria química mexicana genera, son plantear los límites máximos permisibles de los contaminantes más importantes y, por otro lado, dejar para las condiciones particulares de descarga a los contaminantes específicos de cada área industrial.

La tabla 11 muestra los límites máximos permisibles en las aguas residuales provenientes de la industria, actividades agroindustriales, de servicios y el tratamiento de aguas residuales a los sistemas de drenaje y alcantarillado urbano o municipal. Las descargas de las aguas residuales deben cumplir con las especificaciones que se indican en la tabla 11.

Tabla 11. NORMA OFICIAL MEXICANA NOM-CCA-031-ECOL-1993, QUE ESTABLECE LOS LÍMITES MÁXIMOS PERMISIBLES DE CONTAMINANTES EN LAS DESCARGAS DE LAS AGUAS RESIDUALES PROVENIENTES DE LA INDUSTRIA, ACTIVIDADES AGROINDUSTRIALES, DE SERVICIOS Y EL TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES A LOS SISTEMAS DE DRENAJE Y ALCANTARILLADO URBANO O MUNICIPAL.

PARÁMETROS	LÍMITES MÁXIMOS PERMISIBLES	
	PROMEDIO DIARIO	INSTANTÁNEO
Temperatura (C)	35 - 40	40
pH (adimensional)	6 a 9	6 a 9
Sólidos sedimentables (ml/L)	6	10
Grasas y aceites (mg/L)	60	100
Conductividad eléctrica (µmhos/cm)	5 000	6 000
Aluminio (mg/L)	10	20
Arsénico (mg/L)	0.5	1.0
Cadmio (mg/L)	0.5	1.0
Cianuros (mg/L)	1.0	2.0
Cobre (mg/L)	5	10
Cromo hexavalente (mg/L)	0.5	1.0
Cromo total (mg/L)	2.5	5.0
Fluoruros (mg/L)	3	6
Mercurio (mg/L)	0.01	0.02
Níquel (mg/L)	4	8
Plata (mg/L)	1.0	2.0
Plomo (mg/L)	1.0	2.0
Zinc (mg/L)	6	12
Fenoles (mg/L)	5	10
Sustancias activas al azul de metileno (mg/L)	30	60

Para determinar que parámetros normar, se tomaron en cuenta los siguientes aspectos:

1. Tipo y número de posibles contaminantes
2. Caracterización de las aguas residuales de la industria química.
3. Tratamiento de las aguas residuales
4. Dilución
5. Toxicidad

En general los dos primeros aspectos mencionados ayudarán a generar la información cualitativa de las normas, y los tres últimos aspectos la información cuantitativa.

Para determinar el número de normas generadas, se siguió como criterio la llamada "clasificación funcional de la industria química".

Por lo anterior, este apartado de normas abarca los 13 giros más importantes de la industria química.

1. INDUSTRIA QUÍMICA DE PROCESO

- a) Industria química básica.- Considerando una eficiencia de tratamiento de agua residual del 90% y una producción de 1 a 2 de agua residual industrial a doméstica, y basándose también en la norma NOM-CCA-003-ECOL/1993, se tienen los límites máximos permisibles mostrados en la tabla 12.

Parámetro	Valor
pH	8 - 9
Conductancia específica	No mayor de 4000 microsiemens
Sólidos totales	No mayor de 5000 mg/l
DBO ₅	250 mg/l
DQO	500 mg/l

Tabla 12. Límites máximos permisibles para las aguas residuales de la industria química inorgánica básica

- b) Industria petroquímica básica.- Tomando promedio y haciendo la consideración de una eficiencia del 90% en tratamiento y una dilución de 1 a 2 por la presencia de las aguas residuales domésticas, y basándose también en la norma NOM-CCA-003-ECOL/1993, se tienen los límites máximos mostrados en la tabla 13.

Parámetro	Valor
Temperatura	35 C
Grasas y aceites	40 mg/l
Fenoles	5 mg/l
Cromo	0.01 mg/l
pH	8 - 9
Conductancia específica	No mayor de 4000 microsiemens/cm
Sólidos totales	No mayor de 5000 mg/l
DBO ₅	50 mg/l
DQO	750 mg/l

Tabla 13 límites máximos permisibles para las aguas residuales de la industria petroquímica básica.

- c) Industria petroquímica secundaria.- Tomando promedio y haciendo la consideración de una eficiencia del 90% en tratamiento y una dilución de 1 a 2 por la presencia de las aguas residuales domésticas, y basándose también en la norma NOM-CCA-003-ECOL/1993, se tienen los límites máximos mostrados en la tabla 14.

Parámetro	Valor
Temperatura	35 C
Grasas y aceites	70 mg/l
Arsénico	0.25 mg/l
Tolueno	1.0 mg/l
Benceno	0.5 mg/l
Cianuros	0.15 mg/l
Fenoles	1.5 mg/l
pH	8 - 9
Conductancia específica	No mayor de 4000 microsiemens/cm
Sólidos totales	No mayor de 5000 mg/l
DBO ₅	350 mg/l
DQO	500 mg/l

Tabla 14 límites máximos permisibles para las aguas residuales de la industria petroquímica secundaria

2. INDUSTRIA QUÍMICA DE PRODUCTO

- a) Industria de las resinas sintéticas.- Con los mismos criterios marcados con anterioridad, y basándose también en la norma NOM-CCA-005-ECOL/1993, se pueden generar los requeridos para los límites máximos mostrados en la tabla 15.

ESTA TESIS NO DEBE
SALIR DE LA BIBLIOTECA

Parámetro	Valor
Temperatura	35 C
Sólidos suspendidos totales SST	70 mg/l
Fenoles	0.5 mg/l
Metanol	75 mg/l
pH	8 - 9
Conductancia específica	No mayor de 4000 microsiemens/cm
Sólidos Sedimentables	10 mg/l
Formaldehído	35 mg/l
DBO ₅	100 mg/l
Grasas y Aceites	150mg/l
DQO	200 mg/l

Tabla 15 límites máximos permisibles para las aguas residuales de la industria de las resinas sintéticas.

- b) Industria del hule sintético y hulequímicos.- Con los mismos criterios marcados con anterioridad, y basandose también en la norma NOM-CCA-012-ECOL/1993, se pueden generar los requeridos para los límites máximos mostrados en la tabla 16.

Parámetro	Valor
Temperatura	35 C
Sólidos suspendidos totales SST	60 mg/l
Grasas y aceites	10 mg/l
pH	8 - 9
Conductancia específica	No mayor de 4000 microsiemens/cm
Sólidos totales	No mayor de 2000 mg/l
DBO ₅	50 mg/l
DQO	180 mg/l

Tabla 16 límites máximos permisibles para las aguas residuales de la industria de hule y hulequímicos.

- c) Industria de los adhesivos.- Debido a que el único dato que se tiene para este giro industrial es el de la DBO, que fluctúa entre 50 y 500 mg/l, el criterio que se propone para la norma es fijar límites máximos permisibles similares en un agua residual de tipo doméstico, lo que genera valores mostrados en la tabla 17.

Parámetro	Valor
Temperatura	35 C
pH	6 - 9
Conductancia específica	No mayor de 4000 microsiemens/cm
Sólidos totales	No mayor de 1000 mg/l
Nitrógeno total	50 mg/l
Grasas y aceites	1000 mg/l
DBO ₅	25 mg/l
DQO	500 mg/l

Tabla 17 límites máximos permisibles para las aguas residuales de la industria de los adhesivos.

- d) Industria de los plaguicidas.- Con los mismos criterios marcados con anterioridad, se pueden generar los requeridos para los límites máximos mostrados en la tabla 18.

Parámetro	Valor
Temperatura	35 C
Sólidos suspendidos totales SST	1250 mg/l
Fenoles	10 mg/l
Paration	1 mg/l
pH	6 - 9
Conductancia específica	No mayor de 4000 microsiemens/cm
Sólidos totales	No mayor de 2500 mg/l
Acido clorofenoxiacético	5 mg/l
Grasas y aceites	100 mg/l
DBO ₅	250 mg/l
DQO	10 mg/l

Tabla 18 límites máximos permisibles para las aguas residuales de la industria de los plaguicidas.

- e) Industria de los fertilizantes.- este tipo de industria se recomienda seguir el mismo criterio, y basándose también en la norma NOM-CCA-004-ECOL/1993, los límites máximos son mostrados en la tabla 19.

Parámetro	Valor
Temperatura	35 C
Grasas y aceites	100 mg/l
pH	8 - 9
Conductancia específica	No mayor de 4000 microsiemens/cm
Sólidos Suspendidos totales	60 mg/l
Nitrógeno	40 mg/l
Fluoruros	10 mg/l
Fósforo total	30 mg/l
DBO ₅	60 mg/l
DQO	100 mg/l

Tabla 19 límites máximos permisibles para las aguas residuales de la industria de los fertilizantes.

- f) Industria de los colorantes y pigmentos.- Con los mismos criterios marcados con anterioridad, se pueden generar los requeridos para los límites máximos mostrados en la tabla 20.

Parámetro	Valor
Temperatura	35 C
Sólidos suspendidos totales SST	250 mg/l
pH	8 - 9
Conductancia específica	No mayor de 4000 microsiemens/cm
Sólidos totales	No mayor de 750 mg/l
DBO ₅	30 mg/l
DQO	125 mg/l

Tabla 20 límites máximos permisibles para las aguas residuales de la industria de los colorantes y pigmentos.

- g) Industria de los jabones y detergentes.- Con los mismos criterios marcados con anterioridad, se pueden generar los requeridos para los límites máximos mostrados en la tabla 21.

Parámetro	Valor
Temperatura	35 C
Sólidos suspendidos totales SST	30 mg/l
Sólidos AAM	2.5 mg/l
pH	8 - 9
Conductancia específica	No mayor de 4000 microsiemens/cm
Sólidos totales	No mayor de 1350 mg/l
DBO ₅	500 mg/l
DQO	1500 mg/l

Tabla 21 límites máximos permisibles para las aguas residuales de la industria de los jabones y detergentes.

- h) **Industria Farmacoquímica**- Con los mismos criterios marcados con anterioridad, se pueden generar los requeridos para los límites máximos mostrados en la tabla 22.

Parámetro	Valor
Temperatura	35 C
pH	6 - 9
Conductancia específica	No mayor de 4000 microsiemens/cm
Grasas y aceites	100 mg/l
DBO ₅	1250 mg/l
DQO	2500 mg/l

Tabla 22 límites máximos permisibles para las aguas residuales de la industria farmacoquímica.

- i) **Industria farmacéutica**- Con los mismos criterios marcados con anterioridad, se pueden generar los requeridos para los límites máximos mostrados en la tabla 23.

Parámetro	Valor
Temperatura	35 C
pH	6 - 9
Conductancia específica	No mayor de 4000 microsiemens/cm
Sólidos totales	No mayor de 750 mg/l
Grasas y aceites	100 mg/l
DBO ₅	250 mg/l
DQO	500 mg/l

Tabla 23 límites máximos permisibles para las aguas residuales de la industria farmacéutica.

- j) **Industria de la curtiduría**- Con los mismos criterios marcados con anterioridad, y basándose también en la norma NOM-CCA-021-ECOL/1993, se pueden generar los requeridos para los límites máximos mostrados en la tabla 24

Parámetro	Valor
Temperatura	35 C
pH	6 - 9
Sólidos Sedimentables	5 mg/l
Sólidos Suspendidos totales	200 mg/l
Cromo total	1.0 mg/l
Cromo hexavalente	0.1 mg/l
Sulfuros	1.0 mg/l
Grasas y aceites	30 mg/l
DBO ₅	200 mg/l
DQO	2500 mg/l

Tabla 24 límites máximos permisibles para las aguas residuales de la industria de la curtiduría.

- k) Establecimiento que prestan atención médica.- Las descargas de aguas residuales en las redes colectoras, ríos, cuencas, cauces, vasos, aguas marinas y demás depósitos o corrientes de agua de aguas residuales en los suelos o su infiltración en los terrenos provenientes de la Industria de Hospitales, provocan efectos adversos en los ecosistemas, por lo que es necesario fijar los límites máximos permisibles que deberán satisfacer dichas descargas de la norma NOM-CCA-029-ECOL/1993 siguiente:

Parámetro	Valor
Temperatura	35 C
pH	6 - 9
DBO ₅	40 mg/l
DQO	80 mg/l
Sólidos Sedimentables	1.0 mg/l
Sólidos Suspendidos totales	40 mg/l
Grasas y aceites	15 mg/l
Materia flotante	ausente
Coliformes fecales	1000 NMP/100 ml
Cloro libre residual	0.2 mg/l

Tabla 25 límites máximos permisibles para las aguas residuales de establecimientos que prestan atención médica.

- l) Industria de la Matanza de animales y empacados cárnicos.-Las descargas de aguas residuales en las redes colectoras, ríos, cuencas, cauces, vasos, aguas marinas y demás depósitos o corrientes de agua de aguas residuales en los suelos o su infiltración en los terrenos provenientes de la industria de matanza de animales y empacado de cárnicos, provocan efectos adversos en los ecosistemas, por lo que es necesario fijar los límites máximos permisibles que deberán satisfacer dichas descargas de la norma NOM-CCA-022-ECOL/1993 siguiente:

Parámetro	Valor
Temperatura	35 C
pH	8 - 9
DBO ₅	200 mg/l
Sólidos Sedimentables	1.0 mg/l
Sólidos Suspendidos totales	200 mg/l
Grasas y aceites	30 mg/l
Nitrógeno amoniacal	20 mg/l

Tabla 26 límites máximos permisibles para las aguas residuales provenientes de la industria de la matanza de animales y empaçados cármicos.

Tabla 27. Límites máximos permisibles para uso de aguas residuales tratadas en el riego agrícola NTE-CCA-033/93

PARÁMETRO	LÍMITE MÁXIMO PERMISIBLE
pH	8.5 - 8.5
C.E.	2000
Aluminio	0.2
Sb	0.1
As	0.1
B	0.75
Cd	0.01
Cianuro	0.02
Cu	0.2
Cr	0.01
Fe	5
Fluoruros	1
Mn	0.02
Ni	0.05
Pb	0.5
Se	0.02
Zn	2

CAPITULO 5

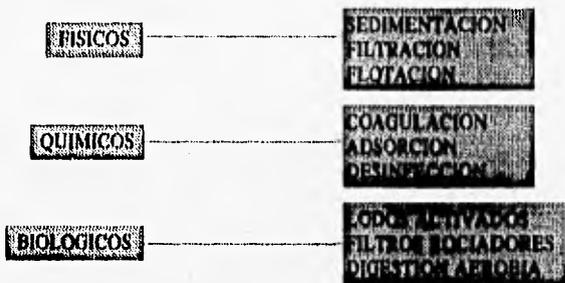
PROCESOS DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES

INTRODUCCIÓN

Para que se logre el reuso del agua residual, se necesita el tratamiento adecuado, de aquí que para su remoción se emplean diversos métodos y sus combinaciones de algunos de ellos. En la figura 23 se muestra una clasificación general de los sistemas de tratamiento de aguas residuales.

Figura 23 Clasificación General de los sistemas de tratamiento de aguas residuales.

A) EN FUNCIÓN DE LA FORMA EN QUE SE REMUEVEN LOS CONTAMINANTES:



B) EN FUNCIÓN DEL CONTAMINANTE REMOVIDO O LA CANTIDAD DESEADA:

PRIMARIO	SÓLIDOS SUSPENDIDOS MATERIAL FLOTANTE	SEDIMENTACIÓN FILTRACIÓN FLOTACIÓN
SECUNDARIO	MATERIA ORGÁNICA SÓLIDOS SUSPENDIDOS	LODOS ACTIVADOS LAGUNAS COAGULACIÓN
TERCIARIO	MATERIAL REFRACTARIO SÓLIDOS DISUELTOS METALES PESADOS	ADSORCIÓN INTERCAMBIO IÓNICO OSMOSIS INVERSA

En esta parte del trabajo se hablará de los tres tipos básicos de tratamiento:

- Físicos (pretratamiento y tratamiento primario).
- Químico y Biológico (tratamiento secundario).
- Físico químico (tratamiento terciario o avanzado).

Para lograr el recurso del agua residual, es necesario que esta resista un tratamiento que adecue su calidad a las normas específicas por el uso al que se destina, requiriéndose la aplicación de una tecnología que asegure la economía y confiabilidad de los sistemas y que tome en consideración el nivel técnico de los operarios, los costos de energía, disponibilidad de terreno y el uso de materiales y equipos propios de la localidad, entre otros factores de importancia.

La tecnología que actualmente se usa en el país en el tratamiento de aguas residuales, proviene generalmente de países donde la necesidad de racionalizar el uso de agua ha generado un alto nivel de investigación y desarrollo de nuevos procesos de tratamiento, capaces de generar efluentes de buena calidad. En el país ha sido muy limitado el desarrollo de tecnologías propias y la investigación que en este campo se efectúa con recursos y alcances, centrados estos sobre procesos conocidos. La necesidad de implementar técnicas de tratamiento avanzado, genera la de adecuar las tecnologías extranjeras a las particularidades del medio mexicano y a su vez la de desarrollar variantes acordes con las características locales.

De aquí para la remoción de contaminantes o sustancias indeseables en las aguas residuales se emplean diversos métodos y /o combinaciones de ellos. En la figura 24 se muestra un diagrama de flujo de manera general, de una planta de tratamiento de aguas residuales.

Los contaminantes del agua residual son eliminados por medios físicos químicos y biológicos. Los medios de tratamiento en que se aplican predominantemente fuerzas físicas se llaman operaciones unitarias. Operaciones unitarias son pues cribado, mezclado, floculación, sedimentación, flotación, elutriación, filtración al vacío, transferencia térmica y mezclado. Los medios de tratamiento en los que la alimentación de los contaminantes se consigue mediante la adición de productos químicos o por actividad biológica se la conocen por procesos unitarios.

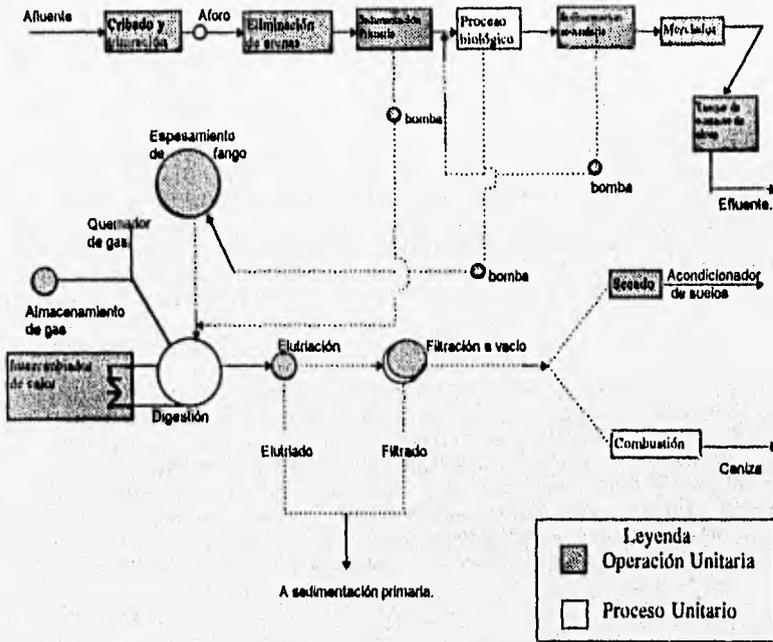


Figura 24. Diagrama de flujo de una planta de tratamiento de aguas residuales.

TRATAMIENTO PREPARATORIO O PRELIMINAR.

Se le llama tratamiento preliminar o preparatorio al sistema que se utiliza en el tratamiento de aguas residuales para dejar en condiciones aceptables o manejables, al agua que se le dará posteriormente un tratamiento ya sea primario, secundario o terciario, y es de fundamental importancia, ya que, como sabemos, las aguas residuales pueden ser puramente domésticas (aguas negras), pero también contienen todo tipo de desperdicios, corrientes pluviales las que arrastran arenas, infiltraciones de aguas subterráneas y de desechos industriales (aguas residuales en general), por lo cual el objeto fundamental del pretratamiento consiste en separar de las aguas residuales todos aquellos constituyentes que podrían llegar a obstruir o dañar los equipos de bombeo, o interferir con los procesos subsiguientes del tratamiento, por lo cual los dispositivos empleados para el tratamiento preliminar se diseñan principalmente para:

1. Separar o disminuir el tamaño de los sólidos orgánicos grandes que flotan o están suspendidos. estos sólidos consisten generalmente en trozos de madera, telas, papel, basura, junto con algo de materia fecal.
2. Separar los sólidos inorgánicos pesados, como la arena, la grava e incluso objetos metálicos; a todo lo cual se llama arena.
3. Separar cantidades excesivas de aceites y grasas.

FACTORES DE IMPORTANCIA

Como es lógico pensar, existen varios factores que se deben de tomar en cuenta para la elección del sitio donde se instalarán los equipos que se requieran para dicho tratamiento; a continuación se mencionarán algunos factores de importancia que deben de tomarse en cuenta para la correcta elección de dicho sitio, no sólo para el tratamiento preliminar, sino para la planta de tratamiento en general, tratándose tanto de descargas líquidas residuales por tratar, como de la toma de agua en cuerpos receptores para su reutilización.

1. Topografía del terreno:

Este punto es muy importante y debe tomarse en cuenta, ya que de acuerdo a una correcta selección de la topografía del terreno elegido, estará involucrado un ahorro en la inversión de los equipos, principalmente los de bombeo que se deban utilizar, pues se podría utilizar solamente la gravedad para alimentar todos los procesos, sin la necesidad de tener que utilizar equipos de bombeo para llevar el agua de un proceso a otro, por lo que se tiene que efectuar un hidrograma de flujos y evaluar las alternativas de costos de sobre elevación del terreno en su caso, contra el costo de adquisición y operación y mantenimiento de equipos de bombeo.

2. Obra de toma:

Otro factor importante de observar es la distancia que debe de guardar la obra de toma, la recolección del agua cruda por tratar, con la planta de tratamiento también por razones económicas, se debe procurar que quede lo más cerca posible, ya que así se requerirá menos tubería para su conducción, incluye para poder efectuar su constante vigilancia, operación y mantenimiento.

Dependiendo de la fuente de abastecimiento del agua por tratar, ya sea ésta una descarga industrial o un cuerpo receptor el cual puede ser un río, un lago o un sistema de alcantarillado, para reutilización del agua en la industria, o en la agricultura uno de los primeros puntos que se debe tomar en cuenta es la eliminación de sólidos gruesos, flotantes o suspendidos, y esto se puede llevar a cabo mediante cualquier dispositivo que impida el paso de los mismos al proceso inicial que serían las rejillas, pero se debe tomar en cuenta que pueden causar taponamientos muy seguidos, aumentando lógicamente la frecuencia de su limpiado.

La eliminación de sólidos gruesos se puede llevar a cabo mediante un sistema de mallas o mamparas flotantes, las cuales pueden ser para ejemplificar, una serie de tambos flotantes unidos entre sí mediante un cable de acero que tiene a su vez una cara expuesta a la toma de agua en una serie de láminas del largo del tambo y con una profundidad dentro del agua de 0.40 m. y hacia arriba del espejo del agua de 0.30 m para así evitar el paso de los sólidos gruesos flotantes o parcialmente suspendidos.

3. AREA REQUERIDA.

Debe pensarse en que probablemente por alguna necesidad específica, la cual podría ser la reutilización de las aguas residuales, o para efecto de no contaminar cuerpos receptores, se haga necesaria la realización de una ampliación de las instalaciones para lo cual deberá contarse con el terreno disponible para tal objeto.

TRATAMIENTO FÍSICO O PRIMARIO

El tratamiento físico de las aguas residuales consiste en aquellas operaciones en las cuales se produce un cambio por medio de la aplicación de fuerzas físicas, estas operaciones se conocen como operaciones unitarias y naturalmente forman la base de la mayor parte de los diagramas de flujo de los procesos.

Estas operaciones se derivan originalmente de las observaciones del mundo físico, así que fueron los primeros métodos de tratamiento que se usaron.

Las operaciones se derivaron originalmente usadas en el tratamiento de aguas residuales incluyendo: cribado, pulverizado, igualación de flujo, mezclado, floculación, sedimentación, flotación, filtración y osmosis inversa.

Las operaciones físicas son usadas para la remoción de sólidos mayores, sólidos suspendidos y flotantes, grasas, y para el bombeo de lodos.

A continuación se describen algunas de las operaciones unitarias físicas más comunes.

Cribado

Con el objeto de proteger de taponamientos o daños a las bombas y otros equipos debido a los sólidos mayores que se encuentran en las aguas residuales se deben instalar antes de las estaciones de bombeo alguna clase de dispositivo de cribado que detenga estos sólidos.

Los dos tipos principales de dispositivo para cribado son las rejas para basura y las rejillas. Las rejas para basura son una serie de barras o soleras de metal paralelas, colocadas verticalmente o con un determinado ángulo de inclinación, que tienen por objeto detener los objetos grandes como son los troncos, botellas y envases de plástico que van en las aguas residuales. Estas rejas tienen generalmente una separación entre barras mayor a los 5 cm. Cuando el agua residual, por su naturaleza este exenta de sólidos mayores orgánicos e inorgánicos, se puede prescindir de este tipo de dispositivos.

Las rejillas son muy similares, en principio a las rejas para la basura y se utilizan comunmente en las plantas de tratamiento municipal. Los claros entre las barras son más pequeños que los usados para unidades de limpieza manual y de 1.5 a 5 cms. en las cribas de limpieza mecánica. El propósito de las rejillas es el remover pequeños objetos extraños como ramas, bolsas de plástico y trapos.

El índice promedio de remoción de sólidos es aproximadamente de $0.015 \text{ m}^3 / 10^3 \text{ m}^3$ de aguas residuales tratadas.

Se debe tener una serie de rejas y rejillas para evitar el paso de sólidos gruesos que se hayan logrado pasar por el sistema de malla, generalmente las rejas tienen espaciamiento entre si de 0.05 m y las rejillas desde 0.015 m; existen varios procedimientos para eliminar sólidos retenidos por este sistema, desde el rastrilleo manual hasta los procesos automatizados para el efecto de limpieza requerido, por regla general, las medidas de éstos son:

1. Rejas gruesas 5 cm de separación entre claros libres, y la cantidad de sólidos retenidos varía de 2 a $5/10^6$ L.
2. Rejas medianas Rejas medianas 2 a 5 cm de separación entre claros libres, y sólidos retenidos de 5 a $20/10^6$ L.
3. Rejillas 1 a 2 cm de separación entre claros libres, y sólidos retenidos 20 a $50/10^6$ L.
Para este tipo de rejillas conviene utilizar un sistema automatizado de limpieza mecánica

Independientemente de que el sistema de limpieza de las rejas, cribas y rejillas sean de banda, de disco o tambor; la inclinación y el área sumergida de las mismas; o la forma de las barras, se debe procurar mantener una velocidad de cruce en las rejillas de cuando menos 0.5 m/seg. para evitar la sedimentación.

De no efectuarse la limpieza de las mismas con la frecuencia que se requiera, las basuras colectadas por la rejilla bloquearán el paso libre del agua produciendo una pérdida de carga y además un regreso del agua, lo que causará una gran cantidad de materia orgánica sedimento y cause septicidad con la consecuente producción de ácido sulfhídrico el cual además de causar mal olor es altamente corrosivo, ataca el concreto y las estructuras metálicas.

Todo lo anterior puede dañar seriamente u obstaculizar los subsecuentes procesos de tratamiento, lo cual debe de impedirse realizando una efectiva limpieza o rastrilleo de las rejillas. El proceso de limpieza es sencillo y consiste básicamente en pasar un rastrillo cuyos dientes tengan las dimensiones óptimas para que pasen a través de la separación de las rejillas de abajo hacia arriba y los sólidos que se han eliminados de las rejillas caigan en una pequeña charola unida a esos dientes para que en su movimiento ascendente se vayan depositando en ella y así se repita la operación las veces que sean necesarias hasta dejar perfectamente limpias las rejillas depositando en el exterior todas las basuras.

Estas basuras no deben ser regresadas al agua sino agrupadas y ser enviadas a un incinerador o disponer de ellas para relleno sanitarios, enterrarlas inmediatamente y checar que cuando menos 0.30 m lo cubran y así evitar la presencia de mosquitos y otros serios problemas de contaminación.

La limpieza automática se lleva a cabo a base de diferentes procesos que pueden ser a base de cepillos rotatorios, chorros de agua o de aire y con formas varias, cinturones, discos, pero el más común es el de las rejillas viajeras que no es otra cosa que un mecanismo activado automáticamente mediante unos flotadores que marcan los niveles de agua antes y después de pasar por las rejillas fijas dentro del mismo mecanismo y que al producirse una pérdida de carga por obstrucción de la rejilla, uno de los flotadores subirá y accionará un motor el cual acciona otra rejilla que pasa a través de los espacios de la rejilla fija con movimiento de abajo hacia arriba y deposita en un lugar predestinado los objetos retenidos.

Como es lógico pensar se requiere de una vigilancia si ya no tan constante, como en el caso de las rejillas de limpieza manual, si de dos o tres veces por día para checar su correcto funcionamiento ya que requieren ser lubricadas y ajustadas sus piezas móviles, checar que algún objeto de características especiales de forma y tamaño hayan obstaculizado su funcionamiento. En la figura 25 puede verse una reja de limpieza mecánica.

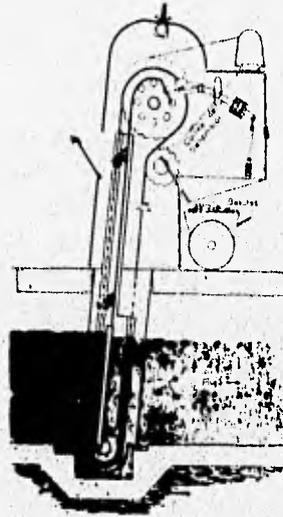


Figura 25 Reja de limpieza mecánica

Pulverizado o desmenuzado.

Los desmenzadores cortan o trituran los sólidos grandes que llevan las aguas residuales para que puedan bombearse y tratarse en los procesos subsecuentes. Las rejas para basura proceden usualmente a los desmenzadores, los cuales se utilizan en lugar de las rejillas cuando la remoción o disposición de material cribado es difícil. Los distintos tipos de estos dispositivos son patentados, y trabajan con motores eléctricos, normalmente se requieren dos unidades o una unidad con una derivación hacia una rejilla de limpieza manual, para cuando haya la necesidad de reparación o de servicio de mantenimiento.

El desmenzador, puede estar constituido a base de molinos, cortadoras y trituradoras. Los molinos, cortadoras y trituradoras, son dispositivos que sirven para romper o cortar los sólidos hasta un tamaño tal que permita que sean reintegrados a las aguas negras, sin peligro de obstruir las bombas o las tuberías, o afectar los sistemas de tratamiento posteriores. Pueden disponerse aparte para triturar los sólidos que separan las cribas (barminutor), pueden ser combinaciones de cribas y cortadoras con movimiento (comminutor) los cuales se instalan dentro del canal por donde fluyen las aguas negras, de manera que se logre su objeto sin necesidad de separar los sólidos de aguas negras. Estos últimos dispositivos los construyen diversas marcas comerciales, y en la mayoría de los casos, constan de hojas dentadas afiladas, fijas o móviles, que actúan en forma continua para reducir los sólidos a un tamaño tal, que puedan pasar a través de cribas o rejas que tienen aberturas de unos 6 mm. Algunos de estos aparatos están diseñados para operar como bombas de poca succión y esta es la manera de evitar el manejo de las basuras en las rejillas. se debe checar su funcionamiento las veces que al experiencia la marque ya que en algunos casos se puede observar que una pérdida de carga muy fuerte, marca una anomalía en su funcionamiento, quizás las cuchillas se han atorado con alguna piedra o metal y su funcionamiento es deficiente o nulo o tal vez requiera de mantenimiento correctivo.

Desarenadores.

Los desarenadores como su nombre lo indica, separan arenas, término que engloba cualquier sólido o materia pesada que tenga velocidad de sedimentación o peso específico superior de los sólidos orgánicos putrescibles en el agua residual. Son de utilidad porque protegen a los equipos de abrasión y de los depósitos pesados. Existen dos tipos de ellos, los de flujo horizontal y los de tipo aereado que se diferencian en que el primero cruza el desarenador en forma horizontal y el segundo es sometido a un flujo en espiral al que se le suministra aire.

Las aguas negras contienen, por lo general, cantidades relativamente grandes de sólidos inorgánicos como arena, cenizas y grava, a los que generalmente se les llama arena, la cantidad es variable y depende de muchos factores, pero principalmente de si el alcantarillado colector es del tipo separado, sanitario o del tipo combinado.

1. El desarenador como se verá puede ser en forma de canal o de un tanque, cuya finalidad es:

- a) Regular la velocidad de arrastre para que se depositen las partículas mayores de 2 mm de diámetro en un determinado tiempo de retención. La velocidad de arrastre es la velocidad del paso del flujo a través del desarenador para que la partícula sedimente.
- b) Reducir las obstrucciones en los cambios de dirección de las tuberías.
- c) Disminuir la frecuencia del desalojamiento de lodos de los sedimentadores.

Las arenas pueden dañar a las bombas por abrasión y causar serias dificultades operatorias en los tanques de sedimentación y en la digestión de los lodos, por acumularse alrededor de las salidas causando obstrucciones. Por esta razón es práctica común eliminar este material por medio de cámaras desarenadoras. Estas se localizan antes de las bombas o de los desmenuzadores y, si su limpieza se lleva a cabo mecánicamente, deben ser precedidas por cribas de barras y rastrillos gruesos. Los desarenadores se diseñan generalmente en forma de grandes canales. En estos canales la velocidad disminuye lo suficiente para que se depositen los sólidos inorgánicos pesados, manteniéndose en suspensión el material orgánico. Los desarenadores de canal deben diseñarse de manera que la velocidad se pueda controlar para que se acerque lo más posible a 30 cm por segundo. El tiempo de retención debe basarse en el tamaño de las partículas que deben separarse y generalmente varía de 20 segundos a 1 minuto.

Esto último se logra instalando varios desarenadores para que el flujo se ajuste en ellos mediante vertederos proporcionales colocados al final de cada canal o mediante otros dispositivos que permitan regular la velocidad del flujo. Hay también desarenadores patentados. Véase figura 26

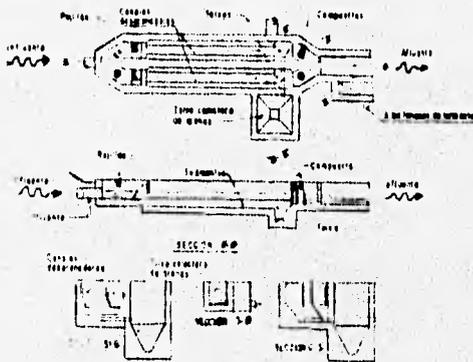


Figura 26 Desarenadores de velocidad constante

Se requiere tener un control hidráulico lo que implica tener una carga superficial determinada.

$$Cs = Q/A \quad [1]$$

Donde:

- Cs = Carga superficial en L/seg/m²
- Q = Gasto de diseño en L/seg
- A = Area superficial en m²

Dicha carga superficial está en función del tamaño de partículas y de la densidad con la cual se diseña, generalmente se calculan para eliminar por sedimentación partículas mayores de 2 mm y con una densidad de 2.85 que es generalmente la de las aguas residuales domésticas. Y también se debe mantener la velocidad constante en todas las profundidades del flujo mediante dispositivos de control, como serían los vertedores proporcionales o el regulador de flujo y medidor Parshall el cual puede tener un graficador y un totalizador de gasto.

Una innovación al proceso, consiste en inyectar aire a una altura de un metro o más del fondo de una unidad del tipo de depósito; la acción revolvedora del aire mantiene en suspensión a la materia orgánica más ligera y deja que las arenas queden relativamente libres de materia orgánica y que se depositen en la zona no agitada que queda bajo la difusión del aire.

Los desarenadores se diseñan para ser limpiados a mano o mecánicamente. Cuando se limpian manualmente, se provee generalmente de espacio para el almacenamiento de las arenas depositadas. Los desarenadores para plantas de tratamiento de desechos provenientes de alcantarillado combinado, deben tener al menos dos unidades que se limpien manualmente o una unidad de limpieza mecánica provista de una derivación auxiliar. Se recomienda el uso de las unidades de limpieza mecánica, las cuales cuentan con un BY-PASS para desviar el agua en caso de necesitar afectar en el desarenador algún mantenimiento, ya sea preventivo o correctivo. En las pequeñas plantas de tratamiento que dan servicio a sistemas de alcantarillado sanitario son aceptables desarenadores simples de limpieza manual con derivación auxiliar.

También son aceptables los desarenadores que no sean de canal, siempre que estén provistos de controles adecuados y aceptables para agitar y/o que tengan dispositivos para suministro de aire, además de equipo para eliminar arenas. Se puede disponer de cierta variedad de unidades de limpieza mecánica que eliminan las arenas mediante rastrillos o cangilones estando en operación el desarenador. Estas unidades requieren mucho menor espacio para el almacenamiento de las arenas que las unidades de operación manual.

Las arenas contienen algo de materia orgánica que se descompone y da origen a olores. Para que se facilite la eliminación económica de las arenas sin causar molestias, la materia orgánica se lava a veces de las arenas y se regresa a las aguas negras. Hay equipo especial accionado mecánicamente se pueden lavar las arenas a medida que se retiran del desarenador como se ha mencionado.

La cantidad de arenas depende del tipo de sistema de alcantarillado tributario, del estado de sus líneas y de otros factores. Las aguas negras estrictamente domésticas que se colectan en alcantarillas bien construidas contendrán muy pocas arenas, mientras que las aguas negras combinadas arrastrarán grandes volúmenes de arena alcanzando su máximo en épocas de fuertes lluvias. Por regla general puede esperarse un volumen de arena de 7 a 30 litros por cada 1 000 metros cúbicos de agua.

Los desarenadores de limpieza manual que se usan con aguas negras combinadas, deben limpiarse después de cada temporal fuerte. En condiciones normales de trabajo, estos desarenadores deben limpiarse cuando las arenas depositadas llenen un 50 a 60% del espacio de almacenamiento. Esto debe vigilarse cuando menos cada diez días, además se debe tener cuidado con resbalones por la grasa en el piso y con los gases, producto de la oxidación en condiciones anaerobias de la materia orgánica depositada en el fondo junto con la arena.

Cuando se usen unidades de limpieza mecánica, deben limpiarse a intervalos regulares, para evitar una carga indebida sobre el mecanismo limpiador; Deben observarse estrictamente las recomendaciones del fabricante. Esto, junto con la experiencia, determinará la frecuencia de la limpieza.

Un marcado olor de las arenas significa que se está depositando demasiada materia orgánica en el desarenador. Si los lodos del tanque de sedimentación son excesivamente ricos en materia inorgánica, o si es demasiado grande la carga en las bombas, en los desmenuzadores, en los colectores de lodos o en otro equipo, la razón más probable será un funcionamiento deficiente del desarenador y debe llevarse a cabo un estudio de dicha unidad.

Tanques separadores de grasas.

Estos tanques son depósitos puestos de tal manera que la materia flotante (sustancia más ligera) asciende y permanece en la superficie del agua residual hasta que se recoja y se elimine, mientras que el líquido sale del tanque en forma continua por el fondo. Entre la materia que se recoge, se encuentra: aceite, jabón, pedazos de madera y corcho, residuos vegetales, etc.

A veces se procura una preaeración de las aguas negras, es decir una aereación antes del tratamiento primario, para lograr lo siguiente:

1. Obtener una mayor eliminación de sólidos suspendidos, en los tanques de sedimentación,
2. Ayudar a la eliminación de grasas y aceites que arrastran las aguas negras
3. Refrescar las aguas negras sépticas antes de llevar a cabo el tratamiento
4. Disminuir la Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO).

La preaeración se logra introduciendo aire en las aguas negras durante un periodo de 20 a 30 minutos a la velocidad que se determine. Esto puede llevarse a cabo forzando el paso de aire comprimido a través de las aguas negras, generalmente a razón de 0.75 litros de aire por litro de aguas negras, cuando la operación dura 30 minutos o por agitación mecánica para agitar las aguas negras de manera que se pongan

continuamente en contacto con la atmósfera nuevas superficies que absorban aire. Para garantizar una agitación adecuada, cuando se inyecta aire comprimido a través de las aguas negras, el aire se suministra generalmente a razón de 100 a 400 litros por minuto y por metro lineal de tanque o de canal.

Cuando el aire que se usa para la agitación mecánica (ya sea empleando productos químicos o no), se emplea también para el propósito adicional de disminuir aún más la DBO, el tiempo de retención debe ser de 45 minutos, cuando menos, al gasto especificado. La agitación de las aguas negras en presencia de aire, tiende a aglomerar o flocular los sólidos suspendidos más ligeros, formando masas más pesadas que sedimentan más rápidamente en los tanques de sedimentación o clarificación. También contribuye a la separación de la grasa o el aceite de las aguas y sus sólidos llevándolos a la superficie. Por la adición de aire, se restauran también las condiciones aerobias en las aguas negras sépticas. Los dispositivos y el equipo que se usan para introducir aire a las aguas negras son los mismos, o similares a los que se usan en el proceso de lodos activados.

Igualación de flujo y bombeo.

La igualación de flujo es utilizada para superar los problemas operacionales causados por las variaciones en el caudal u fuerza del influente de las aguas residuales y mejorar el desempeño de los procesos subsecuentes.

La igualación de flujo es simplemente la igualación de las variaciones del caudal para lograr un caudal constante o casi constante por medio de la retención del caudal un cierto tiempo en una cámara de igualación

Después de haber realizado la selección óptima del equipo de bombeo (tomando en cuenta que la planta de tratamiento de agua se diseña para un gasto medio, pero los dispositivos de bombeo y su respectivo cárcamo de bombeo se diseñan para un gasto máximo), de la capacidad y número de los equipos, de la ley de variación horaria del ANC.; de la forma de operación de los equipos, de las formas de arranque y parado, del tiempo de retención y almacenamiento y del tiempo de sapticidad se pueden tener dos formas de carcamos de bombeo:

1. Un cárcamo o fosa doble en donde en una de las dos cámaras en las cuales está dividido sirva para un almacenamiento de volumen de excesos y en la otra sea un cárcamo o cámara seca en donde se alojarán los equipos de bombeo y,
2. Aquella que tiene una sola cámara la cual toda es húmeda en la que el motor eléctrico del equipo de bombeo queda seco en la parte superior, en la fosa de dicho cárcamo y su succión estará sumergida.

Dentro de los diferentes aspectos que se requieren para checar en estas operaciones de pretratamiento o tratamiento es muy importante vigilar el amperaje que toman los motores de los diferentes equipos en funcionamiento, a la vez que checar el voltaje de salida de los transformadores para que sea adecuado. Además vigilar el nivel espejo del agua por tratar, que siempre permanezca a la altura deseada dentro del cárcamo de bombeo.

Mezclado.

El mezclado es una importante operación unitaria en muchas fases del tratamiento de aguas residuales donde una sustancia debe ser completamente revuelta con otra. Un ejemplo es el mezclado del cloro o hipoclorito con el efluente de un tanque secundario.

El mezclado del líquido se puede llevar a cabo de diferentes maneras, incluyendo resaltes hidráulicos en canales abiertos, tubo Venturi, ductos, bombas, y por medios mecánicos como paletas y propelas.

El mezclado tiene lugar como resultado de la turbulencia que existe en el régimen de circulación, en el caso de recipientes con agitación por medios mecánicos, la turbulencia es inducida por medio de impulsores giratorios como paletas, turbinas y hélices; gases (como en una aereación por difusión), y bombas impelentes de chorros de aire y agua.

Las paletas giran, por lo general, lentamente ya que una superficie de las mismas se haya expuesta al líquido. En la adición de coagulantes, como el sulfato de aluminio o férrico así como polieléctricos y cal, que se añaden en las aguas residuales para producir floculación se requiere un mezclado rápido de ellos de 1 a 3 minutos lo que generalmente se obtiene con turbinas o mezcladores de propela. En estos casos debe evitarse los vórtices mediante el uso de mamparas.

La producción de un buen flóculo requiere generalmente un tiempo de retención de 15 a 30 minutos. por otro lado, un tiempo de retención de 2 a 5 minutos es más que suficiente para el mezclado por agitación intensiva de productos químicos en depósitos equipados con turbinas o mezcladores con hélice.

Las turbinas se utilizan para mezclar el aire con todos activados en los tanques de aereación y para mezclar el fango en los digestores. Estos dispositivos agitadores consisten en paletas montadas radialmente y de forma perpendicular en los bordes de una placa plana, girando a velocidades moderadas (aproximadamente 150 r.p.m.). Las hélices se utilizan para mezclado rápido y alcanzan una velocidad de 2000 r.p.m. Tienen la misma forma que las hélices de los barcos y generan fuertes corrientes axiales que mezclan rápidamente los productos químicos o gases con los líquidos.

La producción de vórtices o remolinos de masa en los líquidos debe limitarse en todos los tipos de impulsores. La acción del vórtice reduce la diferencia entre la velocidad del fluido y la del impulsor y, por ello disminuye la eficiencia del mezclado. Si el recipiente donde se efectúa la mezcla es bastante pequeño, puede prevenirse la formación de vórtices montando los impulsores descentrados o en ángulo con respecto a la vertical, o induciéndoselos lateralmente por un ángulo del recipiente. El método corriente en tanques circulares consiste en instalar cuatro o más deflectores verticales, que sobresalgan de la pared aproximadamente una décima parte del diámetro. Dichos deflectores impiden el movimiento giratorio de la masa y favorecen el mezclado vertical. Los tanques de mezclado de hormigón pueden ser cuadrados y en este caso se prescinde de los deflectores.

Floculación.

Una parte esencial de cualquier sistema químico de precipitación o auxiliado químicamente es la agitación para aumentar la oportunidad de contacto entre las partículas después de que se ha agregado las sustancias químicas.

La floculación es promovida por una agitación suave con paletas de lento movimiento. Algunas veces la acción es auxiliada por la instalación de aspas estacionarias, localizadas entre las aspas en movimiento, para romper la rotación de la masa de líquido y promover el mezclado. El incrementado contacto entre partículas promoverá el crecimiento de flóculo; sin embargo si la agitación es demasiado vigorosa el flóculo se romperá en partículas más pequeñas. La agitación debe ser cuidadosamente controlada para que las partículas del flóculo sean del tamaño apropiado y fácilmente sedimentables.

La floculación de aguas residuales por agitación mecánica o por aire aumenta la remoción de sólidos suspendidos y DBO para la sedimentación primaria, acondicionando las aguas residuales que contienen ciertos desperdicios industriales y mejorar el desempeño de los tanques de sedimentación secundaria que siguen a los procesos de tratamiento biológico, especialmente al proceso de lodos activados.

La floculación se puede llevar a cabo en tanques separadores que son cámaras diseñadas especialmente para tal propósito en unidades y en líneas como los conductos y pipas que conectan las unidades de tratamiento y en combinación con clarificadores.

Sedimentación.

La remoción de los sólidos sedimentables de las aguas residuales, se realizan mediante el proceso de sedimentación. La diferencia en gravedad específica entre los sólidos sedimentables y el agua, originan que los sólidos sedimentan en el fondo de un tanque en condiciones no turbulentas.

La sedimentación es usada para la remoción de arenas, remoción de materia específica en el tanque de sedimentación primaria, remoción del flóculo biológico en el tanque de sedimentación de lodos activados y remoción de flóculo químico cuando se usa un proceso de coagulación química. En muchos casos, el propósito principal es producir un efluente clarificado, pero también es necesario para producir lodos con una concentración de sólidos que pueden ser fácilmente maniobrados y tratados.

Existen cuatro tipos de sedimentación: discreta, floculante, de zona y de compresión.

Los tanque de sedimentación primaria remueven los sólidos sedimentables capaces de formar bancos de lodos en las aguas receptoras y aceites, grasa y otros materiales flotantes. Cuando son diseñados eficientemente deben removerse del 50 al 70 % de los sólidos suspendidos y del 25 al 40 % de DBO.

Los dos tipos básicos de sedimentador son los de forma rectangular y circular. Existen así como otro tipo de tanques Imhoff en donde se lleva a cabo simultáneamente la

sedimentación de sólidos y la digestión anaerobia de lodos, el índice de remoción de sólidos suspendidos es del 40 al 50 % y de un 25 a 30 % de la DBO.

Los principales dispositivos para el tratamiento primario son los tanques de sedimentación, algunos también tienen la función adicional de servir para la descomposición de los sólidos orgánicos sedimentados, lo cual se le conoce como digestión de los lodos.

Son diversos los tanques que se utilizan para este proceso:

1. tanques sépticos.- El tanque séptico fué uno de los más antiguos dispositivos de tratamiento primario que se usaron. Está diseñado para mantener las aguas negras a una velocidad muy baja y bajo condiciones anaerobias, por un período de 12 a 24 horas, durante el cual se efectúa una gran eliminación de sólidos sedimentables. Estos sólidos se descomponen en el fondo del tanque, produciéndose gases que arrastran a los sólidos y los obligan a subir a la superficie, permaneciendo como una nata o capa hasta que escapa el gas y vuelven a sedimentarse. Esta continua flotación y subsecuente sedimentación de los sólidos los lleva con la corriente de aguas negras hasta la salida, por lo que eventualmente salen unos sólidos con el efluente, frustrando así parcialmente el propósito del tanque. Debido a los largos períodos de retención y a la mezcla con los sólidos en descomposición, las aguas negras salen del tanque en una condición séptica que dificulta el tratamiento secundario.

Los tanque sépticos ya no se usan, excepto en instalaciones muy pequeñas. Sin embargo, se emplean comunmente en residencias aisladas, en pequeñas instituciones o escuelas, donde puede disponerse del efluente del tanque por el método subsuperficial o cuando el factor de dilución en las aguas receptoras es muy alto. En estas condiciones, tienen ventaja de requerir una atención mínima, bastando solamente una limpieza ocasional de lodos y natas.

2. Tanques de doble acción.- Estos tanques se idearon para corregir los dos defectos principales del tanque séptico, que es impedir que los sólidos que se han separado de las aguas negras se mezclen nuevamente con ellas, permitiendo la retención de estos sólidos para su descomposición en la misma unidad, y proporcionar un efluente adaptable para un tratamiento posterior..

El contacto entre las aguas negras y los lodos que se digieren anaeróbicamente queda prácticamente eliminado y disminuye el período de retención en el tanque. A este tanque también se le conoce como tanque Imhoff el cual puede ser rectangular o circular, y se divide en compartimentos o cámaras, la primera es una sección superior a la que se le conoce como cámara de derrame continuo o compartimiento de sedimentación; la segunda es una sección inferior que se conoce como cámara de digestión de los lodos; la tercera el respiradero y cámara de natas.

No habiendo partes mecánicas en el tanque Imhoff, debe prestarse atención a lo siguiente:

- a) Eliminar diariamente las grasas, natas y sólidos flotantes, del compartimiento de sedimentación.
 - b) Raspar semanalmente los lados y fondos inclinados del compartimiento de sedimentación, con un cepillo de goma, para quitar los sólidos que se hayan adherido y que puedan descomponerse.
 - c) Limpiar semanalmente la ranura del compartimiento de sedimentación. esto puede hacerse con una rastra de cadena.
 - d) Cambiar el sentido del flujo cuando menos una vez al mes, cuando así este previsto en el diseño del tanque.
 - e) Controlar la nata en la cámara de natas, rompiéndola por medio de chorros a presión, manteniéndola húmeda con aguas negras del compartimiento de sedimentación y quitándola cuando su espesor llegue a unos 60 o 90 cm.
 - f) La descarga de lodos debe hacerse antes de que su nivel llegue a estar cerca de los 45 cm de distancia de la ranura del compartimiento de sedimentación.
3. Tanques de sedimentación simple.- Estos son tanques cuya función principal consiste en separar los sólidos sedimentables de las aguas residuales, mediante un proceso físico de sedimentación. Los sólidos asentados se substraen continuamente o a intervalos frecuentes, para no dar tiempo a que se desarrolle la descomposición con formación de gases. Los sólidos pueden irse acumulando por gravedad, en una tolva embudo, de donde se bombean o descargan por la acción de la presión hidrostática. No obstante, este método ha sido reemplazado por el uso de equipo mecánico para recolectar los sólidos en la tolva o embudo, de donde son descargados por bombeo, mismo que puede ser programado mediante unos relevadores de tiempo electrónicos.

Los tanques de sedimentación sin equipo mecánico para la recolección de los sólidos se conocen como tanques de sedimentación simple.

4. Tanques de sedimentación simple con limpieza mecánica.- Estos tanques pueden ser rectangulares, circulares o cuadrados, pero todos operan por el mismo principio de recolectar los sólidos sedimentados por medio de rastras de movimiento lento que los empujan hacia el sitio de descarga.

En los tanques rectangulares, las rastras se fijan cerca de las orillas a una cadena sin fin que pasa sobre engranas o ruedas dentadas accionados por medio de motores. Las rastras empujando los sólidos sedimentados hacia una tolva de lodos localizada en el extremo de entrada del tanque, luego son levantadas por la cadena hacia la superficie del tanque en donde, parcialmente sumergidas, sirven para empujar los sólidos flotantes, las grasas y los aceites a un recolector de natas situado en el extremo de salida del tanque.

Otro tipo de mecanismo consiste en un puente viajero del mismo ancho del tanque, del cual se suspende una paleta que empuja a los sólidos hacia el punto de descarga y otra paleta desespumadora para sólidos flotantes, las grasas y los aceites. Estas paletas trabajan solamente al moverse el puente de dirección, quedando sueltas cuando se les hace regresar en dirección contraria.

Los tanques circulares tienen armaduras horizontales fijas a un eje central impulsado por un motor. El fondo de los tanques está inclinado hacia el centro y las rastras mueven a los sólidos hacia la tolva o embudo de lodos que hay en el centro. Las armaduras desnatadoras están sujetas a la flecha central en la superficie, para recolectar los sólidos flotantes, las grasas y los aceites.

En los tanques cuadrados el mecanismo es similar al de los tanques circulares, la diferencia principal estriba en que una o ambas armaduras rígidas, están equipadas con paletas articuladas, las cuales llegan hasta las cuatro esquinas del tanque y arrastran los sólidos de esas zonas hacia la trayectoria circular del mecanismo.

En los tanques rectangulares, las aguas negras entran por un extremo y fluyen horizontalmente hacia el otro extremo. En los tanques circulares entran las aguas negras en el centro y fluyen radialmente, en el sentido horizontal, generalmente, hacia la periferia. En los tanques cuadrados pueden entrar las aguas negras en el centro y fluir hacia los cuatro lados, o entrar por un lado y atravesar el tanque.

Algunos fabricantes han diseñado equipo que lleva a las aguas negras de alimentación cerca del fondo del tanque, de donde fluyen hacia arriba y radialmente a través de una capa de lodos, hacia la salida de la periferia. Estos se conocen como clarificadores de flujo radial ascendente y tienen la ventaja de introducir los sólidos por el fondo, donde son deseables, en lugar de irse depositando desde las capas superiores.

El período de retención es el tiempo en horas que se retienen las aguas en el tanque, basándose en el gasto y en el volumen del tanque suponiendo un desplazamiento total y un flujo uniforme a través del compartimiento de sedimentación. Durante cierta época fué éste el factor comúnmente usado en el diseño. En la actualidad este factor se ha reemplazado por la carga de los vertedores y la capacidad superficial de sedimentación. Basándose en el gasto de diseño, los períodos de retención deben ser de por lo menos de dos horas cuando menos.

La capacidad superficial de sedimentación, se expresa en términos de litros por metro cuadrado de superficie de tanque, basados en el gasto diario de las aguas negras. En los tanques primarios, cuando no haya un tratamiento secundario, esta capacidad no debe ser mayor de 20 000 litros por metro cuadrado y por día, en las plantas cuya capacidad aproximada sea de 4 000 metros cúbicos por día o menos; pero puede ser mayor para plantas de capacidad superior a la mencionada. La capacidad superficial es un factor importante porque afecta directamente al porcentaje de eliminación de sólidos sedimentables y la DBO.

Las dimensiones globales, según las normas aceptadas más recientemente, la longitud mínima es de tres metros y la profundidad del líquido no debe ser menor de 2.20 metros (en tanques de limpieza mecánica). Las dimensiones del tanque quedan determinadas

por la cantidad de aguas negras que se requiera tratar, por la planeación general de la planta de tratamiento, capacidad superficial de sedimentación y tipo de equipo. Los estudios más recientes indican que es ventajoso el que los tanques no sean demasiado profundos.

Como el proceso de sedimentación de los sólidos en los tanques de sedimentación simple, es el mismo que el comportamiento de sedimentación de doble acción, debe esperarse que los resultados de la eficiencia sean similares. Deben eliminarse cerca del 90 al 95% de sólidos sedimentables, o sea un 40 a 60% de los sólidos suspendidos totales. La DBO debe disminuir en un 25 a 35%. Desde luego que estas cifras son de carácter general y no pueden aplicarse a casos especiales. Las aguas residuales cuyo contenido en sólidos sea alto, pueden presentar un mayor porcentaje de eliminación por sedimentación, que otras aguas cuyo contenido en sólidos suspendidos sea bajo. Debe esperarse un mayor porcentaje de eliminación en un tanque en el cual se traten aguas residuales frescas, que en otro en el que se traten las mismas aguas después de que se han vuelto sépticas, debido a que los sólidos de las aguas sépticas ya han sido descompuestos o desintegrados por la acción bacteriana durante su larga travesía en el sistema de alcantarillado. La cantidad y composición de los desechos industriales, es también factor importante que influye sobre el porcentaje de eliminación de sólidos suspendidos y la DBO.

Para calcular la eficiencia de cualquier proceso de tratamiento se requiere tomar una muestra del influente y del efluente del proceso, en este caso del clarificador o del sedimentador primario, preferiblemente muestras compuestas de un periodo de 24 horas. El calcular la eficiencia es con propósito de controlar la calidad del efluente independientemente del porcentaje de remoción que se tenga. La siguiente es una lista de algunos parámetros y sus porcentajes típicos de la eficiencia de clarificación:

PARAMETROS	EFICIENCIA DE REMOCION ESPERADA
Sólidos sedimentables	90 - 95%
Sólidos suspendidos	40 - 60%
Sólidos totales	10 - 15%
Demanda bioquímica de oxígeno	25 - 35%
Bacterias	25 - 45%

El pH generalmente no se ve afectado con un sistema de clarificación. Los valores típicos de estos parámetros son:

PARAMETROS	RANGOS INFLUENTE	COMUNES EFLUENTE
Sólidos sedimentables	5 - 15 ml	0.5 - 4 ml
DBO	150 - 400 ml	60.0 - 280 ml
Sólidos suspendidos	150 - 400 ml	60.0 - 150 ml
Bacterias Coliformes	-----	5×10^3 - 1×10^4 / ml

Las eficiencias de clarificación pueden verse afectadas por muchos factores, entre los que se pueden mencionar:

1. Tipos de sólidos del agua residual, especialmente se existe un porcentaje considerable de desechos industriales.
2. Edad de las aguas residuales al llegar a la planta, ya que sus condiciones de septicidad propiciarán el desprendimiento de gases lo que dificulta la sedimentación.
3. Rango de variaciones del flujo de aguas residuales en comparación con los gastos de diseño.
4. Condiciones mecánicas y de limpieza de tuberías de clarificador.

Escasa clarificación.- Si los resultados de los análisis de laboratorio o la inspección visual indica que el clarificador no está funcionando debidamente, entonces se debe identificar el origen del problema y tomar de inmediato la adecuada medida correctiva que se requiera.

Algunos problemas que usualmente se presentan en la tabla 28 y sus posibles correcciones son:

Tabla 28.

PROBLEMA	CHECAR PARA CORREGIR: CLAVES:
Trozos flotantes de lodos	a, b, c, d, e
Gran cantidad de espumas y natas flotantes	bc*, bd*, e, b, e*
Presencia de sólidos en el efluente	a, b, c, d, e, bg*, bh*
Baja eficiencia de remoción	e
pH bajo e incremento de olores	a, b, c, d, e, f
Formación profunda de sedimentos y el bombeo es escaso	c, b, a*, b.b*, b.c*, bf
El mecanismo colector de sedimentos o rastras se jalonea o da brinco	
El mecanismo de rastras no funciona, tiene sobrecargas y los switches de control térmico siguen disparando	b, f, b*f, bf

* Dividido en clarificadores rectangulares y circulares.

Tabla 28 (continuación)

CAUSAS Y CORRECCIONES.	
<p>a) Bombas de lodos Bombas de pistón:</p> <p>Bombas de desplazamiento positivo:</p> <p>Bombas centrifugas:</p> <p>Inyector o difusión de aire:</p>	<p>asentar baleros ensamblar ajuste de empaques tensar cadenas sobrecarga tiempo de bombeo</p> <p>funciona el vacío inversión de rotación o rotor trabado cadena empaques tiempo de bombeo</p> <p>funciona el vacío, "chupa aire" ajuste de empaques impulsor tapado o inversión de la rotación tiempo de bombeo</p> <p>Abastecimiento de aire válvulas de pie transroscamiento de válvulas electrodos tiempo de bombeo</p>
<p>b) Mecanismo colector</p> <p>*b.1 Clarificadores circulares:</p> <p>b.2 Clarificadores rectangulares:</p>	<p>Motoreductor switch de sobrecarga brazo desnatador operación espumas en el tanque rastra superficial caja colectora de espumas</p> <p>Motoreductor clutch y engranes rastras espuma operación desnatadora colectores, canales y vertederos baffles</p>
<p>c) Tolvas y tuberías</p>	<p>Si existen taponamientos se puede utilizar un retrolavado o aire a presión.</p>
<p>d) La calidad del líquido sobrenadante retomado al digestor.</p>	

Tabla 28 (cont.)

<p>e) Influyente</p> <p>e.1. Cambio en su composición o temperatura</p> <p>e.2. Variaciones de flujo:</p>	<p>Un incremento en el flujo del influente puede causar una sobrecarga hidráulica. Esto puede determinarse calculando el tiempo de retención, gasto de vertedores y su carga superficial; si se tiene la condición contraria, se debe aumentar el tiempo de purgas o vaciar el tanque.</p>
<p>f) El mecanismo de limpieza de rastras jalonea, brinca o se encuentra ahogado</p> <p>f.1. Capa espesa de lodos</p> <p>f.2. El motoreductor pueda estar afectado por algún engrane o catarina o algún defecto en el sistema de cadenas</p> <p>f.3. Alguna rastra rota, causada por alguna roca o palo atravesado entre las rastras desnatadoras y los de limpieza inferior (clarificadores naturales)</p>	<p>Se debe bombear o purgar para ser eliminada la capa, si el mecanismo se checo y no se encontraron defectos.</p> <p>Si alguno de estos defectos ocurre y no se le puede dar pronta solución el tanque deberá ser vaciado para dar corrección del defecto, no se debe de forzar los mecanismos porque puede causarse un mayor daño a los equipos.</p> <p>Las acciones correctas que se toman dependerá de la raíz del problema y de las facilidades con que la planta cuenta.</p>
<p>CORTO CIRCUITOS.</p>	
<p>A medida que las aguas residuales entren en el clarificador estas deben ser distribuidas uniformemente a través de la sección transversal del tanque y deben fluir a la misma velocidad en todas áreas hacia el extremo, efluente o de salida. Cuando la velocidad es mayor en algunas secciones pueden ocurrir cortos circuitos. La zona de alta velocidad puede disminuir el tiempo de retención en esa área y se pueden mantener en suspensión las partículas pasando por el efluente del tanque porque no tuvieron tiempo para sedimentarse. En cambio si la velocidad es muy pequeña pueden surgir condiciones sépticas indeseables, los cortos circuitos pueden empezar fácilmente a la entrada del tanque de sedimentación. Esto normalmente se evita mediante el uso de placas vertedoras baffles o mamparas y mediante el diseño apropiado del canal de entrada. Los cortos circuitos también pueden ser causados por turbulencia y estratificación debida a temperatura o salinidad.</p>	

Flotación.

La flotación es una operación unitaria que se puede usar en lugar de la sedimentación primaria para la remoción de sólidos suspendidos y flotantes. El proceso de flotación tiene la ventaja de altos valores de remoción de cargas superficiales, grasas y material flotante. La separación se produce por la introducción de finas burbujas de gas en la fase líquida. Las burbujas se fijan a la materia y la fuerza boyante de la partícula combinada con las burbujas de gas es suficientemente para hacer que las partículas asciendan a la superficie. La principal ventaja de la flotación sobre la sedimentación es que las partículas muy pequeñas o ligeras que se asientan muy despacio puedan ser removidas completamente y en menos tiempo.

La actual práctica de la flotación, tal como se aplica en el tratamiento de las aguas residuales municipales, se limita al uso del aire como agente de flotación. Las burbujas de aire se añaden, o se induce su formación, por alguno de los métodos siguientes:

1. Aireación a presión atmosférica (flotación por aire).
2. Inyección de aire mientras el líquido se halla bajo presión (flotación por aire disuelto)
3. Saturación con aire a presión atmosférica, seguido de aplicación de vacío al líquido (flotación por vacío).

En todos estos sistemas, el grado de eliminación puede mejorarse mediante el uso de distintos aditivos químicos inorgánicos y orgánicos tales como las sales de hierro y aluminio y la sílice activada. Los productos químicos orgánicos pueden usarse para cambiar la naturaleza de cualquiera de las interfaces aire - líquido o sólido - líquido, o ambas y los inorgánicos se utilizan para agregar partículas sólidas de manera que se cree una estructura que pueda atrapar fácilmente las burbujas de aire.

Filtración.

La filtración se logra por el paso de las aguas residuales a través de una cama de filtro compuestas de material granular con o sin la adición de sustancias químicas. Dentro de la cama filtro granular, la remoción de sólidos suspendidos se logra por un complejo proceso que involucra uno o más mecanismos de remoción como el colado, sedimentación, absorción y otros.

Cuando comienzan a aumentar los sólidos suspendidos en el efluente más allá de un límite aceptable o cuando la pérdida de carga alcanza un máximo debido a la obstrucción de un filtro, termina entonces la fase de filtrado y da comienzo la fase de retrolavado que consiste en intervenir el flujo y lava el medio filtrante.

Los principales tipos de filtros con medios granulares se pueden clasificar de acuerdo a la dirección de flujo, tipo de cama filtro, fuerza impulsora y método de control caudal.

La filtración es una operación unitaria usada para alcanzar una remoción adicional de sólidos suspendidos de los efluentes de los procesos biológicos y químicos de

tratamiento de aguas residuales. También se ha empleado para la remoción de fósforo químicamente precipitado.

Los metales que se encuentran en forma soluble son eficientemente removidos como el cromo trivalente, cadmio y zinc. La eficiencia de remoción en virus aumenta con la adición de coagulantes al medio filtrante y los datos de remoción son muy variables, van de 10 a 98%.

Merece atención aparte los llamados filtros prensa por su papel en el manejo de lodos activados.

El manejo de estos lodos requiere de un proceso de desaguado, en un filtro prensa, el desaguado se logra forzando a salir el agua del lodo bajo altas presiones. Las ventajas del filtro prensa incluyen altas concentraciones de retortas, claridad del filtrado, captura de sólidos y consumo químico. Las desventajas incluyen altos costos y limitaciones en la vida de la tela del filtro.

Los costos de desaguado por filtro prensas son más altos de los otros medios mecánicos de desaguado, sin embargo las eficiencias de remoción de sólidos son mucho mayores.

Osmosis Inversa.

El proceso de osmosis inversa es usado para el pulimento de efluentes en el tratamiento avanzado de aguas residuales, dada su capacidad para remover la mayoría de los constituyentes orgánicos e inorgánicos tanto en forma disuelta como suspendida.

La osmosis inversa es un proceso en el cual se separa el agua de las sales disueltas en una solución por filtración a través de una membrana semipermeable a una presión mayor que la presión osmótica causada por las sales disueltas en el agua residual. Se ha usado acetato de celulosa y nylon como materia para las membranas.

Los poros en las membranas de osmosis inversa son de 5 a 20 Amstrongs ($5 \text{ a } 20 \times 10^{-8} \text{ cm}$) de diámetro, por lo que la separación de moléculas mayores que lo poros será para un simple proceso de tamizado.

En la tabla 29 muestra un resumen de los procesos físicos para el tratamiento de aguas residuales.

Tabla 29. Resumen de los procesos físicos para el tratamiento de aguas residuales.

PROCESO	APLICACIONES	VENTAJAS	DESVENTAJAS
Separación por gravedad	Aceite libre, Sólidos suspendidos	Barato Bajo mantenimiento Sin elementos mecánicos Relativamente seguro Fácil de operar Bajos costos de energía	Emisiones volátiles No remueve constituyentes disueltos Evacua lodos y aceites
Flotación por aire	Aceite emulsificado, cebo, grasas, finos sólidos suspendidos	Rompe emulsiones mecánicamente Barato, Relativamente seguro	Emisiones volátiles No remueve constituyentes disueltos No rompe emulsiones químicas Requiere de Aditivos químicos Evacua espuma Difícil de mantener Altos costos de energía
Coacencia de aceite	aceite emulsificado y libre	Bajo mantenimiento Sin elementos mecánicos Rompe emulsiones mecánicamente Alta remoción de aceite Sin aditivos químicos Relativamente seguro Fácil de operar Bajos costos de energía	No remueve constituyentes disueltos Evacua aceite residual No rompe emulsiones químicas
Evaporación	Orgánicos volátiles Reducción del volumen de agua	Reduce el volumen de residuo Remueve contaminantes disueltos Fácil de operar	Emisiones volátiles Altos costos de energía Suceptible de obstruirse Difícil de mantener
Filtración	Aceite libre y emulsificado Sólidos suspendidos	Remueve algunos contaminantes disueltos Relativamente seguro Fácil de operar	Suceptible de obstruirse Requiere de relavado Olores, crecimiento bacterial Alto mantenimiento
Adsorción	Compuestos orgánicos Algunos compuestos inorgánicos	Remueve contaminantes disueltos Relativamente seguro Fácil de operar	Suceptible a obstruirse Olores, crecimiento bacterial Alto mantenimiento
Stripping	Orgánicos volátiles Algunos orgánicos semi volátiles	Remueve contaminantes disueltos Algo seguro Bajos costos de capital	Altos costos de energía Difícil de mantener Suceptible a obstruirse Emisiones volátiles No remueve inorgánicos
Extracción	Compuestos orgánicos Algunos compuestos inorgánicos	Remueve contaminantes disueltos Algo seguro Fácil de operar Bajos costos de capital	Altos costos de energía Difícil de mantener Emisiones volátiles Corrientes adicionales de residuos para ser tratadas

PROCESOS BIOLÓGICOS O SECUNDARIOS

Existe una amplia gama de sistemas biológicos de tratamiento en los que una población mixta de microorganismos descompone la materia orgánica para utilizarla como una fuente de nutrientes. Los procesos biológicos son en general las técnicas económicas más eficientes para el tratamiento de desechos líquidos que contengan compuestos orgánicos biodegradables.

Los procesos más aplicados, por su bajo costo, son los que combinan microorganismos aerobios y anaerobios (biomasa mixta).

Para aplicar un tratamiento biológico es necesario que el agua residual cumpla con las condiciones siguientes:

- a) No posea sustancias tóxicas que inhiban el proceso biológico o que sus concentraciones sean menores a las que producen inhibición
- b) Un pH adecuado para el desarrollo de los microorganismos (bacterias, algas, etc.)
- c) Una relación adecuada entre el carbón, nitrógeno y fósforo.
C:N:P, expresada en mg/l para procesos aerobios de 100:5:1 y para procesos anaerobios 100:1:5

Para la determinación de biodegradabilidad o toxicidad del agua residual, se emplea un reactor de eliminación discontinua en los que se evalúan la eficiencia del proceso. Para los desechos no biodegradables, se emplea un tratamiento alterno. Cuando el agua residual es biodegradable con umbral tóxico, se emplean microorganismos adaptados.

Los procesos que persigue el tratamiento biológico del agua residual son la coagulación y eliminación de los sólidos coloidales no sedimentables y la estabilización de la materia orgánica. En el caso de agua residual doméstica, el principal objetivo es reducir el contenido orgánico. Al tratar agua que ha de ser utilizada para fines agrícolas se pretende eliminar los nutrientes, tales como nitrógeno y fósforo, que son capaces de estimular el crecimiento de plantas acuáticas. Para las aguas residuales industriales, la finalidad es de eliminar o disminuir la concentración de compuestos orgánicos e inorgánicos. Dado que muchos de estos compuestos son tóxicos a los microorganismos, en algunos de los casos puede ser necesario efectuar un pretratamiento.

En la mayoría de los casos el agua residual puede ser tratada biológicamente, a base de conseguir un control ambiental adecuado. Por lo tanto compete al ingeniero a cargo asegurar que exista tal ambiente y que esté controlado eficazmente, lo que puede conseguirse con una elección cuidadosa del método de introducción del agua residual en las unidades de tratamiento o mediante la dilución del agua residual por medio de recirculación de una parte de del efluente tratado.

El entendimiento de la forma, estructura y actividades bioquímicas de los microorganismos importantes es básico para el diseño de tratamiento biológico o en la selección del tipo de proceso a utilizar.

En el pasado los microorganismos se agrupaban en dos reinos: vegetal y animal. Por dificultades taxonómicas, la tendencia actual era de clasificarlos en tres grupos: protistas, vegetales y animales. En la tabla 30 se presentan en forma resumida algunos datos sobre las características de los microorganismos de cada reino. Mientras que en dicha tabla se muestran las diferencias más acusadas entre protistas, vegetales y animales, los tres reinos son semejantes por cuanto la célula es la unidad de la vida en todos ellos, sin perjuicio de la complejidad del organismo

Tabla 30. Los tres reinos de los microorganismos

Reino	Miembros representativos	Caracterización
Animal	Rotíferos	Multicelulares con diferenciación de tejidos
Vegetal	Crustáceos Musgos Helechos Plantas de semillas	
Protista: Superiores *	Algas Protozoos Hongos Mucílago	Unicelulares o multicelulares, sin diferenciación de tejidos
Inferiores*	Algas verdiazules Bacterias	

* Poseen núcleo verdadero (células eucarióticas)

** No poseen membrana nuclear (células procarióticas)

En general la mayoría de las células vivientes son muy similares. Tienen una pared celular que pueda ser una membrana flexible o rígida. Si son móviles, poseen por lo general flagelos o algunos apéndices de apariencia capilar. El interior de la célula contiene una suspensión coloidal de proteínas, carbohidratos y otros compuestos orgánicos complejos, llamada citoplasma.

Cada célula contiene ácidos nucleicos, producto hereditario vital para la reproducción. A fin de mantener sus funciones vitales adecuadamente, un organismo debe tener una fuente de energía y de carbono para la síntesis de nueva materia celular. Los elementos inorgánicos, tales como el nitrógeno y el fósforo, y otros elementos que se encuentran a nivel de vestigios como azufre, potasio, calcio y magnesio son también vitales para la síntesis celular. Dos de las fuentes más corrientes del carbono celular para los microorganismos son el anhídrido carbónico y la materia orgánica. Si un organismo obtiene su carbono celular a partir de del anhídrido carbónico, se le llama autótrofo; si utiliza carbono orgánico se le llama heterótrofo.

La energía es también necesaria para la síntesis de nueva materia celular. En los organismos autótrofos, la energía puede ser proporcionada por el Sol, como en la fotosíntesis, o una reacción orgánica de oxidación-reducción. Si la energía fuese solar, al organismo se le denomina autótrofo fotosintético. Si fuese proporcionada por una reacción inorgánica de oxidación-reducción se le conocerá como autótrofo quimiosintético. En los organismos heterótrofos, la energía requerida para la síntesis celular procede de la oxidación o fermentación de la materia orgánica.

Los organismos pueden igualmente clasificarse por su capacidad de utilizar el oxígeno. Los organismos aerobios sólo pueden existir en presencia de oxígeno molecular. Los organismos anaerobios existen solamente en un ambiente privado de oxígeno. Los organismos facultativos tienen la capacidad de sobrevivir con o sin oxígeno libre.

Por su importancia en los tratamientos biológicos es importante conocer las características de los siguientes microorganismos: 1) Bacterias; 2) Hongos; 3) Algas; 4) Protozoos; 5) Rotíferos; 6) Crustáceos, y 7) Virus.

1. **Bacterias.** Las bacterias son protistas unicelulares. Consumen alimentos solubles y, por lo general, se encuentran donde haya alimentos y humedad. Si bien existen miles de especies diferentes, su forma general encaja dentro de alguna de estas tres categorías: esféricas, cilíndricas y helicoidales. Diversos ensayos indican que están compuestas por un 80% de agua y el 20% restante de materia seca, de la cual el 90% es orgánica y 10% inorgánica. Una fórmula aproximada de la fracción orgánica es $C_5H_7O_2N$. Como la fórmula indica, un 53% en peso, aproximadamente, es carbono. Los compuestos que constituyen la porción inorgánica incluyen P_2O_5 (50%), SO_3 (15%), Na_2O (11%), CaO (9%), MgO (8%), K_2O (6%) y Fe_2O_3 (1%). Puesto que todos estos elementos y compuestos deben proceder del medio ambiente en el que se desarrolla la célula, la falta de cualquiera de estas sustancias limitaría su crecimiento y, en algunos casos, lo alteraría.

La temperatura y el pH juegan un papel vital en la vida y muerte de las bacterias así como en otras plantas y animales microscópicos. Se ha comprobado que la velocidad de reacción aumenta con la temperatura, doblándose cada $10^\circ C$ de aumento, hasta alcanzar la temperatura límite. Con respecto al pH la mayoría de las bacterias no toleran niveles de pH por encima de 9.5 o por debajo de 4.0, por lo general, el pH óptimo para el crecimiento se encuentra entre 6.5 y 7.5.

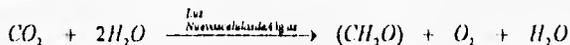
2. **Hongos.** Los hongos se consideran protistas heterótrofos, no fotosintéticos y multicelulares. Los hongos se clasifican generalmente por su modo de reproducción. Se reproducen sexual o asexualmente, por escisión, germinación, o formación de esporas. Los mohos o <<verdaderos hongos>> producen unidades microscópicas (hifas), que colectivamente forman una masa filamentososa llamada micelio. Los términos <<hongos>> y <<mohos>> se usan como sinónimos. Los fermentos son hongos que no pueden formar micelio y, por tanto, son unicelulares.

La mayoría de los hongos son aerobios estrictos. Pueden crecer con muy poca humedad y toleran un medio ambiente con un pH relativamente bajo. El pH óptimo para la mayoría de los hongos es de 5.6; el intervalo es de 2 a 9. Los hongos tienen una demanda baja de nitrógeno, sólo necesitan aproximadamente de la mitad de lo que requieren las bacterias. La capacidad de los hongos a sobrevivir a pH bajos y poco nitrógeno los hace muy importantes en el tratamiento de algunas aguas residuales industriales y en la formación de la composta a partir de residuos sólidos orgánicos.

3. **Algas.** Las algas son protistas unicelulares o multicelulares, autótrofas y fotosintéticas. No son deseables en los abastecimientos de aguas porque producen malos olores y sabores desagradables. En las plantas de filtración, la presencia de

algas reduce el tiempo de filtrado entre lavados. El color verde de la mayoría de las especies y su capacidad para formar capas disminuye el valor estático del agua. En los estanques de oxidación las algas son muy valiosas ya que producen oxígeno por fotosíntesis. Por la noche, cuando no hay luz para producir la fotosíntesis consumen el oxígeno en la respiración. La respiración también tiene lugar en la presencia de la luz solar, sin embargo la reacción neta es la producción de oxígeno. Las siguientes ecuaciones representan las reacciones bioquímicas simplificadas por la fotosíntesis y la respiración:

Fotosíntesis



Respiración



En un medio acuático, puede observarse que este tipo de sistema metabólico produce una variación diurna de oxígeno disuelto. La capacidad de las algas de producir oxígeno es vital para la ecología del medio acuoso. Para un estanque de oxidación aerobio o facultativo funcione eficazmente, es imprescindible que las algas proporcionen oxígeno a las bacterias aerobias y heterótrofas.

Como consecuencia de que las algas utilizan el anhídrido carbónico en su actividad fotosintética pueden producirse valores de pH elevados. Además, al aumentar el pH cambian los componentes de la alcalinidad y así la alcalinidad el carbonato y del hidróxido tiende a predominar. Si el agua tuviese elevada concentración de calcio, el carbonato de calcio precipitará cuando las concentraciones del ion calcio y carbonato llegasen a ser lo suficientemente grandes para sobre pasar el producto de solubilidad. Esta eliminación del ion carbonato por precipitación hace el pH no aumente más. Al igual que en el caso del oxígeno disuelto, existe una variación diurna del pH. Durante el día, las algas consumen el anhídrido carbónico, lo que supone un aumento de pH, mientras por la noche to producen, lo que supone un descenso de pH.

Las algas al igual que otros microorganismos, requieren de compuestos inorgánicos para reproducirse. Aparte de anhídrido carbónico, los principales nutrientes son el nitrógeno y el fósforo. También son importantes los vestigios de otros elementos (oligoelementos), como el hierro, cobre y molibdeno. Merece destacar que el problema de evitar el crecimiento excesivo de las algas en las aguas naturales se ha centrado hasta hoy en la eliminación de nutrientes. Algunos científicos se inclinan por la eliminación del nitrógeno de los efluentes de las plantas de tratamiento, mientras otros recomiendan la eliminación del fósforo y, finalmente, algunos son partidarios de eliminar ambos.

4. **Protozoos.** Los protozoos son protistas móviles microscópicos, y por lo general, unicelulares. La mayoría de los protozoos son heterótrofos aerobios, aunque algunos pocos son anaerobios. Los protozoos son generalmente de un orden de magnitud mayor que las bacterias y suelen consumir bacterias como fuente de energía. En efecto, los protozoos actúan como purificadores de los efluentes de los

procesos biológicos de tratamiento de aguas residuales al consumir bacterias y partículas orgánicas.

Los protozoos suelen dividirse en los cinco grupos siguientes:

- *Sarcodina*. Se caracterizan por sus pies falsos o pseudópodos, que utilizan para su movimiento y captura de alimentos. La *entamoeba histolytica*, causada de una enfermedad intestinal del hombre, pertenece a este grupo.
 - *Mastigophora*. Caracterizados por sus flagelos, que utilizan para moverse. Algunos microbiólogos los subdividen a su vez, en dos grupos; con o sin clorofila. Ejemplos a citar son *Euglena* y *Astacia*.
 - *Sporozoa*. Son protozoos formadores de esporas y parásitos obligados. Su único interés, reside en el hecho de que algunos de ellos, especialmente cuatro de *Paramecium* causan malaria.
 - *Infusoria* o *Ciliata*. El movimiento mediante pestañas es característico de estos protozoos. Las pestañas son extremidades de tipo capilar de la membrana celular. Además de hacer que el organismo pueda moverse, facilitan a los protozoos la captura de alimentos sólidos. Los ingenieros suelen considerar que los *ciliata* suelen dividirse en dos tipos, los que nadan libremente y los fijos. Los primeros tienen que nadar tras las bacterias y necesitan mucho alimento por el gran desgaste de energía al tener que nadar continuamente. El *Paramecium* es un ciliado libre, que es importante en el tratamiento de aguas residuales. Los *ciliados* fijos están adheridos a algo sólido y deben aprehender a sus alimentos cuando pasan por delante. Como su movimiento es limitado y gastan menos energía, necesitan menos alimento. El *Vorticella* es un ciliado fijo de importancia en los procesos de tratamiento biológico, especialmente en el proceso de lodos activados.
 - *Suctoria*. Son protozoos que poseen largos tentáculos, que usan para capturar a otros protozoos y extraer su protoplasma para su utilización. Durante las primeras fases del ciclo de su vida, los Suctoria tienen pestañas pero en la fase adulta son tentáculos.
5. Rotíferos. El rotífero es un animal aerobio, heterótrofo y multicelular. Su nombre procede del hecho de que posee dos juegos de pestañas giratorias sobre la cabeza que utilizan para su movimiento y captura de alimentos. Los rotíferos son muy eficaces al consumir bacterias dispersas y floculadas así como pequeñas partículas de materia orgánica. Su presencia en un efluente indica un proceso de purificación biológica aerobio muy eficiente.
6. Crustáceos. Al igual que el rotífero, el crustáceo es un animal aerobio, heterótrofo y multicelular, pero al contrario, el crustáceo tiene un cuerpo duro y coraza. Los crustáceos son una importante fuente de alimentación de los peces y como tales suelen encontrarse en la mayoría de las aguas naturales. Excepto en los estanques de oxidación con poca carga, donde a veces se detecta su presencia, los crustáceos no aparecen en cantidades apreciables en los sistemas de tratamiento biológico. Su presencia indica que el efluente está bajo de materia orgánica y rico en oxígeno disuelto.

7. Virus. Un virus es la más pequeña estructura biológica que contiene toda la información necesaria para su propia reproducción. Los virus son tan pequeños que sólo pueden observarse con un microscopio electrónico. Son parásitos obligados y como tales necesitan de alguien para poder vivir. Una vez que lo tienen dirigen su compleja maquinaria para producir nuevos virus. Eventualmente las células del huésped se rompen, liberando nuevas partículas del virus, que pueden continuar infectando nuevas células.

Los virus suelen clasificarse según el huésped que infectan. Muchos virus que producen enfermedades al hombre se sabe que son excretados de las heces humanas. Por lo tanto, en el tratamiento de aguas residuales domésticas, el ingeniero tiene la responsabilidad de asegurar que estos virus estén debidamente controlados, lo que logrará mediante la cloración y la adecuada evacuación del efluente.

Algunos microorganismos patógenos presentes en las aguas residuales pueden apreciarse en la tabla 31.

Tabla 31. Algunos Microorganismos patógenos presentes en las aguas residuales.

Microorganismo	Enfermedad
Bacillus Anthracis	Antrax
Brucella s.s.p.	Brucelosis
Entamoeba histolyca	Disenteria
Mycobacterium	Tuberculosis
Salmonella paratyphy	Paratifoidea
Salmonella typhy	Tifoidea
Shiguella s.s.p.	Disenteria Basilar
Vibrio Cholerae	Colera
Virus	Poliomelitis Hepatitis

El control eficaz del medio ambiente en el tratamiento biológico de las aguas residuales se basa en el conocimiento de los principios básicos que gobiernan el crecimiento de los microorganismos.

El modelo de crecimiento puede discutirse según sea la variación con el tiempo de la masa de microorganismos. Este modelo de crecimiento se subdivide en tres fases:

1. Fase de crecimiento logarítmico. Siempre hay una cantidad excesiva de alimento alrededor de los microorganismos; la tasa de metabolismo y crecimiento es solamente función de la capacidad de los microorganismos de procesar el sustrato.
2. Fase de crecimiento decreciente. La tasa de crecimiento, por lo tanto, la masa de bacterias, disminuye por las limitaciones en la disponibilidad del alimento.
3. Fase endógena. Los microorganismos se ven forzados a metabolizar su propio protoplasma sin reposición del mismo, ya que la concentración de alimento disponible se halla en un mínimo. Durante esta fase, puede presentarse el fenómeno llamado lisis, según el cual los nutrientes que quedan en las células muertas se difunden con objeto de proporcionar alimento a las células existentes (crecimiento críptico).

Frecuentemente, las unidades de tratamiento biológico se componen de complejas poblaciones biológicas mezcladas e interrelacionadas, en las que cada microorganismo del sistema tiene su propia curva de crecimiento. La posición y forma de una curva particular de crecimiento en el sistema en función del tiempo, depende del alimento y nutrientes disponibles y de factores ambientales tales como la temperatura y el pH, así como si el sistema es aerobio o anaerobio. La variación con el tiempo del predominio de los microorganismos en la estabilización aerobia del líquido residual orgánico se presenta en la figura 27. Si bien las bacterias son de capital importancia, muchos otros microorganismos toman parte en la estabilización del residuo orgánico. Al proyectar o analizar un proceso de tratamiento biológico, el ingeniero deberá pensar en términos de un ecosistema tal como se muestra en la figura 27 y no en una <<caja>> misteriosa que sólo contenga extraños microorganismos.

En el sistema experto se cuenta con un módulo en el cual se puede consultar una gráfica de diversos microorganismos en variación en número con respecto al tiempo (Módulo de estudio MICROSLIDE).

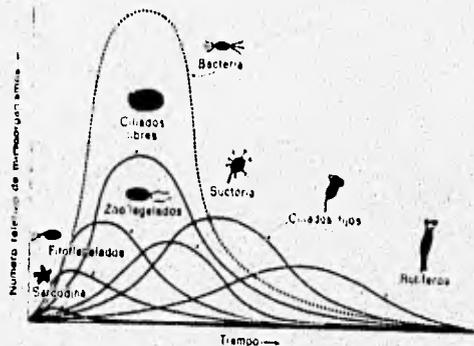


Figura 27 Crecimiento relativo de microorganismos en el curso de la estabilización de un residuo orgánico en medio líquido.

A fin de asegurar que los microorganismos crezcan, se les debe permitir que permanezcan en el sistema el tiempo suficiente para que se reproduzcan. Este período depende de la tasa de crecimiento, la cual está en relación directa con la tasa a la que metabolizan o utilizan el residuo. Suponiendo que las condiciones ambientales estén debidamente controladas, puede asegurarse una estabilización eficaz mediante el control de la tasa de crecimiento de los microorganismos.

Una relación desarrollada empíricamente entre el crecimiento biológico y la utilización del sustrato, que se emplea con frecuencia en los sistemas biológicos estabilizadores de residuos orgánicos y/o inorgánicos, es la siguiente:

$$\frac{dX}{dt} = Y \frac{dF}{dt} - k_d X \quad [2]$$

Donde:

$\frac{dX}{dt}$ = Tasa neta crecimiento de microorganismos, en masa por volumen tiempo.

Y = Coeficiente de producción o crecimiento, en masa de microorganismos/masa de sustrato utilizado.

$\frac{dF}{dt}$ = Tasa de utilización del sustrato por los microorganismos, en masa/volumen tiempo

k_d = Coeficiente de desaparición de los microorganismos en tiempo⁻¹

X = Concentración de microorganismos, en masa/volumen

Esta ecuación, u otra con ligeras modificaciones, se ha venido utilizado con éxito por numerosos investigadores para describir los sistemas de tratamiento biológico aerobios y anaerobios de residuos.

La tasa de utilización de sustrato puede aproximarse mediante la siguiente expresión:

$$\frac{dF}{dt} = \frac{kXS}{K_s + S} = \frac{dS}{dt} \quad [3]$$

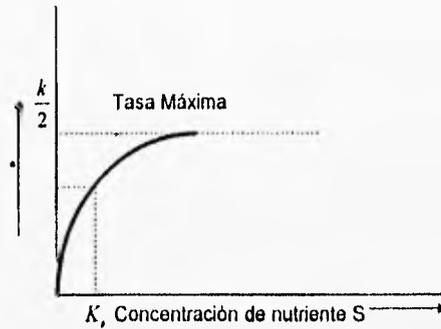
Donde:

k = Tasa máxima de utilización del sustrato por unidad de peso de microorganismos, en tiempo⁻¹

K_s = Concentración del sustrato para la cual la tasa de utilización del mismo por unidad de peso de microorganismos es la mitad de la tasa máxima, en masa/volumen.

S = Concentración del sustrato que rodea los microorganismos en masa/volumen.

Una representación gráfica de de la ecuación 3 puede verse en la figura 28. La ecuación es similar a la desarrollada por Monod para describir la relación entre la concentración de un nutriente limitante y la tasa de crecimiento de los microorganismos. Es también similar a la relación de Michaelis-Menten para describir utilizada para describir las relaciones catalizadas por enzimas.



* Tasa de utilización del sustrato por unidad de peso del microorganismo $\frac{dF}{dt} \cdot \frac{1}{X}$

Figura 28 tasa de utilización del sustrato por unidad de masa de microorganismo en relación con la concentración de un nutriente limitante.

Dividiendo ambos términos de la ecuación 2 entre X se tendrá:

$$\frac{dX/dt}{X} = Y \frac{dF/dt}{X} - k_d \quad [4]$$

En la ecuación 4 la tasa neta de crecimiento $(dX/dt)/X$, suele representarse por medio de la letra griega μ . Utilizando ésta y la expresión para dF/dt dada la ecuación 4 se puede volver a escribir quedando así:

$$\mu = \frac{YkS}{K_s + S} - k_d \quad [5]$$

La ecuación 5 es idéntica a la propuesta por Van Uden para sistemas de cultivos puros. A menudo suele utilizarse μ como un símbolo del producto del coeficiente de producción y la tasa máxima de utilización del residuo por unidad de peso de los microorganismos, k . Al aplicarlo, la ecuación 5 se transforma del siguiente modo:

$$\mu = \frac{\hat{\mu} S}{K_s + S} - k_d \quad [6]$$

Donde $\hat{\mu}$ es el producto de Y por k por lo tanto igual a μ_{max} . La ecuación 6 es similar a la ecuación de Monod para sistemas de cultivos puros.

Escribiendo de nuevo la ecuación 4, pero tomando valores finitos para el tiempo y la masa, de forma que el suíndice M indique una masa definida de microorganismos, aquella ecuación quedará así:

$$\frac{1}{X_M / (\Delta X / \Delta t)_M} = Y \frac{(\Delta F / \Delta t)_M}{X_M} - k_d \quad [7]$$

En la ecuación 7 el término $(\Delta F / \Delta t)_M / X_M$ es comunmente conocido como el factor de carga del proceso, utilización específica, tasa de eliminación del sustrato o **relación alimento-microorganismo (F/M)**. En la discusión que sigue a este término se le llamará relación alimento-microorganismo, y se simboliza con la letra U o con la relación F/M.

$$U = \frac{(\Delta F / \Delta t)_M}{X_M} = F / M \quad [8]$$

En la ecuación 8 $(\Delta F / \Delta t)_M$ representa la masa del sustrato utilizada por la masa de microorganismos X_M en un periodo de tiempo finito Δt .

Al término $X_M / (\Delta X / \Delta t)_M$ del miembro izquierdo de la ecuación 7 se le ha llamado a veces tiempo medio de retención de los sólidos, edad del fango, o **tiempo medio de retención celular (MCRT)**². Aquí se le llamará de la última manera citada y se utilizará θ_c o MCRT para describirle.

$$\theta_c = \frac{X_M}{(\Delta X / \Delta t)_M} = MCRT \quad [9]$$

En la ecuación 9, X_M es igual a la masa microbiana total activa, y $(\Delta X / \Delta t)_M$ es igual a la cantidad total de la masa microbiana extraída diariamente del sistema de tratamiento. La cantidad extraída incluye los sólidos microbianos purgados a propósito, así como los perdidos en el efluente. El recíproco de $\theta_c (\Delta X / \Delta t)_M / X_M$ es igual a la tasa de crecimiento específico o fraccional.

Utilizando las ecuaciones 8 y 9, la ecuación 7 puede volverse a escribir como:

$$\frac{1}{\theta_c} = YU - k_d \quad [10]$$

Por la ecuación 10 puede comprobarse que $1/\theta_c$, tasa de crecimiento de los microorganismos, y U, relación alimento-microorganismo, están directamente relacionados. Dado que θ es fácil de medir se le considera como un parámetro ideal para el control del proceso.

¹ En el sistema experto desarrollado esta relación como se verá es de vital importancia para un tratamiento biológico y los resultados que se aprecien en el programa estarán denotados de la forma F/M.

² El MCRT en el sistema experto es también uno de los parámetros importantes en el programa

Las ecuaciones y los parámetros desarrollados y discutidos hasta ahora son básicos para comprender la cinética del tratamiento biológico. Antes de aplicar estas ecuaciones, se indicarán seguidamente algunos supuestos que han servido de base para el desarrollo de las mismas.

La ecuación 2 es empírica y fue originalmente desarrollada a partir de estudios sobre tratamiento de residuos en sistemas discontinuos (batch); las ecuaciones 3 y 5 se basan en estudios sobre cultivos puros. Los parámetros importantes para el análisis y proyecto de procesos biológicos de las aguas residuales se describen en las ecuaciones 3 y 5 cuando se utilizan con la ecuación 10.

Aunque se sabe que el coeficiente Y de producción o crecimiento es variable, se le ha supuesto constante. Ribbons llegó a la conclusión de que la producción depende de: 1) el estado de oxidación-reducción de la fuente de carbono y los elementos nutrientes; 2) grado de polimerización del sustrato; 3) vías del metabolismo; 4) tasa de crecimiento; y 5) diversos parámetros físicos de cultivo. El término k_d de la ecuación 2 tiene en cuenta factores tales como la muerte, predación y diversión de la energía para las reacciones de mantenimiento de la célula. Otra forma de analizar el crecimiento neto tiene en cuenta la variación del coeficiente de producción incorporando k_d en un coeficiente de producción observado que varía según el tiempo medio de retención celular.

Todos los nutrientes necesarios para un adecuado crecimiento biológico están presentes. La única sustancia limitante es la materia orgánica requerida para el crecimiento heterótrofo o, en el caso de organismos autótrofos, la fuente de energía inorgánica. El pH y la temperatura se regulan de la forma que se logre la tasa óptima de crecimiento.

Las ecuaciones pueden aplicarse a los procesos de tratamiento de residuos que utilicen bacterias como organismos principales. Esta suposición no impide la aplicación de las ecuaciones a las poblaciones biológicas mixtas existentes en los sistemas de tratamiento biológicos de residuos, ya que la mayoría de dichas poblaciones las bacterias son los principales organismos estabilizadores del residuo. Las ecuaciones sólo se aplican a la parte del residuo que es soluble y biodegradable.

Los tratamientos biológicos más empleados para tratar aguas residuales son:

- L. El tratamiento biológico de los efluentes líquidos.- se encuentra dividido en tres etapas:
 1. Tratamiento primario o sedimentación
 2. Tratamiento secundario o oxidación biológica
 3. Tratamiento terciario o eliminación por sedimentación o por cualquier otro método fisicoquímico de las sustancias que no fueron biodegradadas en el paso anterior

II. El tratamiento biológico o secundario pueda llevarse a cabo en dos formas:

1. Usando una película biológica. Un ejemplo de esta, son los filtros percoladores y los sistemas de disco rotatorio.
2. Usando floculos en suspensión. Un ejemplo de estos, son los lodos activados o cultivos fluidizados

Aquí se busca transformar, por la acción de los microorganismos, la materia orgánica soluble e insoluble, dando lugar a la formación de floculos o coágulos. Una vez logrado esto, se procede a su separación por medios físicos como es el caso de la sedimentación. El sedimentador secundario, existe para esa finalidad y constituye parte del tratamiento biológico secundario.

Procesos aerobios convencionales.

En términos generales, los procesos de descomposición de la materia orgánica efectuada por microorganismos puede ser de dos tipos: aerobio y anaerobio. En el primer caso, se llevan a cabo reacciones oxidativas de materiales tales como carbohidratos, proteínas y compuestos orgánicos azufrados o fosfatados, hasta productos inorgánicos estables como CO_2 , NH_3 , NO_3 , NO_2 , SO_4 y fosfatos inorgánicos, mediante una secuencia ordenada de reacciones enzimáticas que comprenden en primer lugar la hidrólisis de moléculas grandes (polisacáridos, aminoácidos, ácidos grasos), los cuales pueden pasar fácilmente a través de las membranas celulares de los microorganismos para ser metabolizados.

La segunda etapa de esta secuencia consiste en la transformación de tales productos en intermediarios de las rutas metabólicas que conducen a la degradación total (ácido piruvico, acético, ácido aceto glutárico, etc.) Finalmente, la incorporación de tales sustancias al ciclo de Krebs da lugar a la transformación de los compuestos orgánicos en CO_2 , H_2O y energía.

Los procesos aerobios más usados o utilizados para el tratamiento de efluentes domésticos, industriales o mixtos son los de microorganismos floculados (lodos activados, lagunas extendidas) y los de biopelícula o película biológica activa (filtros, percoladores, biodiscos, lecho fluidizado, etc.) encontrando procesos completamente mezclados (como los primeros) son relativamente más tolerantes a sustancias tóxicas. El impacto de las sustancias tóxicas se reduce parcialmente por la disolución en los tanques de reacción y se distribuye entre una mayor cantidad de biomasa. Las sustancias no biodegradables pueden ser absorbidas en los lodos biológicos, donde se encuentran e interfieren con el metabolismo celular.

Uno de los problemas relacionados con los sistemas aereados es la dispersión de los compuestos volátiles. Es un mecanismo de remoción de contaminantes que pueden presentar problemas en la salud de los trabajadores y de la propia planta de tratamiento debido al aire contaminado y los núcleos urbanos a los que pueda transportar el viento.

La limitante para controlar las emisiones, es la captura de los compuestos en el aire, por lo cual se sugiere el uso de reactores cerrados a los que se inyecta oxígeno puro en vez de los sistemas tradicionales de aereación y se reciclan los gases generados.

Procesos anaerobios.

En el caso de los procesos anaerobios, la ausencia de oxígeno encauza la transformación de la materia orgánica hacia la formación de productos tales como CO_2 , CH_4 , H_2S , NH_3 y H_2O . El mecanismo bioquímico mediante el cual se lleva a cabo la degradación anaerobia involucra también una primera etapa de hidrólisis enzimática de los materiales complejos, y en segundo lugar, la descomposición de carbohidratos, lípidos y compuestos nitrogenados que a su vez es efectuada por dos tipos de microorganismos: las bacterias productoras de ácido, que transforman tales sustancias en ácidos, alcoholes y aldehídos; y las bacterias metanogénicas que usan los productos anteriores para formar CO_2 , CH_4 .

Los procesos anaerobios, también floculados o de biopelícula, más conocidos son los reactores empacados (llamados erróneamente filtros), las lagunas y los reactores de techos de los lodos.

Estos sistemas presentan algunas ventajas sobre los sistemas aerobios, por ejemplo, se reduce el problema de emisión a la atmósfera de compuestos volátiles ya que son herméticos para impedir la entrada de aire, se reduce la producción de microorganismos (conocidos como lodos) ya que de la materia orgánica metabolizada solamente se genera aproximadamente un 10 % de microorganismos en contraposición a los sistemas aerobios en los que casi el 50 % se convierte en biomasa microbiana, además en el metano producido se puede utilizar como combustible una vez eliminados los gases que lo acompañan.

Las lagunas anaerobias o facultativas no presentan problemas de operación y tienen un menor costo en capital, operación y mantenimiento y, en cambio, los problemas de operación que se presentan en los reactores anaerobios, son comparables con los de un sistema anaerobio de lodos activados.

Adaptación de microorganismos.

La biodegradación se define como la actividad de un sistema biológico sobre algunas sustancias y cuya consecuencia es la modificación total o parcial de su estructura.

Los organismos individuales no solo se adaptan al medio ambiente físico, sino que su acción en los ecosistemas, adaptan también el medio a sus necesidades biológicas.

En las actividades de los microorganismos el medio abiótico (los factores físicos), controla la actividad, y la distribución en la naturaleza; este conocimiento permite idear medios para tratar de gobernar las actividades microbianas, así como destruir los organismos indeseables. No todos los organismos responden igualmente a un cierto ambiente; de hecho, determinada condición ambiental puede ser muy dañina para un grupo y benéfico para otra población.

Los microbios no siempre pueden soportar algunas condiciones adversas bajo las cuales no pueden crecer, y por consiguiente, es necesario distinguir entre los efectos

de estas condiciones sobre la viabilidad de los organismos y su acción sobre el crecimiento, la diferenciación y la reproducción.

Cada especie de microorganismo prospera en su ambiente, sólo mientras las condiciones son favorables para su crecimiento y supervivencia. Tan pronto como un cambio físico o químico, como el agotamiento de nutrientes o cambios en la temperatura o el pH hace las condiciones de crecimiento más favorables para otra especie, el organismo que estaba bien adaptado a las condiciones ambientales prevalentes anteriormente cede su lugar a un organismo mejor adaptado a las nuevas condiciones, por lo que los factores ambientales tienen un efecto selectivo sobre las poblaciones microbianas.

Los microorganismos tienen una amplia distribución taxónomica, pues comprenden a los protozoarios, algas, hongos, bacterias y virus.

La biodegradación de un compuesto se lleva a cabo cuando existe, por una parte, un sistema biológico que posee las características enzimáticas y de adaptabilidad a los factores ambientales para utilizar el sustrato en cuestión; a su vez, debe reunir algunas cualidades que le permiten servir como fuente de carbono y/o energía para el organismo, lo que implica que posea una estructura adecuada, preferentemente soluble en el medio de cultivo y que no sea tóxico para el sistema involucrado. Por otra parte, los factores que conforman el medio ambiente (pH, oxígeno, temperatura, nutrientes, inductores, etc.), deben ser propicios para la actividad degradativa. Véase tabla 32

Los microorganismos, en general, tienen una remarcada capacidad para adaptarse a una multitud de ecosistemas y en condiciones ambientales que les permita metabolizar y degradar una gran cantidad de compuestos orgánicos. Con seguridad se afirma que cualquier molécula orgánica sintetizada biológicamente puede ser destruida por una o varias especies de organismos, y por otra parte, una sola especie de organismo es capaz de descomponer un gran número de moléculas no relacionadas estructuralmente.

El hecho de que algunos compuestos naturales persistan y no sean degradados bajo ciertas condiciones puede deberse a que falta alguno de los elementos necesarios para la biodegradación, esto es, la presencia de un organismo adecuado o las condiciones ambientales locales requeridas para su actividad. A las sustancias que persisten en el medio ambiente por extensos periodos se les conoce como moléculas recalcitrantes o no biodegradables.

Además de las transformaciones bioquímicas por microorganismos, en la naturaleza se efectúan una serie de reacciones fotoquímicas y no enzimáticas que indudablemente ocasionan cambios en muchas sustancias presentes en el suelo y el agua. Sin embargo, en contraste con las relaciones degradativas catalizadas por comunidades microbianas en presencia de oxígeno (que normalmente transforma los sustratos hasta blóxido de carbono y agua), los procesos no microbiológicos raramente llevan un material hasta su completa mineralización.

Tabla 32 Características de algunos microorganismos.

MICROORGANISMO	TAMANO	REQUERIMIENTO DE O ₂	ORGANIZACION CELULAR	LOCOMOCIÓN
Algas	5 a 10 um	Aerobios fotosintéticos	unicelulares - pluricelulares	La mayoría no móviles pero algunas con flagelos
Bacterias	1.5 a 2.5 um	Aerobias, anaerobias facultativas	Procariontes - unicelulares	Natación, flagelos, movimientos espasmódicos.
Hongos	5 a 30 um	Aerobias, anaerobias facultativas	Unicelulares y filamentosos	No móviles
Protozoarios	1 um 600 um 2 mm	Aerobios Anaerobios Facultativos	Unicelulares	Flagelo Pseudopodo Cilios
Rotíferos	3 mm	Aerobios facultativos	Melazoarios	Natación movimientos reptantes
Nematodos	1 mm a 5 cm	Aerobias, anaerobias facultativas	Melazoarios	Contracciones musculares

De estas consideraciones se desprende el enorme potencial que poseen los microorganismos para evitar la acumulación de materiales indeseables en el medio ambiente por lo que los estudios de biodegradabilidad deben ser considerados como de gran importancia sanitaria para la radicación de casi todo tipo de desechos, ya sea que se trate de sustancias de origen natural o de compuestos orgánicos sintéticos que pueden ser parcial o totalmente degradados.

El grado de eficiencia de los procesos degradativos resumidos se encuentra íntimamente relacionado con los factores ambientales que rodean al sistema microorganismo - desecho, de los cuales los más importantes por mencionar son pH, temperatura, tamaño de las partículas, ausencia de compuestos tóxicos, presencia de nutrientes, etc.

En el caso particular de que los materiales por degradar sean desechos orgánicos sintéticos, estos, como ya se menciona son compuestos que no han permitido una evolución de los sistemas microbianos para poder degradarlos, sin embargo, cuando un sistema microbiano se enfrenta a un desecho de este tipo, cuando lo degrada lo hace en base a similitudes de tipo estructural que el desecho sintético tiene con compuestos orgánicos naturales.

En los casos en que los desechos no sean biodegradables, son varios los factores que pueden causar su no - biodegradación, teniendo además de los factores ambientales ya mencionados lo siguiente:

1. Materiales que no pueden hacerse como suministro de carbono y energía (licnina, detergentes).
2. Toxicidad (lacguicidas).
3. Insolubilidad (plásticos).
4. Grado de polimerización (plásticos).
5. Cadenas ramificadas (hidrocarburos, detergentes).

6. Alto número de sustituyentes (plaguicidas).
7. Anillos condensados (hidrocarburos).

En el caso de encontrar a un compuesto que no se degrade en condiciones normales, es importante explorar la presencia de algunos de los factores estructurales señalados y poder discernir es el sustrato del sistema microbiano la causa de la no biodegradación.

Cuando se encuentra que el sistema microbiano es el que falla, es importante explorar los siguientes factores:

1. Existencia de microorganismo adecuado.
2. Permeabilidad del microorganismo.
3. Existencia del sistema enzimático adecuado.
4. Sistemas enzimáticos extra celulares producidos por diferentes poblaciones.
5. Tolerancia a factores ambientales.
6. Existencia de inductores adecuados.
7. Necesidad de varios microorganismos.

Es importante señalar que el concepto de biodegradabilidad es relativo, esto es, lo que es degradable bajo ciertas condiciones puede no serlo bajo otras y viceversa, razón por la cual es importante agotar todas las posibilidades mencionadas, antes de considerar no biodegradable a un compuesto.

Finalmente, debe mencionarse que el éxito de un sistema de tratamiento depende del hecho de que dicho sistema sea capaz de reproducir las condiciones bioquímicas en las que un compuesto es degradado.

Proceso de Lodos Activados.

El proceso de los lodos activados es el proceso biológico de más amplio uso para el tratamiento de las aguas residuales, domésticas e industriales. Han surgido variaciones del sistema básico durante las últimas tres décadas, las cuales confieren al tratamiento una versatilidad que le permite adaptarse a un amplio campo de circunstancias operacionales.

El principio básico del proceso consiste en poner en contacto a las aguas residuales con una población microbiana mixta en una suspensión floculenta con un sistema aerado y agitado. La materia en suspensión y coloidal se eliminan rápidamente de las aguas residuales por adsorción y aglomeración en los flocúlos de lodos activados. Esta materia y los nutrientes disueltos se descomponen luego, más lentamente por metabolismo microbiano, en el proceso de estabilización. Parte del sustrato o material nutriente se oxida a sustancias simples, como el dióxido de carbono, en el proceso conocido como mineralización. Los microorganismos que alcanzan el fin de su ciclo vital se descomponen de la misma manera en un proceso llamado respiración endógena. El proceso de oxidación suministra energía necesaria para los procesos de adsorción y asimilación. Una vez que se alcanza el grado de tratamiento que se desea, los flocúlos de lodos activados se separan del agua por sedimentación en un tanque por separado, conocido como clarificador secundario. El sobrenadante del clarificador

es agua residual tratada y debe estar virtualmente libre de lodos. La mayor parte de los lodos separados por sedimentación regresa a la etapa de aereación para mantener una concentración de lodos adecuada para un tratamiento efectivo. El exeso de lodos es purgado del clarificador y enviado a un tratamiento posterior a su disposición final.

El proposito principal del proceso de lodos activados es alcanzar el grado de calidad del agua requerido, el conocimiento de los procesos que ocurren en el tanque de aereación permite efectuar el tratamiento del agua mediante la selección de valores adecuados de los parámetros controlables del proceso.

Para lograr una clara comprensión de los diferentes procedimientos aplicables al tratamiento, es necesario conocer de antemano ciertas características cualitativas (de que se componen) y cuantitativas (cuanto contienen), tanto en las aguas residuales como en aquellas en las que estas se vierten.

El conocimiento de la naturaleza de las características físicas, químicas y biológicas de las aguas residuales es esencial en el diseño y operación de los sistemas de captación, tratamiento y disposición.

En el proceso de lodos activados, una mezcla de licor consistente de microorganismos suspendidos, oxígeno disuelto, compuestos orgánicos, y nutrientes es continuamente mezclada o aereada (ver figura 29). La materia orgánica suspendida se pone en contacto con el oxígeno, nutrientes, y materia orgánica para degradar los compuestos orgánicos a bióxido de carbono y agua (idealmente) lo que permanece en el licor. El tanque de aereación donde la degradación ocurre, es seguido por un clarificador o etapa de sedimentación, donde la materia microbiana suspendida es removida de la corriente de masa residual. El agua tratada es después descargada, o posteriormente tratada en un tratamiento terciario como adsorción con carbon activado para remover compuestos contaminantes orgánicos e inorgánicos residuales.

Una porción de la biomasa sedimentada, o lodo es reciclada hacia el tanque de aereación, mientras el resto es evacuada o purgada. Frecuentemente el lodo que se está evacuando es tratado después para estabilizar la materia biológica (llamada digestión de lodo) o para reducir el volumen del lodo (llamada engrosamiento de lodo). En algunos casos, la oxidación con aire húmedo o la incineración puede ser usada para disponer del lodo.

En la digestión de lodo, que puede ser aerobia o anaerobia, el lodo es alojado y asimismo degradado en un reactor con mezclado (aerobio) o sin mezclado (anaeróbico). Los microorganismos consumen su propia biomasa, cuando pocas fuentes de alimento están disponibles; y así poder reducir la cantidad de material a ser evacuado y estabilizado de desperdicio y la actividad de los microorganismos ambientes disminuye.

El engrosamiento de lodos involucra remover el agua del lodo para concentrar la biomasa, esto se logra con filtros belt o filtros prensa.

La práctica de recobramiento y recirculación de una porción de biomasa activa involucra una biodegradación cinética en el tanque de aereación, Como los organismos son

reciclados, a través del sistema, la edad del conjunto de lodo, o el tiempo de retención de lodo incrementa

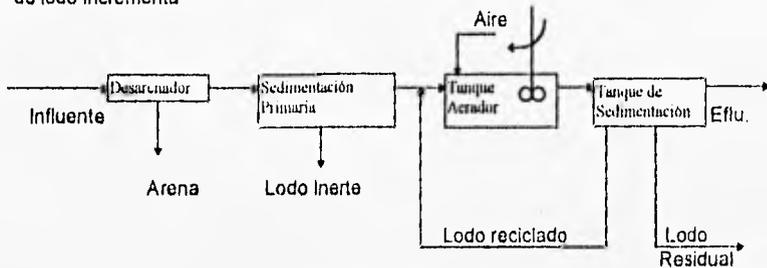


Figura 29 Proceso de Lodos Activados

Los parámetros que se utilizan comúnmente para caracterizar las aguas residuales aparecen en las tablas 1, 2 y 3 del capítulo 1 de este trabajo de tesis.

Con estos parámetros se puede definir la calidad del agua desde el punto de vista de su contaminación, los métodos analíticos para determinar estos parámetros se encuentran explicados detalladamente en la referencia Standar Methods for Examination of Water and Wastewater y algunas otras.

Las actividades del muestreo constituyen un apoyo muy importante en el curso del proceso de tratamiento de aguas residuales, debido a que su correcta ejecución depende en gran medida la confiabilidad de los resultados de laboratorio. El objetivo del muestreo es obtener una muestra representativa de una fase del proceso de tratamiento para que apartir de los resultados del análisis se pueda tomar decisiones que permitan un adecuado control operativo; una muestra no representativa puede conducir a errores en los resultados del análisis cuya interpretación puede ocasionar confusión durante la operación.

Las actividades relacionadas con el muestreo constituyen un proceso integrado por tres etapas:

1. Toma de Muestra
2. Preservación
3. Translado

La toma de muestra debe realizarse en los puntos más importantes de la planta, como son:

1. Influyente
2. Efluente del sedimentador primario
3. Tanque de aereación.
4. Líneas de recirculación de lodos.
5. Efluente del clarificador secundario.
6. Tanque de contacto.
7. Efluente.

Las muestras deben ser representativas de las condiciones que existan en el punto y hora del muestreo, y tener el volumen suficiente para efectuar los análisis de laboratorio.

Las muestras pueden ser simples o compuestas; una muestra simple es una muestra individual tomada en un periodo corto y en forma tal que el tiempo empleado en su extracción sea el transcurrido para completar el volumen necesario.

Una muestra simple representa las condiciones en el momento del muestreo, este tipo de muestra se emplea comunmente para las siguientes determinaciones: pH, temperatura, cloro residual libre y total, oxígeno disuelto, grasas y aceites, coliformes totales, fecales y en general cuando se requiere de la caracterización de un determinado punto de muestreo. Este tipo de muestra es útil cuando:

- EL caudal no sufre variaciones significativas ni en la calidad ni en la cantidad a lo largo del día.
- Existen descargas instantaneas.
- Se tienen descargas intermitentes.

Los puntos en los que se sugiere tomar muestras simples en la planta de tratamiento son:

- Influyente
- Efluente de cada unidad de sedimentación primaria
- Líneas de recirculación de lodos
- Efluente de tanque de aereación
- Efluente en cada unidad de sedimentación secundaria
- Tanque de contacto de cloro
- Efluente

Una muestra compuesta es la que resulta del mezclado de varias muestras simples; existen muestras compuestas proporcionales al volumen y al gasto.

Para la preparación de la muestra compuesta, se determina el volumen final de la misma base a los análisis de laboratorio a efectuar, se establece el número de muestras a tomar (ya sea fijando un número determinando de puntos, ó fijando el intervalo de tiempo de cada muestra), se establece si el gasto es constante o con caudal variable, y se aplica la fórmula según sea el caso para determinar el volumen de cada muestra.

En el caso de muestreo con gasto constante, se aplica la ecuación:

$$\text{Volumen de Cada Muestra} = \frac{\text{Volumen final de la muestra Compuesta}}{\text{Numero de Muestras}} \quad [11]$$

En el caso de muestras compuestas con caudal variable, se establece el número de muestras fijando el intervalo de tiempo entre cada toma, el gasto promedio se calcula mediante la siguiente ecuación:

$$\text{Gasto promedio} = \frac{\text{Suma de los Gastos en cada caso}}{\text{Numero de pruebas realizadas}} \quad [12]$$

$$\text{Volumen de Cada Muestra} = \frac{(Q_{\text{Instantaneo}}) + (V_{\text{Final de muestras}})}{\text{Numero de Muestras}} \quad [13]$$

Las muestras compuestas en una planta de tratamiento se tomarán cuando así se requiera o en casos especiales en los siguientes puntos:

- Influyente
- Efluente del sedimentador primario
- Efluente de tanque de aeración
- Efluente de sedimentación secundaria

Al efectuar el muestreo es extremadamente importante que ninguno de los componentes del agua se pierda o se agregue durante la colección y manejo de la muestra; por esta razón, tanto los equipos de muestreo como los recipientes usados para su manejo deben estar fabricados con materiales inertes como el vidrio o el polietileno.

Los parámetros de operación y control de los procesos de tratamiento de las aguas residuales teniendo en consideración que cada operador debe utilizar datos diarios de operación para establecer las tendencias y los cambios sobre los cuales deben basarse las decisiones de operación de cada planta de tratamiento son los siguientes:

La carga superficial (Cs).- Parámetro de diseño para tanques de sedimentación se expresa mediante el caudal (m³/día) aplicado por unidad de área (m²) del sedimentador su importancia deriva del hecho que afecta directamente las eficiencias de remoción de sólidos sedimentables y de la DBO.

Se calcula mediante la siguiente fórmula:

$$Cs = \frac{Q_{\text{Inf}}}{A} * 86.4 \quad [14]$$

Donde :

Cs = Carga Superficial (m³ / m² día)

Q Inf = Flujo del Influyente L/S

A = Área del sedimentador primario m²

86.4 = Factor para convertir de L/S a m³ /día

Carga en vertedero (CV).- Se define como el caudal que pasa por unidad de longitud de vertederos sus unidades son m^3/m día. Su determinación permite evaluar el funcionamiento de los vertederos.

Se calcula con la siguiente fórmula:

$$CV = \frac{Q_{Inf}}{L} * 86.4 \quad [15]$$

Donde :

CV = Carga de Vertedero (m^3 / m Día)

Q Inf = Flujo del Influyente L/S

L = Longitud total de los vertederos en m

86.4 = Factor para convertir de L/S a m^3 /día

Tiempo de Retención Hidráulico (TRH).- Se define como el tiempo promedio (en horas) que permanece un líquido en un tanque, teniendo un desplazamiento por su caudal.

Se calcula por medio de la siguiente fórmula:

$$TRH = \frac{V}{Q_{Inf} * 3.6} \quad [16]$$

Donde:

TRH = Tiempo de Retención Hidráulica

Q Inf = Flujo o Caudal del Influyente en L/s.

V = Volumen del tanque correspondiente en m^3

3.6 = Factor de conversión para transformar el caudal del influente de L/s a m^3 /hr.

Relación alimento a microorganismo (F/M).- Es uno de los parámetros más importantes ya que representa la relación existente entre la cantidad de materia orgánica presente en el agua residual, a la que se considera como sustrato o alimento y la concentración de microorganismos activos en el tanque de aeración. Con este parámetro se garantiza que el proceso reciba una carga orgánica tal que los microorganismos puedan utilizar la mayor parte del alimento suministrado ya que si no se tiene la relación adecuada de alimento a microorganismo se producen trastornos en el proceso y por consiguiente un descenso en la calidad de las aguas renovadas. En el sistema experto éste es uno de los parámetros importantes calculados dentro de él dada la relevancia del mismo.

Nota.- El programa usa unidades mg/l, Lb, ft, hr, MGD (mega galones día: 1 MGD = $0.044 m^3 / s$), G (galones).

Se calcula mediante la siguiente fórmula:

$$F / M = \frac{DBO \cdot Q_{Inf} \cdot 86.4}{MLVSS \cdot VTA} \quad [17]$$

Donde:

F/M = Relación Alimento a Microorganismo en gr de DBO / gr de Sólidos en lodos día

DBO = Demanda Bioquímica de Oxígeno de tanque sedimentador primario en gr/m^3

Q_{Inf} = Flujo o Caudal del influente en L/s

MLVSS = Mezcla de licor de sólidos suspendidos volátiles en gr/m^3

VTA = Volumen del tanque de aireación en m^3

86.4 Factor de conversión para transformar el caudal del influente de L/s a m^3 /día.

Tiempo Medio de Retención Celular (MCRT).- Expresa el tiempo promedio en días que los microorganismos pueden permanecer en el proceso de lodos activados.

$$MCRT = \frac{MLVSS \cdot VTA}{Q_{purga} \cdot RASs \cdot 86.4} \quad [18]$$

Donde:

MCRT = Tiempo Medio de Retención Celular en Días

MLVSS = Mezcla de licor de sólidos suspendidos volátiles en mg/l

VTA = Volumen del tanque de aireación en m^3

Q_{purga} = Flujo o Caudal de purga de lodos de recirculación en L/s

RASs = Recirculación de sólidos suspendidos volátiles en mg/l

86.4 Factor de conversión para transformar el caudal del influente de L/s a m^3 /día.

El RASs son los sólidos suspendidos volátiles en la recirculación. Son aquellos sólidos en el caudal de recirculación que al ser sometidos a un proceso de calcinación, se volatilizan. Se utiliza como una medida indirecta de la cantidad de microorganismos que se recirculan al tanque de aeración. Este parámetro se obtiene en laboratorio de planta.

Índice Volumétrico de Lodos (IVL).- Se define como volumen en mililitros, ocupado por un grama de sólidos, es deseable que el lodo sedimente rápidamente, dejando un líquido sobrenadante claro cuando se tiene un índice volumétrico alto se tiene un lodo de mala calidad.

$$IVL = \frac{VSS_t}{MLSS} \cdot 1000 \quad [19]$$

Donde:

IVL = Índice Volumétrico de Lodos ml/gr

VSS_t = Volumen de sólidos sedimentables después de t minutos (30 min)

MLSS = Mezcla de licor de sólidos suspendidos totales mg/l

1000 = Factor de conversión para pasar de mg/l a gr/l

La MLVSS son aquellos sólidos que están en suspensión en el licor mezclado, que son perceptibles a simple y que al ser sometidos a un proceso de calcinación, se volatilizan. Se utilizan como una medida indirecta de la cantidad de microorganismos presentes en el tanque de aeración. Este parámetro se obtiene en laboratorio.

Los sólidos sedimentables son la porción de los sólidos suspendidos cuyo tamaño y peso es suficiente para que se sedimenten en un periodo determinado. Se obtiene en el laboratorio de planta.

Para tener un control del proceso se debe tener un ambiente adecuado para los microorganismos, las variables para un tratamiento efectivo y que requieren un control son:

1. Alimento adecuado

Es el factor más importante ya que debe existir un balance entre el alimento o sustrato y la cantidad de microorganismos esta variable la podemos controlar con el parámetro alimento microorganismo (F/M), esta relación específica debe estar entre 0.3 y 0.6 gr DBO/gr de Sólidos en todos los días

2. Oxígeno disuelto apropiado

En la práctica se requiere incrementar la cantidad de oxígeno disuelto en proporción con la cantidad, concentración e incremento de desechos. La cantidad de oxígeno disuelto que debe existir en todo momento y en cualquier lugar del tanque de aeración es una concentración de por lo menos de 1 mg/L de oxígeno normalmente para garantizar que este nivel se mantiene a una concentración mínima de 2 mg/L de oxígeno disuelto en el efluente del tanque de aeración.

3. Temperatura del agua residual

Con temperaturas bajas las tasas de reacción son menores y por lo tanto se requiere de un mayor tiempo de retención y es recomendable a temperaturas bajas una concentración alta de sólidos suspendidos en mezcla de licor.

En temperaturas bajas la rapidez con que se disuelve el oxígeno es menor por lo que necesita una mayor aeración.

La sedimentación de los lodos también es más lenta porque al disminuir la temperatura el agua se vuelve más densa, la solución a este problema sería agregar un agente floculante como sulfato de aluminio.

4. Eliminación de desechos Tóxicos o no biodegradables.

Debe prevenirse la entrada de sustancias tóxicas como son: *plomo, zinc, cromo, cadmio, níquel, mercurio, cianuros las descargas muy alcalinas o muy ácidas, los plaguicidas y fenoles*. Si no se logra prevenir la entrada de estas sustancias al proceso, los microorganismos morirán o se inhibirá su actividad severamente.

Si todos los elementos del ambiente de lodos activados son controlados para producir y mantener los organismos eficientes y en equilibrio, se puede lograr que el sistema produzca un efluente bien tratado.

Debido a las características individuales de cada agua residual, cada operador deberá mantener la planta en las condiciones ambientales en que trabaje mejor. La relación F/M adecuada, la concentración de sólidos suspendidos, el gasto de recirculación de lodos solo pueden ser determinados empíricamente durante la operación.

La tabla 33 muestra un resumen de los procesos biológicos para el tratamiento de aguas residuales.

Tabla 33 Resumen de los procesos biológicos para tratamiento de aguas residuales.

PROCESO	APLICACIONES	VENTAJAS	DESVENTAJAS
Lodos Activados	Bajas Concentraciones de orgánicos y algunos inorgánicos	Remoción de constituyentes disueltos Bajo mantenimiento Relativamente seguro Bajos costos de capital Relativamente fácil de operar	Emisiones volátiles Evacua lodo residual Decierto modo altos costos de energía Suceptible a choques de cargas y toxicidad Suceptible a los cambios climáticos
Lagunas aereadas Balsas de estabilización	Bajas Concentraciones de orgánicos y algunos inorgánicos	Remoción de constituyentes disueltos Bajo mantenimiento Relativamente seguro Bajos costos de capital Fácil de operar No muy frecuente lodo residual	Emisiones volátiles Suceptible a choques de cargas y toxicidad Suceptible a los cambios climáticos Altos requerimientos de tierra Sin control operacional
Filtros percoladores Reactores de película fija	Bajas Concentraciones de orgánicos y algunos inorgánicos	Remoción de constituyentes disueltos Bajo mantenimiento Relativamente seguro Relativamente poco lodo residual	Emisiones volátiles Suceptible a choques de cargas y toxicidad Suceptible a los cambios climáticos Relativamente altos los costos de capital y operación Suceptible de obstruirse
Degradación anaerobica	Bajas Concentraciones de orgánicos, orgánicos clorinados e inorgánicos	Remoción de constituyentes disueltos Tratamiento a residuos clorinados Produce metano Producción de lodo reducida	Suceptible a choques de cargas y toxicidad Suceptible a los cambios climáticos Relativamente altos los costos de capital y operación Altos costos de energía si el metano no es recuperado.

TRATAMIENTO QUÍMICO.

El tratamiento químico de aguas residuales consiste en aquellos procesos en los cuales se produce un cambio por medio de reacciones químicas, estos procesos se conocen como procesos unitarios químicos.

En el campo del tratamiento de aguas residuales, los procesos unitarios químicos son utilizados usualmente en conjunción con las operaciones unitarias físicas y los procesos unitarios biológicos para cumplir con los objetivos de tratamiento.

Al considerar la aplicación de los procesos unitarios químicos, es importante recordar que una de las desventajas inherentes asociadas a estos procesos, en comparación con las operaciones unitarias físicas, es que son procesos aditivos. En la mayoría de los casos se agrega algo más que agua residual para lograr la remoción de algo más. Como resultado, usualmente hay un incremento en los constituyentes disueltos del agua residual.

Los procesos unitarios químicos más comunes son la precipitación, la transferencia de gases, la desinfección con cloro y bióxido de cloro, la decoloración, la desinfección y la absorción.

Los procesos químicos son usados para la remoción de sólidos suspendidos y coloidales por precipitación, desinfección del agua residual y control de olores. Se describen a continuación algunos procesos químicos más comunes:

Precipitación química.

La precipitación química en el tratamiento de aguas residuales involucra la adición de sustancias químicas para alterar el estado físico de los sólidos disueltos y suspendidos, y así, facilitar su remoción por sedimentación.

En el pasado, la precipitación química se usó para mejorar el grado de remoción de sólidos suspendidos y DBO donde hubiera variaciones temporales en la concentración de las aguas residuales; donde se requería un grado intermedio de tratamiento, y como ayuda en el proceso de sedimentación.

Actualmente se usa como medio de mejorar el desempeño de la sedimentación primaria como un paso básico en el tratamiento físico - químico independientemente de las aguas residuales y para la remoción de fósforo.

Las sustancias químicas que se agregan a las aguas residuales interactúan con las sustancias que están normalmente presentes en las aguas residuales.

Las sustancias a agregar pueden ser sales de hierro, sales de aluminio y cal u óxido de calcio.

El cloruro férrico o el sulfato férrico puede usarse para la remoción del fósforo y de los sólidos suspendidos. La experiencia ha demostrado que una eficiente remoción de fósforo requiere que la cantidad estequiométrica de hierro (1.8 mg /litro de Fe por mg /litro de P) sea suplementado cuando menos por 10 mg/ litro más de Fe para la formación del hidróxido. Típicamente, se necesitan de 15 a 30 mg de Fe para proporcionar reducciones de fósforo de 85 a 90 %. Cuando se considere el Fe para la coagulación de desechos crudos, debe recordarse que en un ambiente anaeróbico, de desechos crudos, como puede encontrarse en una columna de carbón de flujo descendente, puede formarse sulfuro ferroso. Evidentemente, este precipitado negro no es deseable en el efluente final.

Las sales de sulfato de aluminio (alúmina), y aluminato de sodio, se usan para coagular las aguas residuales generalmente, la alúmina es un coagulante más efectivo que el aluminato de sodio.

Las desventajas de sales de hierro y aluminio son las siguientes:

- Ambos forman floculos gelatinosos de hidróxidos, los cuales son difíciles de deshidratar en muchos casos.
- Ninguna técnica es disponible para recuperación y el reuso del coagulante cuando se requiere la remoción del fósforo.
- Grandes cantidades de iones (cloruros o sulfatos) se agregan a las aguas residuales

La cal se ha empleado exitosamente para la coagulación de aguas residuales y para la remoción de fósforo. La cantidad de cal es independiente de la cantidad de fósforo presente, es una función de la alcalinidad y la dureza del agua residual.

El grado de clarificación obtenido cuando se agregan sustancias químicas a las aguas residuales sin tratamiento depende de la cantidad de sustancias agregadas y el cuidado con que el proceso sea monitoreado y controlado. Con la precipitación química es posible remover del 80 al 90 % de los sólidos suspendidos, del 70 al 80 % de la DBO y 80 a 90 % de las bacterias.

Transferencia de gases.

La transferencia de gas es la operación por la cual el gas se transfiere de una fase a otra, generalmente de la fase gaseosa a la líquida.

La transferencia de gases es una parte vital de los procesos de tratamiento de las aguas residuales. Por ejemplo, el funcionamiento de los procesos aerobios tales como fangos activados, filtros biológicos y digestión aerobia, dependen de la disponibilidad de cantidades suficientes de oxígeno. Debido a la baja solubilidad, la transferencia de este a través de la interfase aire - agua en la superficie, no es suficiente para satisfacer los requerimientos de oxígeno en los sistemas aerobios por lo que es necesario formar interfaces adicionales con lo que se logra transferir mayor cantidad de oxígeno.

El oxígeno puede suministrarse por medio de aire o de burbujas de oxígeno puro introducidas en el agua para crear la interfase gas - agua. En plantas de tratamiento la aereación se realiza de diversas formas, una de ellas es suministrando burbujas de aire en el líquido a profundidades variables, de 3 a 30 m. Existen diversos tipos de difusores: placa porosa, tuberías con perforaciones, difusores de plástico o metálicos de diversas configuraciones. Se utilizan también mecanismos hidráulicos para introducir cantidades grandes de oxígeno en el líquido, los aereadores mecánicos pueden ser turbinas de bejas o altas velocidades o aereadoras flotantes que operan en la superficie parcialmente sumergidos.

Un proceso para eliminar compuestos de nitrógeno consiste en la conversión del nitrógeno en amoníaco y en transferir este último del agua al aire.

Desinfección

La desinfección se refiere a la destrucción selectiva de los microorganismos patógenos.

La desinfección de aguas involucra un tratamiento especializado particularmente en la destrucción o inactivación de bacterias de origen intestinal.

En el campo del tratamiento de las aguas residuales, la desinfección suele realizarse mediante: Agentes químicos y físicos, medios mecánicos y radiación.

1. Agentes químicos.- Los requisitos que deben cumplir los desinfectantes químicos poseen una amplia y variada gama de características. Los agentes químicos como desinfectantes son: fenol, y compuestos fenólicos, alcoholes, yodo, cloro y sus compuestos, bromo, ozono, metales pesados, colorantes, jabones y detergentes, agua oxigenada y diversas álcalis y ácidos
Los desinfectantes más corrientes son los productos químicos oxidantes de los cuales el cloro es el más universalmente utilizado. El bromo y el yodo son, a veces, utilizados en piscinas, pero no en aguas residuales tratadas. El ozono es un desinfectante muy eficaz y aunque no deja ozono residual, su uso va en aumento.

Agentes físicos.- Los desinfectantes físicos más utilizados son la luz y el calor. El agua caliente a la temperatura de ebullición, por ejemplo, destruye las principales bacterias causantes de enfermedades y no formadoras de esporas. El calor se usa frecuentemente en la industria láctea y de bebidas pero no es un medio factible de aplicación de grandes cantidades de aguas residuales debido a su elevado costo. La luz solar es, asimismo, un buen desinfectante. En especial puede usarse radiación ultravioleta.

2. Medios mecánicos.- Las bacterias pueden también eliminarse por medios mecánicos durante el tratamiento de las aguas residuales, como son: Rejas gruesas y finas, tanques desarenadores, sedimentación simple, precipitación química, filtros percoladores, fangos activados y cloración de aguas residuales tratadas.
3. Radiación.- Los principales tipos de radiación son electromagnéticas, acústicas y de partículas. Los rayos gama se emiten a través de radio isótopos, tales como el cobalto 60.

Decloración

La decloración es la práctica de remover el cloro combinado residual total que existe después de la cloración.

El dióxido de azufre es el candidato a usar para la decloración donde se apliquen requerimientos en este sentido al efluente o cuando sea un paso de pulimiento después del proceso de cloración por punto de ruptura para la remoción del amoníaco. También se ha usado carbón activado.

El bióxido de azufre remueve exitosamente el cloro libre, la monocloramina, dicloramina, tricloruros nitrogenados y compuestos policlorados.

Los sistemas de decoloración con bióxido de azufre son similares a los sistemas de cloración y los equipos son intercambiables

La adsorción por carbón para la decoloración proporciona una completa remoción del cloro combinado y libre residual. El carbón activado granular es usado ya sea en una cama filtro por gravedad o presión.

El método de carbón activado granular en columna es muy efectivo y confiable para la decoloración, sin embargo es bastante caro. Se espera que la principal aplicación de carbón activado para la decoloración sea en situaciones donde se requieran altos niveles de remoción de compuestos orgánicos.

Desinfección con ozono.

El ozono es un agente oxidante con propiedades muy semejantes a las del cloro. La ozonación tiene como principal objetivo la desinfección del agua tratada, sin embargo, también se puede usar para el control de olor, y la remoción de compuestos orgánicos solubles por lo que algunas ocasiones se utiliza en vez de carbón activado.

Debido a la reacción del ozono, no persisten en el agua residuos químicos como es el caso de los residuos de cloro. La ozonación no produce sólidos disueltos y no es afectado por iones de amonio ni por el pH. Un beneficio adicional es la aereación del agua residual derivada del uso del ozono en el proceso de desinfección.

La planta de elaboración de ozono es elaborada, costosa y requiere ser operada por expertos.

Adsorción

La adsorción es un fenómeno físico en el cual se extrae ciertos constituyentes desde una fase para acumularse o concentrarse sobre la superficie de otra en base a fuerzas de atracción entre las partículas eléctricamente cargadas del soluto y el carbón o material adsorbente.

La adsorción por carbón activado es el método más frecuentemente usado. Se usa tanto en forma granular como en polvo. En forma granular el carbón activado se empaca en columnas por gravedad o presión y con flujo ascendente o descendente. Usado en forma de polvo se aplica a reactores de tratamiento biológico, químico y a filtros con carbón en suspensión.

Este proceso es muy efectivo en la remoción de algunos compuestos orgánicos así como de los contaminantes metálicos que forman complejos metálicos en el agua.

En condiciones normales, después del tratamiento con carbón activado la DBO varía de 2 a 7 mg por litro, y la DQO de 10 a 20 mg por litro.

TRATAMIENTOS FISICOQUIMICOS.

Los principales tratamiento fisicoquímicos para el tratamiento de efluentes son: ósmosis inversa, floculación y coagulación. Y los tratamientos químicos principales son: Intercambio iónico, oxidación química, electrofloculación y electrocoagulación.

Ósmosis inversa y presión osmótica.

El proceso de la ósmosis convencional transfiere disolventes a través de un separador semipermeable de la solución más diluida a la más concentrada, impulsado por la diferencia en la presión de vapor del disolvente sobre cada uno de los lados del separador. La presión osmótica Π , o magnitud de esas fuerzas de impulsión, esta dada por la ecuación:

$$\Pi = \frac{RT}{V} \ln \frac{P_1}{P_2} \quad [20]$$

donde:

R = constante de los gases

T = Temperatura absoluta

V = Volumen molar del solvente

P₁, P₂ = La presión de vapor del solvente en las soluciones sobre cada lado de la membrana.

Si se aplica una presión igual a Π a lo largo de la membrana opuesta al flujo normal de disolvente, la transferencia no debe tomar lugar. Si una presión más grande que Π es aplicada, el disolvente debe ser transferido de la solución más concentrada a la más diluida, resultando en ambas una concentración de soluto y purificación del disolvente.

El flujo del disolvente diluido J (frecuentemente expresado en galones/ft² día) está dado por:

$$J = K (\Delta P - \Pi) \quad [21]$$

donde:

ΔP = La presión aplicada.

K = Constante del sistema membrana - solvente

Como puede observarse de esta ecuación la rapidez flujo agua - producto decrece con el incremento de salinidad (aumenta la presión osmótica) de la solución de alimentación. desde luego, las dificultades (y costo) de recuperación del agua limpia también se incrementan con el aumento de salinidad de la corriente de alimentación.

El diseño de los módulos conteniendo las membranas de ósmosis inversa es de vital importancia para la eficiencia de operación del proceso. Como el soluto es rechazado por las membranas, este se concentra en la superficie de la membrana, con lo cual resulta una situación conocida como "polarización por concentración" donde la concentración en la superficie de la membrana es muchas veces más alta que en el volumen de la solución de alimentación. De aquí que la fuerza impulsora de la ósmosis inversa para el transporte del agua ($\Delta P - \Pi$) decrece con el incremento de concentración, la polarización puede tener un efecto muy perjudicial sobre el flujo de

agua. Por lo tanto, la potencia de bombeo debe incrementarse para compensar esta presión osmótica efectiva mayor.

La membrana que más se utiliza es la película de acetato de celulosa modificado, preparada según el proceso de Loeb - Sourigan. Para este tipo de membranas se han acumulado una gran cantidad de datos sobre el rechazo del soluto. Sin embargo, apenas se han desarrollado métodos para predecir cuantitativamente el rechazo del soluto, particularmente en los sistemas de varios componentes.

Se ha observado varias tendencias en los resultados experimentales publicados:

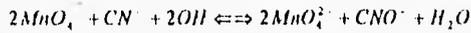
1. Los iones multivalentes se rechazan más eficazmente que los iones univalentes
2. Las sustancias no disociadas o parcialmente disociadas apenas son rechazadas.
3. Los ácidos y bases se rechazan menos que sus sales correspondientes.
4. Los co-iones influyen sobre el rechazo de un ion particular (ejemplo el sodio rechaza mejor en presencia del ion sulfato que el cloruro).
5. Las moléculas solubles en agua y de peso molecular bajo generalmente apenas son rechazadas
6. Los ácidos orgánicos no disociados y de bajo peso molecular apenas son rechazados, mientras que sus sales correspondientes no lo son.
7. Las trazas de iones univalentes apenas son rechazados.

Se han efectuado muchos estudios sobre el rechazo de disoluciones complejas de moléculas orgánicas. En las aguas residuales de industrias conserveras, se han obtenido rechazos de proteína del 98-99%. El rechazo de los sólidos del jugo de tomate ha alcanzado el 100%. Otros estudios realizados sobre concentraciones de jugo de fruta y suero de la leche indicaron un buen rechazo para los solutos orgánicos. El rechazo de los compuestos orgánicos en pastas de industrias papeleras y aguas residuales sanitarias ha sido excelente.

Las membranas de ósmosis inversa remueven un alto porcentaje de casi todos los iones inorgánicos, turbidez, material orgánico, bacterias y virus presentes en el agua residual municipal. Los sólidos disueltos pueden ser fácilmente reducidos a 50-100 mg/l en una etapa. La potencia requerida para sistemas comerciales de ósmosis inversa disponibles son cerca de 7-9 Kwh/1000 galón de agua producto. Esta potencia requerida no cambia apreciablemente sobre el rango de sólidos disueltos generalmente presentes en el agua residual municipal.

Oxidación química.

Las reacciones de oxidación-reducción (REDOX) son aquellas en que el estado de oxidación de al menos un reactivo es aumentado mientras que el otro es disminuido, para ilustrarlo se presenta la siguiente reacción.



En solución alcalina el estado de oxidación del ion cianuro es aumentado de menos uno a más uno (el cianuro es oxidado al combinarse con un átomo de oxígeno para formar cianato), el estado de oxidación del permanganato decrece de menos uno a menos dos (el permanganato es reducido a manganato). Este cambio en el estado de oxidación implica que un electrón fué transferido del ion cianuro al ion permanganato.

El flour es un poderoso agente oxidante. Los otros halógenos, incluyendo el cloro son también buenos oxidantes. Muchos iones oxidados, tales como BrO_3^- y NO_3^- son agentes oxidantes, sin embargo muy pocos son convenientes para usar sistemas de tratamiento en la tabla 34 se muestran los más utilizados.

Tabla 34 Agentes oxidantes

OXIDANTE	RESIDUO
Aire (oxígeno atmosférico)	Sulfatos SO_4^{2-} Sulfuros SO^{2-} Ion ferroso Fe^{2+} muy bajo
Cloro gaseoso	Sulfuros Mercaptanos
Cloro gaseoso y cáustico (cloración alcalina)	CN^- (cianuro)
Dióxido de cloro	<i>Ciamro</i> <i>Diquat</i> <i>Paraquat</i> } Pesticidas
Hipoclorito de sodio Hipoclorito de calcio	Cianuro, Plomo Cianuro
Permanganato de potasio	Cianuro Cloros orgánicos Trazas { - plomo - fenol - Diquat - Paraquat - Compuestos oragni cos sulfurados - formaldehido
Permanganato	Manganeso
Peróxido de hidrógeno	Fenol Cianuros Compuestos sulfurados

Los oxidantes comerciales más comunes son los siguientes: Permanganato de potasio, cloro gaseoso, hipoclorito de calcio, hipoclorito de sodio, peróxido de hidrógeno (solución al 35%), ácido crómico (CrO_3).

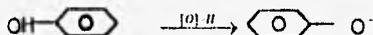
El $KMnO_4$ es usado para la destrucción de residuos orgánicos en aguas residuales y en agua potable. Su forma usual reducida, el dióxido de manganeso (MnO_2), puede ser removido por filtración. El $KMnO_4$ reacciona con aldehidos, mercaptanos, fenoles, y ácidos insaturados. Por lo tanto, este es considerado como un agente oxidante relativamente poderoso.

Peróxido de hidrógeno (H_2O_2). El H_2O_2 es usado para la separación de iones metálicos por oxidación selectiva de esta manera, ayuda a remover hierro por oxidación del ion ferroso a férrico, que es luego precipitado por la adición de la base apropiada. El peróxido de hidrógeno es también usado para remover cloro residual después del tratamiento de cloración.

Acido crómico (CrO_3). El trióxido de cromo CrO_3 , es comercialmente llamado ácido crómico. En la oxidación de compuestos orgánicos, el CrO_3 en una solución de H_2SO_4 es reducido y forma sulfato de cromo $Cr_2(SO_4)_3$.

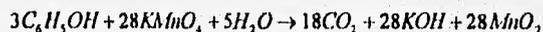
Oxidación del fenol y otros compuestos orgánicos.

Las reacciones de oxidación que involucran al fenol son frecuentemente complejas, de aquí, que los productos de reacción dependen de los sustituyentes. La reacción involucra como primera etapa la remoción del hidrógeno del oxhidrilo para reducir el radical fenoxil:



Los productos de reacción eventuales incluyen quinona que es considerada más tóxica que el fenol.

Spicher y Skrinde propusieron que el mecanismo de reacción involucra primero la formación de quinona y luego la ruptura del anillo seguido por la oxidación de fragmentos de este si existe la cantidad suficiente de oxidante. Normalmente la reacción no va más allá de lo que Spicher y Skrinde sugirieron en su reacción propuesta usando permanganato de potasio:



No obstante la reacción llega usualmente a la etapa de abertura de la cadena.

La oxidación química de fenoles solo se aplica en corrientes residuales diluidas. El $KMnO_4$ es el oxidante que se usa. Algunos momentos después de que este se adiciona el fenol es oxidado a bióxido de carbono y agua. El permanganato es reducido a MnO_2 que es un sólido filtrable.

Cuando el fenol se encuentra en trazas la economía parece favorable para la oxidación química. Para la remoción de una parte por millón de fenol debe adicionarse de 6 a 7 partes por millón de permanganato de potasio.

Los agentes oxidantes químicos son usados para el control de residuos orgánicos en el tratamiento de aguas residuales y agua potable. Los compuestos orgánicos que reciben tratamiento químico son: Aldehidos, mercaptanos, fenoles, bencidina y ácidos insaturados.

Para esto los agentes oxidantes son: Hipoclorito de sodio, hipoclorito de calcio, permanganato de potasio y peróxido de hidrógeno, además el ácido nitroso es usado en algunas ocasiones.

La bencidina, un orgánico usado en la manufactura de lentes, se considera como un calcinógeno, y su concentración es reducida generalmente a partes por millón en aguas residuales previas a la descarga. La oxidación mediante ácido nitroso se usa para obtener una buena calidad del efluente. Mientras la biodegradación, adsorción con carbón activado, radiación, oxidación con ozono y oxidación por otros químicos tales como el peróxido de hidrógeno también suelen ser efectivas, pero dejando con menor grado de calidad el efluente.

Oxidación de compuestos sulfurados.

El cloro e hipoclorito de sodio se usan para prevenir la acumulación de sulfuros en las líneas de desagüe. Si se adiciona un exceso de cloro a las aguas residuales que contienen sulfuros, el sulfuro será oxidado a sulfato:



Para una corriente residual que contiene solo bajas concentraciones de sulfuros y no otras sustancias susceptibles a oxidación, el cloro requerido será aproximadamente 9 partes (en peso) por cada parte de sulfuro. En corrientes donde hay otros constituyentes oxidables, los requerimientos pueden ascender a 15-20 ppm.

El peróxido de hidrógeno también se usa en la oxidación de sulfuros. En una agua residual que contiene cerca de 6 mg/l de sulfuros totales, la adición de 30 mg/l de peróxido de hidrógeno reduce la concentración de sulfuros a menos de 1 mg/l aproximadamente con un tiempo de retención de dos horas.

Intercambio Iónico.

Primero se dará una explicación de como trabajan las resinas de intercambio iónico: una resina de intercambio catiónico (en la cual se intercambian iones de hidrógeno por cationes tales como el calcio, níquel, etc.) consiste generalmente en un compuesto polimérico con iones hidrógeno que son fácilmente reemplazables por otros cationes, quedando entonces la resina con el ion metálico que se desea eliminar de la solución tratada. Por ejemplo, el catión Mg^{++} puede sustituirse en la resina por dos iones H^+ .

En una resina de intercambio aniónico, un ion con carga negativa tal, como el Cl^- puede reemplazar al anión OH^- que se encuentra débilmente ligado al polímero.

Así pues, la solución que contenga aniones y cationes puede pasarse a través de un lecho mixto (tanque con ambas resinas). Las resinas tienen una cierta capacidad para

intercambiar cationes y aniones, cuando dicha capacidad se agota con el uso, la resina puede ser regenerada.

Una forma eficiente de regenerar la resina de intercambio catiónico, es pasar a través de ésta y en contra corriente un ácido fuerte, por ejemplo el HCl , entonces el ion H^+ pasará a formar parte de la resina y el catión que ésta tenía formará una sal con el anión del ácido.

La resina aniónica se regenera con un álcali fuerte, generalmente hidróxido de sodio, y de forma similar se reemplazan los iones OH^- .

Las reacciones de separación se complementarán hasta un punto que depende del equilibrio que se establezca entre los iones en la fase acuosa y los de la fase sólida. Para la eliminación del sodio, este equilibrio viene definido por la siguiente ecuación:

$$\frac{[H]X_{RH}}{[Na]X_{RNA}} = K_{H \rightarrow Na} \quad [21]$$

donde:

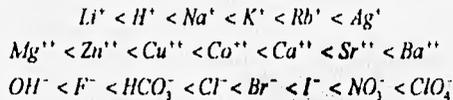
$K_{H \rightarrow Na}$ = Coeficiente de selectividad.

$[]$ = Concentración en la fase en solución.

X_{RH} = Fracción molar de hidrógeno en la resina de intercambio.

X_{RNA} = Fracción molar de sodio en la resina de intercambio.

El coeficiente de selectividad depende principalmente de la naturaleza y valencia del ion, del tipo de resina y de su saturación y de la concentración del ion en el agua residual. En realidad, para una serie dada de iones semejantes, se ha comparado que las resinas intercambiadoras exhiben un orden de selectividad o de afinidad por los iones. Se indican en seguida algunas series típicas de las resinas sintéticas de intercambio catiónico y aniónico:



En la práctica, los coeficientes de selectividad son determinados en laboratorio y solamente son válidos para las condiciones bajo las cuales se han medido. A bajas concentraciones, el valor del coeficiente de selectividad para intercambio de iones monovalentes por iones divalentes es, en general, mayor que el intervalo de iones monovalentes por iones monovalentes. Este hecho ha limitado, en muchos casos, el uso de resinas sintéticas para eliminación de ciertas sustancias del agua residual, tales como amoníaco en forma de ion amonio. Sin embargo, existen ciertas ceolitas que intercambian NH_4^+ o Cu^+ .

Las capacidades de las resinas de intercambio varían según el tipo y concentración del regenerante utilizado. Las capacidades de intercambio de las resinas suelen

expresarse en kilogramos de carbonato de calcio por metro cúbico de resina (Kg/m^3) o equivalente-gramo por metro cúbico.

Aunque se dispone de resinas de intercambio iónico naturales y sintéticas, son estas últimas las más usadas en razón de su durabilidad.

Un grave problema relacionado con la aplicación del intercambio iónico al tratamiento de efluentes de agua residual es el aglutinamiento de la resina causado por la materia orgánica residual presente en el efluente procedente de un tratamiento biológico. Este problema puede ser resuelto parcialmente filtrando previamente el agua residual o utilizando resinas intercambiadoras eliminadoras antes de su aplicación a la torre de intercambio.

Para que el intercambio iónico resulte económico en el tratamiento de las aguas residuales, convendrá utilizar productos regeneradores y restauradores que eliminen tanto los aniones inorgánicos como el material orgánico de la resina agotada. Además del HCl y NaOH como regeneradores también está el metanol y la bentonita.

En resumen las tablas 35 y 36 muestran una secuencia para el tratamiento de aguas residuales, la tabla 37 algunas características típicas de los efluentes y la 38 muestra los procesos de tratamiento químico con sus ventajas y desventajas y que aplicación tienen.

Tabla 35 Secuencia de tratamiento de aguas residuales.

PROCESOS	RESIDUOS
1. TRATAMIENTO PRELIMINAR	
Tamizado y remoción de sólidos gruesos	Trapos, estopas, papel, madera, arena, carbón
Neutralización	Lodos químicos
Separación aguas - aceite.	Lodos aceitosos y aceite recuperable.
2. TRATAMIENTO PRIMARIO	
Sedimentación o flotación por aire disuelto	Lodos orgánicos y espumas flotantes (grasas y otros materiales flotantes)
3. TRATAMIENTO SECUNDARIO	
Lodos activados, estabilización por contacto, aeración extendida, filtros rociadores, biodiscos, etc. Seguidos por la clarificación secundaria.	Lodos biológicos
Lodos activados y carbón activado en polvo	Lodos biológicos y carbón
Lagunas de oxidación aeradas	Algas en el efluente
Nitrificación biológica y desnitrificación	Lodos biológicos
Precipitación química, seguido de coagulación y sedimentación.	Lodos químicos
4. TRATAMIENTO ANAEROBIO	
Digestión anaerobia, espesamiento	Lodos biológicos en el efluente estabilizado.
5. TRATAMIENTO TERCIARIO.	
Filtración en arena	Sólidos suspendidos en el agua de retrolavado.
Adsorción con carbón activado	Carbón activado agotado el cual puede ser regenerado
Intercambio iónico	Regenerante agotado
Potabilización	
Cloración	

Tabla 36 Procesos Específicos aplicados en el tratamiento de aguas residuales.

CONTAMINANTE	PROCESO
Orgánicos biodegradables (DBO)	Tanques Biológicos aerados (lodos activados) Lagunas aeradas, filtros rociadores, lagunas de estabilización.
Sólidos suspendidos (SS)	Sedimentación, flotación y tamizado
Orgánicos no biodegradables	Adsorción en carbón
Nitrógeno	Lagunas de estabilización, agotamiento, nitrificación y desnitrificación, intercambio iónico.
Fósforo	Precipitación con cal; precipitación mediante iones Fe o Al. Intercambio iónico
Metales pesados	Intercambio iónico, precipitación química
Sólidos inorgánicos disueltos	Intercambio iónico, osmosis inversa

Tabla 37 Características típicas de efluentes.

	DBO ₅ (mg/L)	S.S. (mg/L)	P (mg/L)	N - NH ₃ (mg/L)	N org (mg/L)
Influyente	200	250	12	30	20
Tratamiento primario	130-140	75-120	12	30	16
Tratamiento biológico					
Lodos activados	6- 10	10- 25	8	2 - 20	5
Filtros rociadores	20- 30	10- 25	8	1 - 20	5
Lagunas de oxidación	10- 50	20-100	1- 8	5 - 10	5
Tratamiento terciario					
Coagulación y sedimentación	2	5	1	1 - 2	5
Filtros de arena y carbón activado.	1	1	1	1	5

Tabla 38. Resumen de los procesos químicos para tratamiento de aguas residuales.

PROCESO	APLICACIONES	VENTAJAS	DESVENTAJAS
Precipitación Química	Inorgánicos, Metales	Remoción de constituyentes disueltos Bajo mantenimiento Recuperación de metales Algo seguro Bajos costos de Energía Fácil de operar	Emisiones volátiles Apropiado manejo y almacenamiento de reactivos es requerido Evacuación de Lodo Residual Remoción selectiva Requiere de aditivos químicos
Recuperación Electrolytica	Alta concentración de orgánicos, metales e inorgánicos	Remoción de constituyentes disueltos Recuperación de metales Fácil de operar No hay lodo residual	Altos costos de capital y operación Remoción selectiva Difícil mantenimiento Altos costos de energía Susceptible a obstrucción
Intercambio Iónico	Baja concentración de orgánicos, metales e inorgánicos	Remoción de constituyentes disueltos Recuperación de metales Fácil de operar El agua puede ser reusada	Altos costos de capital y operación Remoción selectiva Difícil mantenimiento Altos costos de energía Susceptible a obstrucción
Osmosis Inversa	Baja concentración de orgánicos, metales e inorgánicos	Remoción de constituyentes disueltos Recuperación de metales Fácil de operar El agua puede ser reusada	Altos costos de capital y operación Remoción selectiva Difícil mantenimiento Altos costos de energía Susceptible a obstrucción
Oxidación/Reducción Química	Alta concentración de orgánicos, metales e inorgánicos	Remoción de constituyentes disueltos Alto grado de tratamiento No hay corrientes residuales	Altos costos de capital y operación Remoción selectiva Difícil mantenimiento Altos costos de energía

CAPITULO 6

ELECCIÓN DEL MÉTODO O SISTEMA DE TRATAMIENTO.

INTRODUCCIÓN.

Los sistemas de tratamientos estudiados, son aquellos cuya relativa facilidad en diseño y construcción, así como mínimos problemas de operación y mantenimiento, representan las soluciones más factibles para mejorar la calidad de las aguas residuales a un nivel primario, de acuerdo a las exigencias inmediatas marcadas por el Reglamento para la Prevención y Control de la Contaminación de Aguas.

CONSIDERACIONES GENERALES PARA LA SELECCION.

La selección del método o sistema de tratamiento más adecuado para un determinado tipo de desecho líquido, deberá hacerse tomando en cuenta como objetivo general, conjuntar las máximas eficiencias con los mínimos costos, y específicamente, considerando las necesidades y disponibilidades siguientes:

- a) Tipo de agua residual por tratar : municipal, industrial, o una mezcla de ambas.
- b) Disponibilidad de mano de obra, material de construcción, equipo y terreno.
- c) Condiciones topográficas y climatológicas del lugar.
- d) Desarrollo municipal, industrial o agrícola.
- e) Recursos técnicos y económicos disponibles.
- f) Uso de agua a tratar.

A continuación se discutirán cada uno de estos puntos, comparándolos con los diversos tipos de tratamiento por estudiar.

TIPO DE AGUA RESIDUAL POR TRATAR.

Dado que las aguas residuales por tratar representan la materia prima por transformar, al ser sometida a un determinado proceso de tratamiento, es importante conocer sus características principales, tanto para la selección de los diversos procesos de que deba constar el sistema de tratamiento como para lograr un adecuado control en cuanto a eficiencia del propio sistema.

Aguas residuales municipales o una mezcla de estas con aguas residuales industriales en las que predominen las municipales, pueden ser tratadas por cualesquiera de los procesos que se estudian: teniendo en cuenta que los procesos físicos tales como cribado y sedimentación, no dependen de un tipo específico de desechos, sino de contenido de sólidos en el mismo. Los procesos biológicos sí, se restringen para determinados tipos de desechos líquidos industriales, tales como aquellos cuyo contenido de sustancias tóxicas (plaguicidas, metales pesados, cianuros, cromatos, detergentes, ácidos, álcalis, etc.) es muy alto e inhiben la acción microbiana que en estos procesos estabilizan los desechos.

Es importante considerar al tratar desechos líquidos industriales con municipales, la necesidad de sujetar a los primeros a un pretratamiento adecuado tendiente a la

recuperación o separación simple de sustancias nocivas con las enunciadas, que eviten trastornos en los sistemas de tratamiento, como aquellos que serán mencionados posteriormente al hablar de problemas de operación y mantenimiento.

GASTO.

El caudal por tratar, es limitante del sistema de tratamiento por emplear, dado que la experiencia ha establecido determinados volúmenes límites para que un cierto proceso resulte económico, en función de los periodos de retención del agua en las unidades.

El tiempo medio de detención en una fosa séptica es de 12 horas; lo que explica que sea un tratamiento adecuado solo para unidades unifamiliares o grupos pequeños de viviendas, pues si los caudales son de consideración, el volumen de los tanques hace que el costo de las estructuras se vuelva prohibitivo, sumándole a esto además, la extensión del campo de infiltración; lo mismo puede decirse para los tanques Imhoff aunque su capacidad es mayor (hasta 5000 habitantes).

En cuando a lagunas no se tiene una limitación real por volumen de aguas tratadas; esto estará en función del área que requieran y su consiguiente costo; hasta poblaciones de 100 000 habitantes o el equivalente en desechos industriales, es recomendable. Las zanjas de oxidación, estarán limitadas no solo por el terreno, como por el número de rotores (aeradores) o sus dimensiones, que aumentarían, al aumentarían el volumen por tratar.

En cuanto al tratamiento primario convencional, no existe restricción en cuanto al volumen por sus cortos periodos de retención (1.5 a 3.0 horas); pero en un análisis estricto, debe considerarse el costo del tratamiento de los sólidos sedimentables o flotantes que se originan en estas unidades, las que requieren de digestores anaerobios que incrementan de un 50 a 75 % los costos del tratamiento primario.

DISPONIBILIDAD DE MANO DE OBRA, MATERIAL, EQUIPO Y TERRENO.

Al seleccionar un sistema de tratamiento dado, debe tomarse en cuenta la disponibilidad de mano de obra, material, equipo y terreno en el sitio donde se pretenden construir las diferentes unidades elegidas.

Los sistemas en estudio, no ofrecen mayores problemas en su construcción, una vez hecho el diseño adecuado por un ingeniero especializado. Se podrían tener objeciones en cuanto a carencia de materiales de construcción en el lugar pero estos pueden adaptarse a los que sean factibles de conseguir.

Equipo especial únicamente se requerirá en el caso de los aeradores mecánicos para las lagunas que se quieran aerar artificialmente; en el caso de zanjas de oxidación en cuanto a los rotores; o en el equipo de remoción y tratamiento de lodos residuales en el tratamiento primario convencional. Para esto actualmente existen casas especializadas un equipo de tratamiento en el país no es difícil su consecución.

En terreno en cuanto a su costo y naturaleza, puede ser el factor más importante al decidir la utilización de un determinado sistema de tratamiento. Este influye preponderantemente en:

a) Fosas sépticas y tanques Imhoff, dado que sus campos de infiltración, requieren tener adecuadas características de permeabilidad, pendiente y profundidad del nivel freático, determinando esta última posibles problemas de contaminación de aguas subterráneas. En caso de no ser adecuado el suelo para una buena infiltración, se tendrá que recurrir a cámaras de oxidación a mayores costos.

b) Lagunas y zanjas de oxidación, donde el terreno en cuanto a costo y características de impermeabilidad, pendiente, nivel freático, contenido orgánico, etc., definitivamente deciden junto con las condiciones climatológicas si son o no adecuados al sitio en el que se pretenden instalarse.

Altos costos de terreno, pueden llevar a emplear en lugar de lagunas de aereación natural, lagunas de aereación mecánica o zanjas de oxidación, dado que requieren menos terreno. Grandes pendientes encarecen el bombeo, otro punto de importante consideración.

CONDICIONES TOPOGRÁFICAS Y CLIMATOLÓGICAS.

Ya se discutieron en el inciso anterior, ciertas consideraciones importantes de selección, en cuanto a características topográficas del terreno en que se desplantan las unidades de tratamiento, siendo relevantes: la permeabilidad que resulta positiva en campos de infiltración y negativa de lagunas y zanjas de oxidación donde el costo de impermeabilización es muy alto, la contextura que provoca taludes más o menos estables en lagunas y zanjas, pendiente que pueda favorecer la conducción de aguas residuales por gravedad o requerir bombeo, así como necesitar grandes excavaciones y rellenos y profundidad de nivel freático que puede establecer posible contaminación de las aguas subterráneas por infiltración de las aguas en tratamiento.

En cuanto a condiciones climatológicas o meteorológicas que predominan en una cierta región, estas tienen una influencia definitiva para la adecuada depuración de las aguas residuales en lagunas y zanjas de oxidación; debido a que estas requieren para su adecuado funcionamiento, suficiente luz solar para el proceso de fotosíntesis en lagunas aerobias y facultativas; una temperatura templada o cálida que favorezca la descomposición en lagunas anaerobias de los sólidos sedimentados; aunque una zona donde el régimen de evaporación sea muy alto comparado con la precipitación, tenderá a disminuir el área superficial de las lagunas y dado que los tirantes son más o menos invariables, tendrá que disminuir el volumen al tratar. También los vientos deben ser favorables para que no coadyuven a la formación de cortos circuitos principalmente.

DESARROLLO FUTURO, MUNICIPAL, INDUSTRIAL O AGROPECUARIO.

También en la selección de un determinado tipo de tratamiento de aguas residuales deben conocerse, no solo para el diseño en cuanto al gasto, sino también para considerar variaciones en las características de aguas residuales, la tendencia futura en cuanto a crecimiento de la población, o incremento de las actividades industriales o agropecuarias.

Si bien el diseño contempla el cálculo de las unidades en cuanto a gastos futuros, podría no tomar en cuenta que la tendencia socioeconómica del lugar, variara

radicalmente en cuanto a sus futuras disponibilidades; es decir cambiar una política agropecuaria por industrial con las consiguientes variaciones en la calidad de agua por tratar y en cuanto al uso del agua tratada.

RECURSOS TÉCNICOS Y ECONÓMICOS.

Aunque relativamente simples en su operación y mantenimiento, los sistemas de tratamiento en estudio pueden fallar por descuido o desatención absoluta de los mismos.

Las fosas sépticas y tanques Imhoff, requieren una mínima inspección diaria y purgado de lodos trimestral, semestral o hasta anual dependiendo del desecho tratado.

Las lagunas sin equipo mecánico requieren un solo operador de planta y uno especializado una vez al mes o semana.

Las lagunas de aereación mecánica, zanjas de oxidación o plantas de tratamiento primario convencional requieren además de un operador, a un técnico en mecánica y electricidad para el equipo adicional que requieren.

Además del personal mencionado, debe tenerse el auxilio de un laboratorio para análisis rutinarios de control de calidad, ya sea de planta o externo.

De acuerdo a los recursos económicos y necesidades de una mejor calidad en el efluente tratado, puede escogerse el mejor diseño de los dispositivos de tratamiento, pudiendo llegar incluso a una absoluta automatización del proceso con el equipo y accesorios que la tecnología más avanzada permite.

USO DEL AGUA TRATADA Y CALIDAD.

Este es un factor primordial que considerar al seleccionar un determinado sistema de tratamiento, dado que la eficiencia de un proceso a otro varía considerablemente y si la reglamentación federal exige una calidad determinada en función del uso del cuerpo receptor de las aguas tratadas o con fines de un reuso particular, deberá someterse el influente al tratamiento adecuado.

En general los sistemas de tratamiento primario, logran una eficiencia de remoción de sólidos flotantes y sedimentables del 90 al 95 % y una reducción en el contenido de DBO_5 del 25 al 35 % con lo que el efluente puede ser empleado, con la adecuada desinfección, en irrigación de cultivos que no sean hortalizas o mezcla con aguas no muy contaminadas. El agua tratada en lagunas de estabilización o zanjas de oxidación pueden llegar a tener una eficiencia de remoción de DBO_5 de un 90%, por lo que su reuso puede ser más general, incluyendo recreación o conservación de la flora y fauna acuática.

Realmente, solo se puede restringir el uso del agua tratada, por los procesos que aquí se ven, para abastecimiento público o para su empleo en ciertos procesos industriales específicos, como es la industria alimenticia.

El reciclar una cantidad de agua, por pequeña que sea, traerá tres beneficios inmediatos:

1. Satisfacer con más facilidad la demanda de agua de primer uso, pues en general el reuso del agua la disminuye.
2. Disminuir la cantidad de desechos vertidos al agua y, por consecuencia, abatir un poco los niveles de contaminación en los cuerpos receptores.
3. Reducir, si no es que eliminar, los daños ecológicos que se originan en las regiones en donde el agua es tomada para satisfacer las necesidades de lugares muchas veces distantes al sitio de origen.

El problema de reusar el agua se reduce, en pocas palabras, a eliminar en ella los compuestos y materiales que se les agregan al usarla, problema que puede analizarse desde tres puntos de vista, a saber: legal, económico, técnico.

Por lo que respecta al aspecto legal, el reuso del agua no ha sido contemplado en forma amplia, ya que en general es fácil cubrir los requisitos establecidos para verter el agua residual en los cuerpos receptores, lo que unido a la, generalmente escasa vigilancia para el cumplimiento de los mismos, origina que ni los industriales ni los municipios piensen en el tratamiento del agua residual con reuso o sin él. La única alternativa en este sentido la constituye la aplicación estricta de la legislación existente, lo que obligará a darle los tratamientos adecuados al agua para poder verterla sin problema en los cuerpos receptores o en los drenajes.

El renglón económico ha servido más como excusa (para justificar la actitud de indiferencia que se tiene ante el problema de contaminación) que como problema real en sí. Si bien es cierto que no es fácil obtener los canales adecuados para lograr el financiamiento inicial de las obras, también lo es el hecho de que los costos de fabricación se incrementan sólo entre el 1 y el 5% si el agua se trata y recircula adecuadamente.

En el aspecto técnico, con seguridad existen métodos para remover del agua prácticamente cualquier compuesto; sin embargo, dadas las concentraciones tan bajas en las que se encuentran la mayoría de ellos, no siempre son económicas, por lo cual se puede decir que mucho del trabajo que se requiere desarrollar involucra el hacer más económico el tratamiento de las aguas residuales, lo que se lograría con una introducción de nuevos procesos o bien haciendo que los que se tienen en la actualidad funcionen con máxima eficiencia.

TRATAMIENTO CONJUNTO O SEPARADO.

Esto ya ha sido discutido indirectamente en algunos de los puntos analizados y consiste básicamente en considerar de acuerdo a la política de financiamiento más recomendable, producto de un estricto análisis económico, el beneficio que representa que sean tratadas en conjunto tanto las aguas residuales municipales como las industriales en una determinada comunidad.

Sin lugar a duda que esto parecer ser mas recomendable y no cada industria zona urbana trate particularmente esos desechos.

Lo anterior considerando que aquellos desechos industriales que contengan sustancias tóxicas o perjudiciales para un tratamiento municipal, deberán recibir antes un pretratamiento tendiente a remover dichos tóxicos o en último caso segregarse tales desechos de los demás producidos por la comunidad y factibles de un solo tipo de tratamiento.

De los sistemas aquí estudiados, deberán tomarse en cuenta en este aspecto, aquellos que constan de procesos biológicos sensibles a descargas tóxicas, tales como lagunas y zanjas de oxidación, descartando el uso de fosas sépticas y tanques Imhoof por su reducido volumen destinado principalmente al tratamiento de desechos domésticos.

El conocimiento de todas las consideraciones de selección aquí discutidas, se espera coadyuve al mejoramiento del criterio de selección, diseño, operación y mantenimiento de los sistemas de tratamiento que se estudia en la presente tesis.

MANUAL DE USUARIO

INTRODUCCION.

El programa Sistema Experto para Tratamiento de Aguas Residuales, llamado en lo siguiente SISTEMA, es un sistema experto basado en reglas y actúa como suministrador de información.

El SISTEMA ayuda a saber la situación actual de una planta de tratamiento, así como a resolver problemas más comunes en la planta de tratamiento de aguas, para cada problema que químicos debe emplear y en donde se deben emplear, sus ventajas y desventajas de cada uno de ellos. Realiza cálculos de parámetros importantes en la planta de tratamiento biológico. También contiene módulos informativos como son principales desechos producidos por la industria, normas oficiales para el control de efluentes de las principales industrias, así como propuestas de tratamiento para diferentes efluentes de las principales industrias. Contiene un módulo de estudios microbiológicos donde se pueden observar gráficos de la situación existente de los microorganismos en la planta en una fecha determinada o en el periodo que sea seleccionado para poder saber la situación existente de los microorganismos como un parámetro importante o como un monitoreo. Además cuenta con un estudio de sedimentación, que a base de datos alimentados hace una predicción del lodo sedimentado que se necesita reciclar en el proceso de lodos activados y muestra un gráfico dice las condiciones a las que se encuentra sometido el sistema, este estudio proporciona una orientación de lo que está ocurriendo en las unidades centrifugas y sedimentadoras. Cuenta también entre otros módulos, con un módulo de preguntas y respuestas comunes en donde ofrece respuestas prácticas para el tratamiento biológico.

SISTEMA cuenta con seis archivos que trabajan como bases de datos, los cuales pueden ser actualizados o editados para cada planta en particular o simplemente para actualizar los datos obtenidos en el laboratorio de la planta. Estos archivos pueden imprimirse en caso de que así lo necesite el usuario.

SISTEMA tiene quince archivos ejecutables los cuales actúan como módulos particulares del programa, es decir cada archivo corre bajo el mismo programa para una acción específica.

Como correr el programa.

El programa puede iniciar tecleando SISTEMA y después enter. Inicia con una presentación y después aparece un menú con el cual se puede elegir entre cuatro opciones la primera nos lleva al MENU PRINCIPAL, en este menú el usuario puede elegir entre nueve opciones ya sea con el ratón (mouse), y haciendo un click ó bien con las flechas del teclado y presionando enter; la segunda y tercera opción son de ayuda, con las cuales nos podemos informar de que ventajas y desventajas tiene SISTEMA así como de que uso específico tiene cada una de las opciones que se presentan en SISTEMA. Esto último lo podemos ver seleccionando USO, en seguida aparecerá un menú en la parte superior, en el cual se puede seleccionar la opción que se desea, cada una de las opciones que aparecen en el menú son posibles opciones que el

usuario puede elegir y en seguida aparecerá una ventana de información del uso y aplicación de la opción seleccionada.

Una vez seleccionando IR AL MENU PRINCIPAL aparecerán nueve opciones las cuales se enumeran a continuación:

La primera opción *Agregar datos para actualizar archivo* sirve para actualizar el archivo de datos donde el programa nos pide Ingresar los datos que requiere para hacer los cálculos necesarios, los parámetros más importantes y las condiciones existentes de la planta de tratamiento. Se debe tener cuidado al ingresar estos datos, fijarse que las unidades sean consistentes y evitar ingresar ceros ya que los datos son almacenados en los archivos de datos y al ser leídos pueden causar un error en el SISTEMA. En caso que esto suceda edite los archivos que no tienen extensión (PARAM, DATO, etc) con cualquier editor para MS-DOS o con el editor del SISTEMA, que viene en el MENU II del programa. Los datos que se ingresen aparecerán al último de la lista. En caso de que suceda error edite salve y corra nuevamente el programa o use cualquiera de los respaldos que tiene SISTEMA para cada archivo de datos. Al final de este manual se presenta una tabla con los valores máximos y mínimos de los datos existentes en la base de datos del programa en caso de que quiera ingresar nuevos datos para probar el SISTEMA y una tabla de la nomenclatura de las variables que son requeridas por el SISTEMA..

La segunda opción *Normas oficiales para el control de efluentes*, es un módulo informativo donde nos muestra las diferentes normas oficiales para los efluentes de las diferentes industrias. En este módulo el usuario puede elegir en primera instancia tres opciones que aparecen en pantalla: 1) Ir a Normas oficiales, 2) Salvar el programa y 3) Regresar al módulo principal, la primera opción nos lleva al menú en el cual tenemos la posibilidad de elegir la industria de nuestro interés y nos dará a conocer los límites máximos permisibles de los principales parámetros en los que debe guardar cuidado para su control en las principales industrias, la segunda opción sirve para salvar el programa, esta opción deberá ser elegida en caso de haber hecho algún cambio al programa o haber ingresado nuevos datos, y la tercera para regresar al menú principal.

La tercera opción *Listado de parámetros diarios calculados*, nos muestra una lista con los cálculos realizados con los datos ingresados en el sistema de acuerdo a la fecha en que fueron ingresados.

La cuarta opción *Módulo de unidades centrifugas sedimentadoras*, nos calcula un pronóstico de refluo de lodo activado a través de Ingreso de datos obtenidos en laboratorio. Nos proporciona resultados, en los que podemos observar un análisis de sedimentación y su gráfica así como consideraciones que debemos tener para nuestro refluo. En este módulo se puede graficar selectivamente variables que nos interesen ver o tiene por default a graficar la relación entre la MLSS (Mezcla de Licor de Sólidos Suspendidos) y el RAS (Refluo de Lodo Activado), cuanto *residuo diario* tenemos con los datos adquiridos, así como la relación Turbiedad con MCRT (Tiempo Medio de Retención Celular).

Al elegir esta opción tenemos seis diferentes opciones en donde las primeras tres trabajan bajo los datos de laboratorio ingresados. La primera opción es precisamente la entrada de datos con la cual trabajan las siguientes dos opciones. En la primera opción

nos pide el ingreso de datos que previamente debemos tener de resultados de un análisis de sedimentación o centrifugación como son concentraciones y volúmenes a un determinado tiempo. Una vez que los datos han ingresado podemos seleccionar la segunda y la tercera opción ya sea para *resultados del medidor de sedimentación* o para un *pronostico RAS*, en el resultado del medidor de sedimentación podemos ver un listado con los resultados del análisis y la gráfica del resultado, en la segunda opción podemos ver un resultado para un pronóstico de flujo de lodo activado reciclado (RAS) como un porcentaje del flujo del influente.

Con las opciones *gráficas selectivas* y *gráficas no selectivas* no es necesario ingresar datos ya que trabajan bajo el archivo PARAM (de parámetros tanto ingresados como calculados de la planta). Si selecciona la opción *gráficas no selectivas*, entonces graficará la relación existente entre la MLSS y RAS, también graficará el residuo que se tiene diariamente en planta y la relación de la Turbiedad con MCRT. En el caso de querer relacionar diferentes variables podemos elegir la opción *gráficas no selectivas* donde contamos con 21 opciones de variables a relacionar para graficar y trabajan bajo la base de datos.

En esta opción el SISTEMA nos pide el ingreso los límites superiores de las variables seleccionadas así como el ingreso de la fecha de inicio de la gráfica. Aquí debemos ser cuidadosos ya que al ingresar un dato fuera del rango de nuestros datos puede causar un error del programa debemos apegarnos a nuestros datos de planta, y verificar que la fecha de nuestra gráfica no sale de la base de datos. En caso que el programa marque un error y se salga del programa verifique sus datos máximos para las variables seleccionadas y corra nuevamente el programa

Las últimas opciones salvar el programa y regresar al menú principal se usan en el primer caso en caso de haber hecho un cambio al programa o haber ingresado nuevos datos, y en el segundo para regresar como la opción lo indica al MENU PRINCIPAL.

La quinta opción *Operación de preguntas y respuestas*. Tiene 4 preguntas encaminadas para nuestro proceso biológico, el cual nos arroja valores importantes, dándonos tips para poder tener un mejor tratamiento. Al elegir cualquiera de las cuatro preguntas el SISTEMA responderá a dichas preguntas usando los últimos datos de planta en caso de la primera, la tercera y la cuarta, y en la segunda en caso que así lo quiera el usuario. Si el usuario elige la primera pregunta el SISTEMA responderá dando resultados calculados con los últimos datos ingresados y pedirá otros para dar otros resultados importantes referentes a la pregunta cuestionada. Si elige la segunda el usuario tendrá una respuesta a la pregunta cuestionada y podrá elegir si desea los últimos datos ingresados referentes a la planta o desea ingresar datos nuevos para poder responder la pregunta cuestionada, la tercera y la cuarta pregunta el SISTEMA responde igualmente con los últimos datos ingresados.

La sexta opción *Listado de datos de archivo en el disco*, son los datos que se tienen en la base de datos y la podemos seleccionar para saber cuales son los datos ingresados y hasta que fecha se tiene actualizado.

La séptima opción *MENU II*, nos muestra otro menú con otras once opciones a seleccionar en el SISTEMA:

- I. **Módulo de Probabilidad.** Nos arroja información de probabilidad de la variable que nosotros elijamos en este caso 8 variables importantes para nuestro proceso, dándonos un gráfico donde podemos observar los datos de la variable elegida con respecto a la probabilidad del tiempo en que puede ocurrir y así poder ver su comportamiento para evaluar los datos. Al elegir esta opción aparecerá primero una pantalla con las opciones probabilidad del dato Q, y las que llamaremos en lo subsiguiente SALVAR Y MENU por simplicidad y lógica, las cuales como se mencionó anteriormente se usan para salvar el programa en caso de haber hecho algún cambio en el programa o para regresar al menú principal respectivamente. La primera opción nos lleva a otro menú donde elegirá el usuario la variable que con la cual desee conocer la probabilidad con que puede ocurrir a un determinado porcentaje de tiempo, es decir calcula y relaciona el valor de un dato de la variable con el tiempo en que puede ocurrir dicho valor de la variable, dándonos también un gráfico (semilog o similar) donde podemos apreciar el comportamiento de la variable elegida.
- II. **Módulo de estudios MICROSLIDE.** Nos muestra gráficos del comportamiento de microorganismos en el tratamiento biológico, es un estudio microbiológico donde se pueden observar gráficos de la situación existente de los microorganismos en su planta en una fecha determinada o en el periodo que sea seleccionado para poder saber la situación existente de los microorganismos. Al elegir esta opción nos muestra un menú donde tenemos cinco opciones entre las cuales están MENU y SALVAR las cuales ya se mencionó su función en puntos anteriores, las otras opciones grafican periodos de gráficas continuas, gráficas de un periodo específico o grafica de un sólo día. Como la opción elegida lo indica grafican dependiendo de la opción las gráficas usando datos almacenados en el archivo BUGSDATO, mostrando al usuario el comportamiento del número de microorganismos que se tienen en el estudio con su comentario referente al día de estudio en particular. En el caso de elegir las opciones de *gráficas continuas* o *gráficas de un periodo específico*, presionando la tecla F10 podrá regresar al menú en el momento que la presione.
- III. **Módulo de Impresión.** Sirve para imprimir en caso de necesitarlo los datos que se tienen almacenados en los archivos de datos. Esta opción cuenta con un menú en el cual se podrá elegir el archivo que desee imprimir y las opciones SALVAR y MENU las cuales ya se mencionó anteriormente su función.
- IV. **Módulo de promedios simples, máximos y mínimos de datos,** ejecuta un promedio de los datos existentes en la base y nos proporciona el valor máximo, el mínimo así como la fecha en que encontró dichos valores respectivamente, para cada una de las variables importantes en nuestro proceso. Esta opción es muy simple ya que inicialmente aparece una pantalla con un menú familiar donde aparecen las opciones MENU, SALVAR y *promediando el dato...*, en esta última, únicamente se selecciona la variable que desee el usuario y aparecerá la pantalla de resultados, presionando enter aparecerá otra pantalla que sugiere ir al menú o hacer más promedios.
- V. **Módulo de Ejecución de promedios por periodo,** ejecuta un promedio del inventario de sólidos para un determinado número de días. En esta opción es

similar a las anteriores simplemente seleccione su opción y el SISTEMA realizará su función.

VI. *Módulo de listado de relación F/M y MCRT.* Proporciona un cálculo de la relación alimento-microorganismo (F/M), con los datos máximos y mínimos la base de datos (XLIST). En este módulo se muestra un listado de la relación F/M por DBO y F/M por flujo, donde a través de los datos ingresados de la situación actual de la planta nos muestra un listado con la variación de la F/M con respecto DBO y al flujo respectivamente, tiene un módulo de edad del lodo donde muestra listados por MLSS, por purga ó residuo en galones, por sólidos suspendidos en purga o desecho y un listado dinámico cinético. Al elegir esta opción se cuenta con un menú para poder ver listados de la relación F/M, donde se cuenta con las siguientes opciones:

- A. *Entrada de datos.* Como la opción lo indica el SISTEMA pide el ingreso de datos máximos y mínimos de los parámetros importantes para el cálculo de esta variable.
- B. *Listado de máximos y mínimos.* Muestra una relación entre los datos ingresados máximos y mínimos con respecto a la F/M.
- C. *Listado de F/M por DBO.* Muestra un listado relacionando la variación de la F/M con respecto a la DBO, con los datos actuales de planta.
- D. *Listado de F/M por FLUJO.* Muestra un listado relacionando la variación de la F/M con respecto al FLUJO del influente, con los datos actuales de planta.
- E. *Menú de Edad del Lodo.* Este menú contiene las siguientes opciones ingresando al SISTEMA los datos requeridos:
 - 1. *Listado por MLSS.* Muestra un listado relacionado la variación de la MCRT con la MLSS, con los datos actuales de planta manteniendo constantes las otras variables.
 - 2. *Listado por purga o residuo en galones.* Muestra un listado relacionando la variación de la MCRT con el Residuo (purga) en mega galones (MG) manteniendo constantes las otras variables.
 - 3. *Listado por sólidos suspendidos en purga.* Muestra un listado relacionando la variación de la MCRT (edad lodo) con los sólidos suspendidos de residuo (SS en purga) manteniendo constantes las otras variables.
 - 4. *Listado de cinéticas.* Muestra un listado una variación del Ynet (lbs de VSS producidas por lb de DBO en el influente) con la MCRT o la F/M según elija el usuario con las condiciones que el usuario ingrese de acuerdo a lo que exista en planta. Esta opción el SISTEMA pide el ingreso de datos referentes a F/M y MCRT y con ellos pide que objetivo se desea fijar ya sea F/M o MCRT el

usuario elegirá su opción ingresando la letra F en el caso que desee un objetivo F/M, entonces se ingresa el objetivo deseado y SISTEMA preguntará si desea una lista simplificada si así lo desea se ingresa la letra S donde el clarificador no está incluido, es cuando se muestra el listado, posteriormente aparece una pequeña pantalla donde el usuario puede seguir teniendo más listados con diferentes valores de F/M o MCRT ingresando la letra G o pulsando enter en caso de querer regresar al menú de edad de lodo, en el caso que se desee un objetivo MCRT se ingresa la letra M y se procede de la misma forma.

5. *Regresar al primer menú*, con esta opción se retorna al menú de listados F/M.

F. *MENU III*, al elegir este menú se puede observar un menú con tres opciones:

1. *Salvar programa*, Al igual que las opciones (SALVAR) anteriores se elige cuando se haya hecho un cambio al programa o se hayan ingresado nuevos datos.

2. *Regresar al primer menú*, esta opción sirve para ir al menú de listados F/M.

3. *Regresar al menú principal* Al igual que las opciones (MENU) anteriores se elige para regresar al Menú principal

VII. *Módulo Guía de productos Químicos*. Nos ofrece posibles soluciones a problemas posibles en el tratamiento químico, nos proporciona los químicos efectivos que se pueden usar para solucionar el problema así como donde se deben aplicar, que ventajas y que desventajas se tiene el aplicar cada uno de ellos. Al elegir esta opción el SISTEMA cuenta con treinta y siete posibles problemas encontrados en el tratamiento químico. En este módulo se elige ingresando el número de problema que se tenga, enseguida aparecerá una pantalla con posibles soluciones, químicos efectivos, así como sus ventajas y desventajas de cada químico efectivo. Por ejemplo si en la planta de tratamiento se tienen problemas de olores, entonces podríamos elegir la opción 1. Tratamiento, olores. aparece en pantalla en la parte superior el problema, abajo las posibles soluciones, en los químicos efectivos aparece en el inciso a)cal a la que le corresponde la ventaja del inciso a) puede no agregar sales, y su desventaja a) produce lodos, y así sucesivamente para los demás químicos efectivos. Esta parte del SISTEMA indica los puntos donde deben ser aplicados los químicos para solucionar el problema.

VIII. *Módulo de principales desechos producidos por la Industria*. Esta opción ofrece una ayuda informativa en caso de querer conocer los principales desechos que son producidos por algunas industrias. Simplemente se selecciona principales desechos y despliega una pantalla con las industrias más comunes y el usuario puede seleccionar la que desee. Al igual que en los casos anteriores se elegirá la opción SALVAR el programa en caso de hacer cambios o haber ingresado

nuevos datos al SISTEMA. Y regresar al MENU principal para regresar al módulo principal.

IX. *Módulo Editor de archivos de datos.* En esta opción el usuario puede editar cualquiera de los archivos que trabajan como bases de datos en el SISTEMA, puede cambiar o borrar en caso que así lo requiera los datos almacenados en los archivos. En este módulo al actualizar los archivos crea un respaldo para cada uno de los archivos editados llamados de la siguiente forma:

- Archivo PARAM (parámetros de planta) PARAMBAK
- Archivo QATO (datos d flujo) QBAK
- Archivo BUGSDATO (datos microslide) BUGSBAK
- Archivo DATO (medidad diarias) OLDDATO
- Archivo OXDATO (datos de: nivel de MCRT/ oxidación) OLDOX

En el caso que desee editar debe ingresar el número del dato de acuerdo a la fecha que desee editar o borrar, el dato que sea seleccionado deberá ser único, es decir deberá editarse en el caso que sean dos o más líneas que quieran editarse una por una. Aparecera primeramente un listado de datos del archivo que el usuario ha seleccionado y en la parte baja de la pantalla aparecerá la indicación: ingrese el número de línea que desee editar en esta página, si la línea de acuerdo a la fecha que desee editar esta en esa página simplemente ingrese el número y presione enter, si no está en esa página presione enter hasta que aparezca la línea de acuerdo a su fecha que desee editar o borrar. Después de haber seleccionado el número de línea aparecerá una pantalla con los datos de la línea seleccionada y aparecerán las preguntas: *desee borrar esta línea y desee editar esta línea* si su respuesta es si presione "S" o si es no "N" para cada una de las preguntas respectivamente. En el caso que desee borrar los datos del archivo, el archivo se actualizara sin los datos borrados y el respaldo quedará con la sin cambios en caso de equivocación. En el caso de que se edite un o algunos datos aparecera en pantalla en columnas diferentes los encabezados actual y nuevo en el actual se muestran los datos que tiene el archivo en esos momentos y en nuevo el SISTEMA pedirá el ingreso de los nuevos datos. En este caso al igual que el anterior el respaldo queda intacto en el caso de que exista algún error.

El archivo DPLANTA contiene valores del volumenes del clarificador, profundidad del clarificador, volumen del aereador y el radio existente entre la MLSS y RAS en planta.

- X. *Nomenclatura y bibliografía.* Muestra la nomenclatura que es ocupada por el SISTEMA y la bibliografía recomendada para el caso de que el SISTEMA sea obtenido por alguien que no posea este trabajo de tesis.
- XI. *Regresar al módulo principal.* Regresar al menu anterior.

La octava opción *Módulo de tratamiento de efluentes*. En este módulo se muestra una propuesta de trenes de tratamiento para las principales industrias de acuerdo con las características de los efluentes de cada industria en particular, de acuerdo a información relativa a la degradabilidad y tratabilidad de efluentes se generan dichos trenes desde un punto de vista teórico y con ausencia de estudios completos como son económicos, pruebas completas a nivel laboratorio de tratabilidad. Los trenes de tratamiento aquí propuestos son como una guía u orientación del tipo de tratamiento que se pudiese llegar a seguir.

En esta opción únicamente proporciona información en general de los desechos que principalmente se tienen en las industrias y que tipo de tratamiento se puede llegar a seguir así como el porque del tratamiento seguido.

La novena opción *Salir del programa*, para salir del programa y salir a DOS.

Tabla 39 Valores máximos y mínimos existentes en la base de datos de SISTEMA

Variable	Máximo	Mínimo	Promedio Gral.
DBO Infl	310	140	213.88
DBO eflu	16	3	8.37
S Sus Infl	200	91	128
S Sus Eflu	17	17	3
MLSS	3560	1900	2645.91
RAS	7120	4500	5806.74
%RAS	0.5	0.31	0.39
SVI	262.49	128.53	211.11
F/M	1.09	0.4	0.66
MCRT	8.06	3.98	5.02
GGAL (WGAL)	0.05	0.00	0.03
WAS	20000	12000	14727.06
Infl Q	7	5	6
Eflu Q	7	5.2	8.02
S.SED	800	300	650
CL (Capa de lodo)	4.0	1.0	2.5
Turb.	4.0	1.5	2.75
Volumen del aereador			1.0 ft³
Profundidad			12 ft
Volumen del clarificador			1.0 ft ³
Pérdida típica de sólidos en el efluente			800 mg/l
Proporción entre MLSS y RASs			1.8

Tabla 40 de Nomenclatura

Variable	Significado
DBO Infl	Demanda Bioquímica de Oxígeno en el Influyente
DBO eflu	Demanda Bioquímica de Oxígeno en el efluente
S.Sus Infl	Sólidos Suspendidos en el Influyente
S.Sus Eflu	Sólidos Suspendidos en el Efluente
MLSS	Mezcla de Licor de Sólidos Suspendidos
RAS	Reflujo de Lodo Activado
%RAS	% Reflujo de Lodo Activado
SVI	Sólidos Volátiles en el Influyente
F/M	Relación Alimento/Microorganismo
MCRT	Tiempo Medio de Retención Celular
GGAL (WGAL)	Purga
WAS	Flujo de Lodo Activado
Infl Q	Flujo en el Influyente
Eflu Q	Flujo en el Efluente
S.SED	Sólidos Sedimentables
CL (Capa de lodo)	Capa de lodo
Turb.	Turbiedad

CONCLUSIONES

La conclusión a la que se llegó con el desarrollo de el SISTEMA experto fue que:

1. El programa desarrollado llamado en lo subsiguiente SISTEMA, es un sistema experto que proporciona información acerca de posibles procesos de tratamiento* de aguas residuales de los diferentes tipos de efluentes que el programa maneja.
2. El SISTEMA ayuda a monitorear el proceso de tratamiento, mediante una base de datos que maneja el SISTEMA con datos que va almacenando a través de los días (datos que son ingresados por el usuario de acuerdo al comportamiento de cada planta en particular).
3. El SISTEMA tiene módulos de información con los cuales el usuario tiene la posibilidad de conocer las Normas Oficiales Mexicanas* establecidas por el gobierno mexicano acerca de los límites máximos permisibles de desechos contaminantes de las principales industrias existentes en el país, principales desechos producidos por la industria*
4. El SISTEMA hace cálculos aproximados con los datos que son ingresados por el usuario mediante variables que son requeridas por el SISTEMA .
5. El SISTEMA está limitado a los módulos que contiene*.
6. El SISTEMA, no realiza cálculos para diseño de equipos involucrados en el tratamiento de aguas residuales y las variables como temperatura, presión y densidad del agua permanecen constantes.
7. El SISTEMA cuenta con seis archivos que trabajan como bases de datos, los cuales pueden ser actualizados o editados para cada planta en particular o simplemente para tener los últimos datos de planta. Estos archivos pueden imprimirse en caso de que así lo necesite el usuario.
8. El SISTEMA está limitado a informar y proponer que tipo de químicos emplear en caso de un problema determinado y donde aplicarlos. Lo anterior es teóricamente y empíricamente, pudiéndose poner a discusión o a pruebas de laboratorio.

El SISTEMA proporciona un cálculo de la relación alimento-microorganismo (F/M), con los datos máximos y mínimos la base de datos (XLIST). En este módulo se muestra un listado de la relación F/M (Alimento/microorganismo) por DBO (Demanda Bioquímica de Oxígeno) y F/M por flujo, donde a través de los datos ingresados de la situación actual de la planta nos muestra un listado con la variación de la F/M con respecto DBO y al flujo respectivamente, tiene un módulo de edad del lodo donde muestra listados por MLSS, por purga o residuo en galones, por residuo de sólidos suspendidos en purga y un listado dinámico cinético.

* El módulo maneja algunas industrias y está limitado exclusivamente a las industrias que vienen contenidas en él y existe la posibilidad de ampliarlo o actualizarlo.

BIBLIOGRAFIA

- Enrique Castillo. Sistemas expertos aprendizaje e incertidumbre. Ed. Paraninfo, Madrid 1989.
- Alex Goodall The GUIDE To EXPERT SYSTEMS. ED. Costword Press lld. Oxford, England 1985.
- Adedeji B. Badiru Expert Systems Applications in Engineering and manufacturing. Ed. Prentice Hall, New Jersey 1992.
- James P. Ignizio Introduction to expert systems.
- Jovic, Fran Expert systems in process control.
- Jessica Keyes Handbook of expert systems in manufactures.
- Hisayoshi Kajimara (Kyushu Electric Power Co.), Masahiko Kunugi (Toshiba Corporation). An Expert system Assisting fault analysis and restoration of power system. Japan pp. 1 - 27. 1986.
- Willam B. Gevarter (NASA ames Research Center) Introduction to artificial intelligence. Chemical Engineering Process. September 1987.
- Kristian Lien et. al. The role of expert systems technology in design. Chemical Engineering Since, Vol. : 42, No. 5, p.p.: 1049-1071, 1987.
- D.A.H. Jacob's, J.F. MacQueen and G. Marakham. Workshop on expert systems (Milan January 1987) Expert systems and some of the developments in the CEGB. CEGB. Research in confidence. 1987.
- S.K. Shum, J.F. Davis, W.F. Punch III and B. Chandrasekaran An expert system approach to manufacion diagnostics in Chemical plants. Department of Chemical Engineering the Ohio State University Columbus., Comput. Chem. Eng. Vol. : 12; No.1; pp.
- Rowe, H S Peavy Environmental Engineering. Ed. McGraw Hill, New York 1986.
- Metcalf Eddy Tratamiento y depuración de las aguas residuales. Ed. Labor, Barcelona España 1981.
- Herman Hillebue Manual de tratamiento de aguas. Ed. Limusa, 8a., México 1986.
- Winkler Mitchel Tratamiento biológico de aguas de desecho. Ed. Limusa, México, 1886.
- Perry and Chilton Manual del Ingeniero Químico. Ed. Mc Graw Hill, México, 1981.

- Akinov, 1.1 Purification of colored natural waters by electrochemical method.
- Derek Pletcher Industrial electrochemistry. Chapman and Hair, London 1982.
- Murphy The electrochemical splitting of water. Plenum Press, NY 1983.
- WWT and Waster treatment jounary 1993.
- IAWPRC International Associate on Water Pollution Research and Control Wastewater.
- Subsecretaria de planeación, Secretaria de protección y orden ecológico. Planta de tratamiento de aguas residuales. SARH.
- Presidencia de la República Coordinación de proyectos de desarrollo. Plan regional para las aguas residuales en planta de tratamiento. , 1982
- Departamento de sanidad. Manual de tratamiento de aguas negras. Estado de Nueva York USA 1986.
- IMTA Manual de diseño de plantas de tratamiento de aguas residuales.
- Cambridge scientific abstract Pollution abstract. 1987.
- R.S. Ramalho Tratamiento de Aguas Residuales. Ed Reverte España 1991.
- EPA Desing Manual On site Wastewater Treatment and Disposal Systems. EPA/625/1-80/012 October 1980.
- EPA Manual Alternative Wastewater Collection Systems. EPA/625/1-91/024 October 1991
- EPA Development Document for Internal final Effluent Limitations Guidelines and standar of performance. EPA/440/1-76/0599 October 1991
- Harry M. Freman Standar Handbook of Hazardous Waste Treatment and Disposal. McGraw Hill Usa 1994.
- Winkler Mitchel Tratamiento biológico de aguas de desecho. Ed. Limusa México 1986.
- Azad, H.S. Industrial Wastewater Management Handbook. McGraw Hill 1976
- Mark H. Stenzel Remove Organics by Activated Carbon Adsorption. Chemical Engineering Progress April 1993

- Mike E. Goldblatt, et al. Process water treatment and reuse. Chemical Engineering Progress April 1993
- Metcalf and Eddy Inc. Wastewater Engineering, Treatment, Disposal and Reuse. Third Edition. McGraw Hill, Inc New York 1991.
- Dannelle H. Balhateche Choose Appropriate Wastewater Treatment Technologies. Chemical Engineering Progress. August 1995
- MacLaughlin I.A.; et al Develop and Effective Wastewater treatment Estrategy. Chemical Engineering Progress. September 1992
- Herman Hillebue Manual de Tratamiento de Aguas. Ed Limusa México 1986.
- J.H. Sherrand Kinetics and Stoichiometry of Completely Mixed Activated Sludge. Journal WPCI September 1977
- Diario Oficial de la Federación. Organo del gobierno Constitucional de los Estados Unidos Mexicanos, 18 de Octubre de 1993
- Diario Oficial de la Federación. Organo del gobierno Constitucional de los Estados Unidos Mexicanos, 22 de Octubre de 1993.
- Diario Oficial de la Federación. Organo del gobierno Constitucional de los Estados Unidos Mexicanos, 7 de Noviembre 1995.
- Standar Methods for Examination of Water and Wastewater