



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE QUÍMICA

ESTRATEGIAS DE USO EFICIENTE DE AGUA EN EL SISTEMA
NACIONAL DE REFINACIÓN

TESIS

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE
INGENIERA QUÍMICA

PRESENTA
CASANDRA ESTHER SEPÚLVEDA PINTADO



MÉXICO, D.F.

AÑO 2014



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

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

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

JURADO ASIGNADO:

PRESIDENTE: SANDOVAL GONZÁLEZ REYNALDO

VOCAL: VALLE ARIZMENDI LETICIA

SECRETARIO: DURÁN MORENO ALFONSO

1°. SUPLENTE: LAZCANO ARRIOLA LUZ MARÍA

2° SUPLENTE: ANDRACA AYALA GEMA LUZ

SITIO DONDE SE DESARROLLÓ EL TEMA: UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO. CIUDAD UNIVERSITARIA. TORRE DE INGENIERÍA 3ER PISO ALA SUR

ASESOR DEL TEMA:

Dr. Alfonso Durán Moreno

SUPERVISOR TÉCNICO:

Ing. José Arturo Moreno Xochicale

SUSTENTANTE:

Cassandra Esther Sepúlveda Pintado

“Una vez que el equilibrio se rompe, todo el sistema se desmorona”

ABREVIATURAS

API	American Petroleum Institute
mg CaCO ₃ /l	Miligramos equivalentes a carbonato de calcio por litro
ppm	Partes por millón
PTAN	Planta de tratamiento de aguas negras
PTAR	Planta de tratamiento de aguas residuales
SNR	Sistema Nacional de Refinación
UDA	Unidades de desmineralización de agua
BFW	Boiler feedwater
DQO	Demanda Química de Oxígeno
DBO	Demanda Bioquímica de Oxígeno
COT	Carbono Orgánico Total

Contenido

Contenido	<i>i</i>
Tablas	<i>iii</i>
Figuras	<i>iv</i>
1 Introducción	1
2 Objetivos	3
2.1 Objetivo general.....	3
2.2 Objetivos particulares	3
3 Marco Teórico	4
3.1 Generalidades del uso del agua en el proceso de refinación.....	9
3.2 Uso eficiente del agua en una refinería	16
3.3 Calidad del agua y del agua residual	22
3.3.1 Influentes de agua	23
3.3.2 Sistema de generación de vapor	28
3.3.3 Sistema de enfriamiento	30
3.3.4 Sistema contraincendios	33
3.3.5 Sistema para abastecimiento a servicios.....	33
3.3.6 Agua a plantas de proceso	34
3.3.7 Drenajes	34
4 Uso eficiente en el Sistema Nacional de Refinación	35
4.1 Situación Actual	37
4.1.1 Disponibilidad y calidad del agua	42
4.2 Plantas de proceso y uso de agua en el SNR.....	48
4.3 Hallazgos generales.....	50
4.3.1 Problemas generales	50
4.3.2 Pretratamiento.....	51
4.3.3 Generación de Vapor	51
4.3.4 Sistemas de enfriamiento	52
4.3.5 Drenajes	53
4.3.6 Sistema Contra incendio.....	53
4.3.7 Proceso	54
4.3.8 Efluentes	55
4.3.9 PTAR/PTAN.....	55
4.4 Propuestas de mejoramiento	56
4.5 Soluciones generales	57
4.6 Ejemplo de ahorro de agua en una refinería	58



4.6.1	Descripción.....	58
4.6.2	Ahorros en torres de enfriamiento	59
4.6.3	Ahorros en sistema de vapor y condensado	61
4.6.4	Ahorros en sistema contra incendio	62
4.6.5	Ahorros en el las plantas de proceso	63
4.6.6	Ahorros en el área de efluentes.....	63
4.6.7	Ahorros de agua de pozo debido a la PTAR.....	64
4.6.8	Ahorros de agua de pozo debidos a una PTAN.....	64
5	Análisis de Resultados	65
6	Conclusiones	67
7	Recomendaciones.....	69
8	Fuentes.....	70
9	Anexos	78
9.1	Química y calidad del agua	78
9.1.1	Parámetros físicos	79
9.1.2	Parámetros Químicos.....	83
9.1.3	Parámetros biológicos.....	92
9.2	Procesos de tratamiento de agua.....	93
9.2.1	Eliminación de materias en suspensión.....	93
9.2.2	Eliminación de materia disuelta.....	102
9.2.3	Eliminación de compuestos oxidables	114
9.2.4	Eliminación de microorganismos	120
9.2.5	Reducción de desechos líquidos.....	120
9.3	Plantas de la refinería	126
9.3.1	Salmuera (Proceso de desalado de crudo)	126
9.3.2	Aguas amargas.....	129
10	Glosario.....	146

Tablas

Tabla 1.	Tipos de refinerías	5
Tabla 2.	Ejemplos de esquemas de uso del agua y tratamiento de la misma.	12
Tabla 3.	Agua residual proveniente de plantas de proceso de una refinería	15
Tabla 4.	Ejemplos del índice de consumo de agua cruda por barril de producto.	17
Tabla 5.	Algunos tipos de crudos en diferentes países.	19
Tabla 6.	Ejemplos del índice de descargas a cuerpos receptores.	20
Tabla 7.	Características del agua según su fuente.	24
Tabla 8.	Ejemplo de la composición del agua según su fuente	25
Tabla 9.	Características del agua potable	26
Tabla 10.	Promedio de la calidad del agua de lluvia la región central de México de 1992 a 2007.....	27
Tabla 11.	Criterios de calidad del agua para calderas de acuerdo a la presión de trabajo	29
Tabla 12.	Calidad de agua para torres de enfriamiento	32
Tabla 13.	Consumo de agua en cada refinería del SNR	37
Tabla 14.	Porcentaje de uso de agua por refinería.....	39
Tabla 15.	Volumen de agua utilizada por cada refinería (MBD)	40
Tabla 16.	Calidad del Agua de pozo y superficial en Monterrey	42
Tabla 17.	Calidad del agua osmosada del mar	43
Tabla 18.	Calidad del Agua de pozos en el estado de Hidalgo.	44
Tabla 19.	Calidad del Agua de pozos en la región de Salamanca	45
Tabla 20.	Calidad del agua en la Laguna de Chairel	46
Tabla 21.	Algunos parámetros de calidad del río Huazuntlán.....	47
Tabla 22.	Resumen de ahorros en torres de enfriamiento	60
Tabla 23.	Resumen de ahorros en el sistema de generación de vapor	62
Tabla 24.	Tipos de agua según el grado	90
Tabla 25.	Tipos de sedimentadores	95
Tabla 26.	Tipos de suspensiones según la coagulación.....	97
Tabla 27.	Tipos de filtros.....	98
Tabla 28.	Tipos de sistemas de flotación.....	100
Tabla 29.	Diferencias entre los procesos de cal-carbonato en frío y en caliente.....	103
Tabla 30.	Diferentes tecnologías con uso de membranas.....	113
Tabla 31.	Procesos de Oxidación Directa.....	117
Tabla 32.	Resumen de tecnologías para el tratamiento de agua.....	123
Tabla 33.	Composición típica del efluente de la desaladora.	127
Tabla 34.	Agua necesaria para el desalado según el tipo de crudo	128
Tabla 35.	Calidad del agua congénita.....	129
Tabla 36.	Composición típica promedio del efluente de agua amarga de la planta coquizadora.	133
Tabla 37.	Ejemplo de la composición de las aguas residuales de una planta FCC (agua amarga).....	137
Tabla 38.	Ejemplo de la composición del agua residual de la planta de destilación atmosférica (agua amarga)	138

Tabla 39. Ejemplo de la composición de las aguas residuales de una planta de destilación al vacío	140
Tabla 40. Requerimientos típicos del agua endulzada no fenólica	142

Figuras

Figura 1. Secuencia de proceso de refinación.....	8
Figura 2. Esquema general del balance de una refinería	9
Figura 3. Metodologías de diseño de redes de agua dentro de un complejo de refinación.	10
Figura 4. Distribución porcentual de los usos típicos del agua en las refinerías	14
Figura 5. Clasificación de los parámetros principales para caracterizar el agua.	22
Figura 6. Balance másico simplificado del agua en una torre de enfriamiento.	31
Figura 7. Balance general de la refinería	58
Figura 8. Clasificación de las impurezas sólidas del agua.....	81
Figura 9. Distribución de las especies del ácido carbónico como fracciones del contenido total de carbono.	92
Figura 10. Ejemplo de sedimentador.	96
Figura 11. Ejemplo de un filtro granular	99
Figura 12. Esquema del funcionamiento del fenómeno de flotación	100
Figura 13. Esquema del funcionamiento de un separador API.....	102
Figura 14. Ejemplo de una tecnología para tratamiento por precipitación cal-carbonato. Suavizador cal-carbonato en frío.....	104
Figura 15. Esquema del funcionamiento de la electrodiálisis.	107
Figura 16. Unidades de desmineralización (anión fuerte + Cation fuerte).....	109
Figura 17. Adsorción en carbón activado	111
Figura 18. Comparación de los diámetros de poro de diferentes sistemas de membranas.....	113
Figura 19. Tipos de tratamientos biológicos.....	115
Figura 20. Plantas productoras de aguas amargas en la refinería del caso de estudio.	130
Figura 21. Esquema del proceso de coquización retardada convencional.....	132
Figura 22. Proceso de craqueo catalítico fluidizado (FCC).....	135
Figura 23. Ejemplo del porcentaje de Azufre y Nitrógeno en los productos de la FCC.	136
Figura 24. Integración de destilación al vacío y atmosférica.	140
Figura 25. Proceso Claus de dos etapas	142

1 Introducción

El agua es un recurso indispensable para la vida tanto de los seres humanos como de todos los otros organismos que habitan nuestro planeta; es por esto que mantener una buena calidad del agua se ha convertido en una prioridad dentro del marco del desarrollo sustentable. El desarrollo sustentable tiene como objetivo satisfacer las necesidades presentes, de tal forma, que no se comprometa la habilidad de las generaciones futuras para satisfacer sus propias necesidades. El desarrollo sustentable se encuentra conformado por tres niveles diferentes interconectados entre sí: ambiental, social y económico.

La refinación de petróleo es una actividad industrial que requiere grandes cantidades de agua para operar y que genera aguas residuales con contaminantes peligrosos, por lo que una refinería modifica la disponibilidad y la calidad del agua de la región en la que se construye. Para trabajar dentro del marco de la sustentabilidad, se requiere que se lleve a cabo un aprovechamiento integral del agua dentro las refinerías, el cual permita reducir el impacto negativo que dichos centros de trabajo pueden ocasionar no sólo en el medio ambiente de una comunidad, sino en la salud de la población y en los cuerpos receptores de sus aguas residuales.

La cantidad de agua utilizada por las refinerías depende de diversos factores, entre los que destacan el tipo de crudo que procesa, los productos que genera y la calidad de los mismos. Otro factor importante que modifica la cantidad de agua utilizada en el proceso de refinado de crudo es la cantidad de agua que se reúsa dentro de las instalaciones de la refinería. El reúso de agua además de disminuir el consumo de barriles de agua cruda respecto a los barriles producidos (indicador de consumo), disminuye la cantidad de agua que es descargada a cuerpos receptores.



El Sistema Nacional de Refinación mexicano cuenta con 6 refinерías, las cuales tienen configuraciones diferentes, procesos específicos y características propias. Cada una de las refinерías procesa calidades de crudo diferente, genera diversos productos, recibe agua cruda de fuentes de agua específicas, etc. A pesar de las diferencias, se pueden generar estrategias generales para maximizar el ahorro de agua en los diferentes centros de trabajo, requiriéndose posteriormente, trabajos más detallados que evidencien las necesidades específicas de cada refinería.

2 *Objetivos*

2.1 **Objetivo general**

Con base en información del Sistema Nacional de Refinación y de refinerías a nivel internacional proponer estrategias para el uso eficiente del agua en las refinerías mexicanas.

2.2 **Objetivos particulares**

- Recopilar información sobre la refinación de petróleo, detectando consumidores de agua mayoritarios y calidades de agua requerida y generada.
- Establecer la importancia del reúso de agua dentro de una refinería y la relación de ésta con los índices de consumo y descargas a cuerpos receptores.
- A partir de la información recopilada, detectar áreas de oportunidad en el sistema nacional de refinación, proponer estrategias para el uso del agua y estimar su impacto.
- Generar recomendaciones generales para un uso más eficiente del agua en el sistema nacional de refinación.

3 *Marco Teórico*

En la industria, el agua y la energía se encuentran conectadas íntimamente por medio de una relación de producción y consumo; ambos elementos siempre han jugado un papel importante en el proceso de extracción y posterior refinación de hidrocarburos. El mundo moderno requiere una mayor cantidad de energía, lo que se traduce en un aumento de la demanda de combustibles.

Las refinerías de petróleo son complejos industriales con diferentes plantas de proceso que funcionan de forma continua, transformando el petróleo crudo en una serie de productos refinados con diferentes puntos de ebullición y con características variables. El crudo se separa en fracciones que son convertidas en productos terminados mediante una secuencia de transformaciones tanto físicas como químicas.

En la industria de la refinación el agua es fundamental, ya que se utiliza en diferentes áreas y en diferentes procesos. Las refinerías son sistemas complejos con diversas operaciones, las cuales dependen del tipo de crudo procesado y de los productos deseados; por lo que cada refinería es única y tiene sus propios requerimientos de agua.

A pesar de que no existen dos refinerías con configuraciones idénticas, los centros de refinación se pueden clasificar en grupos con características similares, dependiendo de su complejidad. El término complejidad se utiliza en esta industria como un marcador que permite comparar las refinerías dependiendo de su capacidad de agregar valor al petróleo crudo; este aumento en el valor se logra mediante la conversión de las fracciones de crudo pesado en productos livianos y de alto valor que además cumplan las especificaciones de calidad más estrictas; como por ejemplo, los combustibles con contenido ultra bajo de azufre.

En términos generales, todas las refinerías pertenecen a una de las siguientes cuatro clases, las cuales se definen según la configuración del proceso y la complejidad de la refinería, como se muestra en la Tabla 1.

Tabla 1. Tipos de refinerías

Tipo de Refinería	Descripción	Complejidad
Topping (unidades de destilación atmosférica)	Solo realiza destilación del crudo, no se puede controlar los niveles de azufre del producto.	Baja
Hydroskimming (hidrotratamientos)	Incluye la destilación y además tiene reformación catalítica, diferentes unidades de hidrotratamiento y mezcla de productos. Se puede controlar el contenido de azufre en los productos. No alteran el rendimiento natural de los crudos que procesan.	Moderada
Conversión (craqueo)	Incluyen el craqueo catalítico además de los procesos de las hydroskimming. Mejoran el rendimiento natural de los crudos que procesan	Alta
Conversión profunda	Incluyen también el craqueo térmico, mejorando aún más que las de conversión el rendimiento natural de los crudos procesados	Muy alta

Fuente: (Reliance, 2013) & (The international council on clean transportation, 2011)

El proceso de refinación inicia con la desalación del crudo y el precalentamiento del mismo. El crudo precalentado es enviado a una torre de destilación atmosférica; dicha torre separa el crudo en diferentes fracciones dependiendo de su punto de ebullición.

De la unidad atmosférica se obtienen las siguientes fracciones: butanos, gas húmedo ligero, naftas desestabilizadas, naftas pesadas, keroseno, gasóleo atmosférico y fondos de destilación atmosférica. Cada una de estas fracciones es tratada posteriormente, con el propósito de obtener diferentes productos con características específicas.

La corriente de gas húmedo de la unidad atmosférica es mezclada con las corrientes de gas húmedo de la coquizadora y de las unidades de craqueo; dicha mezcla es introducida a una sección de recuperación de vapor (planta de gas), en donde se separan diferentes fracciones. Las fracciones obtenidas en la planta de gas son: gas combustible, gas licuado de petróleo (gas LP), hidrocarburos insaturados (propileno, butilenos y pentanos), butano e isobutano. El gas combustible es quemado en la refinería (en, por ejemplo, calderas) y el butano es mezclado con la gasolina o el gas LP. Los hidrocarburos insaturados y el isobutano son enviados a la planta de alquilación para ser procesados.

Las corrientes de nafta ligera de la torre de destilación de crudo son mezcladas con las provenientes de la planta de coquización y de las unidades de craqueo; dicha mezcla es alimentada a una unidad de isomerización para convertir las parafinas lineales a isómeros con índices de octanaje mayores.

Las corrientes de nafta pesada de la torre atmosférica son mezcladas con las provenientes de la planta de coquización y de las unidades de craqueo; dicha mezcla es alimentada a una reformadora catalítica para mejorar su índice de octanaje. Los productos de la reformadora catalítica son mezclados con las gasolinas regulares y premium para su venta.

Las fracciones de gasóleo provenientes de la unidad de destilación atmosférica son mezcladas con las provenientes de la unidad de vacío; dicha mezcla es alimentada a las unidades de craqueo catalítico e hidro craqueo. La función de estas plantas es la de romper moléculas pesadas, generando moléculas más pequeñas con pesos moleculares menores. Estos productos más ligeros tienen puntos de ebullición que se encuentran en el rango de las gasolinas y combustibles destilados. Los productos de hidro craqueo se encuentran saturados, mientras que los de la unidad de craqueo catalítico se encuentran insaturados, por lo que deben ser posteriormente saturados para mejorar su calidad mediante reformado o hidrotratamiento.

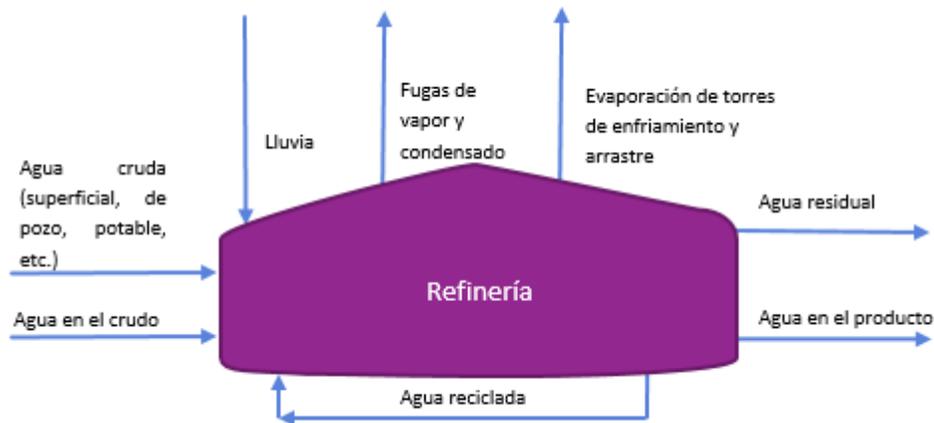
Los fondos de la destilación atmosférica son enviados a una torre de destilación al vacío, en donde se separan las fracciones más pesadas del crudo; obteniéndose gasóleo de vacío y un residuo de vacío. El residuo de vacío tiene una densidad alta y está compuesto por moléculas muy grandes, por lo que es introducido en una unidad de craqueo térmico conocida como coquizadora. Las coquizadoras producen gas húmedo, gasolina de la coquizadora, gasóleo de la coquizadora, y coque. Sin un proceso de coquización, los residuos de vacío son vendidos como combustóleo pesado o como materia prima para producir asfalto.

Una planta que también es importante es la unidad de alquilación catalítica, la cual permite que las olefinas reaccionen con el isobutano para generar isoparafinas con un punto de ebullición que se encuentre dentro del rango de la gasolina. El producto es llamado alquilato y es un producto de alto octanaje que se mezcla con la gasolina para motores premium o en la turbosina.

Cada refinería tiene su proceso único de refinación, el cual se encuentra determinado por los equipos y tecnologías disponibles, las características del crudo a procesar, los costos operativos y la demanda de los productos a generar. El patrón de flujo de cualquier refinería se encuentra dictado por consideraciones económicas y no existen dos refinерías con operaciones o esquemas iguales (GARY & HANDWERK, 2001). La Figura 1 muestra a grandes rasgos el proceso de refinación. Las unidades de proceso son explicadas con un poco más de detalle en el Anexo 9.3

3.1 Generalidades del uso del agua en el proceso de refinación

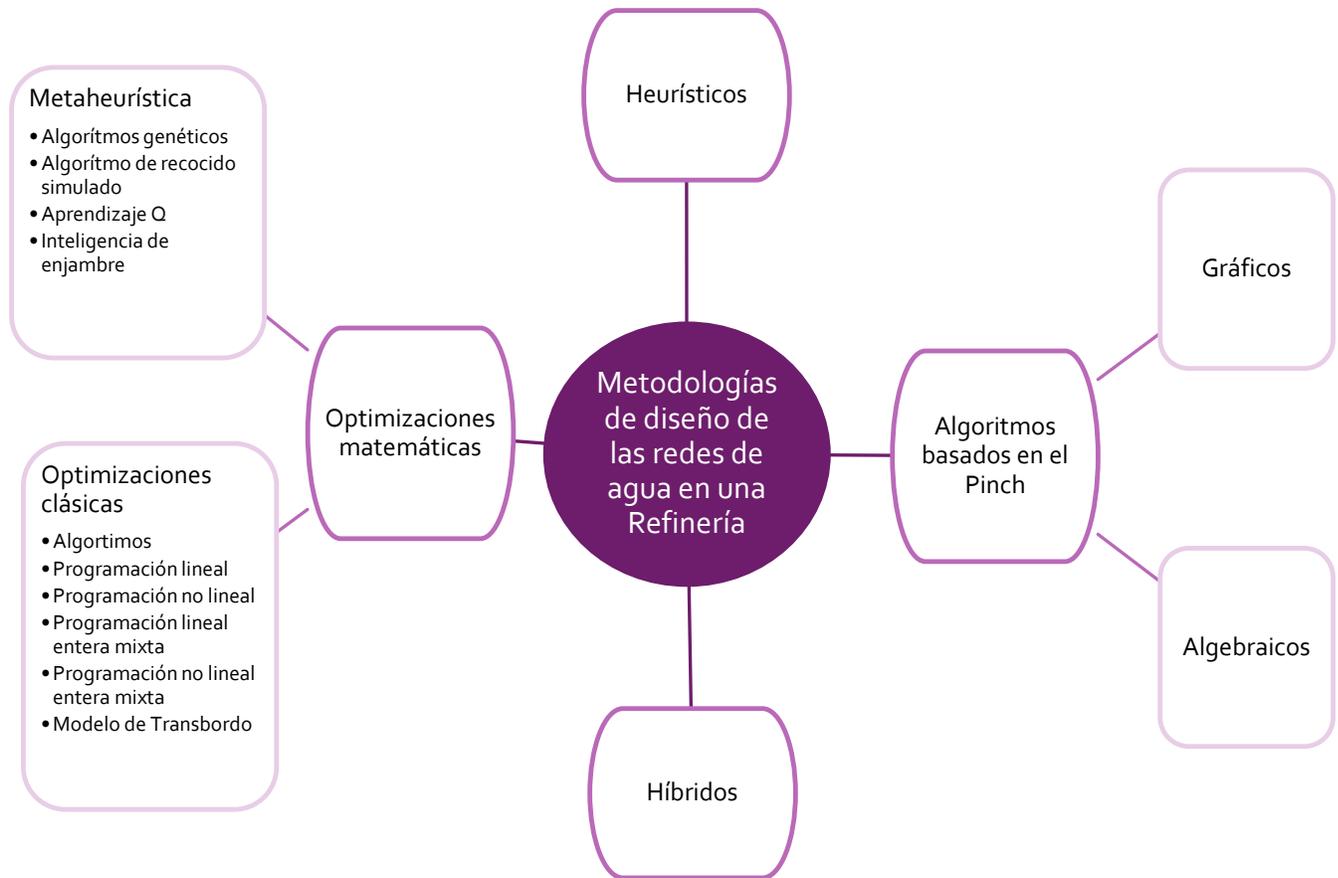
Para conocer los requerimientos del agua se debe conocer el balance tanto de las plantas de proceso como el balance general. El balance global de cualquier refinería se expresa de forma gráfica en la 3.1 Figura 2.



Fuente: Elaboración Propia

Figura 8. Esquema general del balance de una refinería

El uso del agua en una refinería es establecido desde el diseño de la misma. Diseñar la red de agua de una refinería es sumamente complejo, ya que si se busca tener un mejor aprovechamiento del recurso y una menor descarga de efluentes, se deben considerar no solo factores ambientales y técnicos; sino deben tomarse en cuenta también los factores económicos. Al tener tantas variables, se complica el manejo de los datos y la búsqueda de una solución; teniéndose que aplicar herramientas matemáticas para la obtención de la mejor solución. En la Figura 9 se muestran las metodologías de diseño que pueden ser utilizadas a la hora de generar redes de agua.



Fuente: (SUJO-NAVA, SCODARI, SLATER, DAHM, & SAVELSKI, 2009)

Figura 9. Metodologías de diseño de redes de agua dentro de un complejo de refinación.

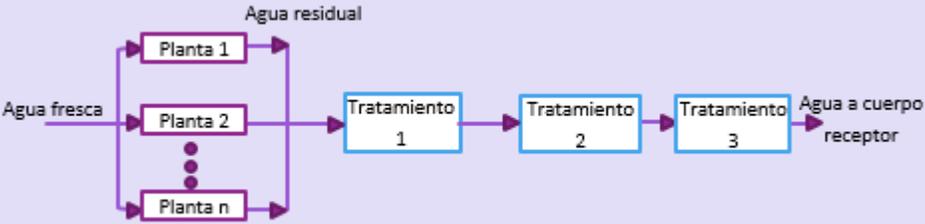
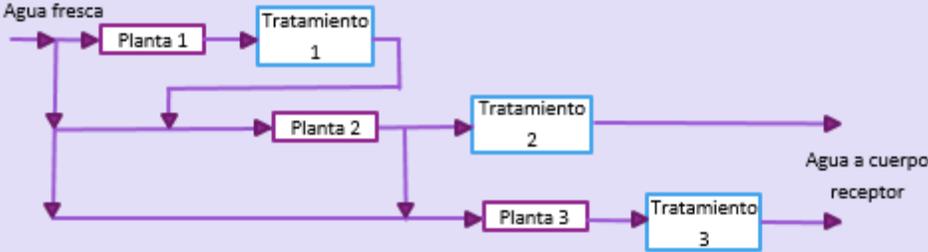
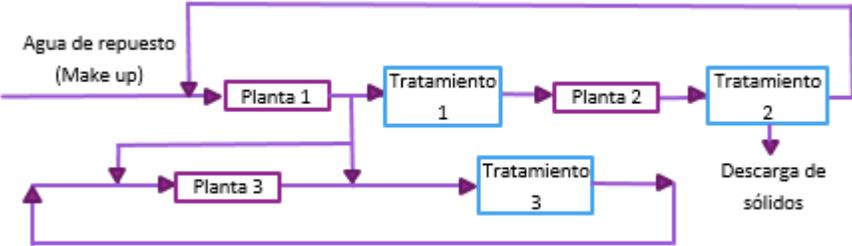
Los resultados arrojados por los diversos métodos difieren en complejidad, variables consideradas, incertidumbre, etc. Los métodos matemáticos y el Pinch de agua suelen ser muy efectivos al conseguir ahorros de energía y agua fresca, pero su efectividad va aunada a su complejidad, por lo que se prefiere simplificar los sistemas con reglas *a priori*. Estas reglas son conceptos de diseño lógicos que permiten simplificar los sistemas y garantizan la disminución de costos, uso de agua y energía.

Existen varias posibilidades para el manejo de agua dentro de una refinería, las cuales dependen de las necesidades y de las decisiones tomadas por los ingenieros durante la

fase de diseño. El esquema más sencillo considera el uso de solo agua fresca para la alimentación de las diversas plantas; considerando que toda el agua residual de la refinería, proveniente de las diferentes operaciones unitarias, se junta en una sola corriente que es tratada para su vertido en algún cuerpo de agua. El esquema más complicado es el de la “descarga cero”, el cual plantea el desarrollo de un circuito cerrado en el que se trata y reúsa toda el agua residual generada; evitando las descargas a cuerpos receptores y disminuyendo la cantidad de agua fresca requerida, ya que solo se requiere alimentar agua fresca para solventar las pérdidas propias a los sistemas de enfriamiento y fugas.

Entre el esquema más sencillo y el más complejo de manejo de agua al interior de la refinería existen otras posibilidades de uso más o menos complejas, dependiendo de la cantidad de agua que sea reutilizada. Los esquemas intermedios contemplan el reúso de agua y el tratamiento de corrientes en forma segregada. El reúso de agua dentro de una refinería no sólo significa una disminución de la cantidad de agua cruda fresca requerida, también significa una disminución en el costo de tratamiento de las aguas residuales. En la Tabla 2 se muestran los sistemas de uso del agua y sus características.

Tabla 2. Ejemplos de esquemas de uso del agua y tratamiento de la misma.

Esquema	Descripción
	<ul style="list-style-type: none"> • Todos los procesos son alimentados con agua fresca y todas las aguas residuales son juntadas no importando su calidad. • Se tiene una serie de tratamientos que permitan al final enviar el agua con la calidad requerida por un cuerpo receptor o un drenaje municipal.
	<ul style="list-style-type: none"> • Esquema con un ahorro de agua fresca pequeño. • Se alimenta agua residual de un proceso a otro sin pasar por tratamiento. • El esquema de tratamiento es el mismo, las corrientes restantes residuales son mezcladas y enviadas a una serie de tratamientos.
	<ul style="list-style-type: none"> • Segregación de corrientes residuales. • Aumento en el reúso de agua. • Disminución de agua residual.
	<ul style="list-style-type: none"> • Esquema de la “descarga cero”. • Reúso máximo de agua en un sistema cerrado. • Uso de agua fresca solo para compensar pérdidas de agua en el sistema. • Únicamente residuos sólidos. <p>Fuente: (Bagajewicz, 2000)</p>

El esquema de manejo de agua conocido como “descarga cero” es bastante llamativo a nivel ambiental; debido a que se elimina totalmente la descarga de corrientes de agua con sustancias peligrosas a cuerpos receptores y se utiliza menos agua fresca; pero sigue siendo un reto a nivel industrial e incluso académico debido a la complejidad inherente a él. El problema más grande para su implementación es lograr que el agua tratada tenga la calidad requerida para su uso en calderas, lo cual se traduce en un aumento en los costos de inversión y operación.

Debido a que el esquema de “descarga cero” es complejo de alcanzar, la tendencia actualmente utilizada en la industria de la refinación es la de la separación de corrientes (BERNÉ, 1995) y (World Bank Group, 1998); esto debido a se tienen las siguientes calidades de agua:

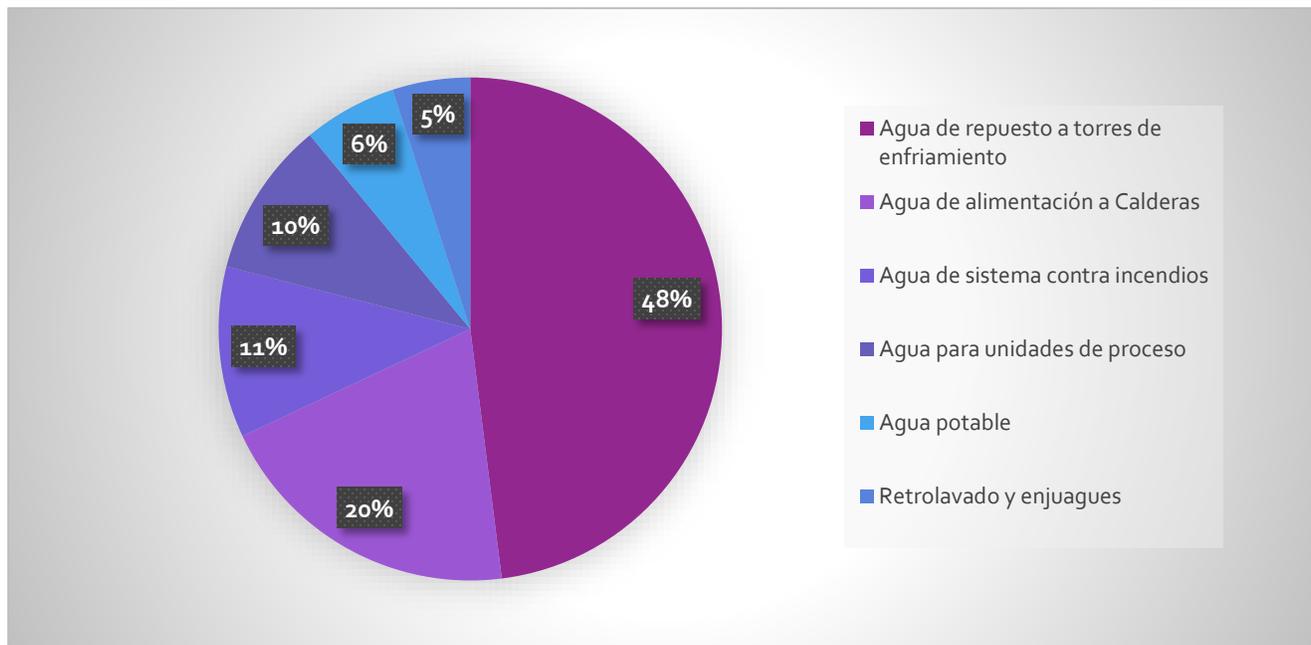
- Corrientes cuyos niveles de S^{2-} y fenoles requieren una secuencia de pretratamiento específico. Enviándolos al sistema general de tratamiento de aguas residuales generaría problemas o haría el tratamiento más costoso.
- Corrientes con poca salinidad que pueden ser reciclables.
- Corrientes salinas, las cuales pueden ser tratadas fácilmente.

La segregación de corrientes es una buena práctica operativa, ya que evita los problemas asociados a la mezcla de corrientes con diferentes calidades; además de que permite, de así quererlo, la recuperación de compuestos.

La generación de una red de agua eficiente depende del análisis de las calidades y cantidades de agua cruda y de agua descargada por las diferentes plantas de proceso. Entre mayor sea el conocimiento de las tecnologías de refinación y sus requerimientos en cuanto a flujo y calidad, mejores redes de distribución y reúso de agua pueden generarse.

Una vez construida una refinería, los ahorros de agua se logran ya sea mediante el hallazgo de problemáticas que disminuyan el ahorro de agua o mediante la implementación de mejoras operativas o tecnológicas que generen una mayor flexibilidad en la operación y disminuyan las necesidades hídricas totales. Para poder analizar las corrientes y sus usos, se requiere conocer las plantas que se tienen y el uso de agua en las mismas.

Dependiendo de la complejidad de la refinería se tendrán diferentes plantas, las cuales tendrán descargas de aguas residuales con características únicas. Los flujos y los valores de los parámetros, tanto de influentes como de efluentes, se verán reflejados en el balance de agua por planta y total. El conocimiento de todas las plantas y sus corrientes permite tener un mejor aprovechamiento del agua, una reducción del agua fresca y una disminución de los efluentes emitidos a cuerpos de agua receptores. En la Figura 10 se ejemplifica la distribución porcentual promedio de los usos del agua en las refinerías de Estados Unidos.



Fuente: (BYERS, GLEN, NOLING, & PETERS, 2002)

Figura 10. Distribución porcentual de los usos típicos del agua en las refinerías

Casi un 70% del agua en una refinería se utiliza en el repuesto a torres de enfriamiento y como alimentación a calderas para la generación de vapor; por lo que a estos dos ámbitos se les debe prestar mucha atención. Por otra parte, sólo un 10% del agua utilizada en una refinería es destinada a las plantas de proceso; dicho porcentaje parece bajo en comparación a los dos primeros rubros mencionados, pero la calidad de los efluentes generados por dichas plantas es mucho menor que en los dos rubros anteriores.

En la Tabla 3 se presenta una caracterización cualitativa del agua por planta de proceso y el porcentaje que el flujo producido en dicha planta representa del total del agua residual proveniente de todas las plantas de proceso.

Tabla 3. Agua residual proveniente de plantas de proceso de una refinería

Proceso	Descripción del agua residual (Contaminantes posibles)	%
1	Destilación	44
2	Craqueo catalítico fluidizado	26
3	Reformado catalítico	10
4	Alquilación	4
5	Dasalado de crudo	4
6	Craqueo térmico/Viscorreducción	3
7	Hidrocraqueo catalítico	3
8	Coquizadora	2
9	Isomerización	2
10	Producción de aditivos (éteres)	-
11	Hidrotratamiento catalítico	2
12	Remoción de azufre/proceso Claus	-
13	Manufactura de aceites lubricantes	-
Total		100

Fuente: (BYERS, GLEN, NOLING, & PETERS, 2002)

Los valores reportados en la Tabla 3 son promedios calculados a partir de información promedio de los Estados Unidos, por lo que difieren a los de otras partes del mundo. La información de esta tabla permite tener una idea general de los porcentajes de aguas residuales generadas y sus contaminantes asociados; lo cual a su vez ayuda en el análisis de las corrientes que se mantendrán segregadas y de las que se juntarán para su posterior tratamiento. De esta manera, cada tratamiento puede ser adaptado a cada nivel de contaminación, teniéndose como resultado que el tratamiento de agua se realice de una manera más efectiva y menos costosa (tanto inversión inicial como operación).

3.2 Uso eficiente del agua en una refinería

Una forma de medir el uso eficiente de agua, el cual se encuentra relacionado al ahorro de agua, es mediante la generación de índices de consumo de agua cruda y desecho de aguas residuales. La industria de la refinación ha progresado en los últimos años; logrando disminuir el promedio de agua requerida por barril de crudo de varios metros cúbicos, en los años 80's, a menos de uno en la actualidad (McMAHON, 2011). Existen diferentes formas de definir un índice y la información representada por él depende de las variables seleccionadas.

Los valores de los índices de consumo de agua cruda permiten realizar comparaciones cualitativas entre el agua cruda que los diferentes complejos de refinación utilizan, pero se debe tener cuidado en su interpretación, ya que no todas las refinerías procesan el mismo tipo de crudo ni tienen las mismas operaciones unitarias.

En la Tabla 4 se presentan ejemplos del índice de consumo de agua cruda por barril de crudo procesado en algunos países. Cabe mencionar que para la generación de dichos índices se consideró el crudo procesado y el agua cruda proveniente de fuentes de primer uso como lo son lagos, lagunas, ríos, el mar, pozos, etc.

Tabla 4. Ejemplos del índice de consumo de agua cruda por barril de producto.

País	Año	Agua cruda	Producción	Índice de consumo de agua	NOTAS
		Barriles/día	Barriles/día	agua/ crudo procesado	
México	2010	1,830,000	1,284,400	1.43	Solo se considera agua cruda utilizada en PEMEX refinación. (PEMEX, 2012), (UNAM, 2010)
USA	2009	715,443	476,962	1.50	Agua requerida en promedio. (McMAHON, 2011)
Arabia Saudita	2009	7,000,000	5,000,000	1.40	Ghawar Oil Field. (McMAHON, 2011)
Canadá	2011	344,647	299,843	1.15	Agua requerida para el sistema de refinación (incluye crudo ligero y los pesados, excluyendo el crudo obtenido de campos de arena). (Canadian Association of Petroleum Producers, 2011).
España	2008	136,705	220,000	0.62	Refinería de Bilbao de Petronor y Repsol. (Repsol, 2011) & (Petronor, 2008)
Alemania	2011	70,940	129,412	0.55	Refinerías de la empresa Bayernoil. (Bayernoil, 2012)
Rusia	2011	615,898	747,000	0.82	Datos de TNK-BP (TNK-BP, 2011)
Colombia	2011	1,139,648	724,000	1.57	Datos de la empresa Ecopetrol (Ecopetrol, 2012)
Finlandia	2012	128,036	56,256	2.28	Información que conjunta dos plantas finlandesas y sus asociados, incluyen procesos de producción de diesel renovable. (Nesteoil, 2013)
India	2008	958,636	405,305	2.37	Datos de Bharat petroleum. (Bharat Petroleum, 2008).
	2012	2,070,079	1,553,210	1.33	Datos de la compañía Reliance. (Reliance, 2012)
Brasil	2011	3,289,657	2,614,000	1.26	Datos de la empresa Petrobras. (Petrobras, 2011). Los datos de agua utilizada incluyen agua residual de oficinas administrativas.
Emiratos árabes unidos	2011	1,650,860	2,500,000	0.66	Información de Abu Dhabi. (Abu Dhabi National Oil Company, 2011)
Noruega	2012	187,833	669,000	0.28	Información de la empresa Statoil. (Statoil, 2013)

Fuente: Las citadas y elaboración propia de los resultados.

Los índices se obtuvieron a partir de los informes que las diferentes empresas realizaron después de un año particular de operación, al haberse conseguido información de años diferentes, debe tenerse en cuenta de que el valor del índice pudo cambiar de un año a otro al establecerse, por ejemplo, una planta de tratamiento de aguas residuales. En un caso como este, el valor del agua cruda requerida disminuiría debido a que parte del agua residual es reutilizada, disminuyendo a su vez la presión que la refinería genera sobre el recurso hídrico en la región en donde se encuentra establecida.

Otro punto importante que debe ser considerado es el hecho de que no se sabe el tipo de refinería o refinerías con las que cuenta cada empresa o país. La complejidad de una refinería se encuentra ligada al número de plantas que ésta tiene y al volumen de agua requerida para realizar el proceso de refinación. Una refinería más compleja tiene más plantas y requiere una mayor cantidad de agua para funcionar.

Finalmente, otro punto que debe ser mencionado es la relación entre la composición del petróleo crudo y el volumen de agua requerida para su procesamiento. Entre mayor sea el contenido de azufre en el crudo, mayor será la cantidad de agua requerida para elaborar productos refinados que cumplan con los requerimientos ambientales. Por otro lado, los grados API del crudo también modifican indirectamente la cantidad de agua requerida para refinación del mismo. Entre menor sea el valor de los grados API de un crudo, más procesos debe tener para lograr su conversión a gasolinas y productos ligeros; esto debido a que si un crudo tiene un valor bajo de grados API es más denso y tiene moléculas más grandes y más parecidas a asfaltos. En la Tabla 5 se muestran algunos ejemplos de los tipos de crudo en diferentes países.

Tabla 5. Algunos tipos de crudos en diferentes países.

PAÍS	NOMBRE	GRADOS	CONTENIDO DE AZUFRE
		° API	%
Arabia Saudita	Arab Extra Light	38.4	1.16
	Arab Heavy	27.5	2.92
	Arab Light	32.7	1.8
	Arab Medium	31.8	2.45
	Arab Super Light	50.6	0.04
Brasil	Marlim	19.6	0.67
Canadá	Albian Heavy	19.6	2.1
	Bow River	24.7	2.1
	Cold Lake	21.2	3.7
	Hibernia	35.8	0.4
	Premium Albian	35.5	0.04
	Syncrude Sweet Blend	30.5-33.6	0.07-0.13
	Terra Nova	33.2	0.48
	Western Canada	20.3	3.43
	White Rose	29.8	0.32
Colombia	Cano Limón	29.2	0.5
	Cusiana	43.8	0.11
EUA	Alaska North Slope	31.9	0.93
	Heavy Louisiana	32.6	0.37
	Light Louisiana	36.4	0.13
	Mars Blend	30.5	1.81
	Southern Green	30.4	2.24
	West Texas	38.7	0.45
	West Texas Sour	31.7	1.28
México	Istmo	33.4	1.25
	Maya	21.8	3.33
	Olmeca	39.3	0.79
Noruega	Asgard	48.9	0.08
	Balder	30.1	0.48
	Draugen	40.8	0.14
	Ekofisk	37.7	0.21
	Grane	19	0.85
	Gullfaks	36.4	0.27
	Heidrun	25	0.52
	Norne	30.8	0.22
	Oseberg	37.8	0.26
	Sleipner	60.39	0.02
	Statfjord	39.7	0.24
	Troll	31.14	0.21
Rusia	Siberian Light	35.1	0.57
	Sokol	37.9	0.23
	Urals	31-32	0.8-1.8
	Vityaz	34.6	0.22

*Se muestran crudos exportados, hay más tipos de crudo por país.

Fuente: (Energy Intelligence, 2013)

En lo referente a las descargas de agua por parte de las refinerías a cuerpos receptores, también se han realizado mejoras en la calidad y volumen de agua descargada a través de los años. En la Tabla 6 se presentan ejemplos del cálculo del índice de agua descargada por barril de crudo procesado en algunos países.

Tabla 6. Ejemplos del índice de descargas a cuerpos receptores.

País y empresa	Año	Producción	Agua residual generada	Índice de descarga de agua	NOTAS
		Barriles /día	barriles/día	Descarga/producción	
México	2005	1,284,400	522,880	0.41	PEMEX Refinación. (PEMEX, 2012)
Alemania	2011	129,412	67,673	0.52	Refinerías de la empresa Bayernoil. (Bayernoil, 2012)
Rusia	2011	747,000	271,720	0.36	Datos de TNK-BP. (TNK-BP, 2011)
Colombia	2011	724,000	1,274,850	1.76	Datos de la empresa Ecopetrol. (Ecopetrol, 2012)
Finlandia	2012	56,256	170,669	3.03	El volumen de agua descargada es grande debido a que se considera también el agua utilizada para la generación de diésel renovable. (Nesteoil, 2013)
India	2008	405,305	639,320	1.58	Datos de Bharat Petroleum (Bharat Petroleum, 2008).
	2012	1,553,210	378,723	0.24	Datos de la compañía Reliance (Reliance, 2012)
Brasil	2011	2,614,000	3,239,683	1.24	Datos de la empresa Petrobras. (Petrobras, 2011) Los datos de agua descargada incluyen agua residual de oficinas administrativas.
Emiratos árabes unidos	2011	2,500,000	642,767	0.26	Información de Abu Dhabi. (Abu Dhabi National Oil Company, 2011) El agua residual no contempla la descarga de agua de enfriamiento, ya que no usan torres; sus sistemas son de un solo paso.

Fuente: Las citadas y elaboración propia de los resultados.

Los valores de los índices de agua descargada permiten realizar comparaciones cualitativas entre los diferentes centros de refinación. Las comparaciones entre el índice de consumo de agua cruda y el de agua descargada nos permiten conocer un poco más sobre cada refinería y si implementan o no medidas de ahorro de agua. Para poder tratar el agua para su reúso o descarga a un cuerpo receptor se debe conocer su calidad y cantidad.

Dentro de este contexto, si se tuviera más información sobre los procesos específicos y volúmenes de agua utilizados por cada uno, se podrían tener otros índices de consumo que permitieran realizar comparaciones más a fondo sobre cada refinería, los procesos que la componen y se obtendría indirectamente una medida de que tan buenas son las prácticas operativas en cada centro de trabajo.

3.3 Calidad del agua y del agua residual

La calidad del agua se encuentra definida por parámetros físicos, químicos y biológicos. Dependiendo de los valores de los parámetros antes mencionados, se dice si un agua cumple o no los requerimientos para ser utilizada en cierto proceso o para ser descargada a algún cuerpo receptor. Los parámetros principales utilizados para la caracterización del agua se enlistan en Figura 11. Las definiciones e importancia de los parámetros se mencionan en el Anexo 9.1 .

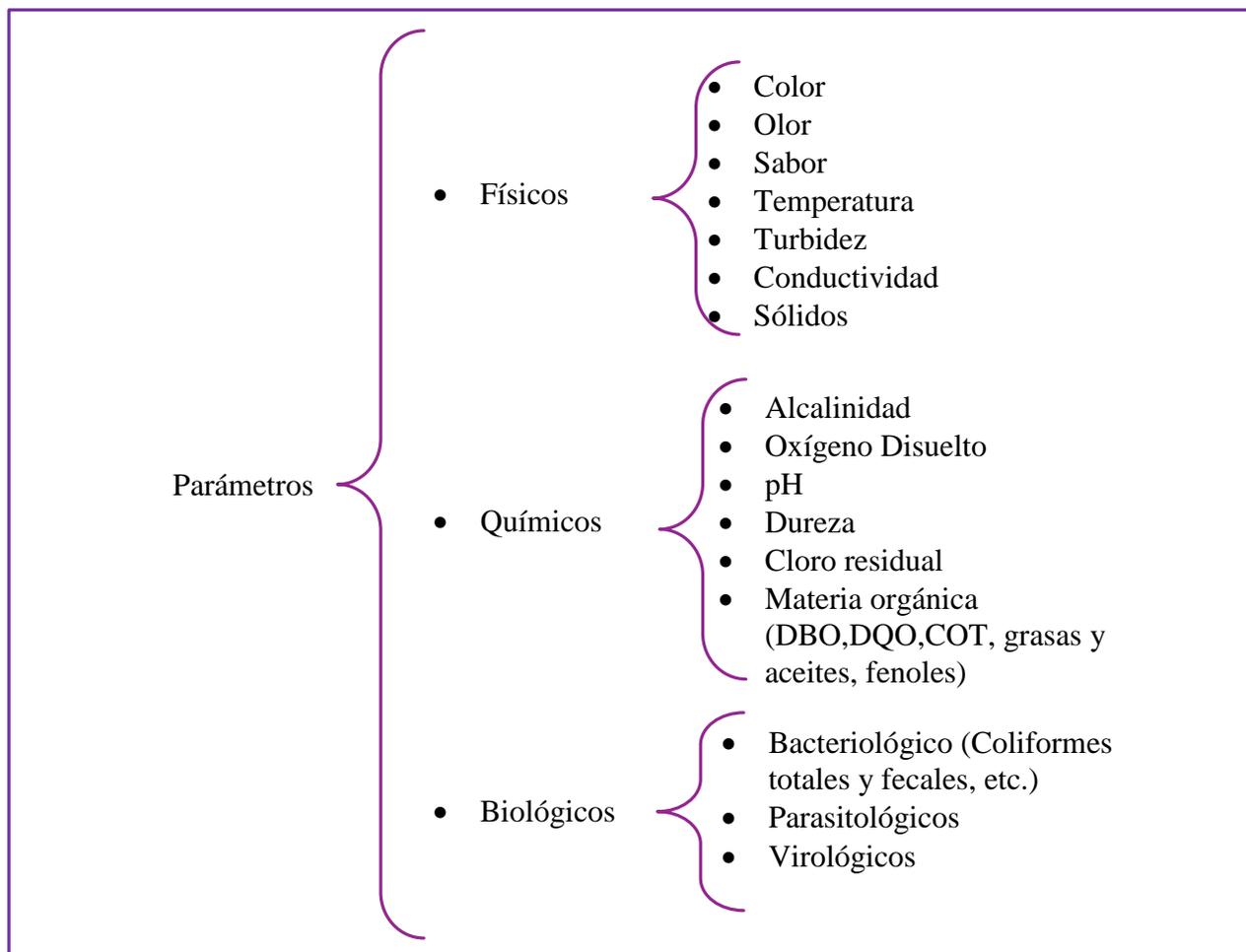


Figura 11. Clasificación de los parámetros principales para caracterizar el agua.

El agua en una refinería puede, desde la perspectiva del balance, separarse en dos ámbitos diferentes: agua que será usada para un proceso o sistema (influyente al proceso) y agua residual que debe ser tratada (efluente del proceso). Las aguas residuales de las refinerías tienen una composición que depende del uso que se les dio. El agua puede separarse en dos tipos principales: agua que estuvo en contacto con hidrocarburos y agua que no estuvo en contacto con hidrocarburos.

3.3.1 Influentes de agua

Las refinerías tienen varias entradas de agua; por lo que para la realización de un balance hídrico correcto se deben considerar todas las fuentes posibles de agua y sus destinos finales; además de la adecuada identificación de las corrientes que son reutilizadas en alguna otra parte del centro de trabajo. El agua utilizada puede provenir de diversas fuentes, ya sea de agua dulce, salada o residual; y es utilizada después de recibir un tratamiento adecuado que le dé las características que, por especificación de los equipos y del proceso, se requieren.

Las características biogeoquímicas de los diferentes tipos de agua que ingresa a la refinería dependen de la fuente de la que provienen. Se tienen las siguientes entradas de agua: agua cruda, agua potable, agua en el crudo, agua pluvial y agua de reúso. Cada una de estas entradas tiene características únicas cuyo conocimiento es fundamental para un buen aprovechamiento del recurso.

El grado de pureza del agua dependerá de su uso particular. El pretratamiento del agua cruda que entre a las plantas debe incluir cribado y sedimentación para eliminar sólidos suspendidos, pero las siguientes partes del tratamiento dependerán del uso específico. En general se separan las calidades requeridas en: agua para proceso, agua para calderas, agua para procesos de enfriamiento (torres de enfriamiento), agua potable, agua para el sistema contraincendios y agua de servicios.

3.3.1.1 *Agua Cruda*

El agua cruda para proceso puede provenir de fuentes de agua dulce o salada ya sean superficiales o subterráneas. La calidad del agua depende de la fuente; teniéndose valores característicos de sólidos suspendidos totales, sólidos disueltos, turbidez, DQO, etc. El grado de pretratamiento que el agua requiere dependerá de su procedencia y de los usos que se le darán dentro de la refinería. Las características generales de cada tipo de fuente se muestran en la 3.3.1.1Tabla 7.

Tabla 7. Características del agua según su fuente.

	Agua Dulce		Agua Salada
	Subterránea	Superficial	Subterráneo/ Superficial
Proviene de:	Acuíferos que se recargan con agua filtrada desde la superficie; se extrae por medio de pozos	Ríos, lagos y depósitos no muy profundos	Fuentes en contacto con agua de mar
Composición	Constante	Variable (cambios biogeoquímicos estacionales)	Constante
Cantidad de minerales	Alta	Baja	Muy alta
Turbidez	Baja	Alta (variable)	alta
Color	Sin color o muy bajo	Tiene color variable	variable
Microorganismos	Pocos organismos	Gran cantidad de biodiversidad (bacterias, virus, algas)	Gran biodiversidad
Oxígeno	Poco oxígeno disuelto	Oxígeno disuelto	Oxígeno disuelto
Dureza	Alta	Baja	Muy alta
Sabor y olor	Sin	Con ambos	Con ambos
Otros	Los acuíferos se encuentran en condiciones de bajas temperaturas y altas presiones lo que promueve la disolución de carbonatos	Diversidad de sustancias, expuestas a contaminación de fuentes intermitentes o continuas	Las características cambian dependiendo de la profundidad

Fuente: Elaboración propia a partir de (PINTADO & OSORNO, 2006), (WEBER, 2003), (RODRÍGUEZ, 2006)

En la industria se prefiere usar agua dulce que agua salada, ya que este tipo de agua contiene sólidos suspendidos y sólidos disueltos (metales y cloruros) en grandes cantidades; por lo que para poder ser utilizada se requieren tratamientos más costosos que los requeridos por el agua dulce. En la Tabla 8 se muestra la composición típica del agua según su fuente.

Tabla 8. Ejemplo de la composición del agua según su fuente

Constituyente (mg/l)	Agua de mar	Agua superficial	Agua subterránea
Sodio	10,710	6.3	30
Magnesio	13,77	4.1	7
Calcio	408	15	50
Potasio	387.6	2.3	3
Cloruros	19,380	7.8	20
Sulfatos	2,754	3.7	30
Bicarbonatos	144.84	58	200
Sólidos disueltos totales	35,190	120	350

Fuente: (CARRILLO, 2013) Dr. Jaime Alejandro Carrillo Chávez especialista en hidrogeológica. UNAM

3.3.1.2 *Agua Potable*

El agua potable se requiere en las refinerías para su uso en cocinas, baños, en duchas, lavajos y como diluyente en algunas operaciones dentro de la refinería. Este tipo de agua puede ser provista por el municipio o puede utilizarse agua suavizada para este propósito. El agua potable debe estar clorada para destruir las bacterias que pudieran existir y debe tener su propia tubería y sistema de distribución para evitar la posibilidad de que exista una contaminación cruzada. Las características del agua potable en México se muestran en la Tabla 9.

Tabla 9. Características del agua potable

Característica	Unidades	Límite permisible
Color	Platino-cobalto	20
Olor y sabor	-	Agradable
Turbiedad	UNT	5
Cianuros	mg/l	0.07
Cloro residual libre	mg/l	0.2-1.50
Dureza total	mg CaCO ₃ /l	500
Fenoles o compuestos fenólicos	mg/l	0.001
Fierro	mg/l	0.3
Fluoruros	mg/l	1.5
Amoniaco	mg/l	0.5
pH	Unidades de pH	6.5-8.5
Sulfatos	mg/l	400

Fuente: (SSA, 2000)

3.3.1.3 *Agua en el crudo*

El crudo a procesar también contiene agua; dicha agua proviene del proceso de extracción del pozo y de acumulaciones durante el transbordo y envío a la refinería. Dicha agua es removida típicamente de los fondos de los tanques de almacenamiento (sedimento) o es removida del crudo en el proceso de desalado y, por lo general, es enviada a un tratamiento de agua residual.

Los tanques que almacenan gasolina también tienden a acumular agua en el fondo; por lo que estos tanques también tienen un sistema de drenado, los cuales evitan que se drene producto inadvertidamente. La cantidad de agua depositada en estos tanques es mucho más pequeña que la que se deposita en los tanques de crudo y tiene una calidad mejor a la registrada por esos tanques.

3.3.1.4 *Agua de lluvia*

La lluvia es otra fuente de agua dentro de las refinerías. Dependiendo del sitio donde haya caído se le da o no tratamiento. El agua que precipita dentro de los límites de batería es típicamente tratada antes de ser descargada; mientras que el agua que cae en zonas que no son industriales, como lo son: estacionamientos, áreas verdes o edificios administrativos puede ser descargada sin tratamiento dependiendo de las regulaciones locales. El agua de lluvia no contaminada puede ser utilizada en ciertos procesos como lo es el lavado de equipo, solo si es almacenada apropiadamente y tratada en caso de requerirlo.

En la Tabla 10 se muestra un ejemplo de calidad promedio de agua de lluvia. La calidad del agua varía dependiendo de la estación del año e incluso de las variaciones de la época de estiaje y lluvias.

Tabla 10. Promedio de la calidad del agua de lluvia la región central de México de 1992 a 2007.

Constituyente (mg/l)	Agua de Lluvia
Sodio	0.13
Magnesio	0.05
Calcio	0.76
Potasio	0.10
Cloruro	0.33
Sulfato	3.15
Nitratos	2.77
Amoniaco	1.6254
pH (unidades de pH)	5

Fuente: (BAEZ & al, 2009)

3.3.1.5 *Agua residual tratada*

El destino de cada tipo de agua dependerá del grado de contaminación y del manejo que se prevea durante la fase de ingeniería; pudiéndose juntar efluentes con diferentes contaminantes para luego tratarse o realizándose tratamientos por separado. El agua no contaminada con hidrocarburos puede ser reutilizada en otros procesos o descargada sin tratamiento. Las diferentes aguas residuales contaminadas pueden ser reutilizadas dentro de las refinerías, después de ser tratadas y acondicionadas para ello. En el Anexo 9.2 se indican los tratamientos que pueden ser aplicados a las diferentes corrientes residuales.

3.3.2 **Sistema de generación de vapor**

3.3.2.1 *Agua para calderas*

El agua para calderas, BFW por sus siglas en inglés (Boiler feedwater), y que es requerida para la generación del vapor debe ser suavizada. El grado de pureza requerido depende del tipo de vapor que se vaya a generar, entre mayor sea la presión del vapor, mayor deberá ser la pureza del agua alimentada. La calidad del agua a calderas debe ser alta, ya que malas calidades alimentadas generan vapor de una calidad pobre.

Los sistemas de vapor son construidos principalmente de acero al carbón y el medio de transferencia de energía es agua, por lo que el potencial de depósito de impurezas y corrosión es alto. Las impurezas más problemáticas para las calderas y las turbinas de vapor son los cationes calcio y magnesio, la sílice, los cloruros, el oxígeno y el hierro. Existen varios estándares de calidad de agua para calderas, dependiendo del tipo de caldera y su presión de operación. En la 3.3.2.1 Tabla 11 se muestra un criterio de calidad de agua para calderas dependiendo de la presión.

Tabla 11. Criterios de calidad del agua para calderas de acuerdo a la presión de trabajo.

Parámetro	Unidades	Rango							
		0-20	21-30	31-42	43-52	53-63	64-70	71-105	106-140
Presión	kg/cm ²	0-20	21-30	31-42	43-52	53-63	64-70	71-105	106-140
Hierro	ppm	0.10	0.050	0.030	0.025	0.020	0.020	0.010	0.010
Cobre	ppm	0.05	0.025	0.020	0.020	0.015	0.015	0.010	0.010
Dureza Total	ppm CaCO ₃	0.30	0.300	0.200	0.200	0.100	0.050	ND	ND
Sílice	ppm	150	90	40	30	20	8	2	1
Alcalinidad Total	ppm CaCO ₃	350	300	250	200	150	100	NS	NS
Conductividad específica	(µmho/cm)	3500	3000	2500	2000	1500	1000	150	100

ND: no detectable, NS: no especificado

Fuente: (Comisión Nacional para el Uso Eficiente de la Energía y Secretaría de Energía, 2013)

El tratamiento para obtener agua con calidad adecuada para su uso en calderas consiste en varios pasos. La primer etapa es por lo general una coagulación para eliminar turbidez y coloides en el agua cruda. El segundo tratamiento consiste en una precipitación química, por lo general se utiliza el proceso cal-carbonato, esto con el fin de reducir la dureza, la alcalinidad y la sílice. Posteriormente, el agua se purifica mediante intercambio iónico u ósmosis inversa para la suavización del agua. Todos estos tratamientos provocan una corriente de rechazo o purga que debe ser tratada debido a su alto contenido de minerales (SIEMENS, 2013).

3.3.3 Sistema de enfriamiento

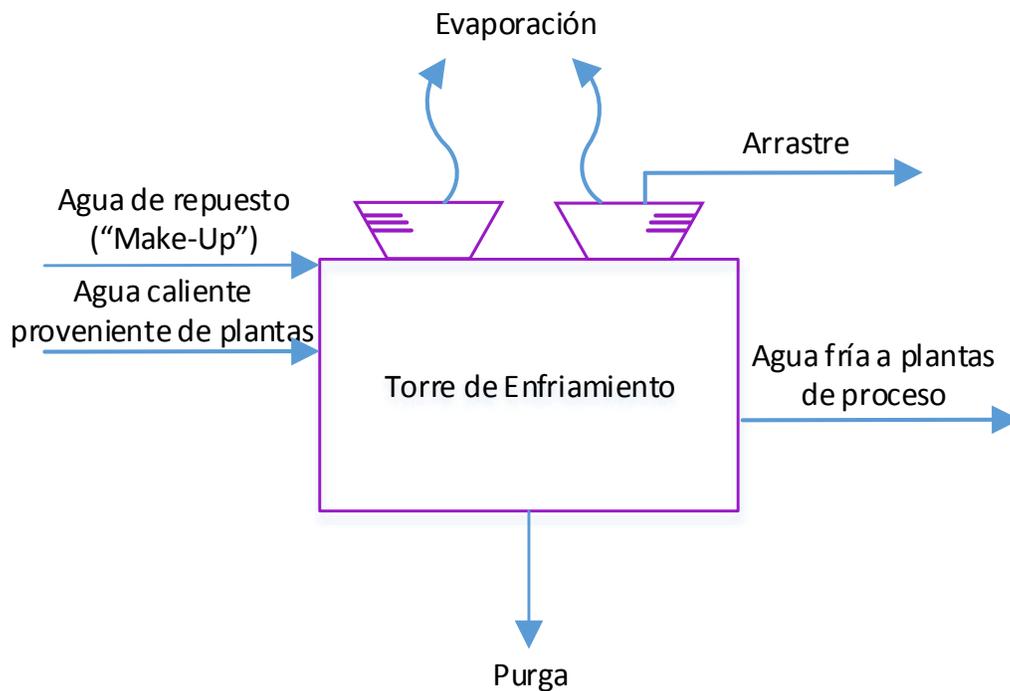
Las refinerías requieren enfriar corrientes de proceso; para ello utilizan equipos de intercambio de calor que permiten la transferencia de energía de una corriente a otra, ya sea que utilicen agua o aire. El uso de enfriadores de aire disminuye el consumo de agua, pero incrementa el consumo eléctrico.

Un problema común en los sistemas de enfriamiento son las fugas de agua a las corrientes de proceso; esto ocurre cuando la presión del agua de enfriamiento es mayor a la de la corriente de proceso en un intercambiador de calor; lo cual origina fugas internas en el equipo y que el agua termine en la corriente de proceso. El agua mezclada con la corriente de proceso es separada posteriormente en algún punto de separación. En cambio, si llega a haber una fuga de la corriente de proceso al sistema de enfriamiento, se obtiene agua aceitosa, la cual tiene que ser separada y tratada.

Algunas refinerías usan sistemas de un solo paso en donde el líquido frío es tomado de una fuente, utilizado y reenviado a la fuente con una mayor temperatura; pero dicha práctica se evita en lugares en donde el agua es un recurso escaso. Por lo que la mayor parte de las refinerías e industrias utilizan torres de enfriamiento para recircular el agua; por lo general el agua que estos sistemas proveen se encuentra a 15°C y regresa a la torre a aproximadamente a 50°C. Las torres de enfriamiento utilizan aire atmosférico para enfriar el agua de proceso. Dentro de las torres, el agua caliente entra en contacto con el aire atmosférico, lo cual genera un intercambio de energía y de materia entre el aire y el agua. Por lo que si el aire contiene contaminantes, éstos serán absorbidos por el agua cambiando su composición.

Los sistemas de enfriamiento requieren evitar la formación de incrustaciones, corrosión y formación de algas; además de que requieren un tratamiento que disminuya los minerales disueltos, ya que en estos sistemas hay evaporación y los contaminantes se concentran. Para mantener constante la cantidad de agua de enfriamiento que es enviada a las plantas, se repone el agua perdida con agua fresca y agua tratada; esta agua se

conoce como “Make-up a torres de enfriamiento”. En la Figura 12 se muestra un balance del agua simplificado en una torre de enfriamiento.



Fuente: (SUJO-NAVA, SCODARI, SLATER, DAHM, & SAVELSKI, 2009)

Figura 12. Balance másico simplificado del agua en una torre de enfriamiento.

La calidad del agua de repuesto define la cantidad de ciclos de concentración que existirá en la torre de enfriamiento. Debe analizarse la cantidad de ciclos de concentración máximos posibles para cada contaminante, con el fin de que el agua que circula por el sistema de enfriamiento cumpla los requerimientos de éste. En la Tabla 12 se muestran los requerimientos de agua para torres de enfriamiento.

Tabla 12. Calidad de agua para torres de enfriamiento

Parámetro	Unidades	“Make-up”	Sistema de enfriamiento
pH	Unidades de pH	6.8-7.2* 7.8-8.4**	7-9
DBO	mg/l	<100	200 máx.
TDS	mg/l	70,000	-
TSS	mg/l	<100	200
Alcalinidad	mg CaCO ₃ /l	30-50* 200-250**	-
Dureza de Calcio	mg CaCO ₃ /l	900 máx.	1,500 máx.
Dureza de Magnesio	mg CaCO ₃ /l		
Sílice	mg/l	150	300 máx.
S	mg/l	5	10
Al	mg/l	<1	1
Fe (total)	mg/l	<0.5	10 máx.

*Sin inhibidor de incrustaciones

** Con inhibidor de incrustaciones

Fuente: (Electric Power Research Institute, 2003)

Los ciclos de concentración están definidos por la relación entre la concentración de la corriente de purga y la concentración de la corriente de reposición:

$$\text{Ciclos de concentración} = \frac{x_P}{x_R}$$

Donde:

X_P= Concentración del contaminante en la corriente de purga y,

X_R= Concentración del contaminante en la corriente de repuesto.

Entre mejor sea la calidad del agua de reposición o “make up”, mayor será la cantidad de ciclos de concentración del sistema; cabe destacar que es importante realizar este cálculo para los diferentes contaminantes, dependiendo de su concentración límite permitida.

La cantidad de agua purgada depende del número de ciclos de concentración:

$$Purga = \frac{Evaporación}{Ciclos - 1}$$

En esta ecuación se observa que al mantener la evaporación constante y al aumentar los ciclos de concentración, el volumen de la purga disminuye.

3.3.4 Sistema contraincendios

3.3.4.1 Agua contra incendios

Los requerimientos de agua contra incendios en la refinería son intermitentes y de flujo desconocido; en algunos casos de emergencia pudieran requerirse volúmenes de agua muy altos. Por lo general, las refinerías colectan el agua de lluvia no contaminada y la almacenan en tanques dedicados al sistema contra incendio. También es normal que el sistema contra incendio de las refinerías cuente con una conexión al suministro de agua cruda de la refinería por si el agua necesaria excediera la cantidad de agua disponible en el sistema contra incendio.

3.3.5 Sistema para abastecimiento a servicios

El agua de servicios se utiliza para operaciones de lavado; por lo que debe encontrarse libre de sedimentos y no requiere un tratamiento extra que el dado en pretratamiento.

3.3.6 Agua a plantas de proceso

Las plantas de proceso utilizan agua para diversas operaciones, entre las que destacan:

- Arrastre con vapor en columnas de destilación.
- Lavado.
- Operaciones específicas en algún equipo (ejemplo: decoquizado con agua a presión en planta coquizadora).

El tema del uso del agua en las diferentes plantas de proceso se aborda con una mayor profundidad en el Anexo 9.3 .

3.3.7 Drenajes

Tanto las plantas de proceso como las áreas administrativas y las calles dentro de una refinería tienen drenajes, a los que llega agua que siendo tratada puede ser reutilizada. La calidad del agua que llega a los drenajes depende del área en donde se encuentra el drenaje. El agua de los drenajes de las áreas de proceso puede contener residuos aceitosos y químicos, mientras que el agua que llega a los drenajes de las áreas comunes, como calles, tiene una calidad bastante buena. Los drenajes de las áreas administrativas contienen materia orgánica proveniente de baños y cocinas.

El tratamiento que se realice al agua de drenajes depende de las decisiones que se tomen durante el diseño de la planta, ya que dependiendo de esto, se separarán los diferentes tipos de drenajes y se tratarán por separado, o se juntarán en un solo cárcamo para su tratamiento en conjunto.

4 *Uso eficiente en el Sistema Nacional de Refinación*

El sistema nacional de refinación se encuentra constituido por seis refinerías cuyos nombres y ubicaciones son:

- “Miguel Hidalgo” en Tula, Hidalgo.
- “Ing. Antonio M. Amor” en Salamanca, Guanajuato.
- “Ing. Héctor R. Lara Sosa” en Cadereyta, Nuevo León.
- “Francisco I. Madero” en Ciudad Madero, Tamaulipas.
- “Ing. Antonio Dovalí Jaime” en Salina cruz, Oaxaca.
- “Gral. Lázaro Cárdenas” en Minatitlán, Veracruz.

Las seis refinerías mexicanas utilizan agua proveniente de fuentes superficiales y subterráneas, siendo sus volúmenes y calidades únicas para cada centro de trabajo; además de esto, las refinerías utilizan agua residual y agua negra tratada para sus procesos.

Durante la última década del siglo pasado Pemex, al percibir la alta presión sobre el recurso hídrico y los altos volúmenes de agua requeridos por las refinerías, inició acciones para lograr una disminución del uso de agua cruda en los centros de trabajo. Una de estas acciones es el proyecto de Uso integral del agua en Refinerías (TERAN Escandón, 1994). En dicho proyecto, se planeó y licitó la construcción de plantas de tratamiento de aguas residuales en las diferentes refinerías, con el fin de reutilizar el agua residual de efluentes. Actualmente, las seis refinerías de Pemex cuentan con plantas de tratamiento de aguas residuales; las cuales tienen diferentes trenes de tratamiento y entregan agua con la calidad requerida en torres de enfriamiento y/o en unidades desmineralizadoras.

En lo referente al uso de agua negra tratada, las refinerías que cuentan con plantas de tratamiento de aguas negras son: Cadereyta, Salamanca, Minatitlán y Salina Cruz (PEMEX, 2002).

Cada una de las refinerías tiene su propia historia, configuración, procesos y esquema de tratamiento; por lo que para presentar un análisis de las problemáticas específicas de cada refinería se requiere un estudio detallado de su manejo de agua y efluentes. En esta tesis se busca encontrar la ó las problemáticas generales que puedan presentarse en las refinerías, independientemente de su configuración y procesos específicos. A partir de estos hallazgos se busca generar propuestas y recomendaciones, las cuales deben encontrarse encaminadas al reúso e incremento de la calidad del agua en las diferentes áreas de la refinería y en la disminución del consumo de agua cruda suministrada.

En México, la actividad que genera más contaminantes de agua es la refinación (JIMÉNEZ, 2001); por lo que para promover una disminución de dichas descargas a cuerpos de agua receptores es necesario un mejoramiento en los tratamientos del agua y un aumento en el reúso de este recurso.

4.1 Situación Actual

La situación actual del Sistema Nacional de Refinación es heterogénea, teniéndose diferencias en cuanto al uso y aprovechamiento del agua dentro de las refinerías. Las refinerías mexicanas son alimentadas con diferentes tipos de crudo, tienen diferencias tanto en el agua cruda como en el agua de reúso que utilizan y tienen esquemas de manejo de agua propios. Estas diferencias se ven reflejadas en los indicadores de consumo que se presentan en la industria petrolera mexicana.

Actualmente existe una gran diferencia en los valores de consumo de agua entre las diferentes refinerías, lo cual puede ser apreciado en la Tabla 13.

Tabla 13. Consumo de agua en cada refinería del SNR

Refinería	Cadereyta	Madero	Minatitlán	Salamanca	Salina Cruz	Tula	TOTAL
Crudo procesado (MBD)	207	149	169	196	290	273	1284
Consumo agua cruda (MBD)	188	355	181	293	302	511	1830
Indicador de uso de agua cruda	0.91	2.38	1.07	1.49	1.04	1.87	1.46
Consumo agua tratada (MBD)	45	46	78	135	82	113	499
Indicador de uso de agua tratada	0.22	0.31	0.46	0.69	0.28	0.41	0.40
Consumo total de agua (MBD)	233	401	259	428	384	624	2329
Indicador de consumo total	1.13	2.69	1.53	2.18	1.32	2.29	1.86
% que el agua tratada representa del total suministrado	19.31	11.47	30.12	31.54	21.35	18.11	21.43

Fuente: (UNAM, 2010)

En la tabla se presentan los datos del consumo por miles de barriles por día (MBD) de agua cruda, agua tratada, así como la producción de crudo procesado en el año 2010 para cada una de las refinerías del Sistema Nacional de Refinación. Al analizar los datos se observa la heterogeneidad de los índices de consumo. El promedio de consumo de agua cruda es de 1.43 barriles de agua por barril de crudo; observándose las refinerías que presentan mayores áreas de oportunidad en lo referente al tema del uso eficiente del agua. La refinería de Madero es la que mayor índice de consumo de agua cruda tiene, siendo este 2.6 veces más grande que el índice de Cadereyta, que es la refinería con el menor índice de consumo; esto quiere decir que la refinería de Madero tiene posiblemente más áreas de oportunidad en cuanto a la disminución del uso de su agua cruda.

Por otro lado, se observa que las Refinerías con un mayor porcentaje de uso de agua tratada son Salamanca y Minatitlán con un 31.54% y 30.12% respectivamente; mientras que la Refinería con un menor porcentaje de uso de agua tratada es la refinería de Madero, con tan solo un 11.47%; lo cual significa que esta refinería tiene un área de oportunidad en este aspecto.

En la Tabla 14 se muestra el desglose del agua utilizada en cada área de las refinerías del SNR.

Tabla 14. Porcentaje de uso de agua por refinería

Parámetro	Calderas	Enfriamiento	Proceso	Servicios	Otros*
Cadereyta	21.4	56.8	4.3	13.4	4.1
Madero	24.4	60.6	5.6	6.6	2.8
Minatitlán	14.6	66.5	0.4	9.0	9.5
Salamanca	21.1	68.5	0.1	0.4	9.9
Salina Cruz	16.8	61.1	0.8	14.7	6.6
Tula	17.1	53.9	5.3	19.8	3.9
Promedio	19.2	61.2	2.8	10.7	6.1

* Comprende el suministro de agua potable a áreas administrativas, colonias PEMEX y agua de riego para áreas verdes.

Fuente: (UNAM, 2010)

Al comparar los valores de otros países como lo es Estados Unidos y México, se observan diferencias entre los porcentajes de uso de agua en cada área de las refinerías; dichas diferencias se observan al comparar la Tabla 14 con la Figura 10 (p.14). Existen tres diferencias principales entre los valores mexicanos y los valores de Estados Unidos. La primera diferencia se encuentra en el uso de agua en el sistema de enfriamiento; el SNR utiliza de un 53.9% a un 66.5% del agua suministrada en el sistema de enfriamiento mientras que el promedio presentado por las refinerías de Estados Unidos es de 48%. La segunda diferencia radica en la cantidad de agua utilizada en el área de proceso. Las refinerías mexicanas destinan una menor cantidad de agua al área de proceso que el promedio de refinerías presentadas en la literatura. La tercera diferencia se muestra en la cantidad de agua utilizada en servicios generales, la cual es aproximadamente el doble de lo reportado en promedio por refinerías estadounidenses. Finalmente, es importante remarcar que el promedio de agua utilizada en calderas tanto en México como en Estados Unidos es similar.

Se pueden realizar comparaciones entre los porcentajes de uso de agua en diferentes partes del mundo, pero en esta tesis se decidió realizarlos entre México y Estados Unidos

debido a que ambos países tienen índices de consumo de aguas similares y procesan calidades de crudo similares.

Para realizar un análisis más profundo del aprovechamiento del agua se requiere también analizar los volúmenes utilizados en cada área. En la Tabla 15 se muestran los flujos de agua destinadas a las diferentes áreas de las refinerías mexicanas en MBD.

Tabla 15. Volumen de agua utilizada por cada refinería (MBD)

Parámetro	Calderas	Enfriamiento	Proceso	Servicios	Otros*	Total
Cadereyta	49.862	132.344	10.019	31.222	9.553	233
Madero	97.844	243.006	22.456	26.466	11.228	401
Minatitlán	37.814	172.235	1.036	23.31	24.605	259
Salamanca	90.308	293.18	0.4 28	1.712	42.372	428
Salina Cruz	64.512	234.624	3.072	56.448	25.344	384
Tula	106.704	336.336	33.072	123.552	24.336	624
Totales	447.168	1425.348	65.212	249.203	142.069	2329
Promedio	74.507	235.288	11.681	43.785	22.906	388.17

Fuente: (UNAM, 2010)

El conocimiento de los porcentajes y de los volúmenes es importante debido a que se requiere conocer el panorama completo para evitar la interpretación errónea de los resultados. Por ejemplo, en la refinería de Tula el volumen de agua administrada a torres de enfriamiento es considerablemente más alto que el promedio de todas las refinerías (aprox. 100 MBD mayor), mientras que al revisar la tabla de los porcentajes, se observa que es la refinería con un menor porcentaje de uso de agua en dicho rubro.

Otros aspectos que deben ser considerados para realizar las comparaciones entre los diferentes centros de trabajo son: el tipo de agua cruda que se les suministra, el tipo de crudo procesado y las plantas de proceso existentes. En esta tesis se habla de la disponibilidad y calidad del agua abastecida a los diferentes centros de trabajo del SNR; pero no se discuten los tipos de crudo procesados por refinería ni las plantas de proceso existentes, debido a limitantes en dicha información.

4.1.1 Disponibilidad y calidad del agua

México se encuentra dividido en 13 regiones hidrológico-administrativas. Cada una de las regiones tiene características propias en cuanto a presión sobre el recurso hídrico y en cuanto a la calidad del agua de sus fuentes subterráneas y superficiales. Las características de la disponibilidad y calidad del agua cruda en cada refinería se describen a continuación:

4.1.1.1 "Ing. Héctor R. Lara Sosa"

La refinería "Ing. Héctor R. Lara Sosa" se encuentra ubicada en Cadereyta, Nuevo León. Cadereyta pertenece a la región hidrológica administrativa VI (Río Bravo), la cual presenta una presión alta sobre el recurso hídrico. La precipitación anual en el estado de Nuevo León es de 589 mm (CONAGUA, 2010) con un periodo de lluvias de Junio a Septiembre. El agua cruda abastecida a la refinería proviene del río Ramos y de agua de pozo (TINAJERO & VELAZQUEZ, 1993). La cantidad de agua con la que ambas fuentes alimentan a la Refinería no es suficiente y no es estable (TOYO ENGINEERING CORPORATION - ATLATEC, 2013). En la Tabla 16 se muestran algunos parámetros de calidad del agua en Monterrey y su zona Metropolitana.

Tabla 16. Calidad del Agua de pozo y superficial en Monterrey

	Unidades	Superficial	Subterránea
pH	-	7.35	7.75
Coliformes fecales	NMP/100ml	41016.67	-
Alcalinidad	mg CaCO ₃ /l	134.52	82.51
Dureza de calcio	mg CaCO ₃ /l	199.31	303.17
Dureza de magnesio	mg CaCO ₃ /l	93.38	14.23
Dureza Total	mg CaCO ₃ /l	292.69	317.40

Fuente: (FERNÁNDEZ, 2003) y (MURILLO, 1986)

4.1.1.2 "Ing. Antonio Dovalí Jaime"

La refinería "Ing. Antonio Dovalí Jaime" se encuentra ubicada en Salina Cruz, Oaxaca. Salina Cruz se encuentra en la Región hidrológica-administrativa V "Pacífico Sur". La precipitación anual en la zona es de 1000 mm. En esta región el agua es principalmente utilizada con fines agrícolas en un 70%, siendo los usos industriales de un 9% solamente (CONAGUA, 2010). La refinería de Salina Cruz utiliza agua superficial de una presa y agua osmosada proveniente del mar como fuente de suministro. En la Tabla 17 se presentan los valores de calidad del agua osmosada suministrada a la refinería.

Tabla 17. Calidad del agua osmosada del mar

Parámetro	Unidades	Calidad
Temperatura	°C	20-35
pH	unidades de pH	5.5-7.0
Conductividad	(μ S/cm)	< 427
Grasas y Aceites	(mg/l)	0
DQO	(mg/l)	0
DBO ₅	(mg/l)	0
Cloruros	(mg/l)	198.3
Alcalinidad Total	(mgCaCO ₃ /l)	—
Dureza de calcio	(mgCaCO ₃ /l)	< 2.95
Dureza de Magnesio	(mgCaCO ₃ /l)	< 15.50
Dureza total	(mgCaCO ₃ /l)	—
Sílice (SiO ₂)	(mg/l)	0
Sólidos Totales Disueltos	(mg/l)	< 250
Sólidos Suspendedos Totales	(mg/l)	0
Sólidos sedimentables	(mg/l)	—
Sulfatos	(mg/l)	< 8.95

Fuente: (PEMEX, 2010)

4.1.1.3 Refinería "Miguel Hidalgo"

La refinería "Miguel Hidalgo" se encuentra ubicada en el Estado de Hidalgo. El clima de Tula es templado y frío y registra una temperatura promedio de 17.6°C y una precipitación pluvial de 699 mm/año. El período de lluvias de en esta zona es de mayo a septiembre (SEGOB, 2013).

El estado de Hidalgo se encuentra en la región hidrológica administrativa XIII, la cual está conformada por las 16 delegaciones del Distrito federal y por 105 municipios de 3 diferentes entidades federativas: Estado de México, Hidalgo y Tlaxcala; esta región es la que presenta la mayor presión sobre el recurso hídrico en todo el país, por lo que es necesario un manejo sustentable del recurso en cuencas y acuíferos. Los usos del agua en este estado se dividen en uso agrícola (86.4%), abastecimiento público (7.2%), uso industrial (2.9%) y uso para generación de electricidad en plantas termoeléctricas (3.5%). El 80% del agua utilizada en la industria tiene un origen subterráneo (CONAGUA, 2010).

El agua de alimentación para la refinería "Miguel Hidalgo" proviene de pozos de la zona. La calidad promedio del agua de pozo para esta refinería se muestra en la Tabla 18.

Tabla 18. Calidad del Agua de pozos en el estado de Hidalgo.

Parámetro	Unidades	Valor Promedio
pH	Unidades de pH	7.3
Temperatura	°C	20
Conductividad	μS/cm	1423.61
Alcalinidad	mg CaCO ₃ /l	320
Cloruros	mg/l	194
Dureza de Calcio	mg CaCO ₃ /l	338
Dureza de Magnesio	mg CaCO ₃ /l	192
Dureza de Total	mg CaCO ₃ /l	530
Sílice	mg/l	77.3
Sólidos Disueltos Totales	mg/l	1200

Fuente: (CFE, 2012) y (Gobierno del Estado de Hidalgo, 2012); (LESSER-CARILLO, LESSER-ILLADES, ARELLANO, & GONZÁLEZ, 2011)

Los valores promedio de los parámetros fueron calculados a partir de la información de la calidad del agua de diferentes pozos de la zona.

4.1.1.4 "Ing. Antonio M. Amor"

La Refinería "Ing. Antonio M. Amor" se encuentra localizada en Salamanca, Guanajuato. El estado de Guanajuato pertenece a la región hidrológica administrativa VIII (Lerma-Santiago- Pacífico), la cual presenta una presión alta sobre el recurso hídrico (CONAGUA, 2010). La única fuente de abastecimiento de agua para usos urbano e industrial en la zona de Salamanca es el sistema acuífero local; dicho sistema se encuentra conformado por dos acuíferos con características geohidrológicas diferentes (MEJÍA, RODRÍGUEZ, & BERLIN, 2001). La mayoría de los pozos de uso industrial se encuentran en un acuífero que presenta mineralización y termalismo (con temperaturas entre 29 y 38°C). La calidad del agua de pozo para esta refinería se muestra en la Tabla 19.

Tabla 19. Calidad del Agua de pozos en la región de Salamanca

Concepto	Unidades	Min	Max
pH	Unidades de pH	7.1	8.2
Conductividad	μS/cm	591	1958
Alcalinidad	mg/l	210.80	387.15
Sulfatos	mg/l	39	458
Cloruros	mg/l	11	115
Nitratos	mg/l	0.60	12.20
Dureza de Calcio	mg CaCO ₃ /l	10	232
Dureza de Magnesio	mg CaCO ₃ /l	4	420
Dureza total	mg CaCO ₃ /l	14	652
Sodio	mg/l	102	250
Potasio	mg/l	5	25
Floruros	mg/l	ND	6.50

Fuente: (ESTELLER, RODRÍGUEZ, CARDONA, & PADILLA-SÁNCHEZ, 2012)

4.1.1.5 "Francisco I. Madero"

La refinería "Francisco I. Madero" se encuentra ubicada en Madero, Tamaulipas. Esta refinería pertenece a la región hidrológica administrativa IX "Golfo Norte" (CONAGUA, 2012). La precipitación promedio de la región es variable, siendo mayor cerca de la costa (1020.89 a 1606.14 mm anuales). En esta región hidrológica, el agua cruda utilizada en la industria proviene mayoritariamente de fuentes superficiales (93%). La refinería "Francisco I. Madero" utiliza agua superficial proveniente de la "Laguna de Chairel", la cual alimenta a un cuerpo de agua ubicado al interior de la refinería, conocido como "Laguna de patos". Algunos parámetros importantes medidos en 1999 de la Laguna de Chairel se muestran en la Tabla 20.

Tabla 20. Calidad del agua en la Laguna de Chairel

Parámetro	Unidades	Valor
pH	-	8.5
Temperatura	°C	29.1
Conductividad específica	μohms/cm	1098
Oxígeno disuelto	mg O ₂ /l	7.045
Sólidos suspendidos	mg/l	34.5
DBO	mg O ₂ /l	0.795
DQO	mg O ₂ /l	19.5
Coliformes fecales	NMP/100 ml	39

Fuente: (VILLA, 2005)

4.1.1.6 "Gral. Lázaro Cárdenas"

La Refinería "Gral. Lázaro Cárdenas" se encuentra ubicada en Minatitlán, Veracruz. Minatitlán se encuentra en la región administrativa X (Golfo-Centro), la cual tiene una presión sobre el recurso hídrico media. El estado de Veracruz tiene una precipitación anual de 1617 mm y un uso de agua superficial mayor al uso de agua subterránea, siendo 87% el uso de agua superficial. A la refinería de Minatitlán se le suministra agua cruda proveniente del río Coatzacoalcos, de la presa cangrejera y del río Huazuntlán.

Tabla 21. Algunos parámetros de calidad del río Huazuntlán.

Parámetro	Unidades	Calidad
Temperatura	°C	20.23
pH	unidades de pH	8
DQO	(mg/l)	6.69
DBO ₅	(mg/l)	2.41
Coliformes	NMP/100ml	1100
Nitratos	mg/l	0.1604

Fuente: (CERACIRE, 2009)

Como puede observarse de la Tabla 16 a la Tabla 21, las necesidades de tratamiento para el agua cruda dependen totalmente de las fuentes que la suministran, teniéndose requerimientos específicos para cada una de ellas. La calidad del agua suministrada a cada refinería define el tren de pretratamiento que se requiere para maximizar el aprovechamiento de agua y disminuir efectos negativos de contaminantes como lo son la corrosión o las incrustaciones.

4.2 Plantas de proceso y uso de agua en el SNR

Las refinерías en el Sistema Nacional de Refinación elaboran productos con diferentes especificaciones y tienen configuraciones únicas, a pesar de esto, se pueden resumir en los procesos que las conforman de manera general. El agua suministrada a las refinérías de Pemex proviene de las siguientes fuentes: pozos, lagos, lagunas, ríos, presas, inclusive del mar. El agua cruda es pretratada dependiendo de la fuente y de los usos que se le den dentro de los diferentes centros de trabajo. Los usuarios del agua pueden ser torres de enfriamiento, unidades desmineralizadoras, plantas de proceso, servicios generales y sistema contraincendio entre otros. El agua proveniente de PTAR y/o PTAN se considera como agua pretratada y dependiendo de sus características puede ser reutilizada directamente o mezclada con el agua cruda.

El agua pretratada es enviada principalmente a tres áreas de la refinería: sistema de enfriamiento, producción de vapor y proceso. El sistema de enfriamiento se encuentra constituido por torres de enfriamiento, las cuales disminuyen la temperatura de las corrientes de agua caliente que regresan de las plantas de proceso. El agua evaporada durante el enfriamiento y las purgas son sustituidas con agua pretratada conocida como agua de “make up” o “repuesto” en la torre.

La segunda área a donde el agua es enviada en la refinería es el área de producción de vapor. Para producir vapor, se debe tratar el agua pretratada para obtener la alta calidad requerida en las calderas. El agua pretratada es enviada hacia las unidades desmineralizadoras, donde se eliminan las principales sales que contiene el agua: calcio, magnesio, sodio, potasio, sulfatos, sílice, carbonatos, nitratos, cloruros; además se eliminan gases disueltos como el CO₂ y el O₂.

Una parte del agua desmineralizada convertido en vapor de alta presión, de 60 kg/cm², es utilizada para la generación de energía eléctrica mediante turbogeneradores. El vapor de alta presión es reducido a 30 kg/cm² (vapor de media presión) y empleado como fuente

motriz de diversos equipos de bombeo y calentamiento de corrientes. El vapor de media presión es reducido a su vez a 3.5 kg/cm^2 y utilizado para el calentamiento de corrientes.

En todos los casos, los diferentes tipos de vapor generan condensado, el cual puede clasificarse como limpio o aceitoso dependiendo de si estuvo o no en contacto con hidrocarburo. El condensado limpio procede de la generación de energía eléctrica y de equipos dinámicos, mientras que el condensado aceitoso proviene de las líneas de calentamiento de proceso. El condensado aceitoso con una concentración de Grasas y Aceites menor a 50 ppm es tratado por filtros de antracita y por un pulidor y posteriormente es mezclado con el condensado limpio y con el agua desmineralizada para la producción de vapor. Si el condensado aceitoso supera las 50 ppm de Grasas y Aceites es enviado al área de efluentes.

La tercera área a la que se envía agua desmineralizada es proceso. En esta área se utiliza agua desmineralizada en el desalado de crudo, en el lavado de reactores y en los intercambiadores de calor de las plantas hidrodesulfuradoras. Tanto el agua de desalado como los residuos de lavados son enviados al área de efluentes. El área de proceso, además de utilizar agua desmineralizada, utiliza vapor para arrastrar sustancias incondensables, H_2S y NH_3 de las corrientes de crudo y también utiliza vapor para agotar ácido sulfhídrico de las diferentes fracciones de producto, generando agua amarga.

En los servicios generales, en el sistema contraincendio, en oficinas y en el riego de áreas verdes se utiliza agua pretratada. En el caso de las oficinas, el agua recibe un tratamiento de potabilización para poder ser utilizada.

Los diferentes usos en la refinería generan agua con calidades específicas. El agua amarga generada en proceso es tratada en las diferentes plantas de aguas amargas de las refinerías; mientras que el área de efluentes recibe los flujos de las purgas de torres de enfriamiento, de calderas, de fosas de neutralización, salmuera de desalado y fondos de tanques, agua desflemada, drenajes pluviales y drenajes aceitosos; la mezcla

generada es desgrasada mediante un separador API y enviado a fosas de igualación-oxidación y es dividida en dos corrientes, una que alimenta a la PTAR y otra que desemboca en algún cuerpo receptor.

4.3 Hallazgos generales

Para encontrar las áreas de oportunidad con una mayor importancia dentro del sistema nacional de refinación se establecen primero los puntos problemáticos o los puntos que sean susceptibles a una mejora en el uso y aprovechamiento del agua, para poder posteriormente encontrar áreas donde se garantice una mejora, ya sea por disminución de consumo (volumen) o por disminución de contaminación en las descargas (aumento de calidad).

La UNAM ha realizado múltiples proyectos sobre el uso del agua en las refinerías del SNR; en los diferentes proyectos se encontraron hallazgos de diversas índoles, los cuales son resumidos a continuación por áreas:

4.3.1 Problemas generales

Las problemáticas del SNR se encuentran separadas en áreas de las refinerías. Dentro de las problemáticas que se presentan comúnmente en todas las áreas se tiene:

- a) Tecnologías obsoletas y procedimientos operativos anticuados en lo referente al uso y aprovechamiento del agua. Por ejemplo, se utiliza agua pretratada para apagado en coquización, cuando las mejores prácticas internacionales indican que puede reutilizarse agua de otros procesos como lo es el agua desflemada, procedente del tratamiento de aguas amargas (The global oil and gas industry association for environmental and social issues, 2010).
- b) Infraestructura que ha llegado al término de su vida útil y sigue dando servicio.

- c) Problemas en mediciones derivados de la falta de instrumentación o de la falta de calibración de la misma. Se requieren mantenimientos correctivos a equipos por presencia de corrosión exterior en válvulas y accesorios de las líneas.
- d) Deterioros en estructuras civiles.
- e) Bajas flexibilidades operativas con algunos equipos fuera de operación.
- f) Problemas de mantenimiento.

4.3.2 Pretratamiento

Los 6 centros de trabajo tienen influentes de agua con características únicas, por lo que tienen pretratamientos y problemáticas diferentes en esta área. Dentro de las problemáticas al interior de los centros de trabajo se encuentra:

- a) Pérdidas de agua en lodos purgados entre 4% y 7%, los cuales son enviados a disposición sin un tratamiento previo. Estas pérdidas pueden ser reducidas al deshidratar dichas purgas.
- b) Agua con contenido alto de sólidos y presencia de coliformes fecales en agua de suministro, en especial para áreas administrativas.
- c) Fugas en acueductos
- d) Falta de pretratamiento.

4.3.3 Generación de Vapor

- a) Para la generación de vapor, se utiliza agua pretratada, la cual es desmineralizada mediante UDAs. Dentro de las problemáticas se tiene que el agua pretratada que es suministrada a las UDAs cuenta con una calidad inferior a la requerida, por lo que se requiere una mayor cantidad de químicos para la regeneración de las resinas de intercambio iónico.

- b) Ciclos de operación por debajo de diseño; lo cual se debe a calidad de entrada del agua y a las resinas, las cuales deben ser sustituidas.
- c) Otro problema relacionado a las UDAs es su deterioro; por lo que un mantenimiento general o una sustitución de dicha tecnología generará ahorros de agua. Se deben buscar implementar tecnologías alternas de punta para la desmineralización de agua, con calidad para calderas de alta presión.
- d) No se aprovechan las purgas de calderas. Se debe realizar una evaluación de tecnologías para la recuperación de las purgas, ya sea con precipitación química, electroquímica, etc.
- e) El sistema de vapor cuenta con trampas que tiran condensado al suelo; las pérdidas de condensado debido a las trampas de vapor puede ser reducido al instalarse cabezales de condensado o al sustituir las actuales trampas. Por otra parte, se ventea vapor de 3.5 kg/cm²; dicha pérdida de agua puede ser disminuida al instalar aerogeneradores o al aprovechar la energía del vapor para el calentamiento de corrientes de proceso.

4.3.4 Sistemas de enfriamiento

- a) Las refinerías del SNR utilizan torres de enfriamiento para enfriar el agua de proceso; la mayoría de estas torres tienen más de 15 años de vida operacional, por lo que presentan fisuras y fugas.
- b) Las purgas de torres de enfriamiento no son aprovechadas como debería; instalando sistemas de tratamiento como ósmosis inversas, concentradores de sales y fosas de secado se puede recuperar agua de dichas purgas.
- c) Bajos ciclos de concentración (2.5 a 3); por lo que se requiere una mayor cantidad de agua de “make up” o repuesto (TERÁN, 1994). Al aumentar ciclos de concentración con un repuesto de mejor calidad, se disminuye la cantidad de agua purgada y la cantidad de agua repuesta. (mínimo de 6.5 ciclos de concentración)

- d) Poco mantenimiento a las torres de enfriamiento (limpiezas, eliminación de infiltraciones, eliminación de crecimientos biológicos).

4.3.5 Drenajes

Las refinerías tienen drenajes pluviales y drenajes aceitosos. En algunos centros de trabajo se tienen problemas con la segregación de ambos drenajes, por lo que se tienen dificultades al manejar el agua y descargarla.

4.3.5.1 *Drenajes pluviales*

En algunos centros de trabajo se vierten corrientes contaminantes a los colectores de drenaje pluvial. Esta problemática se soluciona eliminando o sellando las salidas a drenaje pluvial provenientes de plantas de proceso. También se requieren rehabilitaciones y reparaciones de colectores.

4.3.5.2 *Drenajes aceitosos*

A los drenajes se vierten cantidades significativas de hidrocarburos, grasas y aceites; lo cual genera que el tratamiento de dichos efluentes se complique; parte de esto niveles altos de hidrocarburos se presentan durante el paro de plantas. También se requieren rehabilitaciones y reparaciones de colectores.

4.3.6 Sistema Contra incendio

- a) Los sistemas contraincendio presentan fugas y tomas parásitas de agua. Ambos aspectos se solucionan al identificar las fugas y las tomas parásitas para su posterior eliminación.
- b) En una refinería este sistema utiliza agua cruda y clarificada como fuente de suministro.
- c) En otro centro de trabajo el agua contraincendios presenta coliformes fecales y altas concentraciones de sólidos

4.3.7 **Proceso**

En las plantas de proceso se encuentran hallazgos principalmente en dos tipos de efluentes generados:

4.3.7.1 ***Agua de desalado***

Problemas en algunos centros de trabajo a la hora de desalar el crudo, generándose salmuera contaminada con cantidades altas de hidrocarburos. Las salmueras se descargan a efluentes; dichas salmueras deben ser tratadas para disminuir sulfuros y poder posteriormente ser descargadas o utilizadas en otras áreas de la refinería.

4.3.7.2 ***Agua amarga***

- a) Se detectaron producciones de agua amarga mayores a las de diseño de las plantas; teniéndose una capacidad limitada para su tratamiento. Se requieren tanques para almacenamiento de agua amarga y agua desflemada; además del aumento de la capacidad de tratamiento instalada en las plantas de tratamiento de aguas amargas.
- b) El agua desflemada es tirada en algún centro de trabajo al drenaje pluvial, en vez de ser utilizada, por ejemplo, en la planta de coquer para el apagado.
- c) El agua amarga no es segregada en fenólica y no fenólica; las buenas prácticas internacionales (The global oil and gas industry association for environmental and social issues, 2010) recomiendan una segregación para tener un tratamiento más eficiente y para el posible reúso de aguas fenólicas en el desalado de crudo y de no fenólicas a HDS y coquer.
- d) Problemas en la torre agotadora de la planta de tratamiento de aguas amargas debida a sulfuros y nitrógeno amoniacal.

4.3.8 Efluentes

La calidad de los efluentes es menor a la proyectada inicialmente, por lo que no se cumple con la calidad preestablecida para envío a las plantas de tratamiento de aguas residuales (PTARs). El influente a las PTARs contiene valores elevados de grasas y aceites. Esta problemática se soluciona al rehabilitar sistemas API o al instalar tratamientos de grasas y aceites en el área de efluentes.

Otra problemática encontrada es la dilución del efluente con agua cruda para asegurar el cumplimiento de las normas oficiales mexicanas en materia de descargas a cuerpos receptores y a PTARs.

4.3.9 PTAR/PTAN

Las plantas de tratamiento de aguas negras y aguas residuales que suministran agua tratada a las refinerías envían cantidades de agua tratada menores a las de diseño. Al aumentar el volumen tratado en estas plantas, la cantidad de agua cruda requerida disminuye; por lo que es importante asegurar el suministro del influente necesario con la calidad requerida a estas plantas.

Existen centros de trabajo que aún no cuentan con una PTAN, por lo que la construcción y puesta en marcha de una en las refinerías faltantes disminuiría automáticamente el consumo de agua cruda de las mismas. Los centros de trabajo que cuentan con una PTAN pueden buscar un aumento de flujo de agua tratada; lo cual genera no solo beneficios ambientales debidos a la disminución de uso de agua cruda, también disminuye la cantidad de agua negra no tratada del municipio

4.4 Propuestas de mejoramiento

Los objetivos para el uso eficiente del agua deben contemplar acciones que promuevan:

- Utilizar la menor cantidad de agua cruda en la refinería.
- Suministrar la mayor cantidad de agua tratada con buena calidad.
- Minimizar el consumo y/o las pérdidas dentro del centro de trabajo.
- Reusar el agua al mayor grado posible.
- Minimizar el volumen de efluentes.
- Satisfacer la normatividad ambiental vigente.
- Generar propuestas con nivel de prioridad asignado de mayores a menores ahorros.

Para poder lograr estos lineamientos se deben recopilar datos dentro de los centros de trabajo, caracterizar tanto influentes como efluentes de las diferentes áreas y procesos de producción en la refinería; además de identificar las necesidades en cuanto a volumen y calidad del agua para diferentes usos. Los alcances de esta tesis no contemplan la generación de propuestas concretas.

4.5 Soluciones generales

Dentro de las soluciones generales se requieren las siguientes acciones:

- a) Mejora en los sistemas de pretratamiento de agua cruda, instalación de nuevas tecnologías.
- b) Rehabilitaciones y modernizaciones en equipos y sistemas
- c) Mantenimientos preventivos y correctivos
- d) Sustituciones de equipos
- e) Implementación de procesos
- f) Cambios tecnológicos
- g) Aumentos en volúmenes y calidades de agua generadas en PTANs y PTARs

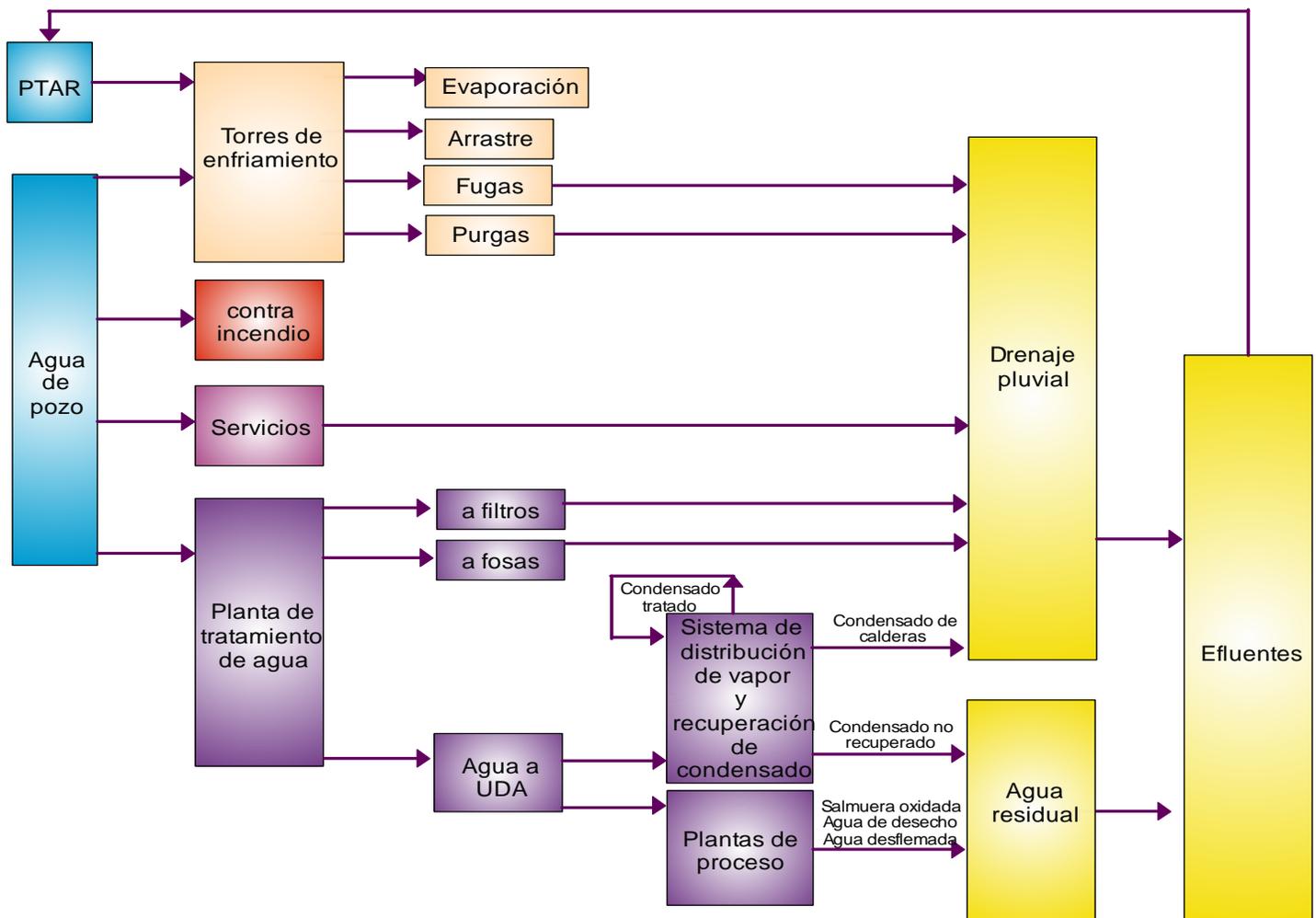
Todas estas soluciones tienen como objetivo utilizar la menor cantidad de agua cruda en la refinería, minimizar el consumo y las pérdidas dentro del centro de trabajo; además de reutilizar al mayor grado posible el agua al interior del centro de trabajo. Además de esto, se busca disminuir el volumen de efluentes y satisfacer la normatividad mexicana vigente.

4.6 Ejemplo de ahorro de agua en una refinería

Para generar un análisis sencillo de los ahorros que se pueden lograr en cuanto al manejo de agua en una refinería, se analizará en esta sección una de las refinерías del Sistema Nacional de Refinación.

4.6.1 Descripción

El balance general de la refinería en cuestión se muestra en la Figura 7.



Fuente: (UNAM, 2010) y elaboración propia

Figura 7. Balance general de la refinería

La refinería utiliza agua cruda de pozo en el sistema contra incendios, en las torres de enfriamiento (agua de repuesto), en las calderas (después de ser desmineralizada), en proceso (vapor de media y baja presión y agua desmineralizada) y en servicios generales (servicios internos y colonia PEMEX).

4.6.2 Ahorros en torres de enfriamiento

La refinería en cuestión tiene un sistema de enfriamiento conformado por torres, las cuales son las mayores consumidoras de agua cruda en la refinería, por lo que analizando su situación y requerimientos se pueden lograr ahorros importantes de agua cruda. Dentro de las acciones para el ahorro de agua se tienen, el aumento de ciclos de concentración debido a una mejora de la calidad del agua suministrada, la disminución de suministro de agua de pozo debida al tratamiento de purgas y a la disminución de fugas.

Esta refinería no cuenta con un pretratamiento del agua cruda; por lo que sus ciclos de concentración son bajos (2.8 ciclos) y su gasto en químicos para acondicionamiento de agua en torres de enfriamiento es alta. Al realizar una comparación entre los valores de cada parámetro y su límite máximo en las torres de enfriamiento se detecta que los parámetros que restringen el número de ciclos de concentración son la alcalinidad, la dureza de calcio y la dureza de magnesio. Al mejorar la calidad del agua de suministro, considerando un 90% de remoción de dichos contaminantes, se logran aumentar los ciclos de concentración máximos para cada contaminante, siendo la dureza de magnesio el contaminante que determina el menor número de ciclos de concentración (6 ciclos). Al aumentar los ciclos de concentración de 2.8 a 6 se logra un ahorro de agua cruda purgada del 63.86%, lo que equivale a 127.98 l/s. Este volumen representa un 20.68% del agua que es alimentada a las torres. La cantidad de agua que llegaría a efluentes disminuiría un 25.79%.

Otra fuente de ahorro de agua cruda en las torres de enfriamiento es el tratamiento de las purgas para su reúso dentro del sistema de enfriamiento. En caso de que se mejorara la calidad del agua de suministro y se tuvieran 6 ciclos de concentración en la torre, la cantidad de agua purgada reutilizable sería de 72.43 l/s. Dicho volumen representa un 11.70% del agua suministrada. Además de esto, la eliminación de purgas generaría una disminución del agua que llega actualmente a efluentes (de 40.39%), lo que a su vez representa una disminución del agua enviada al cuerpo receptor.

Una tercera fuente de ahorro de agua en las torres de enfriamiento de esta refinería es la eliminación de fugas, lo cual equivale a 54.6 l/s; dicho valor representa un 8.83% del agua suministrada.

Al eliminar fugas, tratar purgas y pretratar el agua para lograr obtener 6 ciclos de concentración, se logra un ahorro total del 52.85 % del agua de pozo suministrada actualmente a torres de enfriamiento. En la Tabla 22 se resumen los ahorros en torres de enfriamiento.

Tabla 22. Resumen de ahorros en torres de enfriamiento

Concepto	Valor (l/s)	% del flujo suministrado a torres actual	% del agua de pozo suministrado actualmente	% del agua cruda suministrada a la refinería
Aumento de ciclos de concentración (a 6)	127.98	20.68	26.52	11.14
Reúso de purgas (considerando 6 ciclos)	72.43	11.70	15.01	6.31
Eliminación de fugas	54.62	8.83	11.32	4.76
Total	255.03	41.21	52.85	22.21

Fuente: (UNAM, 2010) y elaboración propia

El ahorro de agua puede incrementarse en las torres de enfriamiento al cambiar empaques y/o condiciones de operación, pero dichos posibles ahorros no son contemplados dentro de esta tesis debido a que no se cuenta con la información suficiente para calcularse.

4.6.3 Ahorros en sistema de vapor y condensado

La refinería cuenta con calderas y calderetas para la generación de vapor; en las cuales se utiliza agua desmineralizada con el fin de evitar incrustaciones y corrosión. Para generar agua desmineralizada se utilizan Unidades Desmineralizadoras de Agua (UDAs); en estas unidades al aumentar la calidad del suministro de agua aumenta el ciclo de producción y se disminuye el consumo de químicos.

El agua desmineralizada es convertida en vapor y utilizada en la generación de energía, como calentamiento o en proceso. El condensado que se genera al enfriarse este vapor puede ser contaminado (aceitoso) o no contaminado, dependiendo de si estuvo o no en contacto con hidrocarburo. Actualmente, en la refinería que se está analizando se trata solo una parte del condensado total recuperado; el resto es enviado a efluentes. Si este condensado fuese tratado y acondicionado para su reúso en las UDAs, se obtendría un ahorro de 59.8 l/s, lo que equivale a un 24.24% del agua desmineralizada de repuesto que se suministra a UDAs. Además de esto, puede generarse un ahorro de agua cruda al tratar los rechazos de las UDAs; lográndose una disminución de 44.4 l/s de agua.

El sistema de generación de vapor tiene fugas, no se tratan las purgas y existen venteos de vapor de baja presión. Si se contemplara el ahorro de agua en estos tres aspectos, se obtendría un ahorro de agua desmineralizada de más de un 15%; siendo el ahorro por concepto de arreglo de fugas del 10.12%, el ahorro por eliminación de venteos de vapor de baja presión de 3.41% y el ahorro por concepto de tratamiento de purga de un 2.35%. En la Tabla 23 se muestra el resumen de los ahorros en el sistema de generación de vapor.

Tabla 23. Resumen de ahorros en el sistema de generación de vapor

Concepto	Valor (l/s)	% del agua desmineralizada alimentada a UDAs
Tratamiento de condensado que se envía a drenaje	59.80	24.24
Rechazo de UDAs	44.40	18.00
Eliminación de fugas en el sistema	24.97	10.12
Eliminación de venteo de vapor de baja presión	8.42	3.41
Tratamiento de purga de calderas	5.81	2.35
Total	143.4	58.12

Fuente: (UNAM, 2010) y elaboración propia

Al implementar los cambios sugeridos, se obtiene un ahorro de 58.12% del agua desmineralizada suministrada a UDAs. La eliminación de fugas y el tratamiento de las purgas de las calderas disminuyen, a su vez, la cantidad de agua que es recibida en efluentes.

4.6.4 Ahorros en sistema contra incendio

Debido a que el sistema contra incendio tiene fugas y tomas parásitas, consume agua que debería ser utilizada en caso de una contingencia. Si las fugas fuesen arregladas y se eliminarán las tomas parásitas, se lograría un ahorro de agua de pozo de 46.6 l/s.

4.6.5 Ahorros en el las plantas de proceso

Las plantas de proceso generan principalmente dos tipos de efluentes, agua amarga y salmuera. El agua amarga es tratada en las plantas de tratamiento de aguas amargas y es posteriormente enviada a efluentes, mientras que la salmuera es enviada directamente a efluentes. Las buenas prácticas internacionales sugieren la segregación del agua amarga en fenólica y no fenólica y el reúso de la salmuera; en por ejemplo, el apagado de coquización. La refinería estudiada actualmente no cuenta con una planta coquizadora, por lo que la salmuera no puede ser utilizada con este fin por el momento.

En esta tesis no se hablarán de los volúmenes ahorrados al utilizar prácticas de reúso de los efluentes provenientes de proceso debido a que no se cuenta con información detallada al respecto, por lo que solo se menciona la posibilidad de su uso.

4.6.6 Ahorros en el área de efluentes

Actualmente el área de efluentes recibe agua residual del sistema de enfriamiento, del sistema de generación de vapor, de los drenajes pluviales, de proceso, entre otros. El agua procesada en efluentes en algunas ocasiones no cumple con los valores de los parámetros de calidad y descarga grandes cantidades de agua a cuerpos receptores; actualmente se descargan aproximadamente 365 l/s. El área de efluentes se ve directamente afectada por el uso de agua dentro de las demás áreas de la refinería, por lo que si se generan ahorros en las otras áreas, efluentes disminuye su carga automáticamente. Por ejemplo, en caso de que se aumentarán los ciclos de concentración de las torres de enfriamiento y se trataran las purgas generadas, se disminuiría el influente a efluentes un 39.86%, disminuyéndose la cantidad de agua descargada a cuerpos receptores un 54.89%.

4.6.7 Ahorros de agua de pozo debido a la PTAR

La PTAR de esta refinería actualmente suministra un volumen de agua de 136 l/s, lo cual se encuentra por debajo del flujo de diseño, el cual es de 235 l/s. Si la planta trabajara a sus condiciones de diseño, se podrían ahorrar 99 l/s de agua proveniente de pozo y se disminuirían las emisiones a cuerpos receptores.

El flujo tratado por la PTAR depende de los valores de los parámetros de calidad del agua proveniente del área de efluentes de la refinería y del volumen que se tenga ahí, por lo que es importante puntualizar que un aumento en la segregación y reúso de agua en otras áreas de la refinería disminuirá el volumen que es entregado a efluentes, pudiendo afectar la disponibilidad de agua enviada a la PTAR.

4.6.8 Ahorros de agua de pozo debidos a una PTAN

La refinería no cuenta con una planta de tratamiento de agua negra como fuente alternativa de agua. La instalación de una planta de este tipo o el uso de agua negra tratada es una fuente potencial de ahorro de agua; la cual no depende del manejo de agua dentro de la refinería, lo que la convierte en una fuente confiable y, además, disminuye problemas ambientales relacionados a la falta de tratamiento de las aguas negras en la comunidad.

5 *Análisis de Resultados*

Se realizó un análisis de la información recopilada, realizando un resumen de los contaminantes existentes en el agua suministrada a una refinería y en el agua residual generada; también se realizó un resumen de las tecnologías disponibles para el tratamiento tanto del agua de suministro como del agua residual generada en una refinería.

El contenido de azufre en un crudo modifica la cantidad de agua requerida para el proceso de refinación debido a que es un contaminante indeseable en los productos y se utiliza agua como adsorbente, por lo que a mayores cantidades de azufre, mayores cantidades de agua requerida. Además de esto, las exigencias actuales para la disminución de la contaminación atmosférica, con la inclusión de combustibles ultra bajos en azufre, exigen combustibles con una menor concentración de este contaminante, por lo que para alcanzar los requerimientos de estas nuevas tendencias se requieren más operaciones de remoción de azufre que las preexistentes en otras refinerías.

Se obtuvieron los índices de uso de agua cruda y de descarga de agua residual a cuerpos receptores de diversas refinerías del mundo; lo cual fue comparado con la información del sistema nacional de refinación. Se encontró que el índice de consumo de agua cruda es mayor al existente en Europa, pero su valor se encuentra dentro del promedio de los países analizados; por otro lado, el volumen de descargas del SNR es bajo comparado a los países reportados, esto debido a que PEMEX se ha preocupado por un uso integral del agua y a principios de los años 90 construyó en todas sus refinerías PTARs.

Las refinerías, tanto nacionales como internacionales, tienen un porcentaje similar de uso de agua en sus diferentes áreas. Las refinerías utilizan el mayor porcentaje del agua cruda que se les suministra en torres de enfriamiento y en los sistemas de generación de vapor (60 y 20% aprox. respectivamente); sistemas en los que se debe prestar mucha

atención para obtener grandes volúmenes de ahorro de agua. Los efluentes de ambos sistemas tienen una calidad alta y pueden ser tratados fácilmente para ser reincorporados a los sistemas. El volumen de agua cruda enviada a proceso es mucho menor que la empleada en enfriamiento, pero la calidad de sus efluentes es mucho más baja, por lo que se requiere analizar los posibles usos de cada tipo de efluente para proporcionarle el tratamiento correcto y poder reusarla sin temor a dañar equipos.

A las refinerías mexicanas se les suministra agua cruda de fuentes muy diversas, tanto superficiales como subterráneas. Dentro del análisis de la información recopilada, se observó que existe una falta de pretratamientos eficientes que permitan un mayor aprovechamiento del agua cruda en torres de enfriamiento. También se descubrió que las refinerías del SNR cuentan con esquemas de tratamiento de efluentes convencionales, con tecnologías antiguas y poca segregación de corrientes; en las que aún se descarga agua a cuerpos receptores.

El SNR tiene varias áreas de oportunidad referente al uso eficiente de agua y ahorro en las diferentes áreas de los centros de trabajo. El área de oportunidad mayor se observa en las torres de enfriamiento, ya que al aumentar ciclos de concentración, eliminar fugas y tratar purgas se pueden lograr ahorros de más del 20% del agua cruda suministrada actualmente.

En esta tesis se analizó el caso de una refinería alimentada con agua de pozo y como resultado se obtuvo que al aumentar la calidad del agua de repuesto en torres de enfriamiento y aumentar los ciclos de concentración, se obtiene un ahorro de agua del 11% del total de agua suministrada a la refinería.

6 *Conclusiones*

Las refinerías son complejos industriales cuya función es la de transformar petróleo crudo en productos con un mayor valor agregado mediante el uso de diferentes operaciones unitarias. Para lograr esto, las refinerías ocupan grandes cantidades de agua. La cantidad de agua cruda consumida en una refinería depende de varios factores, entre los que destacan: el tipo de crudo a procesar, la capacidad de la refinería, la cantidad de unidades o procesos de los que consta la refinería (complejidad) y el nivel de reúso de agua dentro de la misma; el valor de índice de consumo es la resultante de la interacción de estos diferentes factores.

El mayor porcentaje de agua utilizado en las refinerías está relacionado a los procesos de generación de vapor y enfriamiento; los cuales generan aguas residuales que requieren ser reacondicionadas para su uso. La mayor cantidad de agua cruda requerida por una refinería es utilizada como repuesto para torres de enfriamiento, dicho consumo no puede ser eliminado y es por ello que se tienen altos consumos de agua a pesar de un reúso alto de agua dentro de las unidades de proceso; es por ello que buscar la forma de aumentar la eficiencia y disminuir las purgas en estos equipos es fundamental.

Las plantas de proceso utilizan, en comparación a los sistemas de enfriamiento, un porcentaje bajo del agua cruda total utilizada en las refinerías. Aunque dicho volumen es bajo, la calidad de estos efluentes es mala, debido a su contenido de cianuros, sulfuros, hidrocarburos, aromáticos, entre otros; lo cual ocasiona que deba prestarse interés a estos efluentes y se busque su segregación y tratamiento independiente, como lo dictan las mejores prácticas internacionales.

El Sistema Nacional de Refinación requiere diferentes acciones que permitan un mayor reúso de agua dentro de las refinerías; lo cual solo se logrará al realizar análisis de cada uno de los centros de trabajo y un seguimiento de los proyectos desarrollados. Dentro de

la información recopilada, se encontró que la refinería con un índice más bajo de uso de agua cruda por crudo producido es Cadereyta, mientras que la refinería mexicana cuyo índice es el mayor es Madero.

Las mayores problemáticas que el SNR presenta son: equipos con vidas útiles cercanas a su fin, falta de mantenimiento en unidades de proceso, capacidades de tratamiento menores a las requeridas y tratamientos convencionales poco flexibles. Además de esto, los pretratamientos del agua cruda de las diferentes refinerías no es el requerido, por lo que la calidad de agua a torres de enfriamiento, área con mayores consumos, no es lo suficientemente buena para lograr un consumo de agua cruda mínimo.

Las refinerías mexicanas requieren establecer acciones para lograr un mayor ahorro de agua en las diferentes áreas de los centros de trabajo, siendo prioritario el pretratamiento adecuado del agua cruda y el seguimiento de las mejores prácticas operativas y recomendaciones internacionales.

7 *Recomendaciones*

Se recomienda llevar a cabo estudios del uso de agua como los realizados por la UNAM nuevamente, procurando darles seguimiento. Se requiere un seguimiento periódico de los mismos y la generación de metas a corto, mediano y largo plazo por parte de los centros de trabajo; así como el análisis y comparación periódica de los índices de consumo de agua internacional y nacional.

Se recomienda poner especial atención a proyectos relacionados con la mejora de los sistemas de enfriamiento, ya que dichos sistemas son los mayores consumidores de agua en las refinerías y las modificaciones generadas en ellos impactan de manera considerable los volúmenes de agua utilizados en las refinerías.

Se requiere analizar la factibilidad técnica-económica de nuevos sistemas de pretratamiento y la posibilidad de la segregación de corrientes dentro de los centros de trabajo actuales para cumplir con las buenas prácticas internacionales.

8 Fuentes

Bibliográficas

- AGUILAR, M. e. (2002). *Tratamiento físico-químico de aguas residuales (Coagulación-floculación)*. Universidad de Murcia.
- AMBASTA, B. (2008). *Chemistry for Engineers*. Laxmi Publications.
- AYALA Cruz, M. (1996). CALIDAD FISICOQUIMICA Y BACTERIOLOGICA DE UN ACUIFERO DE CADEREYTA JIMENEZ, N. L. *Tesis para obtener el Grado de MAESTRIA EN CIENCIAS con Especialidad Ingeniería Ambiental*. Universidad Nacional Autónoma de Nuevo León, Nuevo León: 132 páginas.
- BAEZ, A., & al, e. (2009). Trends in Chemical Composition of Wet Precipitation in México City, México: 1992-2007. *The Open Atmospheric Science Journal*, 187-195.
- Bagajewicz, M. (2000). A review of recent design procedures for water networks in refineries and process plants. *Computers and Chemical Engineering*, 2093–2113.
- BARDAHL. (s.f.). Imagen de destilación atmosférica. Ecuador.
- BELGIORNO, V., NADDEO, V., & RIZZO, L. (2010). *Wastewater and Soil Treatment by Advanced Oxidation Processes (AOPs)*. Italia: ASTER.
- BERNÉ, F. &. (1995). *Industrial Water Treatment: Refining petrochemicals and Gas processing techniques*. Francia: Technip.
- BYERS, W., GLEN, L., NOLING, C., & PETERS, D. (2002). *Industrial Water Management: A Systems Approach, 2nd Edition*. Oregon: Wiley.
- CARRILLO, J. (Junio de 2013). *Página del Dr. Jaime Alejandro Carrillo Chávez*. Obtenido de Programa de geofluidos, Geociencias-UNAM, Campus Juriquilla: www.geociencias.unam.mx
- CERACIRE, C. y. (2009). Caracterización Físicoquímica y microbiológica en temporada de lluvias en agua de la subcuenca del río Huazuntlán en el sur de Veracruz. Tesis para obtener el título de Ingeniero Químico en la Universidad Veracruzana. Campus Coatzacoalcos.
- CERIC, E. (2012). *Crude Oil, Processes and Products*. Sarajevo: Petrolinvest.
- CFE. (2012). *Estudio Geohidrológico Para el Abastecimiento de Agua Subterránea Para la Nueva Refinería en Tula, Hidalgo*. México.
- CONAGUA. (2010). *Statistics on Water in México*. México.
- Departamento de Energía de E.U.A. (2003). *Water Use in Industries of the Future : Petroleum Refining*. EUA: US Department of Energy.
- DICKENSON, C. (1997). *Filters and Filtration Handbook*. Oxford: 4th edition. Elsevier.
- ESTELLER, M. V., RODRÍGUEZ, R., CARDONA, A., & PADILLA-SÁNCHEZ. (2012). Evaluation of hydrochemical changes due to intensive aquifer exploitation: case studies from Mexico. *Environmental Monitoring and Assessment Volumen 184*, 5725-5741.
- FAHIM, M., AL-SAHAF, T., & ELKILANI, A. (2010). *Fundamentals of Petroleum Refining*. United Kingdom: Elsevier.
- FRAUME, N. (2008). *Diccionario Ambiental*. Bogotá : ECOE Ediciones.

- GARCÍA, S. (2011). *Operación y mantenimiento de centrales de ciclo combinado*. Argentina: Díaz de Santos.
- GARFIAS, F., & BAROJAS, L. (1997). *Residuos Peligrosos en México*. México: Publicaciones de la Secretaria de Medio Ambiente, Recursos Naturales y Pesca.
- GARY, J. (1980). *Refino de Petróleo*. España: Reverté.
- GARY, J., & HANDWERK, G. (2001). *Petroleum Refining*. New York : Marcel Dekker.
- HARRIS, D. (2007). *Análisis Químico Cuantitativo 3a edición*. Barcelona: Reverté.
- HENRY, G. (1999). *Ingeniería Ambiental 2a edición*. México: Prentice Hall.
- HÉRNANDEZ, L., & GONZÁLEZ, C. (2002). *Introducción al Análisis Instrumental*. Barcelona: Ariel Ciencia.
- J.P., W. (1998). *Petroleum refining: Separation Processes*. Paris: TECHNIP.
- JIMÉNEZ Cisneros, B. (2001). *La contaminación ambiental en México: causas, efectos y tecnología apropiada*. México: Limusa.
- JIMÉNEZ, B. (2001). *La Contaminación Ambiental en México: Causas, efectos y tecnología apropiada*. México D.F.: Limusa.
- LAITINEN, H., & HARRIS, W. (1982). *Análisis Químico*. España: Reverté.
- LAWLER, D., & KWEON, J. (2003). *Integrated Water Treatment: Softening and Ultrafiltration*. London: IWA Publishing.
- LESSER-CARILLO, L. E., LESSER-ILLADES, J. M., ARELLANO, S., & GONZÁLEZ, D. (2011). Balance Hídrico y Calidad del Agua Subterránea en el Acuífero del Valle del Mezquital, México Central. *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*, 323-336.
- Luthy, R. (1979). Kinetics of reaction of cyanide and reduced sulfur species in aqueous solution. *Environmental Science & Technology*, 1481-1487.
- MANAHAN, S. (2007). *Introducción a la Química Ambiental*. México D.F.: Reverté UNAM.
- McKETTA, J. (1998). *Encyclopedia of Chemical Processing and design*. New York: Marcel Dekker.
- METCALF, & EDDY. (1996). *Ingeniería de Aguas Residuales: Tratamiento, Vertido y Reutilización*. USA: McGraw-Hill.
- MEYERS, R. (2004). *Hanbook of Petroleum Refining Processes 3ed*. EUA: Mc-Graw-Hill Education.
- Mijaylova, P., Sandoval, L., & Ramírez, E. (2005). *Tratabilidad de las aguas residuales de desalación del petróleo, para su reúso en pozos de inyección al subsuelo*. México: Anuario del Instituto Mexicano de Tecnología del Agua.
- MURILLO, M. (1986). Estudio hidrogeoquímico del área metropolitana de Monterrey, N.L. Universidad Autónoma de Nuevo León. Facultad de Ingeniería: P. 69. Obtenido de Tesis para obtener el grado de maestro en ciencias, especialidad en salud pública.
- NATH, K. (2008). *Membrane Separation Processes*. India: Prentice Hall.
- Nazarov, V., & Onegova, A. (1979). Use of ozone in treating condensates from delayed coking to remove phenols and 3-4 benzopyrene. *Springer*, 771-774.
- NGUYEN, H., & JOACHIM, H. (2004). *Colloidal Science of Flotation*. New York: Marcel Dekker.

- OSORIO, F., TORRES, J., & SÁNCHEZ, M. (2010). *Tratamiento de Aguas para la Eliminación de Microorganismos y Agentes Contaminantes: Aplicación de procesos industriales a*. Madrid: Díaz de Santos.
- OXFORD-COMPLUTENSE. (2000). *Diccionario de Ciencias*. España: Ibérica Gráfico.
- PÉREZ Munguía, J. (Julio de 2003). Diseño de un Índice Medio Ambiental para el recurso del agua en Refinerías de Petróleo. *Presentada en el Instituto Politécnico Nacional para la obtención del grado de Maestro en Ciencias con Especialidad en Medio Ambiente y Desarrollo Integrado*. México D.F. .
- PINTADO, L., & OSORNO, G. (2006). *Agua: usos, abusos, problemas, soluciones*. México: Mapas.
- RAMALHO, R. (1996). *Tratamiento de Aguas Residuales*. Barcelona: Reverté.
- Rigola Lapeña, M. (1990). *Tratamiento de aguas industriales: Aguas de proceso y residuales*. España: Alfaomega.
- RODRÍGUEZ, A. e. (2006). *Tratamientos avanzados de aguas residuales industriales*. Madrid: Elecé Industria Gráfica.
- Rodriguez, A., Letón, P., Rosal, R., Dorado, M., Villar, S., & Sanz, J. (2006). *Tratamientos avanzados de aguas residuales industriales*. Madrid: Elecé Industria Gráfica.
- RUIZ, G., JEISON, D., & CHAMY, R. (2003). Nitrification with high nitrite accumulation for the treatment of wastewater with high ammonia concentration. *Water Research*, 1371–1377.
- RUIZ, G., JEISON, D., & CHAMY, R. (s.f.). Nitrification with high nitrite accumulation for the treatment of wastewater with high ammonia concentration.
- Sadeghbeigi, R. (2012). *Fluid catalytic Cracking Hanbook 3 ed*. Reino Unido: Elsevier.
- SAINZ, A. (2005). *Tecnologías para la sostenibilidad. procesos y operaciones unitarias en depuración de aguas residuales*. Madrid: Colección EOI Medio Ambiente.
- Secretaría de Economía. (2001). NMX-AA-050-SCFI-2001. *Análisis de Agua- Determinación de fenoles totales en aguas naturales, potables, residuales y residuales tratadas. Método de prueba*. México.
- SEÓANEZ, M. (2000). *Tratado de Reciclado y Recuperación de Productos de los Residuos*. Madrid: Ediciones Mundi-Prensa.
- SUJO-NAVA, D., SCODARI, L., SLATER, C., DAHM, K., & SAVELSKI, M. (2009). Retrofit of Sour Water Networks in oil Refineries: A case study. *Chemical Engineering and Processing*, 892-901.
- TERAN Escandón, L. Á. (1994). UN NUEVO ENFOQUE DE LA CULTURA Y LA POLÍTICA DEL AGUA EN MEXICO. PARA OBTENER EL TITULO DE INGENIERO CONSTRUCTOR , INSTITUTO TECNOLÓGICO DE LA CONSTRUCCIÓN .
- TERÁN, L. (1994). Un nuevo enfoque de la cultura y la política del agua en México. Tesis para obtener el grado de Ingeniero Constructor en el Instituto Tecnológico de la Contrucción.
- The global oil and gas industry association for environmental and social issues. (2010). *Petroleum refining water/ wastewater use and management*. Londres.
- TINAJERO, J., & VELAZQUEZ, L. (1993). GEOHYDROLOGICAL BEHAVIOUR OF THE CERRITOS WELL SYSTEM, NORTHEASTERN MEXICO. *Hydrogeological Processes* vol. 207, 139-151.

- VILLA, F. (2005). Calidad del agua en ríos y Lagos de México. *Proyecto Terminal de la carrera de Ingeniería Hidrológica*. Universidad Autónoma Metropolitana.
- VILLASEÑOR, J. (2001). *Eliminación Biológica de Fósforo en Aguas Residuales Urbanas*. España: Universidad de Castilla- La Mancha.
- W.-C. CHENG, G. K. (1998). Environmental Fluid Catalytic Cracking Technology, Catalysis Reviews. *Science and Engineering*, 39-79.
- WANG, L., HUNG, Y.-T., & LO, H. (2004). *Hanbook of Industrial and Hazardous Wastes Treatment*. New York: Marcel Dekker.
- WANG, L., HUNG, Y.-T., LO, H., & APIJAKIS, C. (2006). *Waste Treatment in the Process Industries*. USA: Taylor & Francis Group.
- WAUQUIER, J. (2004). *El Refino del Petróleo: petróleo crudo, productos petrolíferos y esquemas de fabricación*. Madrid: Diaz de Santos.
- WEBER, W. J. (2003). *Control de la calidad del agua: Procesos Fisicoquímicos*. Barcelona: Reverté.

Fuentes de internet

- Abu Dhabi National Oil Company. (2011). *ADNOC 2011 Sustainability Report*. Obtenido de http://www.adnoc.ae/publications/hse_reports/ADNOC_Sustainability_Report%202011_English.pdf
- AMBASTA, B. (2008). *Chemistry for Engineers*. Laxmi Publications.
- ANDÍA, Y. (Abril de 2000). *Evaluación de Platas y Desarrollo Tecnológico*. Obtenido de Tratamiento de agua: Coagulación-Floculación: <http://www.frm.utn.edu.ar/archivos/civil/Sanitaria/Coagulaci%C3%B3n%20y%20Floculaci%C3%B3n%20del%20Agua%20Potable.pdf>
- ARREGUI, A. (31 de Julio de 2012). *Proyecto Nueva Refinería*. Obtenido de http://www2012.pemex.com/files/content/120731_refineria_ref.pdf
- BARDAHL. (s.f.). Imagen de destilación atmosférica. Ecuador.
- Bayernoil. (2012). *Umwelterkarung 2012 der Bayernoil Raffineriegesellschaft mbH*. Obtenido de http://www.bayernoil.de/fileadmin/downloadpool/Info-Material/UWE2012_Bayernoil_Internet.pdf
- Bharat Petroleum. (2008). *Corporate Sustainability*. Obtenido de http://www.bharatpetroleum.com/pdf/SR07-08_evn_perf.pdf
- Canadian Association of Petroleum Producers. (Marzo de 2011). *Water Conservation, Efficiency and Productivity Plan*. Obtenido de Upstream Oil and Gas Sector: <http://www.capp.ca/getdoc.aspx?DocId=187709&DT=PDF>
- Capital Carbon. (2014). *Imagen de adsorción*. Obtenido de Manufacturing Process: <http://www.capitalcarbon.in/process.html>
- CARRILLO, J. (Junio de 2013). *Página del Dr. Jaime Alejandro Carrillo Chávez*. Obtenido de Programa de geofluidos, Geociencias-UNAM, Campus Juriquilla: www.geociencias.unam.mx

- Centro Politécnico del Petróleo. (2012). *Curso de certificación de operadores*. Obtenido de Capítulo 5: Desalado: <http://mediateca.rimed.cu/media/document/2690.pdf>
- CERIC, E. (2012). *Crude Oil, Processes and Products*. Sarajevo: Petrolinvest.
- CFE. (2012). *Estudio Geohidrológico Para el Abastecimiento de Agua Subterránea Para la Nueva Refinería en Tula, Hidalgo*. México.
- Comisión Nacional para el Uso Eficiente de la Energía y Secretaría de Energía. (14 de 08 de 2013). *CONUEE*. Obtenido de Tratamiento de agua para su uso en calderas: http://www.conuee.gob.mx/work/sites/CONAE/resources/LocalContent/3856/10/Tratamiento_de_agua_v1_1.pdf
- CONAGUA. (2010). *Compendio del Agua de la región XIII*. Obtenido de Lo que se debe saber del organismo de cuenca aguas del valle de México: http://centro.paot.org.mx/documentos/conagua/compendio_del_agua_.pdf
- CONAGUA. (2012). *Región Hidrológico-Administrativa IX Golfo Norte*. Obtenido de <http://pronacose.uacj.mx/Carpeta1erTaller/4.%20PROGRAMA%20H%C3%8DDRICO%20REGIONAL/IX%20PHOCGN.pdf>
- DMP Corporation. (Septiembre de 2013). *Industrial Water Treatment*. Obtenido de Ion Exchange: http://www.dmpcorp.com/area_of_expertise_list.asp
- DOMENEC, X., WILSON, J., & LITTER, M. (s.f.). *Comisión Nacional de Energía Atómica de Argentina*. Obtenido de Procesos Avanzados de Oxidación para la Eliminación de Contaminantes: <http://www.cnea.gov.ar/xxi/ambiental/cyted/06cap01.pdf>
- Ecopetrol. (2012). *Unidad de Comunicaciones Corporativas*. Obtenido de Reporte Integrado de Gestión Sostenible 2012: [http://www.ecopetrol.com.co/documentos/Reporte_Integrado_de_Gestion_Sostenible_2012%20\(V1\).pdf](http://www.ecopetrol.com.co/documentos/Reporte_Integrado_de_Gestion_Sostenible_2012%20(V1).pdf)
- Electric Power Research Institute. (Octubre de 2003). *Use of Degraded Water Sources as Cooling Water in Power Plants*. Obtenido de http://www.energy.ca.gov/reports/2004-02-23_500-03-110.PDF
- Energy Intelligence. (2013). Obtenido de http://www.energyintel.com/Pages/Eig_Article.aspx?DocId=200017
- EPA: United States Environmental Protection Agency. (Agosto de 2004). *Technical Support Document for the 2004 Effluent Guidelines Program Plan*. Washington. Obtenido de Office of Water.
- Facultad de Ciencias Aplicadas a la Industria. (s.f.). *La Refinación del Petróleo*. Obtenido de <http://www.fcail.uncu.edu.ar/upload/LIBRO%20TOMO%201.pdf>
- FERNÁNDEZ, A. (2003). *Programa Iberoamericano de ciencia y tecnología para el desarrollo*. Obtenido de El agua en Iberoamérica: Aportes para la integración entre los organismos de gestión y los centros de investigación: http://rele.fcien.edu.uy/pdf/el_agua_en_iberamerica.pdf
- FOSTER WHEELER. (Junio de 2013). *Compañía Foster Wheeler*. Obtenido de Publicaciones: coquización retardada: <http://www.fwc.com/publications/pdf/delayedcoking06.pdf>
- General Electric. (2010). *Water & Process technologies*. Obtenido de Crude Unit Corrosion and corrosion control: http://www.gewater.com/pdf/Technical%20Papers_Cust/Americas/English/tp1105.pdf

- General Electric. (enero de 2014). *Water and Process Technologies*. Obtenido de GE Handbook of Water Treatment: <http://www.gewater.com/handbook/index.jsp>
- Gobierno del Estado de Hidalgo. (Junio de 2012). *Gobierno del Estado de Hidalgo*. Obtenido de Diagnóstico: Actualización del Programa de Ordenamiento Ecológico Territorial Región-Tepeji: http://187.188.87.34/actualizacion_tula_tepeji/Actualizaci%C3%B3n%20OET%20Tula-Tepeji/Reportes%20Caracterizaci%C3%B3n%20y%20Diagn%C3%B3stico/Diagn%C3%B3stico/DIAGNOSTICO_TULA_TEPEJI_FINAL.pdf
- HQCEC. (2013). *Refinadora Costarricense de Petróleo*. Obtenido de Technical recommendations: <http://www.recope.go.cr/acerca/modernizacion/technical%20study.pdf>
- IAEA. (2013). *International Atomic Energy Agency*. Obtenido de QUÍMICA DEL ÁCIDO CARBÓNICO DEL AGUA: <http://www-naweb.iaea.org/napc/ih/documents/LIBRO%20IS%C3%93TOPOS/PDF%20Isotopos-I/Seccion9.pdf>
- Imagen de sedimentador*. (2014). Obtenido de <http://ingenieriaquimica-iq.blogspot.mx/2009/06/visita-virtual-una-edar.html>
- Luthy, R. (1979). Kinetics of reaction of cyanide and reduced sulfur species in aqueous solution. *Environmental Science & Technology*, 1481-1487. Obtenido de <http://pubs.acs.org/doi/pdf/10.1021/es60160a016>
- McMAHON, J. (2011). *The Annual Review of Environment and Resources*. Obtenido de Water and Energy Interactions: <http://www.annualreviews.org/doi/pdf/10.1146/annurev-environ-061110-103827>
- MEJÍA, J., RODRÍGUEZ, R., & BERLIN, J. (2001). *Hydrodynamic and pollution of the urban aquifer system of Salamanca, Gto. The Salamanca case 1*. Obtenido de http://www.igme.es/internet/web_aguas/igme/publica/pdf/lib15/031.pdf
- Merles Water Conditioning. (2014). *Imagen de adsorción con carbón activado*. Obtenido de <http://www.merleswater.com/whole-house-chlorine-filters/>
- Nesteoil. (Agosto de 2013). *Water use and wastewater treatment*. Obtenido de <http://2012.nesteoil.com/sustainability/climate-and-resource-efficiency/water-use-and-wastewater-treatment>
- New Logic Research. (2003). *Case of Study*. Obtenido de Using V-SEP to treat Desalter Effluent: <http://www.vsep.com/pdf/DesalterCaseStudy.pdf>
- OLGUIN, P. (febrero de 2011). *El Agua en la Industria Petrolera*. Obtenido de Instituto Mexicano del petróleo: <http://tratin.cinvestav.mx/Portals/0/Users/003/03/3/06%20Patricia%20Olguin.pdf>
- OXFORD-COMPLUTENSE. (2000). *Diccionario de Ciencias*. España: Ibérica Gráfico.
- PEMEX. (2002). *Refinación*. Obtenido de http://www.ri.pemex.com/files/dcpe/inf02_ref.pdf
- PEMEX. (2012). *Anuario Estadístico*. Obtenido de <http://www.ri.pemex.com/files/content/Anuario%20Estadistico%202012.pdf>
- PEMEX. (2014). *Glosario de términos*. Obtenido de <http://www.pemex.com/ayuda/glosario/Paginas/A-D.aspx#.Uv1UxPI5NB0>
- PEMEX. (2014). *PEMEX GAS*. Obtenido de Gas Natural: <http://www.gas.pemex.com.mx/pgpb/Productos%20y%20Servicios/Gas%20Natural/>

- PEMEX. (s.f.). *Pemex a grandes rasgos*. Obtenido de Curso de inducción para instructores:
http://www.imp.mx/especialidades/sisevi/Ind_pemex020408.pdf
- PÉREZ Munguía, J. (Julio de 2003). Diseño de un Índice Medio Ambiental para el recurso del agua en Refinerías de Petróleo. *Presentada en el Instituto Politécnico Nacional para la obtención del grado de Maestro en Ciencias con Especialidad en Medio Ambiente y Desarrollo Integrado*. México D.F. .
- PÉREZ, J. (1981). Manual de Tratamiento de Aguas. *Trabajo presentado como requisito Parcial para ingresar a la Categoría de Profesor Asociado*. Medellín, Colombia: Facultad de minas. Obtenido de http://www.bdigital.unal.edu.co/70/2/45_-_1_Prel_1.pdf
- Petrobras. (2011). *Informe de Sostenibilidad 2011*. Obtenido de http://www.petrobras.com.br/rs2011/downloads/RS_espanhol_online_p%C3%A1gina%20dupla.pdf
- Petronor. (2008). *Proyecto de Estudio de Impacto Ambiental*. Obtenido de http://www.euskadi.net/r33-2288/es/contenidos/informe_estudio/esia_urf_petronor/eu_doc/adjuntos/esia_urf.pdf
- Process Engineering Associates. (Junio de 2013). *Página de Process Engineering Associates*. Obtenido de Publicaciones: http://processengr.com/ppt_presentations/coking_101.pdf
- RAE. (2014). *Real Academia Española*. Obtenido de Diccionario de la lengua española: <http://lema.rae.es/drae/>
- Reliance. (2012). *Sustainability Report 2011-12*. Obtenido de http://www.ril.com/downloads/pdf/ril_sr2011_12.pdf
- Reliance. (Agosto de 2013). *Types of Refinery & Nelson's Complexity*. Obtenido de http://www.ril.com/html/business/types_refinery.html
- Repsol. (2011). *Dirección General de Comunicación y Gabinete de Presidencia de Repsol*. Obtenido de Información al Accionista: http://www.repsol.com/imagenes/es_es/Informe_azul_tcm7-624862.pdf
- Repsol. (Julio de 2013). Obtenido de Repsol Argentina: <http://www.iae.org.ar/archivos/educ1202.pdf>
- SEGOB. (Agosto de 2013). *Enciclopedia de los Municipios y Delegaciones de México*. Obtenido de Tula de Allende: <http://www.e-local.gob.mx/work/templates/enciclo/EMM13hidalgo/municipios/13076a.html>
- SENER. (Febrero de 2014). *Refinación*. Obtenido de http://www.energia.gob.mx/res/85/Refinacion_Web.pdf
- SIEMENS. (Agosto de 2013). *Water Technologies*. Obtenido de Boiler Feedwater Treatment: http://www.water.siemens.com/en/applications/industrial_process_water/boiler_feedwater/Pages/default.aspx
- SSA. (22 de 11 de 2000). *NOM-127-SSA1-1994, Salud ambiental. Agua para uso y consumo humano. Límites permisibles de calidad y tratamientos a que debe someterse el agua para su potabilización*. Obtenido de <http://www.salud.gob.mx/unidades/cdi/nom/127ssa14.html>
- Statoil. (2013). *Annual Reporting Compendium*. Obtenido de Annual Report 2012: <http://www.statoil.com/AnnualReport2012/en/Download%20Center%20Files/01%20Key>

- %20downloads/10%20Annual%20Reporting%20Compendium/AnnualReportingCompendium.pdf
- The international council on clean transportation. (24 de Octubre de 2011). Obtenido de Introducción a la refinación de petróleo y producción de gasolina y diésel con contenido ultra bajo de azufre:
http://www.theicct.org/sites/default/files/ICCT_RefiningTutorial_Spanish.pdf
- TNK-BP. (2011). *TNK-BP web page*. Obtenido de Responsible Energy Sustainability Report 2011: http://www.tnk-bp.ru/upload/iblock/ad9/sr_2011_eng.pdf
- TNK-BP. (2011). *TNK-BP web page*. Obtenido de Reporte anual TNK-BP: <http://annual-report-2011.tnk-bp.ru/en/>
- TNK-BP. (2011). *TNK-BP web page*. Obtenido de Reporte anual TNK-BP: http://annual-report-2011.tnk-bp.ru/en/processing_and_trade/oil_refining/
- TOYO ENGINEERING CORPORATION - ATLATEC. (6 de febrero de 2013). *Improvement of Industrial Wastewater Treatment & Enhancement of Water Recycle with ZLD Application in the Existing Refinery and Petrochemical Facilities*. Obtenido de http://www.jccp.or.jp/english/wp-content/uploads/31gcc-japan-environment-symposium-feb6_2013-zld_toyoengatlatic.pdf
- Universidad nacional de Colombia. (2012). *Sede Manzanales*. Obtenido de Química del Agua: <http://www.virtual.unal.edu.co/cursos/sedes/manizales/4090020/>
- University of California. (Agosto de 2013). *Department of Land, Air and Water Resources*. Obtenido de Soil Chemistry: Chemistry of Carbonate Systems: <http://lawr.ucdavis.edu/classes/ssc102/Section5.pdf>
- UOP. (Julio de 2013). *Compañía UOP*. Obtenido de UOP FCC training portfolio: <http://www.uop.com/uop-fcc-training-portfolio/>
- World Bank Group. (1998). *Pollution and Abatement Handbook*. Obtenido de http://www.ifc.org/wps/wcm/connect/b99a2e804886589db69ef66a6515bb18/petroref_PP_AH.pdf?MOD=AJPERES

9 *Anexos*

9.1 **Química y calidad del agua**

El agua es un compuesto químico con características moleculares únicas que le confieren propiedades especiales; las cuales convierten a este recurso natural en una pieza clave del desarrollo sustentable, al influir ampliamente en la vida, el medio ambiente y la industria. La calidad del agua se refiere a las características físicas, químicas y biológicas de este recurso. Las sustancias existentes en cualquier corriente de agua le dan sus características y definen su calidad, posibles usos y el tipo de tratamiento requerido para acondicionarla para algún uso específico.

El agua que se encuentra en los diferentes cuerpos hídricos puede contener una gran variedad de impurezas debido a su capacidad natural de disolver iones y sustancias polares a causa de los puentes de hidrógeno que forma. Las sustancias disueltas en el agua y su concentración dependerán del ciclo hidrológico por la que dicha agua ha pasado y a qué sustancias ha sido expuesta. Las impurezas se conocen como contaminantes cuando su concentración excede el valor máximo establecido, dependiendo del uso que se le vaya a dar.

Las industrias utilizan agua para una gran cantidad de operaciones y generan efluentes que regresan al medio ambiente con contaminantes o impurezas que pueden ser dañinas en diferentes concentraciones. Para evitar ocasionar un efecto negativo en el ambiente se remueven los contaminantes de los efluentes industriales, de tal forma que se cumplan las normas de vertido a cuerpos receptores vigentes. Existen una gran cantidad de procesos para la purificación o tratamiento del agua.

Existe una gran cantidad de impurezas que el agua puede contener dependiendo de su procedencia; dichas impurezas son evaluadas mediante diferentes parámetros, los

cuales son seleccionados dependiendo del tipo de agua a analizar y el uso que se le va a dar.

9.1.1 **Parámetros físicos**

Los parámetros físicos dan una idea aproximada de la calidad del agua, ya sea de agua potable, de alimentación a un proceso o residual. Estos parámetros también permiten tener una idea de los posibles problemas existentes en algún tratamiento del agua.

9.1.1.1 **Color y olor**

El color y el olor del agua se deben a las sustancias que se encuentran en solución, ambas nos dan una idea cualitativa de la calidad del agua. El color cualitativamente permite estimar el tipo de agua que se tiene y a veces permite observar problemáticas en algún proceso de una planta de aguas residuales. El color es medido con la escala de Platino- Cobalto. El olor, por su parte, nos permite tener una idea del tipo de agua que se tiene y qué contaminantes existen; dichos contaminantes pueden ser reconocidos por su aroma característico.

9.1.1.2 **Sabor**

El sabor es un parámetro físico utilizado en la caracterización de agua potable y se debe a la presencia de compuestos orgánicos e inorgánicos.

9.1.1.3 **Temperatura**

La temperatura es un parámetro con gran importancia debido a que influye en las reacciones químicas al modificar las velocidades de reacción, modifica la actividad bacteriana, cambia la solubilidad de los sólidos, líquidos y gases; además de requerirse para la determinación de las propiedades del agua.

Cabe destacar que la actividad bacteriana se desarrolla óptimamente en un rango de temperatura de entre 25°C y 35°C. Si la temperatura se acerca a los 5°C la actividad microbiana se inhibe, mientras que si lo hace a 50°C la digestión aerobia y la nitrificación se detienen. También es importante tener en cuenta que los gases tienen una menor solubilidad en los líquidos al aumentar la temperatura, mientras que la solubilidad de los sólidos suele aumentar al aumentar la temperatura; existiendo algunas excepciones.

9.1.1.4 *Turbidez*

La turbidez mide la pérdida de transparencia del agua. Este parámetro se mide al hacer pasar un haz de luz a través de una muestra de agua, midiendo la intensidad de la luz dispersada. Los resultados de las mediciones de turbidez se expresan en Unidades Nefelométricas de Turbiedad (UNT).

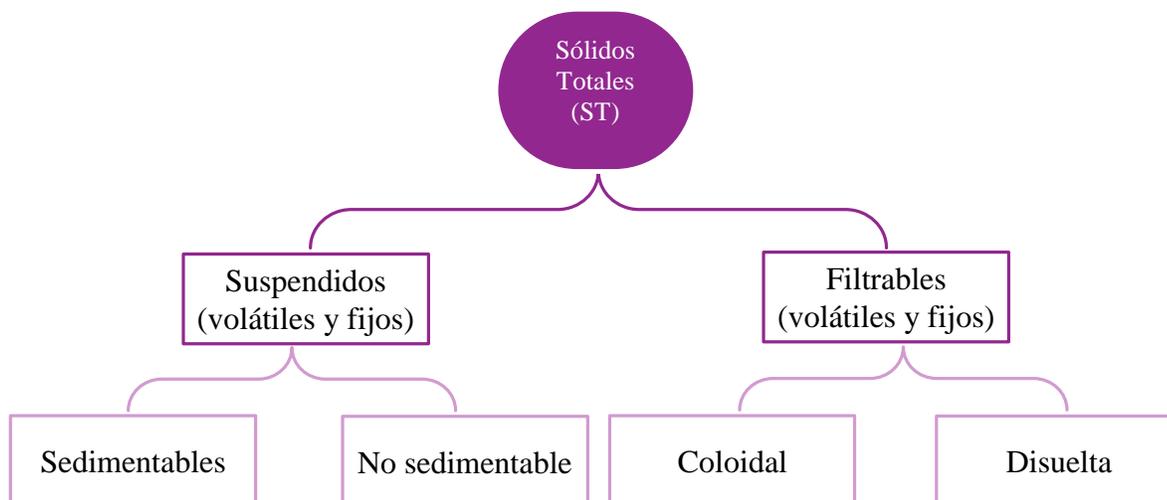
9.1.1.5 *Conductividad*

La conductividad es la capacidad que tiene una muestra de agua para conducir la electricidad. Los responsables de la transmisión de la corriente eléctrica en el agua son los iones presentes en ella. La conductividad depende del tipo, concentración y estado de oxidación de los iones presentes en la muestra; además de la temperatura a la que se encuentra la solución. La conductividad se expresa en microsiemens por cm ($\mu\text{S}/\text{cm}$) o micromohos/cm.

9.1.1.6 *Sólidos totales (ST)*

Los sólidos son todos los residuos que quedan después de evaporar agua; su procedencia, tamaño y tipo es variable. El origen de los sólidos puede ser orgánico o inorgánico y su tamaño varía desde unas cuantas micras hasta algunos milímetros. La fracción orgánica se conoce también como fracción volátil debido a que al hacer pasar

una muestra de sólidos por una mufla a 550°C se pierde por ignición, mientras que la fracción inorgánica se queda al realizar esta acción y es por ello conocida como fracción fija. En la Figura 8 se muestra las formas en las cuales se pueden encontrar las impurezas sólidas del agua.



Fuente: (METCALF & EDDY, 1996)

Figura 8. Clasificación de las impurezas sólidas del agua

9.1.1.6.a Sólidos suspendidos totales (SST)

Es la fracción de sólidos con una densidad superior a la del agua; éstos se mantienen suspendidos mientras el agua se encuentre en movimiento, al detenerse sedimentan. Son susceptibles a ser eliminados por sedimentación, floculación o filtración.

Sedimentables

Los sólidos sedimentables son los que tienen un tamaño mayor a 0.01 mm y sedimentan en el fondo de un recipiente de forma cónica (cono de Imhoff) en un período de 60 minutos. Esta fracción permite conocer la medida aproximada del fango que se obtendría en la decantación primaria del agua residual. Las unidades para expresar los sólidos sedimentables son ml/l o mg/l.

No Sedimentables

Es la fracción de sólidos en suspensión que no sedimentan en el fondo del cono Imhoff al dejarlos en reposo por un periodo de tiempo determinado.

9.1.1.6.b **Sólidos Filtrables**

Es la fracción de sólidos que pasa a través de los poros de un filtro; teniendo diferentes tamaños y origen.

Coloidales

Es la fracción de sólidos que tiene un diámetro de 10^{-2} a 10^{-5} milímetros. Las partículas coloidales son estables por lo que no pueden ser eliminadas por sedimentación. Los coloides pueden ser sedimentados con procesos de coagulación-floculación, filtración con membranas (como ultrafiltración y ósmosis inversa) y si los coloides son orgánicos pueden tratarse biológicamente.

Disueltos

Esta fracción está conformada por moléculas e iones que se encuentran disueltos en el agua, los cuales tienen un diámetro menor a 10^{-5} milímetros. La concentración de estos depende de las sales disueltas, de los gases disueltos en equilibrio, etc.

9.1.2 Parámetros Químicos

9.1.2.1 *Materia orgánica*

La materia orgánica está formada por combinaciones de carbono e hidrógeno con oxígeno y otros elementos como azufre y nitrógeno. Existen varios parámetros que miden la presencia de materia orgánica en el agua, ya sea cruda o residual. Los parámetros más utilizados se describen a continuación brevemente:

9.1.2.1.a Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO)

La Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO) es la cantidad de oxígeno necesaria para que una población microbiana heterogénea degrade la materia orgánica biodegradable presente en una muestra de agua. A partir de esto, se obtiene indirectamente la concentración de la materia transformable biológicamente en un período de tiempo dado. Por lo general se reporta la DBO_5 , la cual mide el oxígeno consumido por los microorganismos durante 5 días. La DBO se reporta en mg/l de O_2 consumido.

9.1.2.1.b Demanda Química de Oxígeno (DQO)

La demanda Química de Oxígeno (DQO) es una medida de la cantidad de oxígeno consumido en la oxidación química de la materia orgánica presente en una muestra de agua. La determinación de este parámetro se lleva a cabo con un agente oxidante fuerte

(dicromato de potasio) en un medio ácido a elevada temperatura en presencia de un catalizador como el sulfato de plata.

9.1.2.1.c Demanda Teórica de Oxígeno (DTeO)

La demanda Teórica de Oxígeno (DTeO) es la cantidad teórica de oxígeno requerida para oxidar totalmente la fracción orgánica contenida en una muestra de agua.

9.1.2.1.d Carbono Orgánico Total (COT)

El carbono orgánico total (COT) es la medida de la cantidad de carbono existente en la muestra. Se obtiene indirectamente al medir el CO₂ generado al oxidar la materia orgánica presente en una muestra mediante un proceso de combustión.

9.1.2.1.e Compuestos orgánicos volátiles

Los compuestos orgánicos volátiles (COV) son todos los compuestos orgánicos que tienen un punto de ebullición menor a los 100°C; algunos ejemplos son la gasolina, los clorofluorocarburos, el alcohol etílico, la acetona y el hexano.

9.1.2.1.f Hidrocarburos totales de petróleo (HTP's)

Son compuestos orgánicos no polares que pueden ser extraídos de una muestra con tetracloruro de carbono; la determinación de su presencia y concentración es de suma importancia, ya que al ser descargados a cuerpos receptores como ríos y lagos afectan a los ecosistemas. Los HTP's son fácilmente oxidables por lo que al encontrarse presentes en cuerpos de agua disminuyen la concentración de oxígeno disuelto; además de disminuir la tensión superficial del agua. La concentración de estos compuestos

orgánicos se realiza por lo general mediante cromatografía de gases y es reportada en mg/l.

9.1.2.2 *Materia inorgánica*

El agua tiene características moleculares que la vuelven un buen disolvente de sustancias inorgánicas. Los siguientes parámetros permiten la medición de los parámetros inorgánicos del agua tanto residual como cruda

9.1.2.2.a **Potencial de hidrógeno (pH)**

La concentración del ion hidrógeno es sumamente importante en las aguas naturales y residuales, su concentración influye en el desarrollo de la vida acuática. El tratamiento de agua mediante procesos biológicos requiere que se ponga especial atención en este parámetro debido a que afecta la velocidad de descomposición de los sustratos, llegando en algunos valores a inhibir completamente la acción metabólica de los microorganismos. Un ejemplo de la influencia del pH en el tratamiento de agua se encuentra en la nitrificación, ya que a un pH menor a 6.35 se inhibe completamente este proceso (RUIZ, JEISON, & CHAMY).

El pH no solo afecta el tratamiento mediante procesos biológicos, también es un parámetro fundamental en los tratamientos mediante procesos físico-químicos. Por ejemplo, en la coagulación-floculación si se trabaja fuera del rango óptimo de pH se debe aumentar la cantidad de coagulante suministrado, por lo tanto se genera un gasto en químicos mayor.

9.1.2.2.b Salinidad

La salinidad total del agua es la suma de los cationes y aniones presentes en una muestra de agua. Se expresa en mg/l.

9.1.2.2.c Nitrógeno

El nitrógeno es un elemento esencial para el crecimiento de protistas y plantas, lo cual lo convierte en un parámetro que debe ser medido y controlado. El nitrógeno es fundamental en los tratamientos de agua residual, por lo que si hace falta debe ser agregado, mientras que si su concentración es mayor a la requerida genera crecimientos biológicos y eutrofización.

El contenido de nitrógeno total en cualquier agua está constituido por nitritos, nitratos, nitrógeno orgánico y amoníaco. El Nitrógeno Kjeldahl total es un proceso en donde se digiere una muestra acuosa, convirtiendo el nitrógeno orgánico en amoníaco. El resultado de este parámetro da la suma del nitrógeno orgánico y del nitrógeno amoniacal. El nitrógeno orgánico se determina mediante el método Kjeldahl; el cual funciona como el parámetro anterior, solo que antes de digerir la muestra acuosa se hierve, para eliminar el nitrógeno amoniacal inicial. La concentración de nitritos y nitratos se determina colorimétricamente.

9.1.2.2.d Fósforo

El fósforo es otro elemento fundamental para el crecimiento de algas y otros organismos biológicos. El fósforo se encuentra en las soluciones acuosas en diferentes formas: ortofosfatos (PO_4^{-3} , HPO_4^{-2} , H_2PO_4^- , H_3PO_4) fosfatos condensados y fosfatos orgánicos (compuestos organofosfatados). El fósforo es eliminado mediante la sedimentación, precipitación, adsorción y en los tratamientos biológicos (por asimilación en la biomasa).

9.1.2.2.e **Azufre**

El azufre puede presentarse tanto en compuestos orgánicos como inorgánicos. En las aguas industriales por lo general se encuentran sulfatos, sulfitos y H₂S además de otros compuestos orgánicos azufrados. El sulfuro de hidrógeno es corrosivo y se puede eliminar mediante aeración u oxidación por cloración. Los sulfatos son eliminados mediante intercambio iónico.

9.1.2.2.f **Cloruros**

Los cloruros son aniones provenientes de la disociación de sales ya sean orgánicas o inorgánicas. Su medición es importante debido a que pueden generar corrosión en los equipos industriales, al hidrolizarse y formar HCl. La presencia de HCl puede ser controlada con la adición de amoníaco. Los cloruros afectan principalmente a los equipos de intercambio de calor (Sistema de agua de enfriamiento y retorno de agua de enfriamiento).

9.1.2.2.g **Fenoles**

Los fenoles son compuestos químicos definidos como hidroxiderivados del benceno (Secretaría de Economía, 2001). Los compuestos fenólicos más comunes en aguas residuales en la industria de la refinación son el fenol, naftol, cresol, catecol, los clorofenos y nitrofenoles. La concentración de estos contaminantes debe ser controlada para evitar desequilibrios en los sistemas biológicos. Su eliminación se puede llevar a cabo mediante sistemas biológicos o mediante oxidaciones como la ozonización, la supercloración y la adsorción con carbón activado.

9.1.2.2.h Silicio

El silicio se presenta en el agua por lo general en su forma oxidada (SiO_2) o como el anión HSiO_2^- en una solución coloidal. La medición de la concentración de silicio es importante debido a su tendencia a formar incrustaciones; es por eso que este parámetro es utilizado para definir los ciclos de concentración en torres de enfriamiento. Es problemático principalmente en el sistema de generación de vapor en las calderas de alta presión. Este contaminante es eliminado mediante precipitaciones con óxido de magnesio o por ablandamientos con cal en frío o caliente.

9.1.2.2.i Cianuros

Además de ser venenosos, los cianuros (CN^-) constituyen un problema en la industria debido a su poder corrosivo, por lo que su determinación y eliminación es muy importante.

9.1.2.2.j Alcalinidad

La alcalinidad es una medida de la capacidad del agua para neutralizar ácidos. La alcalinidad se debe a la presencia de iones como hidroxilo, carbonatos y bicarbonatos, fosfatos y otros ácidos débiles. La importancia del control de la alcalinidad en la industria radica en que los carbonatos y bicarbonatos pueden generar CO_2 en el sistema de vapor, el cual corroe las líneas de condensado. La alcalinidad se determina mediante la titulación con un ácido estándar y sus resultados se expresan en mg/l de CaCO_3 .

Existen dos tipos de alcalinidad: la alcalinidad m y la p. La alcalinidad m o alcalinidad total se mide a partir de la adición de ácido a una muestra utilizando como indicador anaranjado de metilo. La alcalinidad p se mide utilizando como indicador fenolftaleína. La alcalinidad puede reportarse como alcalinidad p y m o, de una manera más elaborada, pueden reportarse los diferentes iones que conforman la alcalinidad.

La alcalinidad se elimina mediante descarbonataciones con cal, tratamientos ácidos o mediante desmineralizaciones por intercambio iónico.

9.1.2.2.k Dureza

La dureza es causada principalmente por la presencia de cationes como lo son el calcio, el magnesio, el estroncio, el hierro y el manganeso; pero debido a que los iones que se encuentran en mayor concentración son el calcio y el magnesio se considera, por cuestiones prácticas, que la dureza total es la suma de las concentraciones de iones de magnesio y calcio, despreciando las concentraciones de los demás iones en disolución.

La dureza es un parámetro de la calidad del agua fundamental en la industria de la refinación, ya que a ella se le asocian fenómenos de corrosión e incrustaciones. Cuando la dureza se encuentra en valores bajos (0-75 mg/l) el agua se vuelve muy agresiva o corrosiva; afectando tuberías y equipos, mientras que a valores altos (>150 mg/l aprox.) se presenta en fenómeno de incrustación en tuberías y equipos.

Según el grado de dureza las aguas se clasifican de la siguiente forma:

- Agua blanda 0 – 75 mg/l CaCO_3
- Agua semi-dura 75 – 150 mg/l CaCO_3
- Agua dura 150 – 300 mg/l CaCO_3
- Agua muy dura >300 mg/l CaCO_3

Existen dos tipos de dureza, la permanente y la temporal. La dureza temporal o carbonatada mide la cantidad de dureza asociada a iones HCO_3^- ; por lo que cuando la dureza es inferior al valor de alcalinidad, solo se tiene este tipo de dureza. Se llama temporal porque al elevarse la temperatura del agua hasta el punto de ebullición, el calcio y el magnesio se precipitan en forma de carbonato de calcio e hidróxido de magnesio respectivamente. Por su parte, la dureza permanente se encuentra asociada a otros aniones y no puede eliminarse al aumentar la temperatura; requiere del uso de procesos

químicos para ser eliminada y se obtiene al restar el valor de la alcalinidad total a la dureza total.

La dureza se elimina mediante procesos como el ablandamiento con cal, cal-soda y mediante intercambio iónicos. En la Tabla 24 se muestra el grado de mineralización de los diferentes tipos de agua.

Tabla 24. Tipos de agua según el grado

Grupo	Mineralización (mg/l)	Conductividad (µS/cm)	Sub-grupo	Características del subgrupo
Muy débil mineralización	Máx. 50	Máx. 66	Aguas corrosivas	Saturación en O ₂ CO ₂ libre < 10 mg/l
			Aguas fuertemente agresivas	CO ₂ libre > 10 mg/l
Débil mineralización	Máx. 120	Máx. 200	Débilmente agresivas en frío y tendencia a la incrustación en caliente	pH ácido < 7 CO ₂ libre < 10 mg/l
			Aguas agresivas y corrosivas	pH ácido < 7 CO ₂ libre > 10 mg/l
			Aguas muy corrosivas y agresivas	pH ~7 CO ₂ libre > 10 mg/l
Media mineralización	Máx. 500	Máx. 500	Aguas incrustantes y corrosivas	Saturación O ₂ pH ~7 CO ₂ libre < 10 mg/l
			Aguas agresivas y corrosivas en frío, incrustantes y corrosivas en caliente	pH ~7 CO ₂ libre < 5 mg/l
Fuerte mineralización y dureza	Máx. 1000	Máx. 1250	Aguas inertes en frío, incrustantes en caliente	pH de 6.8 a 7.5
			Aguas incrustantes	pH ~7
Dureza y mineralización muy elevada	>1000	>2500		pH débilmente alcalino. O ₂ escaso

Fuente: (PANCORBO, 2011).

9.1.2.2.1 Grasas y aceites

Las grasas y aceites son compuestos orgánicos constituidos por ácidos grasos de origen animal y vegetal como lo son ceras, hidrocarburos, aceites y cualquier otra sustancia extraíble con hexano. Para la determinación de este parámetro se utiliza hexano y se acidifica la muestra, el hexano es posteriormente evaporado y la muestra se pesa. El resultado de la medición se reporta en mg/l.

9.1.2.2.m Gases

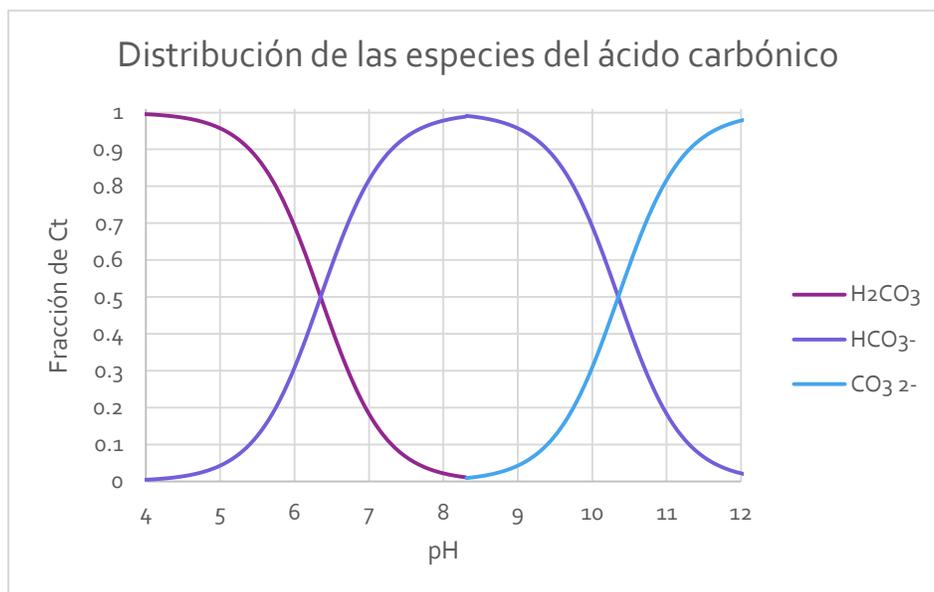
En una muestra de agua existirán gases disueltos, la cantidad de ellos existente se encuentra condicionada a la solubilidad del gas, la presión parcial del gas en la atmósfera, la temperatura, la calidad del agua (salinidad, sólidos en suspensión, etc.)

Oxígeno

El oxígeno disuelto es un parámetro importante ya que además de generar corrosión en el metal de los equipos y tuberías, es fundamental en el control de los procesos biológicos. La cantidad de oxígeno disuelto determina en los procesos de tratamiento biológicos si las condiciones son aerobias, anaerobias o anóxicas.

Dióxido de Carbono

Es un gas relativamente soluble que se hidroliza formando iones bicarbonato y carbonato en función del pH (Figura 9). El CO₂ corroe las líneas de condensado por lo que su eliminación es importante y se logra mediante aeración, desgasificación o descarbonatación.



Fuente: (University of California, 2013)

Figura 9. Distribución de las especies del ácido carbónico como fracciones del contenido total de carbono.

9.1.3 Parámetros biológicos

El agua puede contener una gran cantidad de organismos vivos dependiendo de su calidad. El agua puede contener bacterias, hongos, algas, protozoarios, virus, etc. La velocidad de reproducción de estos organismos depende de la temperatura, la concentración de nutrientes en el agua, la existencia de microbicidas como el cloro en el agua. Los principales microorganismos en el agua a los que se les asocia una problemática en la industria son:

- Algas.- Encuentran un ambiente favorable para crecer en las vasijas de las torres de enfriamiento (luz, CO₂, temperatura, O₂, etc.). Estos organismos pueden generar taponamientos en el sistema de enfriamiento al ser transportados por el agua circulante.

- Bacterias.- Pueden provocar depósitos de hierro, corrosión y acidificación. Los productos residuales de su metabolismo enriquece el agua con materia coloidal que provee de nutrientes a otros organismos vivos y precipita en agua caliente.

9.2 Procesos de tratamiento de agua

El tratamiento que se le dará al agua depende de la calidad inicial que se tiene y de la calidad final que se pretende obtener. Existen un gran número de operaciones disponibles para la eliminación de los diferentes tipos de contaminantes o impurezas del agua. En esta sección se describen los tipos de impurezas y los tratamientos requeridos para su eliminación.

9.2.1 Eliminación de materias en suspensión

Debido a que la materia en suspensión puede tener características variables, la elección del tratamiento más conveniente depende de la caracterización del agua a tratar, además de la concentración inicial y final de estos contaminantes. Hay aguas residuales que contienen materia en suspensión con partículas grandes y densas usualmente inorgánicas, mientras que existen otros tipos de aguas residuales con partículas más pequeñas en suspensiones muy estables.

La materia en suspensión generalmente es lo primero en eliminarse debido a que este tipo de partículas pueden ser removidas fácilmente mediante procesos físicos y operaciones mecánicas, además de que su presencia puede ocasionar problemas en los procesos siguientes en el tren de tratamiento;. Se suelen utilizar aditivos químicos para favorecer la separación.

9.2.1.1 *Desbaste o cribado*

En el desbaste se eliminan sólidos de gran tamaño mediante rejillas de 6 o más milímetros, las cuales se encuentran separadas unas de otras entre 10 y 100 milímetros. La limpieza de las rejillas puede hacerse manualmente o mecánicamente; los productos recogidos se destruyen por incineración, se tratan por procesos de digestión anaerobia o se dirigen directamente a un vertedero. (RAMALHO, 1996)

9.2.1.2 *Sedimentación*

La sedimentación es una operación física en la cual se separan partículas con una densidad mayor a la del agua mediante el aprovechamiento de la fuerza de gravedad. La eficiencia de remoción depende del tamaño de las partículas y sus densidades.

La sedimentación puede ser simple o inducida. La sedimentación simple se lleva a cabo cuando las partículas que descienden por acción de la gravedad no cambian de forma, tamaño o densidad durante su descenso; mientras que en la filtración inducida, las partículas se aglutinan, modificando su tamaño, forma y peso específico (RODRÍGUEZ, 2006).

Existen tres tipos de sedimentación (PÉREZ, 1981):

- Clarificación (tipo 1).- Las partículas sedimentan como entidades individuales y no existe interacción con las partículas vecinas.
- Sedimentación floculenta.- Las partículas interfieren entre ellas, se agregan o floculan durante el proceso de sedimentación. Al unirse su masa aumenta y sedimentan a una mayor velocidad.
- Decantación zonal.- Las partículas se agregan formando una masa compacta que decanta como un manto con una interfase distintiva entre el fango decantado y el efluente clarificado.

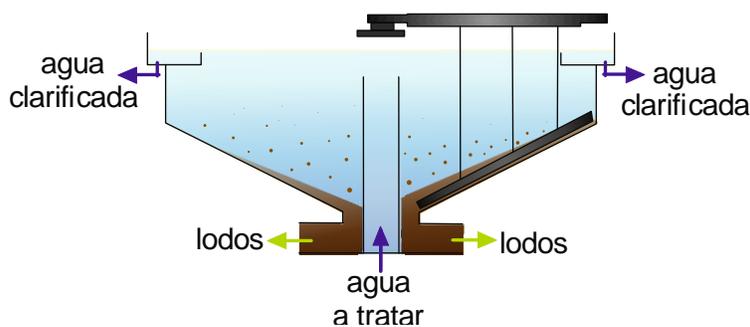
Los sólidos que se encuentran en aguas residuales suelen ser poco densos, por lo que para mejorar su remoción, se prefiere realizar una coagulación-floculación previa, la cual permitirá tener partículas más densas con una mayor velocidad de sedimentación. La forma de los equipos de sedimentación es variable, dependiendo de las características de los sólidos que se removerán. Las características de los tipos de sedimentadores se muestran en la Tabla 25

Tabla 25. Tipos de sedimentadores

	Sedimentadores rectangulares	Sedimentadores Circulares	Sedimentadores lamelares
Flujo	Horizontal	Radial (usualmente del centro hacia el exterior)	Ascendente
Desplazamiento (sedimentación)	Constante a lo largo del sedimentador	Disminuye al alejarse del centro	Se realiza en cada placa o tubo inclinado
Profundidad	Poco profundos	Variable	Poca profundidad (mayor área de sedimentación que en los rectangulares con el mismo volumen)
Longitud/diámetro	-30 m (más comunes) -hasta de 91 m de largo	-30 m (más comunes) -de 10 a 70m	-
Partículas	No varían sus propiedades físicas	Usualmente se acompaña con floculación por lo que el tamaño de las mismas aumenta mientras descienden	Se acumulan en la superficie de las placas o tubos y descienden al fondo del tanque

Fuente: (RODRÍGUEZ, 2006)

Los lodos o fangos de un sedimentador se encuentran conformados por las partículas depositadas en el fondo del equipo. Son empujados mecánicamente a la salida del equipo y posteriormente son tratados y preparados para su destino final. En la Figura 10 se muestra ejemplo de sedimentador circular.



Fuente: (Imagen de sedimentador , 2014)

Figura 10. Ejemplo de sedimentador.

9.2.1.3 *Coagulación-floculación*

La materia de tamaño muy pequeño, de entre 10^{-6} y 10^{-9} m, forma suspensiones coloidales, las cuales son muy estables debido a las interacciones eléctricas entre las partículas. Aunque las partículas sólidas de una dispersión coloidal están en movimiento constante, su velocidad de sedimentación es muy pequeña; por lo que para mejorar su eficiencia de remoción se adicionan reactivos químicos que desestabilicen la suspensión coloidal (coagulación) y posteriormente favorezcan la formación de agregados moleculares más grandes conocidos como flóculos, los cuales sedimentan con mayor facilidad (floculación).

Los coagulantes utilizados para el proceso de coagulación-floculación suelen ser productos químicos que en solución se disocian, aportando una carga eléctrica contraria a la del coloide. Se utilizan por lo general cationes con una relación alta entre carga y masa como lo son las sales de hierro o de aluminio y los poli-electrolitos. Los coagulantes y coadyuvantes a utilizar dependen de las características de los mismos y de las características físico-químicas del agua a tratar. La eficacia de un coagulante químico se determina por medio de un ensayo discontinuo conocido como prueba de jarras, en el cual se varía la dosificación del químico y se mide la turbidez del agua residual después de periodos apropiados de agitación suave y sedimentación.

La dosis de coagulante condiciona el funcionamiento de las unidades, por lo que si la dosificación no es adecuada se tendrá agua con mala calidad; impactando también en el costo. (ANDÍA, 2000)

En la aplicación de este tratamiento se genera lodo, el cual debe ser tomado en cuenta para su posterior disposición o tratamiento. En la Tabla 26 se muestran los tipos de suspensiones vistos desde la perspectiva de la coagulación.

Tabla 26. Tipos de suspensiones según la coagulación

Concentración coloidal	Alcalinidad	
	Alta	Baja
Alta	<ul style="list-style-type: none"> • Dosificación alta de coagulante (pH neutro y ácido). ó • Eliminación previa de alcalinidad para realizar su tratamiento a pH bajo. 	<ul style="list-style-type: none"> • Sistema fácil de tratar. Solo debe determinarse la dosificación óptima de coagulante (niveles ácidos de pH).
Baja	<ul style="list-style-type: none"> • Coagulación fácil a altas dosificaciones de coagulante. • Con dosificación de una ayuda al coagulante aumenta la concentración coloidal (aumento de contacto interpartícula) disminuyendo la cantidad de coagulante requerido. 	<ul style="list-style-type: none"> • Coagulación muy difícil, se requiere adicionar alcalinidad o partículas. Alta dosis de coagulantes.

Fuente: (ANDÍA, 2000) y (AGUILAR, 2002)

9.2.1.4 *Filtración*

La filtración es una operación física en la cual se hace pasar agua a través de un medio poroso con la finalidad de retener la mayor cantidad de materia en suspensión posible. En el tratamiento de aguas industriales es habitual realizar una sedimentación o una coagulación- floculación previamente y utilizar además de arena, otros medios porosos como la Tierra de Diatomeas. La filtración se emplea para eliminar los sólidos presentes en las aguas superficiales, precipitados de otras operaciones como el ablandamiento de agua con cal, para eliminar flóculos provenientes de tratamientos biológicos, entre otras aplicaciones.

La filtración es un proceso en el que el agua pasa a través de un lecho filtrante (medio filtrante), donde las partículas de mayor tamaño que los poros no logran pasar a través de los intersticios de las partículas del medio, generando una torta; es por esto que, con el tiempo, los poros del filtro se obstruyen y se hace necesario limpiar el filtro.

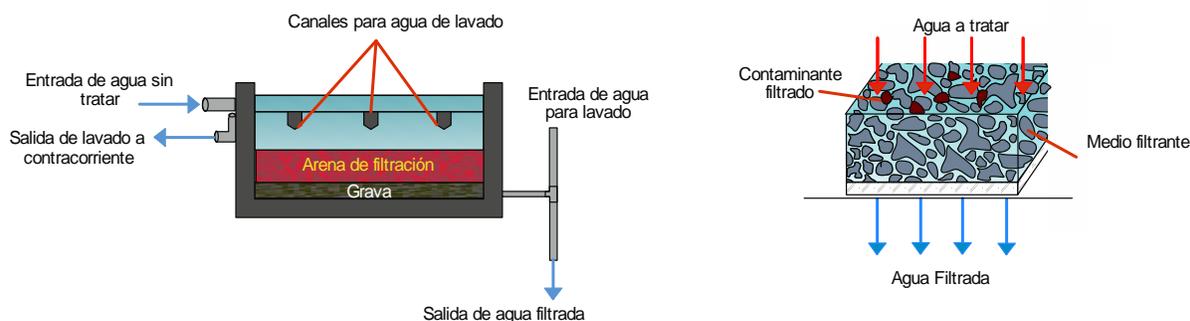
Los lechos de material poroso se disponen en distintas capas con distintos tamaños de partícula. Los sistemas de filtración se clasifican como se muestra en la Tabla 27.

Tabla 27. Tipos de filtros

	Filtración por gravedad		Filtración por presión	
Descripción	El agua circula verticalmente por acción de la fuerza de gravedad.		Contenidos en recipientes, el agua es forzada mediante presión a atravesar el medio filtrante.	
Tipos	Lenta	Rápida	Lenta	Rápida
Mecanismos y observaciones	Combinación de: *asentamiento *retención *adhesión *atracción	Tamizado, con eficiencias menores a las de una filtración por gravedad	Físicos y biológicos	La calidad de filtrado mejora conforme aumenta la profundidad

Fuente: (RODRÍGUEZ, 2006)

Existe una gran cantidad de tipos de filtros en el mercado; teniéndose filtros de medio granular, cartucho, de membrana, entre otros. La filtración remueve partículas de un tamaño mayor a 1 micrón. En el caso de los filtros de membrana, se pueden remover partículas de hasta $0.1 \mu\text{m}$ (HENRY, 1999). En la Figura 11 se muestra un ejemplo de filtro granular y un esquema de su funcionamiento.



Fuente: (DICKENSON, 1997) y (HENRY, 1999)

Figura 11. Ejemplo de un filtro granular

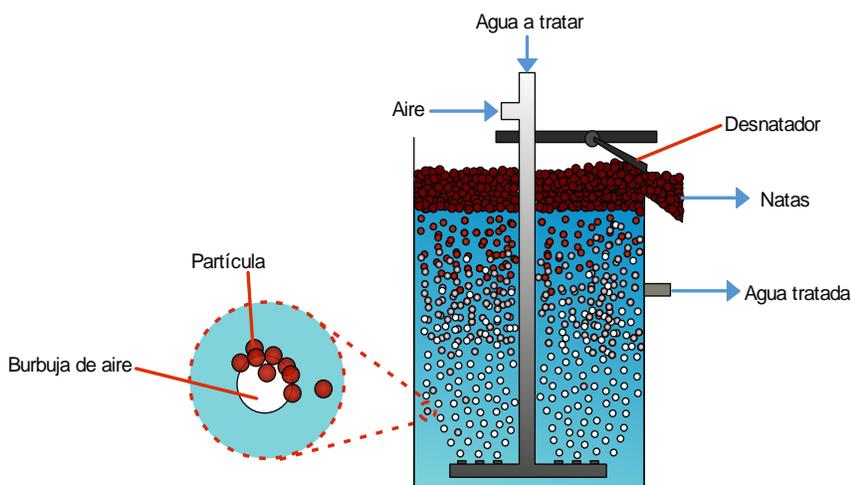
9.2.1.5 *Flotación*

La flotación es una operación física que consiste en separar materiales en suspensión mediante la asociación de estos con pequeñas burbujas de aire generadas dentro del sistema. Las burbujas de aire arrastran los materiales menos densos hacia la superficie del líquido. En esta operación el parámetro de diseño más importante es la relación aire/sólidos; es decir (ml/l) de aire liberado en el sistema por cada mg/l de sólidos en suspensión contenidos en el agua a tratar. Existen dos sistemas de flotación principalmente, los cuales se muestran en la Tabla 28.

Tabla 28. Tipos de sistemas de flotación

Tipo de flotación	Funcionamiento	Tamaño de burbuja
Por aire disuelto (DAF)	Se inyecta aire a una corriente de agua residual para saturarla a una presión de varias atmósferas, posteriormente se reduce la presión, lo que genera una gran cantidad de microburbujas	Pequeño
Por aire inducido (IAF)	Se instalan difusores de aire, normalmente en la parte inferior del equipo. También pueden inducirse las burbujas mediante rotores o agitadores.	Más grande que en el caso de DAF

La flotación se utiliza para separar materia sólida o líquida con una densidad menor que la del agua; sin embargo, las mejoras en la generación de burbujas y la utilización de reactivos coagulantes han logrado que se puedan eliminar también materia más densa que la del agua. En la Figura 12 se muestra un esquema del funcionamiento de la flotación como medio de eliminación de sólidos suspendidos.



Fuente: (NGUYEN & JOACHIM, 2004)

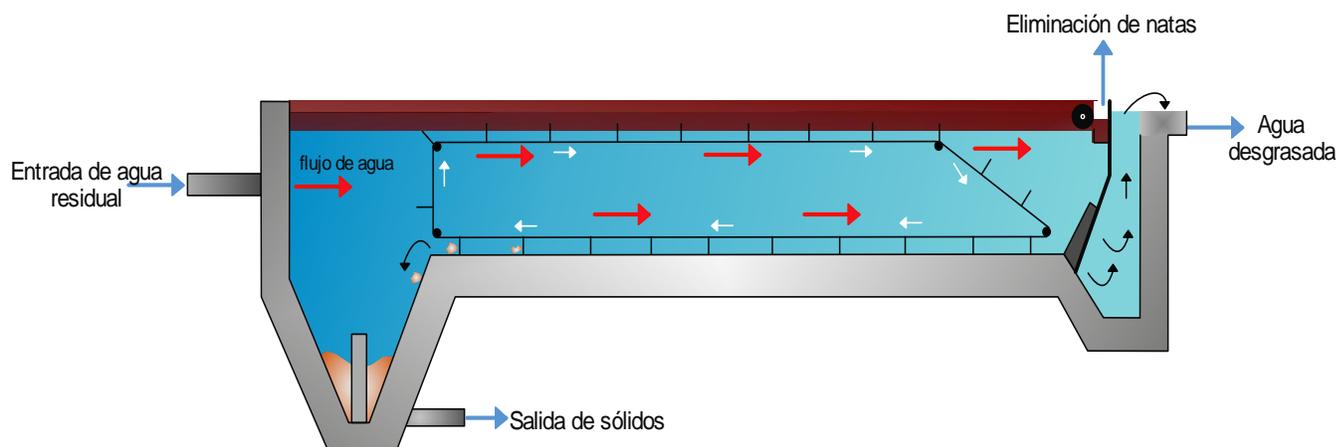
Figura 12. Esquema del funcionamiento del fenómeno de flotación

9.2.1.6 *Separadores API*

Los sistemas API son separadores por gravedad ampliamente usados, los cuales tienen el objeto de eliminar partículas de hidrocarburo presentes en una corriente de agua residual. La separación se logra debido a la diferencia de densidad existente entre los hidrocarburos y el agua en la que se encuentran; estos contaminantes se encuentran formando glóbulos o burbujas de diferentes tamaños, siendo las de gran tamaño más fáciles de separar. Estos separadores pueden ser instalados en la planta de tratamiento de aguas residuales centrales o como un proceso de pretratamiento para eliminar grandes cantidades de aceites libres y sólidos (WANG, HUNG, LO, & APIJAKIS, 2006).

Los separadores API no separan sustancias en disolución, ni rompen emulsiones; su efectividad depende de la temperatura del agua, de la densidad y tamaño de los glóbulos y de la cantidad y características de los materiales suspendidos. Este tipo de separadores constan de un canal de sección rectangular, el cual trabajan en régimen de flujo laminar y con un tiempo de retención que permite a las gotas de aceite a separar alcanzar la superficie donde serán eliminadas (SAINZ, 2005).

Los separadores API pueden recibir proporciones variables de hidrocarburos, productos sólidos viscosos y ceras; requiriendo para esto, superficies grandes. (SEÓANEZ, 2000). En la Figura 13 se muestra un ejemplo de funcionamiento de separador API.



Fuente: (SAINZ, 2005)

Figura 13. Esquema del funcionamiento de un separador API

9.2.2 Eliminación de materia disuelta

Al igual que la materia en suspensión, la materia disuelta tiene características variables. Existe una gran cantidad de tratamientos para la eliminación de contaminantes disueltos, los cuales dependen de las características del influente a tratar.

9.2.2.1 *Precipitación*

La precipitación elimina sustancias disueltas mediante la adición de reactivos que formen compuestos insolubles; favoreciendo su precipitación y facilitando su eliminación. La precipitación se parece a la coagulación-floculación, pero el término precipitación es más utilizado para describir procesos en donde se forman sales insolubles. El equilibrio de solubilidad es desplazado para permitir que se produzca un precipitado insoluble de los compuestos a eliminar; también se logra mediante el cambio de la temperatura de la solución para disminuir la solubilidad del compuesto. Por lo general se utilizan sales de calcio debido a que forman una gran cantidad de sales insolubles.

9.2.2.1.a SUAVIZACIÓN CAL-CARBONATO

La suavización cal-carbonato es un método utilizado para eliminar tanto la dureza carbonatada como la no carbonatada. Este método es una precipitación química en donde se utilizan cal, ya sea viva o apagada (CaO y Ca(OH)_2 respectivamente), y carbonato de sodio (Na_2CO_3). Ambos compuestos se utilizan para convertir sales solubles existentes en el agua en insolubles; las cuales precipiten y puedan ser removidas del agua con mayor facilidad. La cal elimina la dureza carbonatada (temporal), mientras que el carbonato de sodio se utiliza para eliminar la dureza no carbonatada (permanente).

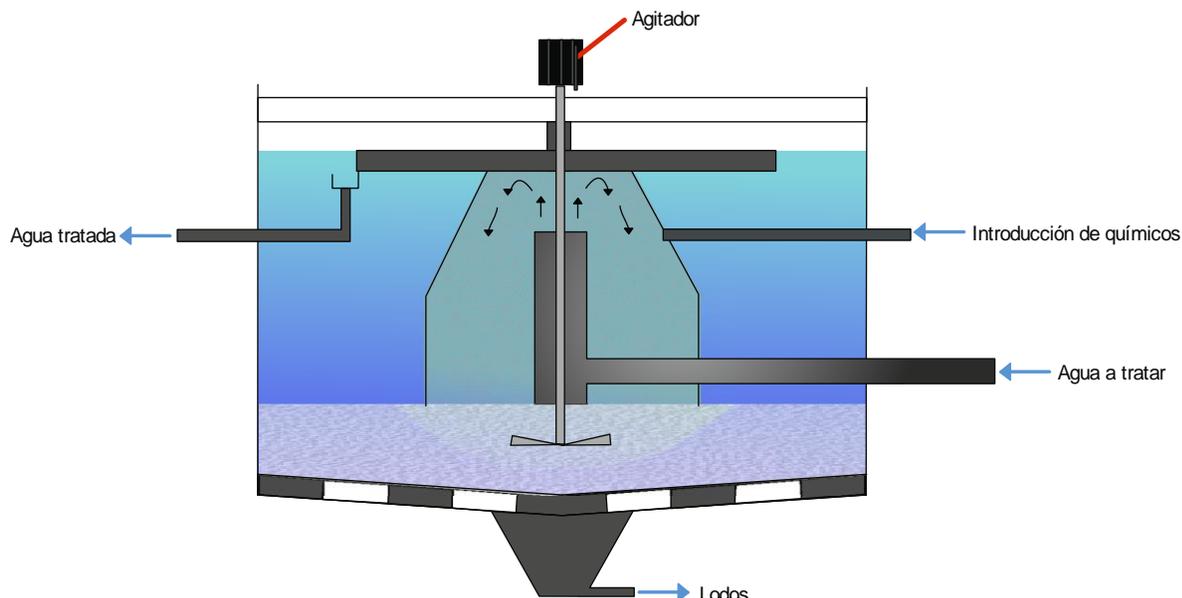
Existen dos tipos de proceso cal-carbonato; el primero es el proceso en frío, el cual se lleva a cabo a temperatura ambiente; mientras que el segundo es el proceso en caliente, el cual se lleva a cabo en un rango de temperatura de 90 a 100°C. Las diferencias entre ambos procesos se resumen en la Tabla 29.

Tabla 29. Diferencias entre los procesos de cal-carbonato en frío y en caliente.

	Cal-carbonato en frío	Cal-carbonato en caliente
Velocidad	Proceso lento	Proceso rápido
Filtración	La filtración no es sencilla, uso de coagulantes como NaAlO_2	La filtración es sencilla y rápida
Temperatura	Temperatura ambiente	Alta temperatura (49-60°C)
Capacidad de suavización	Baja	Alta
Dureza residual	50-60 ppm	15-30 ppm

Fuente: (AMBASTA, 2008)

Existen diversas tecnologías y equipos basados en la precipitación mediante cal o cal-carbonato; una de estas tecnologías se presenta en la Figura 14 se presenta un equipo para ablandamiento con cal-carbonato.



Fuente: (General Electric, 2014)

Figura 14. Ejemplo de una tecnología para tratamiento por precipitación cal-carbonato. Suavizador cal-carbonato en frío.

En general, el proceso de cal-carbonato tiene las siguientes ventajas (BYERS, GLEN, NOLING, & PETERS, 2002) y (LAWLER & KWEON, 2003):

- Proceso económico
- Durante el tratamiento el valor del pH aumenta y la corrosión de la tubería se reduce.
- Además de la remoción de la dureza, se remueven los minerales en el agua.
- La cantidad de bacterias patógenas se reduce debido a la naturaleza alcalina del agua.

Las desventajas del proceso son:

- El agua suavizada no se encuentra completamente libre de dureza.
- Se requiere disponer de una gran cantidad de lodo.
- Se requiere un control en la operación cuidadoso y una supervisión adecuada para que se obtenga un tratamiento del agua eficiente.

9.2.2.2 *Procesos electroquímicos*

Los procesos electroquímicos consisten en la eliminación de sustancias indeseables mediante reacciones electroquímicas de óxido-reducción tanto en el cátodo como en el ánodo. Estos procesos se basan en el hecho que al hacer pasar una corriente eléctrica a través de una solución con iones, éstos migrarán a los electrodos de la carga opuesta.

Para el tratamiento del agua se utiliza energía eléctrica, por lo que los costos de operación suelen ser una desventaja de este proceso; sin embargo, este proceso tiene una gran versatilidad en cuanto a los equipos se refiere. Al controlar el potencial del electrodo se selecciona la reacción electroquímica dominante deseada, además de que no se generan lodos ni se utilizan reactivos.

Los procesos electroquímicos también se utilizan para tratar compuestos orgánicos. Este tipo de tratamientos se dividen en dos grupos. El primer grupo está compuestos por todas las sustancias orgánicas que pueden ser separadas del efluente (compuestos con dipolos o ionización) y el segundo grupo se encuentra conformado por los compuestos que se destruyen en la superficie del electrodo.

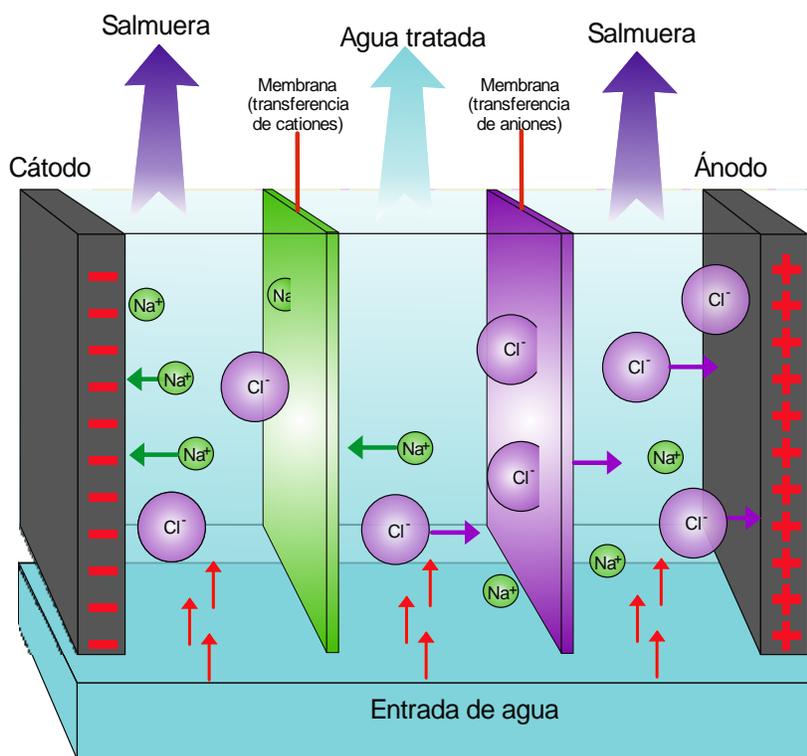
La mayoría de las tecnologías electroquímicas para tratamiento de sustancias orgánicas se encuentran en etapas de desarrollo (laboratorio o plantas piloto). En cambio, los tratamientos a corrientes que contienen metales y sales inorgánicas son comunes. Dos tecnologías comerciales en este grupo son la electrodiálisis y la electrodisposición

(McKETTA, 1998). También puede aplicarse la electroflotación, electrocoagulación, electroflotación, electrofiltración y la electrocristalización para el tratamiento de agua residual.

9.2.2.2.a Electrodiálisis

La electrodiálisis es un método para concentrar agua con 1,000 a 10,000 partes por millón de sólidos disueltos mediante la aplicación de una corriente directa a través de agua; la cual se encuentra separada por capas de membranas altamente permeables a los cationes y aniones. Los cationes migran hacia el cátodo y los aniones hacia el ánodo. Las capas de agua enriquecidas en sales se alternan con capas a las que se les ha removido la sal. La corriente afectará no sólo a los iones inorgánicos; también afectará a los iones orgánicos. Los factores a considerar más importantes son los tipos y características de las membranas. En esta tecnología se separa los iones en solución para un tratamiento posterior (McKETTA, 1998).

Existe una innovación a esta tecnología, conocida como electrodiálisis reversa, en donde se modifica la polaridad de los electrodos frecuentemente (3 a 4 veces por hora) para minimizar la precipitación y la incrustación; lo cual elimina la necesidad de utilizar inhibidores.



Fuente: (MANAHAN, 2007)

Figura 15. Esquema del funcionamiento de la electrodiálisis.

La electrodiálisis tiene varias aplicaciones industriales actuales (BYERS, GLEN, NOLING, & PETERS, 2002):

- Concentración de salmuera de ósmosis inversa
- Tratamiento de agua para producción de vapor
- Tratamiento de purgas de torres de enfriamiento
- Producción de sal a partir de agua de mar.

9.2.2.3 *Intercambio iónico*

El intercambio iónico, desmineralización o deionización es el proceso mediante el cual se remueven completamente los iones presentes en el agua al utilizar resinas constituidas por largas cadenas poliméricas orgánicas. El intercambio reversible entre una sal sólida e insoluble (resina) y el líquido que se encuentra en contacto con el sólido se utiliza generalmente como un pretratamiento para remover sales divalentes (suavizado) o como un pulido para remover constituyentes en bajas concentraciones de una corriente de agua. Las resinas tienen sitios Las resinas pueden ser naturales o sintéticas y se dividen en dos tipos: resinas catiónicas y resinas aniónicas (General Electric, 2014).

Las resinas catiónicas contienen grupos ácidos como $-\text{COOH}$ o SO_3H , siendo las SO_3H más ácidas. Este tipo de grupos intercambian sus iones H^+ por los cationes del agua dura.

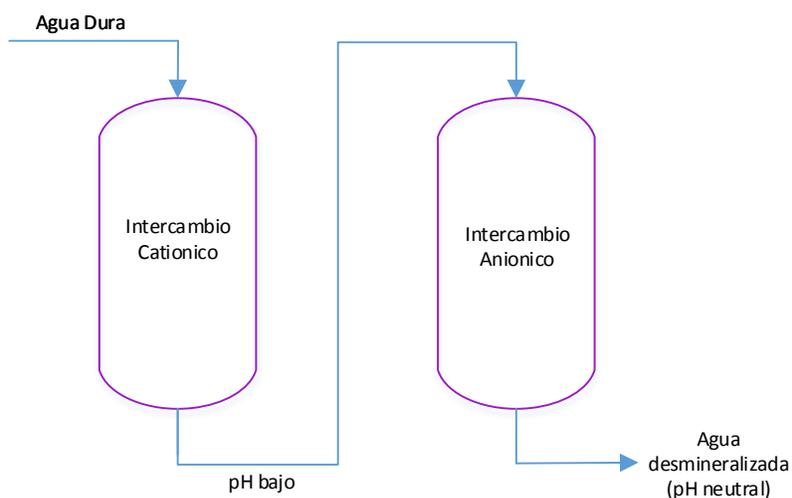
Las resinas aniónicas contienen grupos funcionales básicos como aminas y sus hidróxidos. Intercambiando sus iones OH^- por los aniones del agua dura.

Existen varios sistemas de intercambio iónico, cuyos trenes de eliminación pueden ser las siguientes:

- a) Cation fuerte + anión fuerte.
- b) Cation fuerte+ descarbonatador + anión fuerte.
- c) Cation débil + cation fuerte + descarbonatador +anión fuerte.
- d) Cation débil + cation fuerte + descarbonatador+ anión débil + anión fuerte.

En todos los trenes mencionados el principio es el mismo: el agua dura es introducida a un sistema de intercambio en donde primero se hace pasar a través de las resinas catiónicas y posteriormente por las aniónicas. En caso de que lo haya, el descarbonatador servirá para remover los iones bicarbonato (HCO_3^-).

Después de cierto tiempo, dependiendo de la calidad de entrada del agua dura, las resinas de intercambio iónico agotarán su provisión de iones H^+ y OH^- , disminuyendo su eficiencia. Para recuperar la capacidad de las resinas se deben realizar retrolavados haciendo pasar soluciones ácidas en las resinas catiónicas y sosa en las aniónicas para restaurar los iones H^+ y OH^- respectivamente. Los efluentes de la regeneración deben ser neutralizados antes de su descarga. En la Figura 16 se muestra un esquema sencillo de intercambio iónico.



Fuente: (DMP Corporation, 2013)

Figura 16. Unidades de desmineralización (anión fuerte + Cation fuerte).

El proceso de intercambio iónico tiene las siguientes ventajas:

- Se obtiene agua con una dureza muy baja (2 ppm aprox.)
- Reducción de corrosión en calderas.
- Puede suavizarse agua con una muy alta acidez o basicidad.

Las desventajas de este tratamiento son:

- Los equipos son costosos.
- La regeneración de las resinas es costosa debido a los químicos requeridos.

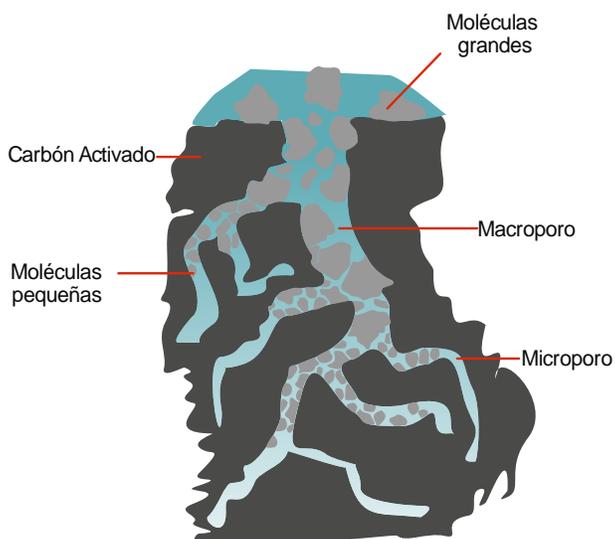
- La turbidez del agua reduce la eficiencia de las resinas.
- Los crecimientos microbianos reducen la eficiencia del tratamiento.
- Los residuos concentrados de la regeneración requieren su estabilización y disposición controlada, para evitar un daño al ambiente.

Existen también equipos de intercambio iónico de cama mixta, los cuales permiten que el agua dura se ponga en contacto con ambos tipos de resina varias veces, generando una corriente tratada con una concentración de dureza de solo 1 ppm o menos. La regeneración de las resinas en este tipo de equipos se lleva a cabo de la siguiente manera: primero se enjuagan a contracorriente las camas de resina, después se separan ambos tipos de resina (la resina aniónica queda arriba de la catiónica por ser menos pesada); posteriormente se regeneran ambas con químicos (ácidos y sosa como en los trenes de columnas separadas) y se introducen en el equipo, mezclándolas con una corriente de aire comprimido.

9.2.2.4 *Adsorción*

La adsorción es un proceso físico en el cual se captan sustancias en la superficie de un sólido; por lo general se utiliza carbón activado, ya sea granular o en polvo. El carbón activado granular se utiliza en columnas; en las que el agua a tratar entra por la parte inferior y asciende hacia el final de la columna. El carbón activado en polvo tiene un diámetro de partícula menor al que tiene el granular.

El fenómeno de la adsorción es función del tamaño de la partícula del medio, del pH, temperatura, tiempo de contacto y de los tipos y concentraciones de los contaminantes. Actualmente este tratamiento es aplicado en refinerías para la eliminación de fenoles (BYERS, GLEN, NOLING, & PETERS, 2002). En la Figura 17 se muestra el fenómeno de adsorción en carbón activado.



Fuente: (Merles Water Conditioning, 2014)

Figura 17. Adsorción en carbón activado

9.2.2.5 **Membranas**

Las membranas son barreras físicas semipermeables que separan dos fases, restringiendo el movimiento de las moléculas a través de ellas de forma selectiva, debido a esto, las sustancias contaminantes del agua pueden ser separadas, generándose un efluente acuoso depurado. Los procesos de membrana se llevan a cabo debido a una fuerza impulsora, la cual puede ser generada por un campo eléctrico, por un gradiente de concentración, temperatura o presión. En las membranas, el agua alimentada pasa a través de la membrana formando una corriente de agua tratada (permeado) y dejando atrás a todos los constituyentes que no lograron atravesarla en otra corriente concentrada. Los rangos de eliminación van de 0.0001 a 1 micrón.

Las ventajas de las membranas son:

- Permiten separar contaminantes que se encuentran disueltos o en forma coloidal.
- Eliminan contaminantes en baja concentración.
- Operan a temperatura ambiente.

- Procesos sencillos y diseños que ocupan poco espacio.
- Pueden combinarse con otros tratamientos.

Las desventajas de las membranas son:

- En general los procesos de membrana son más caros en comparación a otros procesos de tratamiento (método de fabricación, remplazo de membranas y limpiezas)
- No eliminan el contaminante, únicamente lo concentran en otra fase.
- Posibles incompatibilidades entre el contaminante y la membrana.
- Problemas de ensuciamiento de la membrana: necesidad de otras sustancias para llevar a cabo la limpieza, ajustes de pH, ciclos de parada para limpieza de equipo.
- Deficiente escalado: doble-flujo de equipos (equipos modulares)
- Los equipos necesarios para conseguir altas presiones generan ruido.

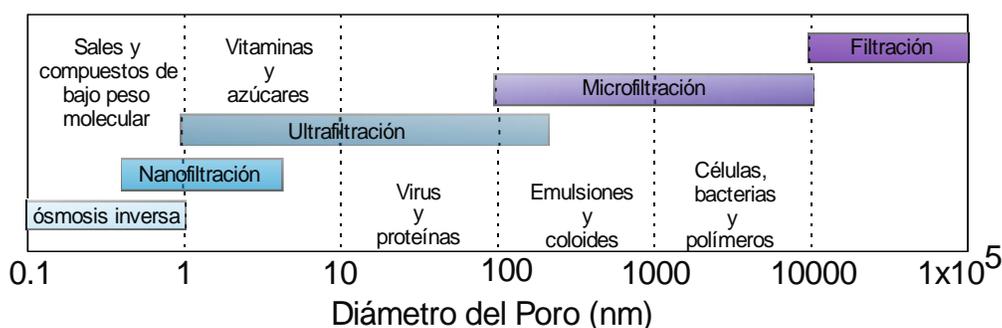
Tipos de membranas:

Las membranas pueden ser clasificadas por el material del que se encuentran fabricadas, por su estructura física o por el tamaño de sus poros. Existen membranas con materiales poliméricos, cerámicos o metálicos. El tamaño de poro y las características de la membrana determinan las sustancias que pueden pasar a través del mismo; en la Tabla 30 se muestran algunas de las tecnologías que usan membranas y en la Figura 18 se muestran los diámetros de poro de las diferentes tecnologías.

Tabla 30. Diferentes tecnologías con uso de membranas

Tecnología	Fuerza impulsora	Presión	Permeado	Retenido		
Microfiltración	MF	Diferencia de presión transmembrana	0.5-2 bar	Sólidos disueltos, agua, gases	Partículas suspendidas, agua	0.1 a 10 μm
Ultrafiltración	UF		1-10 bar	Pequeñas moléculas, agua	Polímeros, proteínas, micelas, coloides	0.001 a 0.1 μm
Nanofiltración	NF		10-70 bar	Iones monovalentes, agua	Pequeñas moléculas, sales divalentes	0.001 a 0.0001 μm
Ósmosis Inversa	RO		10-100 bar	Agua, pequeños solventes polares, sales	Solutos, agua	0.0001 μm
Electrodiálisis	ED	Diferencia de potencial eléctrico transmembrana	-	Soluciones ionizadas, agua	Solutos no iónicos, agua	Membranas selectivas (catiónicas o aniónicas)

Fuente: (RODRÍGUEZ, 2006) y (NATH, 2008)



Fuente: (NATH, 2008)

Figura 18. Comparación de los diámetros de poro de diferentes sistemas de membranas.

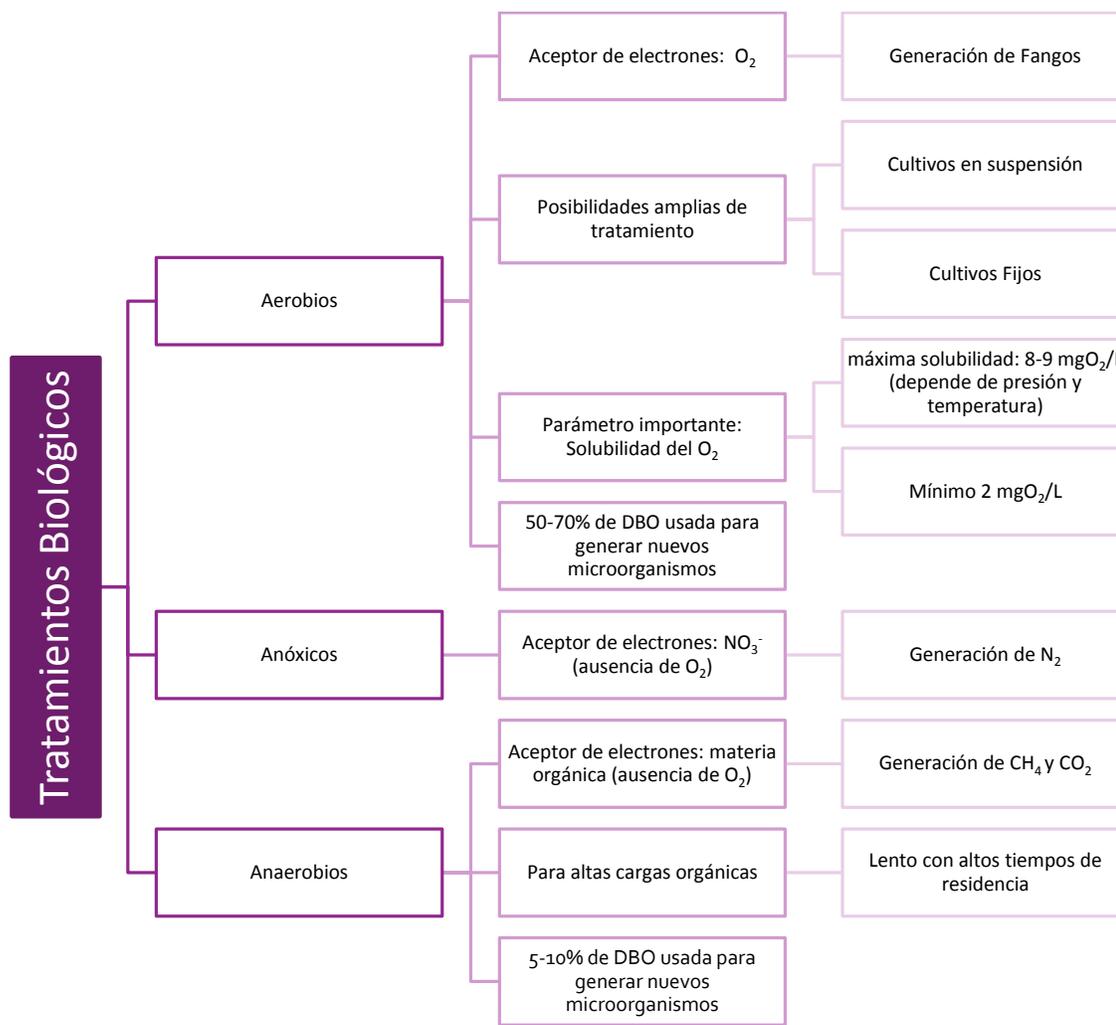
Las membranas sufren ensuciamiento, por lo que requieren limpiezas y limpiezas químicas, lo que genera un gasto en químicos.

9.2.3 Eliminación de compuestos oxidables

Una parte de las impurezas del agua pueden ser oxidadas para ser eliminadas. La oxidación se define como la pérdida de electrones que un átomo, molécula o ion sufre al reaccionar con otro, el cual es conocido como agente oxidante. La oxidación es un método común en el tratamiento de aguas residuales; entre los tipos de oxidaciones que pueden encontrarse son las realizadas por microorganismos en los tratamientos biológicos, las oxidaciones directas ocasionadas por la inyección de aire y las oxidaciones avanzadas.

9.2.3.1 *Tratamientos biológicos*

Los tratamientos biológicos eliminan materia orgánica biodegradable indeseable en el agua mediante microorganismos, entre los que destacan las bacterias. Estos microorganismos utilizan fósforo y nitrógeno como nutrientes y la materia orgánica existente en el influente como su fuente de energía y carbono. Hay tres tipos de tratamientos biológicos, cuyas características principales se muestran en la 9.2.3.1 Figura 19.



Fuente: (METCALF & EDDY, 1996)

Figura 19. Tipos de tratamientos biológicos

Hay muchas variaciones en estas tecnologías; existiendo procesos con membranas, procesos especializados para la desnitrificación, entre otros.

9.2.3.2 *Oxidación Química*

La oxidación química es la conversión parcial o completa de los compuestos orgánicos en CO₂ y agua. En las conversiones parciales de los compuestos orgánicos se obtienen alcoholes, aldehídos, cetonas y ácidos carboxílicos; los cuales tienen una biodegradabilidad mayor que los compuestos padres. Entre los métodos comunes de oxidación química se tienen ozono, cloro, peróxido, aire húmedo, agua supercrítica, permanganato de potasio y oxidaciones avanzadas. Algunas de las oxidaciones avanzadas utilizan radicales generados in situ para el tratamiento del agua. Algunos de los procesos de oxidación son utilizados para la eliminación de microorganismos (BYERS, GLEN, NOLING, & PETERS, 2002).

9.2.3.3 *Oxidación Directa*

La oxidación directa es un método en el que a una corriente de agua contaminada se le agrega ya sea aire o aire enriquecido con oxígeno para degradar los compuestos oxidables. Los tipos de oxidaciones directas se describen a continuación y sus características más importantes son resumidas en la Tabla 31

- Oxidación húmeda no catalítica (WAO).- Proceso en donde la materia orgánica, soluble y en suspensión, es oxidada mediante radicales formados a partir de la inyección de una corriente de aire o de aire enriquecido con oxígeno. Requiere altas temperaturas de entre 150 y 350 °C y presiones de entre 20 y 200 bar.
- Oxidación húmeda catalítica (CWAO).- Proceso en donde la materia orgánica es oxidada en presencia de catalizadores para acelerar la velocidad de las reacciones de degradación de los compuestos orgánicos. Los catalizadores utilizados son por lo general metales u óxidos metálicos soportados. El rango de temperatura de operación oscila entre 120 y 250°C, mientras que la presión de operación se encuentra comprendida entre los 15 y 50 bar.
- Oxidación húmeda supercrítica.- Proceso en donde se trabaja a condiciones supercríticas, eliminando las limitaciones que la interfase gas-líquido puede

generar en una oxidación tradicional. La temperatura de operación se encuentra entre 400 y 650°C con tiempos de residencia pequeños. Es un método en desarrollo precomercial.

Tabla 31. Procesos de Oxidación Directa.

Tipo	Condiciones		Desventajas	% eficiencia
	T (°C)	P (bar)		
Oxidación húmeda no catalítica	150-350	20-200	<ul style="list-style-type: none"> • DQO inicial: 500-15,000 mg/l • Requiere alto gasto de energía. 	75-90
Oxidación húmeda catalítica	120-250	5-25	<ul style="list-style-type: none"> • DQO inicial: >10,000. • Proceso dependiente del tipo de catalizador. 	75-99
Oxidación húmeda supercrítica	400-650	>250	<ul style="list-style-type: none"> • DQO inicial: 50 g/L. • Requiere alto gasto de energía • Condiciones que vuelven el medio corrosivo y generan deposición de sales. • Pequeña escala 	>99.9

Fuente: (RODRÍGUEZ, 2006)

9.2.3.4 *Oxidación Avanzada (AOP)*

Los procesos de oxidación avanzada son aquellos en los que se producen radicales hidroxilo (HO•) en el agua. El radical hidroxilo es un oxidante poderoso altamente reactivo, el cual puede ser generado mediante procesos fotoquímicos y no fotoquímicos. Los procesos de oxidación avanzada pueden ser también clasificados por el sistema que forman en homogéneos y heterogéneos y según la forma en que generan el radical OH• en: Ultravioleta (UV)/procesos oxidativos, procesos Fenton y Foto-Fenton, procesos fotocatalíticos (fotosensibilizados) y sonólisis. (BELGIORNO, NADDEO, & RIZZO, 2010). Este tipo de tratamientos es utilizado para la oxidación de fenoles.

Los AOP se utilizan como pretratamiento antes de un tratamiento biológico para contaminantes resistentes a la biodegradación y como postratamiento para mejorar la calidad del agua que será descargada a un cuerpo receptor. El valor máximo de DQO en el que es económicamente aceptable utilizar los procesos de oxidación avanzada es de 5g/L; a valores mayores aumentan los costos operativos (agentes oxidantes, energía, etc.) y se vuelve más factible utilizar las técnicas de oxidación directa.

La aplicación práctica de los AOP se encuentra limitada debido al alto costo de los reactivos como el O_3 y el H_2O_2 y de la fuente de energía requerida, por ejemplo, para generar la radiación UV en los procesos fotoquímicos. Otro problema para la aplicación práctica de estos procesos consiste en la complejidad que representarían al ser operados a escala industrial, ya que se requiere un control adecuado de los parámetros que afectan la cinética de la reacción. Los radicales $HO\bullet$ son altamente reactivos y no selectivos, por lo que reaccionan con iones y otros compuestos presentes en la solución, disminuyendo la velocidad de las reacciones de oxidación principal (efecto de “secuestro”).

9.2.3.4.a Procesos fotoquímicos

La fotólisis se define como el uso de energía radiante (UV) para producir un cambio en soluciones acuosas contaminadas sin la presencia de catalizadores. Las reacciones fotoquímicas son reacciones inducidas o catalizadas por la luz u otro tipo de radiación electromagnética (BELGIORNO, NADDEO, & RIZZO, 2010).

Los costos y la efectividad de los tratamientos con radiación dependen en gran medida de las propiedades de absorción de energía de las sustancias. Cada compuesto absorbe energía de longitudes de onda determinadas y para que un compuesto sea degradado por la energía UV debe absorber energía de ésta zona del espectro radioeléctrico.

La mayoría de los contaminantes orgánicos tienen una absorbancia baja, por lo que al tratar de degradarlos con una foto-oxidación directa genera mezclas complejas de productos intermedios en lugar de productos simples totalmente oxidados. Es por esto, que se incrementa la velocidad de las reacciones oxidativas mediante la adición de ozono, peróxido de hidrógeno, etc. Los procesos en los que intervienen tanto el ozono como la radiación ultravioleta comienzan con la fotólisis del ozono, el cual da lugar a la formación de radicales hidroxilo.

9.2.3.4.b Procesos no fotoquímicos

Los procesos de oxidación avanzada no fotoquímicos utilizan sustancias químicas, electricidad u otros medios para tratar el agua.

Los métodos que utilizan ozono como lo son la ozonización en medio alcalino y la ozonización con peróxido de hidrógeno se basan principalmente en la degradación indirecta de los compuestos por vía radicalaria. El ozono es inestable en el agua, por lo que tiende a descomponerse en una secuencia de pasos que generan radicales, entre ellos se encuentra el radical hidroxilo.

El proceso Fenton se basa en la generación de radicales gracias a la interacción de peróxido de hidrógeno con una sal de hierro, habitualmente FeSO_4 .

Los métodos electroquímicos se basan en el uso de energía eléctrica para romper los enlaces de las moléculas. En estos procesos, los contaminantes orgánicos reaccionan con algunos compuestos generados electroquímicamente como los radicales hidroxilos, generados en el ánodo al oxidar el agua y el peróxido de hidrógeno, producido en el cátodo a partir del oxígeno disuelto.

Existen otros procesos en los que se aporta energía mediante ultrasonidos. La formación de radicales HO• en estos procesos se debe a las condiciones de presión y temperatura que se alcanzan en el interior de las burbujas generadas con los ultrasonidos. La tecnología necesaria para este tipo de procesos se encuentra en sus primeras fases de desarrollo, por lo que su aplicación a nivel industrial todavía no es posible (OSORIO, TORRES, & SÁNCHEZ, 2010).

9.2.4 **Eliminación de microorganismos**

La eliminación de los organismos en aguas industriales se lleva a cabo a través de una desinfección. La desinfección es una acción que busca eliminar cualquier organismo vivo presente en el agua para su reutilización. Existen diferentes métodos, los cuales deben cumplir con la desinfección y deben evitar la generación de subproductos indeseables. Entre los métodos de desinfección se tienen tratamientos físicos como el calor o la radiación, la oxidación con cloro o sus derivados.

9.2.5 **Reducción de desechos líquidos**

9.2.5.1 ***Evaporación mecánica***

La evaporación se utiliza para disminuir el volumen de una corriente de desecho para disminuir sus costos de disposición finales. La evaporación se utiliza comúnmente en las aguas residuales que contienen concentraciones significativas de sales inorgánicas y metales pesados. Existen dos tipos principales de evaporadores: evaporadores mecánicos y lagunas de evaporación (BYERS, GLEN, NOLING, & PETERS, 2002).

Los evaporadores mecánicos son equipos que requieren vapor o energía eléctrica para operar. La finalidad de estos equipos es recuperar agua para un potencia reúso. Las

lagunas de evaporación no requieren fuentes de energía, pero no permiten que el agua sea recuperada.

Parte de los usos actuales de estas tecnologías son:

- Purgas de torres de enfriamiento
- Productos de regeneración de intercambio iónico
- Concentrados del tratamiento de membranas

9.2.5.2 *Cristalización*

La cristalización se utiliza para disminuir el volumen de una corriente de desecho, generando un destilado de alta calidad y un corriente de sólidos húmedos (pastel o torta). Para llevar a cabo la cristalización se llevan a cabo dos procesos diferentes. El primer proceso consiste en calentar la corriente para evaporar el agua hasta que cristalice y el segundo proceso consiste en disminuir la temperatura de la fase líquida hasta el punto en que las sales cristalizan (BYERS, GLEN, NOLING, & PETERS, 2002). Esta tecnología se utiliza en muchos procesos que desean tener una descarga cero.

9.2.5.3 *Extracción con solventes*

La separación con solventes es una técnica indirecta, en la cual dos fases inmiscibles se ponen en contacto para transferir las impurezas de una fase a la otra. La alimentación por lo general es puesta en contacto a contracorriente con el solvente utilizado. Por lo general este tratamiento es utilizado en la industria de la refinación para recuperar fenoles y otros productos, al poner en contacto el agua residual con la corriente de crudo.

9.2.5.4 *Desorción*

La desorción es un proceso de transferencia de masa en el que se hace pasar aire o vapor, por lo general a contracorriente, a través de una corriente residual. La desorción se lleva a cabo en torres empacadas. Las diferentes tecnologías basadas en este tratamiento son utilizadas en la industria de la refinación para tratar aguas amargas, disminuyendo el contenido de H₂S y amoníaco.

En la Tabla 32 se muestra el resumen de las tecnologías utilizadas para el tratamiento de agua presentadas en esta sección.

Tabla 32. Resumen de tecnologías para el tratamiento de agua.

Proceso	Contaminantes inorgánicos	Grasas y aceites	Orgánicos	Sólidos disueltos	Sólidos suspendidos	Biológicos	Observaciones
Filtración	Sí (precipitados insolubles)	Sí	Sí (DBO y DQO)	No	Sí	Sí (Bacterias y algas)	*Sólidos suspendidos reducidos en 90-99%. *Grasa disminuida a menos de 5 mg/l.
Flotación	Sí (Metales pesados)	Sí	Sí (Aceite y grasa, DBO y DQO)	No	Sí	No	*Sólidos suspendidos reducidos en >75% (con adición de químicos). *Grasa y aceites disminuidos en >90% (adición química).
Sedimentación y coagulación/floculación	SI (Metales pesados)	Sí	Sí	No	Sí (Arena y limo)	No	* Reducción de grasas del 60 a 99%. *Sólidos suspendidos removidos de 10 a 50% en sedimentación y >70 en coagulación/floculación.
Precipitación	Sí (Metales pesados, cianuros, fluoruros y fosfatos)	No	Sí	Sí (DQO)	Sí (alcalinidad y dureza)	No	* Eliminación de 80-90% de materia en suspensión. *40 a 70% de DBO, 30 a 60 de DQO y 80-90% de bacterias. (Eliminación de fósforo y materia orgánica disuelta).
Electrodialisis	Sí (especies iónicas y metales)	No	No (polares o iónicos)	Sí (TDS)	No	No	* Corrientes con menos de 100 mg/l de TDS, las corrientes con TDS muy altas requieren un manejo posterior para su uso. *No es efectivo disminuyendo sustancias no ionizables.

Proceso	Contaminantes inorgánicos	Grasas y aceites	Orgánicos	Sólidos disueltos	Sólidos suspendidos	Biológicos	Observaciones
Intercambio iónico	Sí (la mayor parte de los aniones y cationes)	No	Sí (DBO y DQO)	Sí	No	No	* Eficiencias de más del 90, orgánicos de 20 a 80%. *efluentes con alta pureza con muy bajos solidos suspendidos.
Adsorción con carbón	Sí (algunos metales pesados)	No	Sí (aromáticos , orgánicos clorados, HC de alto peso molecular)	Sí (Hidrofóbicos, DQO y carbonos volátiles)	No	No	*Orgánicos disminuidos más del 90% *Disminución de DQO y DBO de 30 a 60%. *La regeneración del carbón requiere control en las emisiones gaseosas. *El agua de lavado puede ser alta en Sólidos suspendidos.
Separación con membranas	Sí(Metales pesados, aniones)	Sí (de mediano a alto peso molecular)	Sí (aceites)	Sí (depende del tamaño)	Sí (TDS)	Sí (bacterias y virus)	*Recupera el 80% o más de agua de purgas de torres de enfriamiento y purgas de calderas.
Reactores biológicos	Sí (NO ₃ ⁻ , PO ₄ ³⁻ , CN ⁻ , H ₂ S)	Sí	Sí (DBO, DQO, COV)	Sí (DQO y DBO)	Sí (biosólidos)	Sí (biosólidos)	*Reducción al 90% de orgánicos biodegradables *Aeróbicos generan muchos lodos *Se requiere filtrar para reusar.
Oxidación química	SI (NH ₃ , CN ⁻ , Sulfuros, Mercaptanos)	No	Sí (Fenoles, HC)	Sí (DQO, DBO, COT)	No	Sí (patógeno, bacterias, virus)	*Orgánicos reducidos en 80% *Queda oxidante residual en algunos procesos.

Proceso	Contaminantes inorgánicos	Grasas y aceites	Orgánicos	Sólidos disueltos	Sólidos suspendidos	Biológicos	Observaciones
Evaporación	Sí (Sales y metales pesados)	No	Sí (todos menos volátiles)	Sí (sólidos totales disueltos)	No	No	*Destilado de alta calidad con SDT menores a 100 mg/l *La salmuera resultante es alta en sólidos suspendidos (1 a 10%) y disueltos (5 a 20%)
Cristalización	Sí (SDT, sales inorgánicas)	No	Sí (menos volátiles)	Sí	No	No	*Sólidos en el destilado menores a 100 mg/l, valores cerca del agua destilada. *Dependiendo de la calidad de la sales puede ser utilizada la torta. * El gas venteado tiene oxígeno y nitrógeno pero puede tener otros gases.
Extracción con disolventes	Sí (metales, actínidos)	No	Sí (no volátiles o azeótropos)	Sí	No	No	* Los orgánicos extraíbles por lo general son reducidos en más de un 60% y algunos en más de un 99%.
Desorción	Sí (H ₂ S, NH ₃ , CO ₂ , HCN)	Sí (volátiles, HC ligeros, carbono orgánico total)	Sí	No	No	No	* Los volátiles y el amoníaco se reducen en un 95% de la corriente alimentada. *Las emisiones gaseosas por lo general requieren más tratamiento para cumplir con la normatividad. *Los sólidos pesados no van a ser movidos de la alimentación.

Fuente: (BYERS, GLEN, NOLING, & PETERS, 2002)

9.3 Plantas de la refinería

9.3.1 Salmuera (Proceso de desalado de crudo)

El crudo proveniente de los pozos de extracción contiene una cantidad variable de agua, la cual crea una solución emulsificada con sales, predominantemente cloruro de sodio, magnesio y calcio. El agua existente en el crudo a procesar se encuentra en una concentración de 0.1 a 2% volumen; mientras que el contenido de sales se encuentra dentro del rango de 4.536 g a 113.398 g por barril de crudo (New Logic Research, 2003) y (The global oil and gas industry association for environmental and social issues, 2010).

La primera operación que sufre el crudo al ingresar a una refinería generalmente es el desalado, el cual elimina las sales y otras impurezas presentes en el crudo. La importancia de esta operación unitaria radica en el hecho de que las sales pueden provocar fallas en equipos al acumularse (formación de depósitos) y a que durante el procesamiento de crudo los cloruros forman HCl, el cual provoca corrosión en líneas y equipos.

El desalado es un proceso de eliminación de contaminantes físico, el cual usa tanto un rompimiento de emulsiones como el fenómeno de coalescencia; la separación se debe a la diferencia de afinidad entre los compuestos existentes con los disolventes con los que se ponen en contacto. Las sustancias polares o con carga como lo son las sales tienen afinidad con el agua, por lo que se distribuyen en el agua de lavado; mientras que las sustancias no polares se mantienen en la corriente de crudo. El reparto de los compuestos en ambas fases depende de qué tan hidrofílicas o hidrofóbicas son las sustancias presentes en la mezcla.

Existen varios tipos de desaladores, la selección del adecuado depende de las necesidades de cada refinería. Las características principales de los distintos tipos de desaladores son:

- Desalador eléctrico.- Se induce un campo eléctrico en la mezcla de crudo y agua de lavado para garantizar la separación de las fases gracias a la coalescencia. El campo puede ser inducido tanto con corriente directa como con corriente alterna.
- Desalador químico.- Se agrega agua de lavado y la separación de las fases se promueve mediante químicos y calentamiento.
- Desalador mixto.- Es un híbrido de los desaladores eléctricos y químicos.
- Separación por gravedad.- Permite, como su nombre lo indica, separar las fases debido a la acción de la gravedad; por lo general consiste en un tanque largo o tambor en el que se almacena la mezcla, la cual se separa a consecuencia de la diferencia de densidad entre el agua y el crudo.

La composición del agua residual de una desaladora depende de las características del crudo tratado, del agua de lavado utilizada y de la operación del equipo. Los rangos de contaminantes típicos se muestran en la Tabla 33.

Tabla 33. Composición típica del efluente de la desaladora.

Contaminante	Concentración (mg/l)
Demanda Química de Oxígeno	400 a 1000
Hidrocarburos libres	Hasta 1000
Sólidos Suspendidos	hasta 500
Fenoles	10 a 100
Benceno	5 a 15
Sulfuros	Hasta 100
Amoniaco	Hasta 100

Fuente: (The global oil and gas industry association for environmental and social issues, 2010)

El agua de lavado utilizada en las desaladoras se encuentra típicamente dentro del rango de 3 a 10% del volumen de crudo tratado, dependiendo principalmente de los °API que éste tenga; entre más pesado sea el crudo, mayor cantidad de agua se utilizará. En la Tabla 34 se muestran rangos aproximados de agua para desalado según el crudo:

Tabla 34. Agua necesaria para el desalado según el tipo de crudo

° API del crudo	% de agua utilizado del crudo alimentado
30	8-10
30-40	5-8
40	3-5

Fuente: (BERNÉ, 1995)

Mijaylova et al. (2005) obtuvieron las características físico-químicas de aguas congénitas en un complejo de extracción de PEMEX; dichas características se muestran en la Tabla 35.

Tabla 35. Calidad del agua congénita

Parámetros	Unidades	Valor	Parámetros	Unidades	Valor
pH	Unidades de pH	6.86	Sulfuros	mg/l	152
SST	mg/l	108	Alcalinidad	mg/l	1084
Grasas y aceites	mg/l	75	Amoniaco	mg/l	54
DQO	mg/l	2690	Sulfatos	mg/l	148
COT	mg/l	140	Cloruros	mg/l	24,957
Dureza Total	mgCaCO ₃ /l	4490	Conductividad	mS/cm	61,233
Dureza de Calcio	mgCaCO ₃ /l	2738	Carbón inorgánico	mg/l	164
Magnesio	mg/l	288	Silicio	Mg/l	34
Hierro	mg/l	0.73	Temperatura	°C	36.6
Potasio	mg/l	830	Bromatos	mg/l	133
Fenoles	mg/l	10 a 100	Sodio	mg/l	16,100

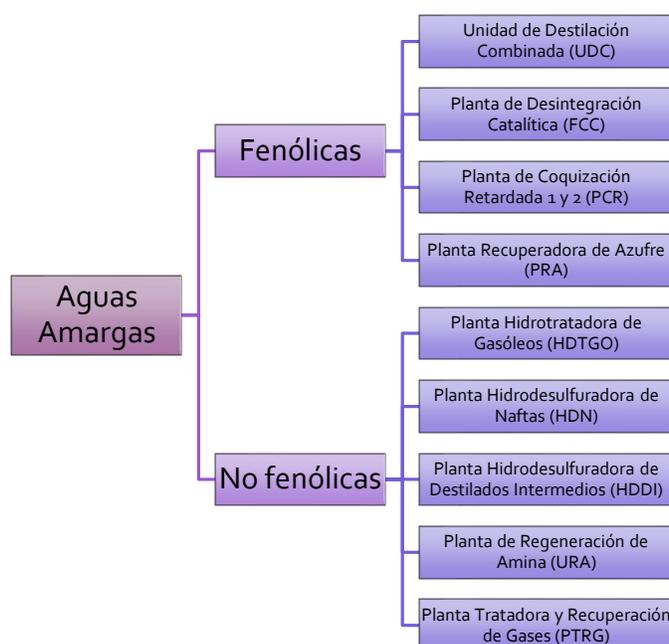
Fuente: (Mijaylova, Sandoval, & Ramírez, 2005) y (The global oil and gas industry association for environmental and social issues, 2010)

9.3.2 Aguas amargas

En muchos procesos al interior de las refinerías se utiliza vapor como medio de agotamiento en la destilación y como medio para reducir la presión parcial de los hidrocarburos en el craqueo catalítico y térmico. También, en algunas unidades de refinación se inyecta agua de lavado para absorber compuestos corrosivos o sales que puedan producir atascamientos. Este vapor o agua entra en contacto con hidrocarburos que contienen sulfuro de hidrógeno (H₂S) generando como resultado aguas amargas. El amoniaco (NH₃) presente en las aguas amargas proviene del nitrógeno en el crudo o del amoniaco inyectado en las fraccionadores del crudo para evitar la corrosión.

Las refinerías tienen varias plantas productoras de aguas amargas. El volumen y las características de las mismas dependerán de la complejidad de la refinería. Los complejos que incluyen plantas como la de craqueo catalítico o las coquizadoras retardadas producen una gran cantidad de aguas amargas, las cuales contienen además cianuros y fenoles que deben ser segregados del resto del agua amarga producida en la refinería.

La refinería del caso de estudio generará aguas amargas tanto fenólicas como no fenólicas; debido a que el suministro de agua cruda en dicho nuevo complejo es limitado, es de suma importancia el tratamiento y la reutilización de dichas corrientes. Las plantas que producirán aguas amargas se presentan en la Figura 20



Fuente: (ARREGUI, 2012)

Figura 20. Plantas productoras de aguas amargas en la refinería del caso de estudio.

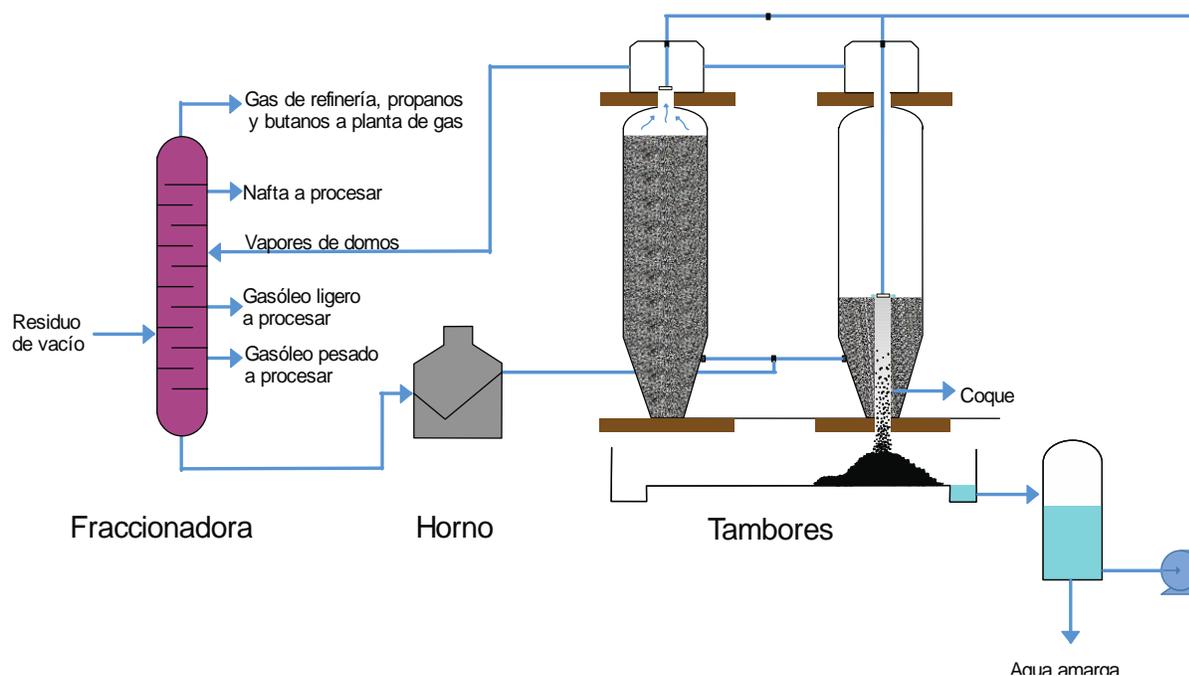
9.3.2.1 *Coquización retardada*

La coquización retardada es un proceso semi-batch de desintegración térmica utilizado en las refinerías de petróleo para mejorar y convertir los residuos de petróleo (fondos de destilación al vacío y atmosférica de petróleo crudo) en corrientes de productos con un mayor valor agregado y menor peso molecular. Los productos de la planta coquizadora son: vapores de domo, nafta no estabilizada, gasóleo combinado y coque.

La coquización es una reacción endotérmica, por lo que para suministrar la energía necesaria para la reacción se utilizan calentadores a fuego directo. La coquización se lleva a cabo en dos zonas: la zona del calentador y la de los tambores de coque, y consta de tres etapas: vaporización parcial y desintegración suave (rompimiento de viscosidad), desintegración de vapor a través del tambor y desintegración sucesiva y polimerización del líquido atrapado en el tambor hasta que se convierte en vapor y coque. El coque producido en esta planta tiene características que dependen principalmente de las siguientes variables de proceso:

- Temperatura.- Es una variable muy importante, a mayores temperaturas se obtienen más productos líquidos (menos gas y coque).
- Presión.- a mayor presión se obtienen menos productos líquidos, aumentando la cantidad de gas y coque producido.
- Relación de producción.- Es la relación entre la alimentación (incluyendo la recirculación) y la alimentación fresca.

El proceso de coquización es semi-batch porque se tiene un número par de tambores, por cada siempre hay uno que se encuentra en el ciclo de llenado (activo) mientras el otro se encuentra en el ciclo de decoquizado. En la 9.3.2.1Figura 21 se observa un esquema general del proceso.



Fuente: (Process Engineering Associates, 2013)

Figura 21. Esquema del proceso de coquización retardada convencional

El residuo asfáltico entra a la fraccionadora, la cual pone en contacto los vapores provenientes de los tambores de coque con la corriente alimentada, entregando sus fondos al calentador que alimenta a los tambores. El calentador aumenta la temperatura a 482-507 °C; este calentamiento causa que el líquido pesado se rompa generando una mezcla de moléculas más pequeñas de gas y líquido; el craqueo o rompimiento se controla mediante vapor. La mezcla entra posteriormente al tambor que se encuentra en operación (alimentada por el fondo), dicho proceso dura aproximadamente 16 horas dependiendo del diseño.

Al llenarse el primer tambor, el efluente del calentador es redireccionado al segundo tambor, y mientras este se llena, el primer tambor entra en el ciclo de decoquizado. El ciclo de decoquizado consiste en la limpieza del tambor. La primera operación es la de inyectar de vapor para eliminar los vapores de hidrocarburos y luego se procede a enfriar

el tambor mediante el uso de agua. Posteriormente se drena el tambor y se corta el coque predominantemente de arriba hacia abajo utilizándose ya sea un sistema hidráulico o un taladrador mecánico. El sistema hidráulico utiliza agua a alta presión (2000 a 2500 psig); primero se hace un agujero de diámetro pequeño a lo largo del tambor y posteriormente mediante un vástago giratorio y los chorros de agua a alta presión se retiran el coque del tambor. Existe un sistema de recolección que permite almacenar el agua y manejar el coque cortado.

Además de coque se obtienen otros productos, los cuales salen de la fraccionadora y son manejados en otra parte de la planta. La panta de coquización retardada genera aguas amargas durante las diferentes fases del proceso de decoquización, ya que el coque contiene compuestos azufrados y al entrar en contacto directo con el coque, el agua con la que se retirará el residuo de la coquización absorbe dichos contaminantes; otra parte del proceso en la que se generan aguas amargas es durante el manejo de los productos de la fraccionadora; a los cuales se les elimina el azufre al convertir mercaptanos a H_2S y eliminar éste mediante una absorción con agua. La calidad y cantidad del agua amarga generada en la planta depende tanto de las características de la corriente de alimentación como de la etapa en la que se encuentre el ciclo de decoquización de los tambores. Se tendrán corrientes intermitentes con características específicas; en la Tabla 36 se muestra la composición típica promedio del efluente de la planta coquizadora.

Tabla 36. Composición típica promedio del efluente de agua amarga de la planta coquizadora.

Contaminante	Concentración (mg/l)
Demanda Química de Oxígeno	4000-8000
Hidrocarburos	200-800
Fenoles	1000-1500
Sulfuros	2500-7000
Amoniaco	3000-5000
pH	9-9.5

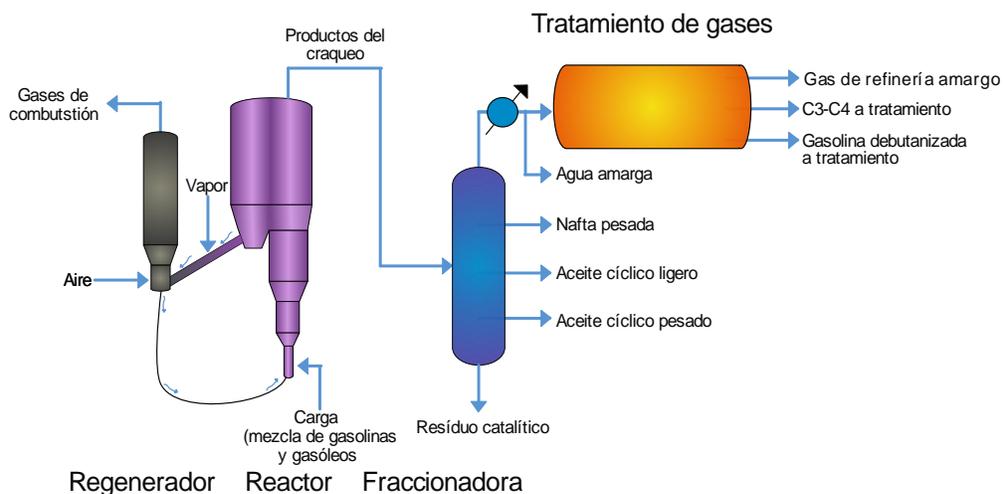
Fuente: (HQCEC, 2013) y (Nazarov & Onegova, 1979)

El efluente de la coquizadora también contiene cantidades variables de CN^- , el cual es un contaminante indeseable por su corrosividad.

9.3.2.2 *Desintegración catalítica*

El craqueo catalítico es un proceso de desintegración endotérmica de hidrocarburos de alto peso molecular a productos más ligeros mediante el uso de un catalizador a altas temperaturas y baja presión, y su subsecuente separación. El corazón de la planta de craqueo catalítico es el par reactor-regenerador. Existen varias tecnologías pero básicamente se pueden separar en dos tipos: los procesos catalíticos de lecho móvil (TCC) y los procesos de lecho fluidizado (FCC). Ambos procesos son químicamente similares y difieren solamente en su configuración física. El lecho móvil utiliza un catalizador con bolitas o cilindros de 1/8 a 1/4 pulgada mientras que los de lecho fluidizado utilizan partículas de aproximadamente 50 micrómetros.

El craqueo catalítico produce coque, el cual se sitúa sobre el catalizador y disminuye su actividad. Para mantener la actividad se regenera el catalizador mediante la eliminación por combustión con aire del coque en un regenerador (reacción exotérmica). La Figura 22 muestra el diagrama general de los equipos principales de una planta de craqueo catalítico.



Fuente: (UOP, 2013)

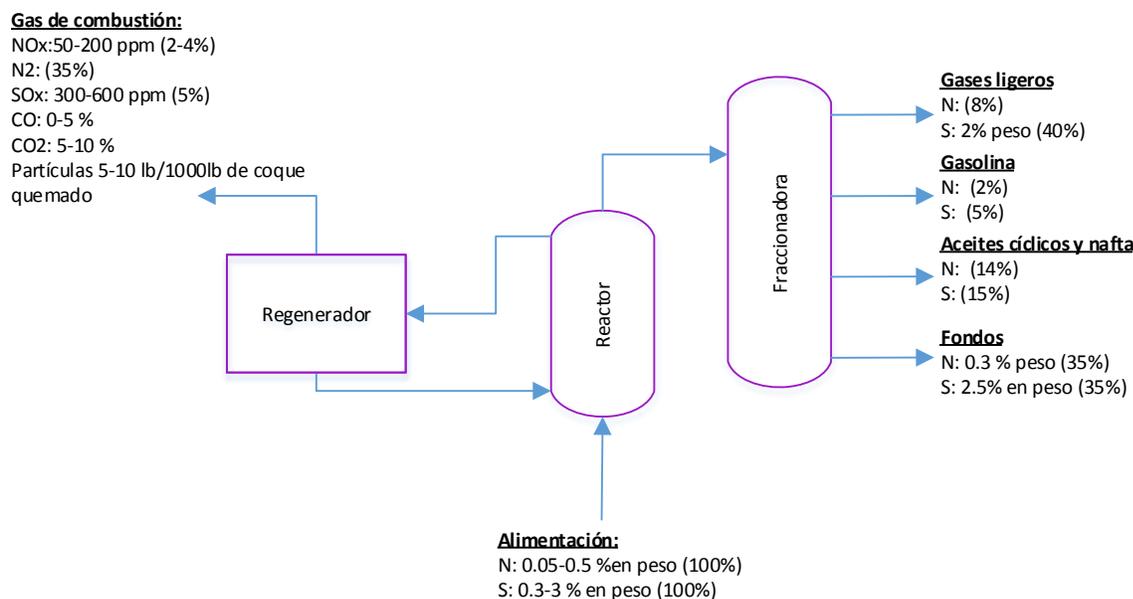
Figura 22. Proceso de craqueo catalítico fluidizado (FCC).

El proceso inicia con la alimentación de hidrocarburo pesado o aceite precalentado, el cual se pone en contacto con el catalizador caliente regenerado en el reactor. A medida que la reacción avanza se forma coque y vapores de hidrocarburo. El catalizador envenenado y los vapores son separados mecánicamente, los vapores salen del reactor y son enviados a la columna de fraccionamiento y se separan en diferentes intervalos de ebullición mientras que el catalizador es enviado al regenerador. El aceite que permanece en el catalizador se elimina mediante agotamiento con vapor antes de llegar al regenerador, este vapor absorbe no solo el hidrocarburo, también los contaminantes existentes en él como lo son el amoníaco y los diversos compuestos azufrados.

En el regenerador el catalizador es tratado y posteriormente separado de los gases de combustión mediante ciclones. Antes de ser reenviado al reactor, el catalizador es tratado con vapor para eliminar el oxígeno que se haya absorbido. Los catalizadores compuestos de zeolitas de alta actividad logran que las reacciones de craqueo se lleven a cabo en 3 segundos o menos. Dentro del reactor se llevan a cabo una gran cantidad de reacciones simultáneas, obteniéndose una amplia gama de productos en diferentes proporciones y con diferentes rangos de punto de ebullición, los cuales posteriormente son separados

por rango de punto de ebullición en la fraccionadora. En este proceso se obtiene gas amargo, el cual al ser tratado generará agua amarga; por otro lado, al condensar el vapor de la fraccionadora se obtiene agua amarga, proveniente del vapor utilizado para el agotamiento del catalizador.

En la Figura 23 se muestra la distribución aproximada del azufre y el nitrógeno en los diferentes productos de la planta FCC y un ejemplo de la calidad promedio del agua residual de la planta se muestra en la tabla Figura 23.Tabla 37



Fuente: (W.-C. CHENG, 1998)

Figura 23. Ejemplo del porcentaje de Azufre y Nitrógeno en los productos de la FCC.

Tabla 37. Ejemplo de la composición de las aguas residuales de una planta FCC (agua amarga)

Contaminante	Concentración (mg/l)
Cianuros	5-200
Hidrocarburos	5-60
Cloruros	10-50
Fenoles	80-300
Sulfuros	500-3000
Amoniaco	300-3000
pH	8-9.5

Fuente: (BERNÉ, 1995)

9.3.2.3 *Destilación Atmosférica (Topping/Primaria)*

La destilación atmosférica es un proceso físico básico en la industria de la refinación; manejando la mayor cantidad de producto dentro de ésta. Esta destilación es el primer tratamiento al que se somete el crudo previamente desalado. El proceso consiste en la separación de diferentes fracciones de petróleo según sus puntos de ebullición al calentar el crudo dentro de una columna a presiones bajas entre 1 y 3 bar. A lo largo de la columna hay extracciones, las cuales son transportadas a otros procesos dentro de la refinería para un posterior procesamiento.

Las características de las extracciones o cortes de la columna dependen del diseño, al igual que el número de platos, diámetro, altura y sus características internas. Por lo general se tienen los siguientes cortes en la torre:

- Destilados Ligeros (Éter de petróleo, gasolinas, kerosenos, Solventes, Aguarrás, etc.).
- Destilados Medios (Diesel, combustóleo, lubricantes ligeros, aceites ligeros etc.).
- Destilados Pesados (Lubricantes pesados, aceites pesados, etc.).
- Residuales (Asfaltos, Vaselinas, Parafinas, Coque de petróleo).

El agua amarga producida en esta unidad se debe principalmente a dos razones, la primera es que para promover la destilación se utiliza vapor de agua y la segunda es que se deben tratar las diferentes fracciones para obtener productos con un menor contenido de contaminantes.

El vapor de agua que es utilizado en la destilación atmosférica para promover la destilación se contamina al entrar en contacto con el crudo, ya que el crudo tiene contaminantes que se desplazan al agua, en mayor o menor medida, dependiendo de su afinidad a ella.

Las diferentes fracciones acumulan compuestos azufrados, como mercaptanos, los cuales deben ser eliminados en su totalidad de ser posible. Para el tratamiento de estos compuestos no deseados se realizan procesos de endulzamiento, los cuales llegan a generar aguas amargas. La composición del agua residual de esta planta se muestra en la Tabla 38.

Tabla 38. Ejemplo de la composición del agua residual de la planta de destilación atmosférica (agua amarga)

Contaminante	Concentración (mg/l)
Cianuros	-
Hidrocarburos	30-60
Cloruros	5-100
Fenoles	10-30
Sulfuros	20-200
Amoniaco	10-64
pH	6-7

Fuente: (BERNÉ, 1995)

9.3.2.4 *Destilación al vacío*

La destilación al vacío o a presión reducida es un proceso de separación físico el cual es utilizado para la fracción de crudo cuyo punto de ebullición es tan alto que no puede ser destilado a presión atmosférica (material del fondo de la columna de destilación). La destilación a presión reducida permite la separación de los compuestos pesados al disminuir su punto de ebullición, reduciendo también la posible descomposición térmica debida a altas temperaturas. Entre los productos de la destilación al vacío se encuentran el gasóleo ligero, el gasóleo pesado y el residuo de vacío.

La temperatura de la alimentación se encuentra limitada debido a la posibilidad de un craqueo térmico, debe ser no mayor a 415°C. La presión reducida se logra y mantiene con eyectores y bombas; existen diferentes versiones del proceso, dependiendo de su propósito:

- Destilación flash al vacío.- Se utiliza para la preparación de la alimentación para craqueo catalítico o para hidrocraqueo. Se obtienen: una fracción ligera, una pesada y residuos. Las fracciones obtenidas de este proceso solo requieren tener un contenido de metales (Ni, V) que se encuentre dentro de los límites aceptables. Los fondos de esta columna se pueden usar como alimentación para viscoreducción, coquizado, hidrocraqueo o desasfaltado.
- Fraccionadora de vacío.- Difiere de la destilación flash al vacío mayormente en su propósito, calidad y número de fracciones. El propósito de esta unidad es la de producir destilados aceitosos de buena calidad.
- Redestilación al vacío.- Es una mezcla de los dos procesos anteriores.

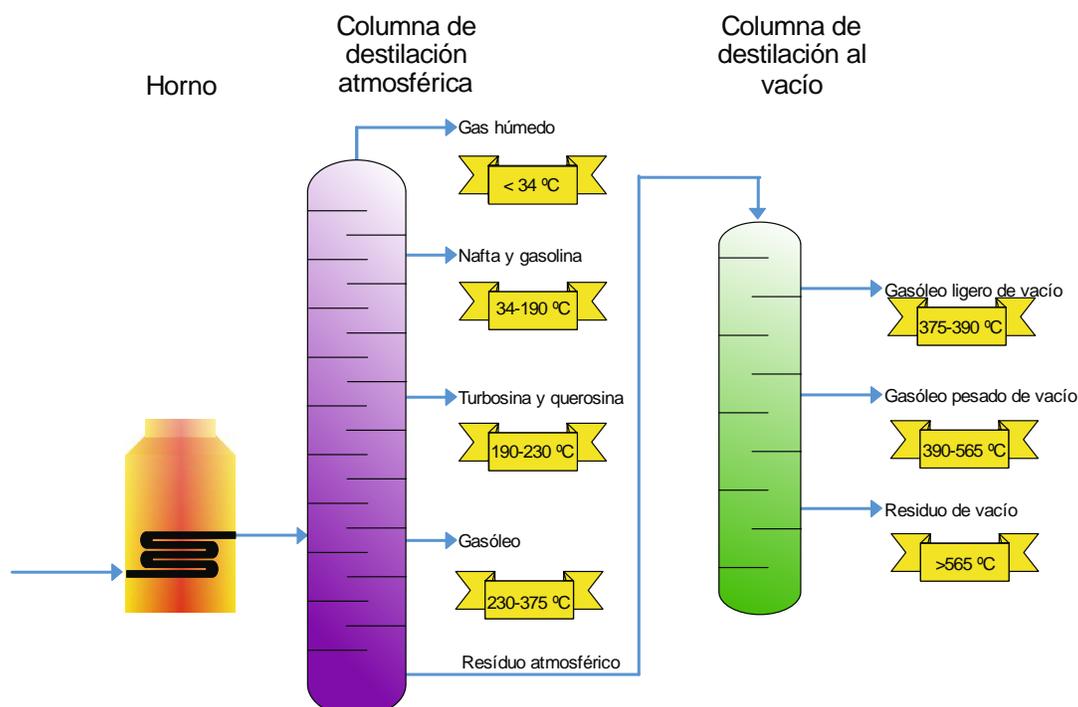
Al igual que en la destilación atmosférica, se obtienen aguas residuales al tratar los productos. La Tabla 39 muestra un ejemplo de la composición de una planta de destilación al vacío.

Tabla 39. Ejemplo de la composición de las aguas residuales de una planta de destilación al vacío

Contaminante	Concentración (mg/l)
Cianuros	-
Hidrocarburos	5-20
Cloruros	5-50
Fenoles	5-10
Sulfuros	10-50
Amoniaco	5-30 1.3
pH	6-7

Fuente: (BERNÉ, 1995)

Actualmente es común encontrar plantas en donde se integren conjuntamente la destilación atmosférica y la destilación al vacío, con el propósito de recuperar energía. La Figura 24 muestra un ejemplo de las fracciones obtenidas al integrar los dos procesos.



Fuente: (CERIC, 2012)

Figura 24. Integración de destilación al vacío y atmosférica.

9.3.2.5 *Recuperadora de Azufre*

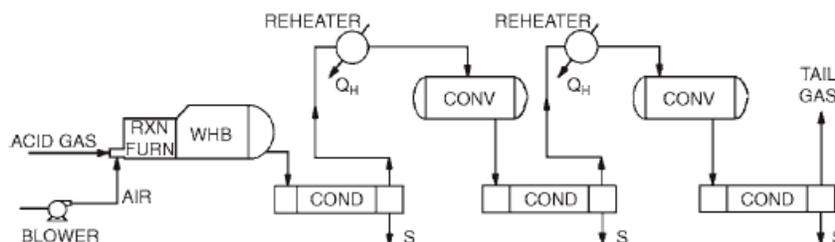
El sulfuro de hidrógeno H_2S y los mercaptanos más ligeros separados dentro de las unidades de desulfuración deben ser tratados para evitar la emisión de compuestos contaminantes al ambiente, es por ello que en las refinerías se transforman dichos compuestos en azufre elemental. Las plantas de recuperación de azufre convierten el H_2S de las corrientes gaseosas ácidas de la regeneración de aminas y de las unidades agotadoras de azufre en azufre elemental fundido. Típicamente se utilizan procesos Claus de dos a tres etapas. Las primeras dos etapas recuperan un 92% de azufre. Para obtener una mayor eficiencia de remoción de azufre se utiliza una tercera etapa operada abajo del punto de rocío o se utiliza un proceso Superclaus.

Existen diversas variantes del proceso Claus, dependiendo de las concentraciones de H_2S e hidrocarburos presentes en el gas ácido. Cuando los hidrocarburos son mayores al 5% y/o el H_2S es inferior al 20% molar deben recurrirse a otros procesos de absorción con reacción química.

El proceso Claus consiste en una etapa de recuperación térmica, la cual es seguida de dos o tres etapas de recuperación catalítica. En la zona de recuperación térmica, el gas ácido es quemado en un horno de reacción, en el cual se agrega la cantidad requerida de aire para lograr quemar solo $1/3$ del H_2S y de los hidrocarburos y amoniaco en la corriente ácida alimentada. Posteriormente el SO_2 formado durante la combustión reacciona con el resto de H_2S para formar el azufre elemental. Los productos de la combustión son enfriados posteriormente. En la unidad de recuperación térmica se recupera el 60% aproximadamente.

Después de la etapa térmica existen dos o tres etapas catalíticas; cada una de las cuales consiste en un intercambiador, el reactor de conversión catalítica (convertidor) y un condensador. De los condensadores se obtiene azufre elemental. Si se requiere una

recuperación del 96 al 99% la última etapa de la unidad Claus puede ser remplazado por un catalizador de oxidación selectiva.



Fuente: (MEYERS, 2004)

Figura 25. Proceso Claus de dos etapas

9.3.2.5.b Tratamiento de aguas amargas

El agua amarga pasa a través de un separador flash, el cual separa los gases disueltos de los aceites de hidrocarburos y sólidos. La alimentación que será agotada es previamente calentada con un intercambiador que utiliza la energía de la corriente de fondo de agotador, la cual es agua agotada. El vapor es provisto al agotador por un rehervidor o por inyección directa de vapor cuando el rehervidor está fuera de servicio. Para agotar el agua amarga se utiliza vapor. Los agotadores se diseñan por lo general para cumplir la concentración máxima de amoníaco permitida en el agua endulzada, debido a que es más difícil removerlo que al H₂S. En la Tabla 40 se muestran la especificación del agua endulzada

Tabla 40. Requerimientos típicos del agua endulzada no fenólica

Contaminante	Concentración (mg/l)
H ₂ S	1 a 10
Amoníaco	30-200

Fuente: (MEYERS, 2004)

Los vapores del agotador tienen H₂S y NH₃ además de vapor de agua, por lo que la corriente pasa por una sección de enfriamiento y deshumidificación en la parte alta del

agotador. Para remover el calor se utiliza un enfriador “pumparound”. Los gases ácidos además del vapor de agua aún no condensado son enviados a la planta de azufre a una temperatura de 82 a 93°C.

El agua agotada es enfriada mediante un intercambio con la corriente alimentada al agotador y posteriormente sigue siendo enfriada mediante agua o aire antes de ser rehusada o enviada a una unidad de tratamiento biológico.

La presencia de fenoles y cianuros en el agua amarga tienen un impacto en el número de agotadores, además de que modifican el equilibrio y la separación del sulfuro de hidrógeno y del amoníaco en las aguas amargas. Las corrientes con fenoles y cianuros son corrosivas y envenenan catalizadores, por lo que no pueden ser utilizadas para inyecciones de agua de lavado; en cambio, el agua amarga no fenólica sí puede ser utilizada con este fin.

9.3.2.6 *Plantas de hidrógeno*

Las plantas de hidrógeno utilizan gas natural como reactivo, el cual deben tratar, ya que el azufre envenena el catalizador utilizado en el proceso.

9.3.2.7 *Hidrocraqueo catalítico*

Las fracciones de petróleo con un mayor peso molecular que requieren hidrógeno para obtener productos ligeros son tratadas en esta planta. La mayor parte de los productos obtenidos son keroseno, turbosina, diésel y combustibles.

9.3.2.8 *Hidrotratamiento*

El hidrotratamiento es un proceso cuyo objetivo es estabilizar catalíticamente los petrolíferos; también es uno de los mayores procesos para la eliminación de contaminantes en las fracciones de petróleo. Se eliminan impurezas como azufre, nitrógeno, compuestos oxigenados, compuestos clorados, aromáticos, ceras y metales mediante el uso de hidrógeno a temperaturas con un rango entre 315 y 430 °C a presiones de 7 a 210 kg/cm² (SENER, 2014). El catalizador que se utiliza es seleccionado para satisfacer las necesidades del proceso, dependiendo del grado de tratamiento y el tipo de impureza. Estos procesos generan gas amargo, el cual debe ser tratado posteriormente en una planta tratadora de gas.

9.3.2.9 *Diesel con contenido ultra bajo de azufre*

Para la producción de diésel con contenido ultra bajo de azufre se utilizan hidrotratadoras ultra-low sulfur diésel (ULSD), las cuales llevan un hidrotratamiento que discrepa del convencional en las condiciones de operación que se requieren y en la cantidad de equipos utilizados para el tratamiento del crudo. En estas unidades se producen aguas amargas durante el tratamiento de las corrientes.

9.3.2.10 *Alquilación*

La alquilación es un proceso en el que el isobutano reacciona con olefinas como el butileno para producir gasolina (alquilado) de alto octano. El isobutano y las olefinas se colectan principalmente en la FCC y en la coquizadora retardada. Para esto se utiliza un catalizador ácido, ya sea ácido sulfúrico (H₂SO₄) o ácido fluorhídrico (HF). La isoparafina resultante es conocida como alquilado ligero (SENER, 2014). En este tipo de unidades no se generan aguas amargas, pero sí se generan sosas gastadas (tema que no es parte del alcance de esta tesis).

9.3.2.11 *Reformación*

La reformación es un proceso utilizado para modificar la estructura molecular de las fracciones de gasolina para mejorar su calidad antidetonante. La reformación puede ser térmica o catalítica (SENER, 2014).

9.3.2.12 *Isomerización*

La isomerización de la nafta ligera es un proceso en el que hidrocarburos con un bajo octanaje (C₄, C₅, C₆) se transforman en productos ramificados con el mismo número de carbonos; lo cual aumenta su número de octanaje. Una ventaja de este proceso es que separa hexano antes de que entre a la reformadora, impidiendo que se forme benceno.

9.3.2.13 *Otros usos de agua*

En las refinerías hay una gran cantidad de pequeñas torres de destilación o columnas, las cuales se encuentran diseñadas para separar productos específicos. Existe un tipo de torres conocidas como torres rectificadoras, las cuales utilizan vapor de agua para eliminar vestigios de productos ligeros de corrientes con productos más pesados. El agua que queda en la torre se deposita en el fondo de esta y es purgada.

10 Glosario

- **Anaranjado de metilo:** Indicador ácido-base; el cual tiene su transición o viraje en un rango de pH de 3.1 a 4.4 de un color rojo al encontrarse en un medio ácido a un color amarillo al aumentar el pH (LAITINEN & HARRIS, 1982).
- **Antidetonante:** Dícese de la capacidad de evitar las detonaciones y explosiones en las máquinas de combustión interna, de tal manera que se libere o se produzca la máxima cantidad de energía útil. (PEMEX, 2014).
- **Aromáticos:** Compuestos con un anillo bencénicos, el cual se encuentra insaturado pero es estable, comportándose como un compuesto saturado (PEMEX, 2014).
- **Ciclos de concentración:** Valor que representa el cociente entre la concentración de las sales disueltas en el agua de la torre y la concentración en el agua de aportación o make-up. El número de ciclos puede estar entre 1 hasta 10 o más. Los ciclos de concentración equivalen a 1 cuando se trabaja en ciclo abierto (GARCÍA, 2011).
- **Coadyuvante:** Productos auxiliares en la coagulación-floculación. Actúan sobre los elementos que producen las interferencias en la coagulación o influyen en la etapa de floculación. Por ejemplo, favorecen la unión de flóculos o aumentan su densidad (AGUILAR, 2002).
- **Corrosión:** Destrucción paulatina de los cuerpos metálicos por acción de agentes externos, persista o no su forma (RAE, 2014). Corrosión e incrustaciones son dos problemas relacionados. A pH bajos se ve favorecida la corrosión (ataque ácido a metales), mientras que a pH altos se ve favorecida la aparición de incrustaciones, por la disminución de la solubilidad de las sales cálcicas y magnésicas (carbonatos, sulfatos, etc.).
- **Desnitrificación:** Es la transformación biológica del nitrógeno oxidado (N-NO₃) en formas más reducidas, las cuales generalmente llevan hasta el nitrógeno molecular N₂ el cual escapa a la atmósfera. Esto debido a que muchas bacterias heterótrofas facultativas pueden utilizar el NO₃ en lugar de oxígeno como aceptor final de electrones (VILLASEÑOR, 2001).
- **Digestión aerobia:** Uso de residuos orgánicos como sustrato para el crecimiento de las bacterias que se desarrollan en presencia de oxígeno. Los productos de esta descomposición son el dióxido de carbono, agua, compuestos inorgánicos, biomasa y material orgánico no digerido (FRAUME, 2008).
- **Digestión anaerobia:** Uso de residuos orgánicos como sustrato para facilitar el crecimiento de bacterias que operan en ausencia de oxígeno; las bacterias consumen el carbono presente en los residuos empleándolo como fuente de energía y lo convierten en productos gaseosos. Se produce metano, dióxido de carbono, compuestos inorgánicos, material orgánico no digerido y agua (FRAUME, 2008).
- **Electrodisposición:** Técnica utilizada para la recuperación de metales pesados, reduciéndose en los iones metálicos, obteniéndose el metal elemental (McKETTA, 1998).
- **Eutrofización:** Enriquecimiento de las aguas con nitrógeno y fósforo, los cuales son nutrientes para las plantas. Al existir más nutrientes aumenta el crecimiento de la materia orgánica en un cuerpo de agua (RAE, 2014).

- **Fenofaleína:** Sustancia que sirve como indicador ácido-base; la cual tiene su transición en el intervalo de pH 8.0-9.6, de incolora a pH ácido a roja a pH básico. En medio ácido fuerte, la forma incolora de la fenofaleína vira a rojo-anaranjado (en 65-98% H₂SO₄) y en medio básico fuerte la especie roja pierde su color (pH>11) (HARRIS, 2007).
- **Fotosensibilizador:** Dicho de un compuesto: Que incrementa los efectos de la radiación luminosa.
- **Gas agrio/amargo (sour gas):** Gas de refinería con una alta concentración de ácido sulfhídrico (Facultad de Ciencias Aplicadas a la Industria).
- **Gas de refinería:** Se encuentra constituido por los mismos hidrocarburos del gas natural, provenientes del petróleo procesado en las unidades de destilación, más los producidos en los procesos de cracking, que aportan compuestos no saturados como el etileno (Facultad de Ciencias Aplicadas a la Industria).
- **Gas dulce (sweet gas):** Gas natural que contiene cantidades muy pequeñas de ácido sulfhídrico y bióxido de carbono. El gas dulce reduce las emisiones de bióxido de azufre a la atmósfera.
- **Gas húmedo (wet gas):** Mezcla de gas metano y metano con concentraciones de C₃+ mayores a 13 ppm (Facultad de Ciencias Aplicadas a la Industria).
- **Gas natural:** Mezcla de hidrocarburos simples que se encuentra en estado gaseoso, en condiciones normales de presión y temperatura. El gas natural comercial está compuesto aproximadamente por un 95% de metano (PEMEX, 2014).
- **Gas seco:** Mezcla de gas metano y etano con un máximo de 13 ppm de C₃+ (Facultad de Ciencias Aplicadas a la Industria).
- **Gasóleo (Gas oil):** El aceite intermedio procedente del proceso de refinación; utilizado como combustible en motores diesel, quemado en sistemas de calefacción central y como carga de alimentación para la industria química.
- **Incrustación:** Dícese de la costra dura formada sobre una superficie (RAE, 2014).
- **Índice:** Expresión numérica de la relación entre dos cantidades (RAE, 2014).
- **Índice de octano (Octanaje):** Es una medida de la calidad de una gasolina; mide la capacidad que tienen los combustibles de quemarse sin producir detonaciones o explosiones dentro de los motores.
- **Make-up:** Agua cruda, agua suavizada o agua desmineralizada que es introducida como repuesto en sistemas cerrados de agua en los que hay pérdidas o purgas.
- **Micrón:** Unidad de medida de longitud (micrómetro) (RAE, 2014).
- **Mineral:** Sustancia inorgánica que se halla en la superficie o en las diversas capas de la corteza del globo, y principalmente aquella cuya explotación ofrece interés (RAE, 2014).
- **Mineralización de la materia orgánica:** Término que designa la conversión de los compuestos orgánicos de un elemento al estado inorgánico.
- **Nafta (Naphtha):** Un rango de destilados más ligeros que la querosina utilizada como carga para la producción de gasolina para motores y para la industria química (PEMEX, 2014).
- **Nafténicos:** Compuestos que se encuentran compuestos por hidrocarburos cíclicos.

- **Nefelometría:** Técnica analítica basada en la dispersión de la luz por partículas en suspensión en el seno de una disolución, midiendo el haz de luz en la dirección que forma un ángulo recto de 90°. Se usa para medir la concentración de partículas en soluciones diluidas o constituidas por partículas relativamente pequeñas. (HÉRNANDEZ & GONZÁLEZ, 2002)
- **Nitrificación:** la nitrificación es el proceso microbiológico en el que se convierte el ion amonio a nitrito y posteriormente a nitrato. Este proceso es llevado a cabo en dos fases; en la primera de ellas el ion amonio se oxida a nitrito por un grupo de bacterias conocidas como Nitrosomonas. La segunda fase del proceso consiste en oxidar el nitrito a nitrato, lo cual es realizado por un grupo de microorganismos conocidos como Nitrobacter. Las bacterias nitrificantes se caracterizan por un bajo coeficiente de crecimiento debido a la poca energía obtenida de las oxidaciones del ion amonio y nitrito; además de esto son autótrofas, utilizando CO₂ como fuente de carbono. (VILLASEÑOR, 2001)
- **Olefinas:** Hidrocarburos con dobles enlaces de carbono. Por lo general no se encuentran en el petróleo crudo, pero que se forman durante su procesamiento. Se encuentran formadas por átomos de carbono e hidrógeno, existiendo al menos dos carbonos enlazados con un enlace doble. La fórmula general es C_nH_{2n}.
- **Parafinas:** Hidrocarburos compuestos por átomos de carbono conectados por un enlace sencillo, cuyos enlaces sobrantes se encuentran saturados con átomos de hidrógeno. Fórmula general: C_nH_{2n+2}.
- **Poli-electrolito:** Polímeros formados por unidades monoméricas que contienen grupos ionizables (como carboxilos, aminos o grupos sulfónicos).
- **Polisulfuro de amoniac:** Químico utilizado para inhibir la corrosión debida a la presencia de CN⁻ en el agua amarga.
- **Prueba de jarras (Jar-Test):** Prueba utilizada para obtener información sobre el proceso de coagulación-floculación de un determinado efluente. Este procedimiento es simple y flexible y simula las tres etapas principales: coagulación, floculación y sedimentación. Se aproxima a los procesos a gran escala. Se fijan las variables que modifican el proceso: velocidad, tiempo de coagulación, tiempo de floculación, pH, dosis optima de coagulante, coadyuvante y tiempo de sedimentación (AGUILAR, 2002).
- **Reformado catalítico:** En este proceso se utiliza un catalizador especial para reestructurar las fracciones de nafta (C₆- C₁₀), convirtiéndola en aromáticos e isoparafinas. El producto de la nafta reformada tiene un índice de octano mayor que la alimentación. Este reformado se utiliza en las fórmulas de las gasolinas para mejorar su octanaje y también se utiliza como alimentación para plantas productoras de aromáticos (BTX- benceno-tolueno y xileno).
- **Sosas gastadas:** Soluciones de NaOH contaminadas con compuestos azufrados o fenólicos. Las primeras se originan en los tratamientos de remoción de azufre de los hidrocarburos gaseosos y las segundas en los tratamientos de remoción de compuestos orgánicos indeseables en los hidrocarburos líquidos (GARFIAS & BAROJAS, 1997).