



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO
FACULTAD DE QUÍMICA

TITULO DEL TEMA DESCRITO

**Propuesta conceptual para la modernización de un sistema de
neutralización de soluciones de regeneración de resinas de
intercambio iónico.**

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE

INGENIERO QUÍMICO

PRESENTA

Mireles Bravo Daniel



MÉXICO, D.F.

AÑO 2013



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: **Profesor: Joaquín Rodríguez Torreblanca**

VOCAL: **Profesor: Alfonso Durán Moreno**

SECRETARIO: **Profesor: Eduardo Flores Palomino**

1er. SUPLENTE: **Profesor: Federico Carlos Hernández Chavarría**

2º SUPLENTE: **Profesor: Jorge Alejandro Avella Martínez**

SITIO DONDE SE DESARROLLÓ EL TEMA:

**UNAM, Torre de Ingeniería
Nivel 3, Ala Sur
Ciudad Universitaria, 04510 Coyoacán, México, D.F.**

ASESOR DEL TEMA:

Dr. Alfonso Durán Moreno

SUSTENTANTE:

Daniel Mireles Bravo

CONTENIDO

| | |
|--|-----------|
| RESUMEN | 6 |
| 1 INTRODUCCIÓN | 7 |
| 1.1 Problemática | 7 |
| 1.2 Objetivo General | 8 |
| 1.2.1 Objetivos particulares | 8 |
| 2 MARCO TEÓRICO | 9 |
| 2.1 Agua para generar vapor en Refinería..... | 9 |
| 2.2 Procesos de desmineralización del agua..... | 11 |
| 2.3 Regeneración de resinas de intercambio iónico | 16 |
| 2.4 Neutralización de aguas residuales | 19 |
| 2.5 Aspectos industriales del control de pH | 24 |
| 2.5.1 Selección del agente neutralizante | 25 |
| 2.5.2 Selección y mantenimiento del electrodo de pH | 26 |
| 2.5.3 Problemas de implementación de control de pH | 27 |
| 2.5.4 Definición del problema de control de pH | 28 |
| 3 CASO DE ESTUDIO | 30 |
| 3.1 Descripción de la fosa de neutralización..... | 30 |
| 3.2 Descripción del proceso | 32 |
| 4 METODOLOGÍA | 38 |
| 5 RESULTADOS Y DISCUSIÓN | 40 |
| 5.1 Diagnostico actual del sistema de neutralización. | 40 |
| 5.2 Ingeniería Conceptual | 42 |
| 5.2.1 Capacidad y diseño | 42 |
| 5.2.2 Normatividad y regulación | 44 |
| 5.2.3 Mejoras en la Infraestructura y proceso | 45 |
| 5.2.4 Costos de inversión y costos unitarios | 46 |
| 5.2.5 Beneficios | 50 |
| 6 Conclusiones | 52 |
| BIBLIOGRAFÍA | 54 |
| ANEXOS | 56 |

ÍNDICE DE TABLAS Y FIGURAS

| | | |
|-------------------|--|----|
| Tabla 1. | Equipos principales de la fosa de neutralización. | 31 |
| Tabla 2. | Parámetros del agua a la descarga del sistema de neutralización..... | 35 |
| Tabla 3. | Tabla comparativa de las condiciones de diseño contra la actual operación..... | 41 |
| Tabla 4. | Tabla de flujos y valores de pH en el sistema de desmineralización..... | 43 |
| Tabla 5. | Normas aplicadas para el manejo de aguas residuales-SEMARNAT | 44 |
| Tabla 6. | Lista de equipo y materiales que se requieren para restablecer el actual sistema de neutralización..... | 45 |
| Tabla 7. | Costos de operación del actual sistema de operación..... | 47 |
| Tabla 8. | Programa de Inversión Total | 47 |
| Tabla 9. | Instalación del sistema de neutralización..... | 48 |
| Tabla 10. | Costos de operación del sistema de neutralización..... | 48 |
| Tabla 11. | Calculo de CAE para el tratamiento de agua residual del sistema de neutralización | 49 |
| Tabla 12. | Límites máximos permisibles para contaminantes básicos | 57 |
| Tabla 13. | Catálogo de conceptos principales de la fosa de neutralización | 58 |
| Tabla 14. | Titulación de un ácido fuerte con NaOH (NaOH es de 0.1M)..... | 60 |
| Figura 1. | Iones en el agua, la suma de las cargas dentro de la solución es igual a cero. 12 | |
| Figura 2. | Descripción del proceso de desmineralización en la planta. | 15 |
| Figura 3. | Sistema completo de desmineralización con lecho mixto como pulido final. 15 | |
| Figura 4. | Proceso de regeneración de las resinas de intercambio iónico..... | 16 |
| Figura 5. | Flujo de agua en la desmineralización y contra flujo para la regeneración de las resinas. | 17 |
| Figura 6. | Comparación grafica de la titulación ácido-base fuerte y ácido débil- base fuerte. | 22 |
| Figura 7. | Descripción del sistema de auto neutralización | 23 |
| Figura 8. | Sistema de neutralización de agua residual de las resinas de intercambio iónico | 23 |
| Figura 9. | Efecto del agente amortiguante en la curva de titulación. | 29 |
| Figura 10. | Ampliación de la zona de neutralización | 29 |
| Figura 11. | Vista general de la Fosa de Neutralización..... | 30 |
| Figura 12. | Estructura del barandal. | 30 |
| Figura 13. | Pasillo principal de la Fosa de Neutralización..... | 30 |
| Figura 14. | Mantenimiento de la Fosa de Neutralización. | 30 |
| Figura 15. | Fosa de neutralización | 34 |

| | | |
|-------------------|--|----|
| Figura 16. | Operación del actual sistema de neutralización..... | 36 |
| FIGURA 17. | Diagrama de flujo de la metodología de trabajo | 39 |
| Figura 18. | Diagrama de Flujo de Proceso de desmineralización – neutralización | 43 |
| Figura 19. | DTI (Diagrama de Tubería e Instrumentación) | 56 |
| Figura 20. | Curva de titulación de un ácido fuerte con un agente neutralizante fuerte (NaOH 0.1M)..... | 61 |

ABREVIATURAS

WAC: Resinas Débilmente Ácidas

WBA: Resinas débilmente Básicas

SAC: Resinas Fuertemente Ácidas

SBA: Resinas Fuertemente Ácidas

DEG: Desgasificación

SNR: Sistema Nacional de Refinación

pH: Potencial de Hidrogeno

UDA: Unidad Desmineralizadora de Agua

VPN: Valor Presente neto

TIR: Tasa Interna de Recuperación

TREMA: Tasa de Rendimiento Mínima Aceptable

USD: Dólar Americano

DBO: Demanda Bioquímica de Oxigeno

DQO: Demanda Química de Oxigeno

RESUMEN

En el presente trabajo, se planteó como objetivo proponer y desarrollar de manera conceptual alternativas de modernización para una fosa de neutralización de aguas residuales de una planta desmineralizadora por resinas de intercambio iónico, la cual tiene una antigüedad mayor a treinta años. Se justificó debido a la necesidad de incrementar la capacidad de tratamiento de la planta y para mejorar la calidad del agua residual a la descarga de la fosa, además de efectuar una mejora en la operación y ahorro en el consumo de químicos utilizados en el proceso de neutralización, que en cantidad y concentración elevada afectan al medio donde se vierten estas aguas. Todo lo anterior con la finalidad de ofrecer un tratamiento eficiente y adecuado que cumpla con la normatividad mexicana en materia de descarga de aguas residuales. Para el análisis del caso de estudio, se presentaron los fundamentos teóricos del funcionamiento de los diferentes procesos que constituyen un tren de neutralización, así como conceptos de tecnologías modernas susceptibles de aplicarse para el mejoramiento de dicho sistema. Se analizaron dos casos particulares:

- 1.- La modernización de una fosa de neutralización convencional en una Refinería.
- 2.- La implementación de un proceso más eficiente que tenga la capacidad de neutralizar el agua residual.

Este último caso se planteó debido a que la demanda de agua desmineralizada se ha incrementado, ocasionando un aumento en los ciclos de retro lavado de las unidades de intercambio iónico generando una mayor producción de aguas residuales; esto ha minimizado los tiempos de retención en la fosa, requiriendo de un vaciado de la misma en menos tiempo sin descuidar la calidad establecida en la norma. Aplicando conceptos de Ingeniería de Proyectos e Ingeniería Ambiental, se plantearon y evaluaron opciones tanto para la modernización de la fosa en cuestión, como para la conversión del actual sistema en otro proceso acorde a las nuevas tecnologías existentes y/o planta, analizando cada uno de los escenarios planteados, y concluyendo con la selección de la mejor opción que permita alcanzar los objetivos planteados.

1 INTRODUCCIÓN

1.1 Problemática

Hoy en día el agua es un recurso natural que se ha vuelto indispensable, cada vez más costosa y difícil de conseguir, ya que su disponibilidad es cada día menor. Debido a esto, desde hace ya varias décadas, comenzaron las tareas por encontrar solución a este problema. Una de las tantas soluciones, a nivel industrial, es la recuperación de las aguas residuales provenientes de una amplia variedad de procesos que se llevan a cabo a nivel mundial que impacta positivamente en la disminución del consumo de agua proveniente de fuentes naturales. A pesar de que en sus inicios, el tratamiento de aguas residuales era visto por las industrias simplemente como un requisito para cumplir con la normatividad y disposiciones gubernamentales, este concepto ha ido mejorando y hoy en día el tratamiento de aguas es uno de los avances tecnológicos más importantes para el abastecimiento de agua.

En nuestro país, grandes sectores de la industria, incluyendo la industria de refinación y petroquímica, han implementado en sus centros de producción, sistemas y procesos de tratamiento para sus aguas residuales, que les ha permitido abastecer de agua algunos de sus procesos, evitando de esta forma utilizar agua de primer uso, o en su defecto darle un mejor trato a sus residuos antes de desecharlos minimizando el impacto ambiental que éste pueda ocasionar.

Todo esto provoca que industrias, como el Sistema Nacional de Refinación (SNR), tomen la iniciativa de generar políticas internas, para tratar las aguas residuales que generan, con la finalidad de reutilizar el agua que consumen y permitir un mayor abastecimiento del vital líquido a otros sectores de mayor relevancia, como lo es la agricultura y el consumo humano, por mencionar los más importantes.

La finalidad del presente trabajo, mediante un estudio es definir opciones viables que permitan modernizar un sistema de neutralización de aguas residuales con características ácidas o alcalinas, procedentes de una planta desmineralizadora de agua por resinas de intercambio iónico, mediante un caso práctico que permitirá a la Refinería donde se encuentra, asegurar el tratamiento del agua que se genera por este proceso.

La fosa de neutralización, seleccionada como caso de estudio, tiene una antigüedad mayor a treinta años al igual que la planta, y que puede ser transformada en un sistema de tratamiento más efectivo recuperando su capacidad de diseño, combinando la actual tecnología para un mayor control y mejoras en la práctica operativa.

1.2 Objetivo General

Proponer opciones de modernización para una fosa de neutralización de aguas residuales generadas por una planta desmineralizadora con el fin de reestablecer la capacidad de diseño, garantizando la eficiencia del proceso y el cumplimiento de la normatividad mexicana correspondiente.

1.2.1 Objetivos particulares

- Realizar el diagnóstico de la infraestructura y equipos periféricos de la fosa de neutralización, evaluar las condiciones de operación actuales e identificar las áreas de oportunidad que permitan alcanzar la capacidad de tratamiento de diseño de la fosa.
- Elaborar la ingeniería conceptual para determinar los requerimientos para restablecer la capacidad de diseño.
- Realizar la estimación del costo de inversión total para restablecer la capacidad de diseño de la fosa de neutralización.

2 MARCO TEÓRICO

2.1 Agua para generar vapor en Refinería

El consumo de agua dentro de una Refinería, suele ser generalmente del orden de miles de metros cúbicos al día. Sin embargo, la calidad requerida de esta dependerá del tipo de proceso o servicio al cual está destinada, pudiendo ser por tanto, de calidades muy distintas y en consecuencia puede necesitar o no de un tipo específico de pretratamiento antes del uso requerido. El consumo general de agua en Refinerías abarca principalmente los siguientes aspectos:

- Agua para enfriamiento
- Agua para proceso
- Agua para contraincendios
- Agua para generación de vapor
- Agua potable para consumo humano
- Agua para desalado de crudo.
- Agua para riego de áreas verdes.
- Agua para servicio general.

El consumo principal de agua dentro de la Refinería es para enfriamiento con aproximadamente el 60% del consumo total, seguido de consumo de agua enviada a desmineralización para generación de vapor con el 17%, agua para servicios con el 8%, y agua potable, agua para riego y otros servicios, el 15% restante¹.

El agua que se utiliza para la generación de vapor requiere de un pretratamiento antes de ser utilizada en los equipos que se encargan de generar vapor, como consecuencia el vapor es un servicio que se requiere en casi todos los procesos que se llevan a cabo en la refinación del petróleo crudo.

¹ Informe de Responsabilidad Social de PEMEX 2011.

Cuando se habla del proceso de la refinación de petróleo, se refiere a procesos que busca transformar la materia prima en recursos de gran utilidad para la sociedad, principalmente los combustibles que se encargan de mover a todo el mundo en sus diferentes aplicaciones y presentaciones. Por ello siempre es recomendable generar la mayor cantidad de productos utilizando la menor cantidad de materias primas.

Por lo tanto, una Refinería implica grandes cantidades en recursos económicos; la mayoría de los países que cuentan con petróleo, basan sus economías en el aprovechamiento y uso del mismo, México no es la excepción y por ello el Sistema Nacional de Refinación busca la innovación en todos sus procesos con el fin de consumir la menor energía posible y generar una mayor cantidad de productos.

Como se mencionó anteriormente el mayor consumo de agua que se utiliza en la refinación de petróleo está destinado al enfriamiento de los procesos. Sin embargo el agua destinada a la generación de vapor representa un servicio de primera, pues todos los procesos que involucran el calentamiento o generación eléctrica por medio de vapor, requieren que el agua esté disponible para poder operar de manera continua. El agua para generación de vapor representa un elevado costo en la refinación, debido a los múltiples procesos de pretratamiento que se requieren para cumplir con las características necesarias para ser alimentada a la caldera que se encargará de generar el vapor de diferentes calidades.

Entre los procesos para la generación de agua para la alimentación de calderas se encuentran:

- ✓ Intercambio iónico
- ✓ Osmosis inversa
- ✓ Electrodesionización
- ✓ Electrodialisis
- ✓ Vaporización

Todos estos procesos tienen la capacidad de generar agua libre de contaminantes e impurezas que permiten que el proceso de generación de vapor sea rentable y seguro. El proceso de desmineralización por resinas de intercambio iónico es el más usado en el Sistema Nacional de Refinación, debido a que es altamente rentable y práctico al momento de operar. Es relevante mencionar que el tipo de proceso dependerá totalmente de las características del agua cruda (agua sin tratamiento de alguna fuente natural) de la zona donde se encuentre la Refinería.

2.2 Procesos de desmineralización del agua.

Se entiende por desmineralización cualquier proceso usado para eliminar los minerales del agua, y por desionización: el proceso que utiliza resinas de intercambio iónico que eliminan las sales ionizadas del agua. Teóricamente puede eliminar el 100% de las sales.

En muchos procesos es necesario eliminar todos los iones del agua, ya que para generar vapor, cualquier impureza en ella puede precipitar y causar daño en el equipo. Como existen cationes y aniones en el agua cruda, se deben usar dos tipos de resina: un intercambiador de cationes y un intercambiador de aniones, esta combinación produce agua ultra pura libre de iones.

El agua que se encuentra en la naturaleza contiene sustancias disueltas en pequeñas cantidades, en algunos casos se pueden encontrar partículas sólidas insolubles, como arena o fragmentos vegetales, que en principio se pueden filtrar, pero existen compuestos solubles, que normalmente no se ven y no se pueden filtrar, estos compuestos son de origen mineral u orgánico, y pueden ser ionizados (separados en partículas cargadas eléctricamente).

Los iones pueden tener una o más cargas, generalmente entre una y tres. Estos pueden ser de un átomo (iones monoatómicos) o una combinación de varios átomos (poliatómicos), que en su conjunción forman moléculas. Existen diferentes tipos de iones, a continuación se mencionan los más comunes en la naturaleza.

- Cation monovalente monoatómico: el ion sodio Na^+
- Cation divalente monoatómico: el ion calcio Ca^{++}
- Cation monovalente poliatómicos: el ion amonio NH_4^+
- Anión monovalente monoatómico: el ion cloruro Cl^-
- Anión divalente poliatómico: el ion carbonato $\text{CO}_3^{=}$
- Anión divalente poliatómico complejo: el ion cromato $\text{CrO}_4^{=}$
- El cation trivalente monoatómico aluminio Al^{+++} no existe en la naturaleza, pero se puede encontrar en soluciones muy ácidas.

No existen aniones di o trivalentes monoatómicos en el agua que se encuentren en la naturaleza. Una de las principales características de los iones es que estos no están fijos en alguna posición específica en la solución; se encuentra en movimiento en todo el volumen de agua. Sin embargo la suma de las cargas de los cationes y aniones es idéntica, por lo que la suma de cargas dentro de la solución es igual a cero.

Las sales son sustancias cristalizadas que contienen una proporción fija de cationes y aniones. Cuando se disuelve en agua, los cationes y aniones se mueven libremente en el agua, es decir que se ionizan figura 1.

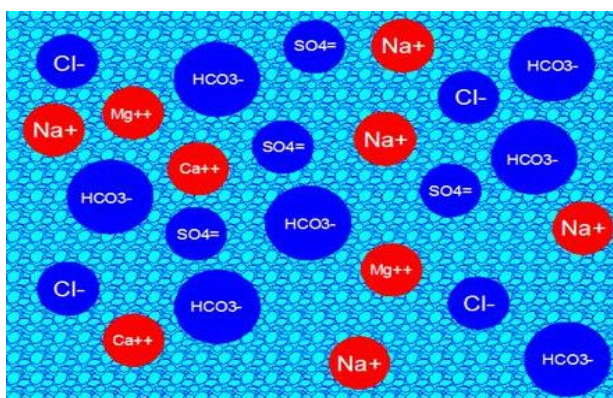


Figura 1. Iones en el agua, la suma de las cargas dentro de la solución es igual a cero.

Durante el proceso de intercambio iónico, la resina catiónica se usa en forma de iones de hidrogeno (H^+) y la aniónica en forma de iones hidróxido (OH^-), de manera que la catiónica se regenera con un ácido y la aniónica con un álcali. El dióxido de carbono que se encuentra disuelto en el agua, se elimina con una torre desgasificadora, del mismo modo que cuando contiene concentraciones apreciables de bicarbonatos. En general, el intercambiador de cationes está colocado como el primer paso del proceso de la desmineralización, subsecuentemente se ubica el intercambiador de aniones. Si no fuese de esta forma, los cationes de dureza precipitarían en el medio alcalino de la resina aniónica en forma de carbonatos e hidroxilos, sobre todo los de menor solubilidad como lo es el hidróxido de calcio ($Ca(OH)_2$) o carbonato de calcio ($CaCO_3$).

El proceso de desmineralización del caso de estudio, es un sistema sencillo con una resina fuertemente ácida (SAC) en forma de protones (H^+), una torre desgasificadora (DEG) y una resina fuertemente básica (SBA) en forma de hidroxilos (OH^-).

El arreglo incluye la siguiente estructura: **WAC/SAC-DEG-WBA/SBA**². Las resinas débilmente ácidas (WAC) y débilmente básicas (WBA) ofrecen una alta capacidad y se regeneran muy fácilmente, debido a esto se emplean en combinación con resinas fuertemente ácidas (SAC) y básicas (SBA). Este arreglo es muy usado en la industria que requiere generar grandes volúmenes de agua desmineralizada.

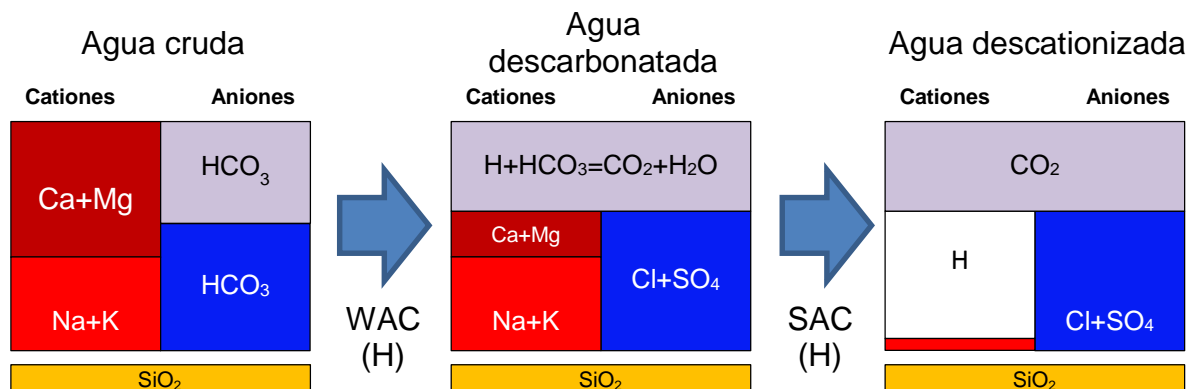
Para lograr un mejor rendimiento químico y un consumo bajo de regenerante, la primera etapa con la resina WAC es una descarbonatación (eliminación de la dureza temporal), y la segunda etapa elimina casi todos los cationes que se encuentran disueltos en el agua. Las resinas débilmente ácidas (WAC) se emplean cuando el agua cruda tiene concentraciones relativamente elevadas de dureza y alcalinidad.

² Proceso Básico de Intercambio Iónico en el tratamiento de agua, ©Francois de Dardel 2010-2011

Las resinas débilmente básicas (WBA) neutralizan los ácidos fuertes que se forman después de la etapa de descationización, por lo que no tiene la capacidad de eliminar los ácidos débiles. En su forma regenerada, no son disociados y entonces no tienen iones libres OH^- necesitados para un intercambio de aniones naturales. Por el otro lado, su basicidad es suficiente para neutralizar los ácidos fuertes formados por el intercambio de cationes.

El tren de desmineralización que existe en la planta de estudio, incluye una columna de intercambio catiónico de dos cámaras (WAC y SAC), una torre de desgasificación, una columna de intercambio aniónico de dos cámaras (WBA y SAB), y un lecho mixto como pulido final (figura 3). El uso de la resina débilmente ácida (WAC) y de la torre de desgasificación depende de la concentración de dureza y de alcalinidad en el agua cruda de la zona donde se ubica la planta. En la figura 2 se resume el proceso de desmineralización que se lleva a cabo en una planta desmineralizadora en el Sistema Nacional de Refinación³, el agua cruda que se utiliza para este proceso requiere de un pretratamiento antes de ser sometida a la desmineralización, debido a que contiene altas concentraciones de sales y minerales disueltos, posteriormente entra al proceso de desmineralización descrito arriba.

Intercambio catiónico empezando por una decarbonatación seguida por la eliminación de todos los demás cationes.



³ Sistema completo de desmineralización con tecnología Amberpackt, Dow 2011

Intercambio aniónico empezando por la eliminación de los ácidos fuertes después de una desgasificación

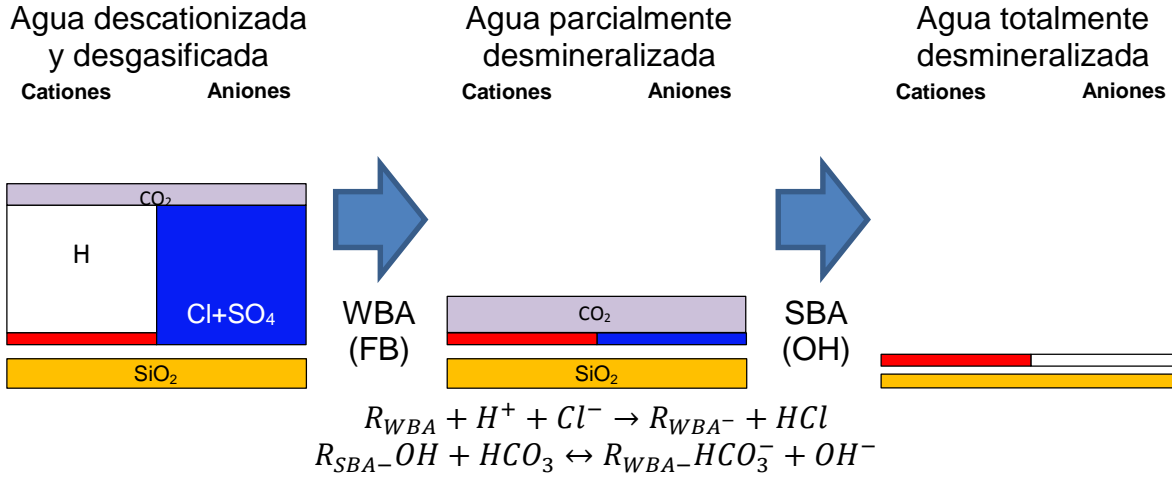


Figura 2. Descripción del proceso de desmineralización en la planta.

Después se somete a una descationización, donde se busca promover el intercambio iónico con las cargas positivas a fin de generar un excedente de iones (H^+), esto genera que se formen grandes cantidades de CO_2 , aun así existen los iones como el cloruro y sulfato disueltos en el agua con pequeñas trazas de óxido de silicio. La siguiente etapa es la desgasificación donde se libera el CO_2 que se forma por las etapas anteriores, para que posteriormente con las resinas básicas se eliminen los excedentes de los iones anteriormente mencionados y que son producto del proceso de descationización. Con esto se genera al final un agua pura libre de iones.

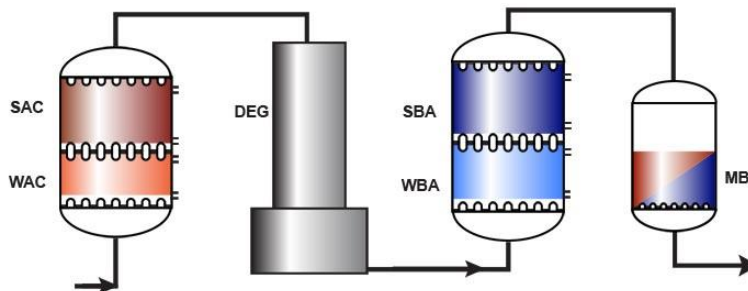


Figura 3. Sistema completo de desmineralización con lecho mixto como pulido final.

2.3 Regeneración de resinas de intercambio iónico

La regeneración se hace en serie: la solución regenerante pasa primero por la resina fuerte y después por la resina débil; en general, el regenerante no consumido por la resina fuerte basta para regenerar la débil. Las resinas intercambiadoras de cationes se regeneran con un ácido fuerte, preferentemente ácido clorhídrico (HCl) porque el ácido sulfúrico (H₂SO₄) puede precipitar en sulfato de calcio.

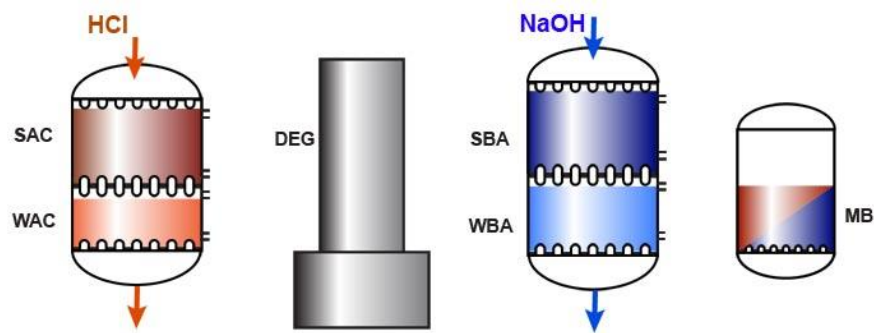
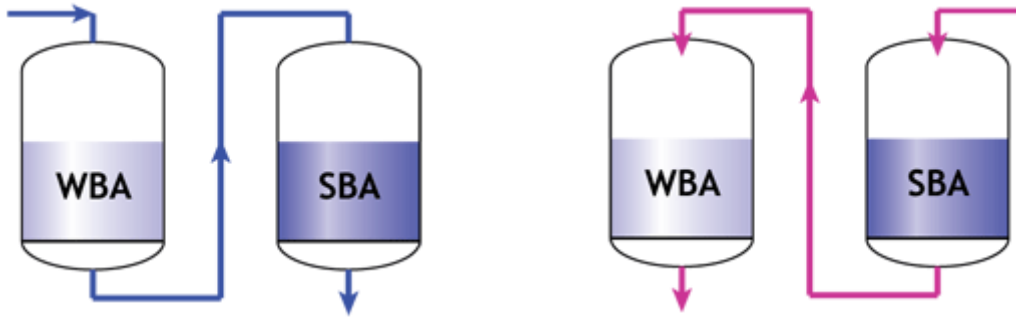


Figura 4. Proceso de regeneración de las resinas de intercambio iónico

Existen tres pasos para llevar a cabo la regeneración, la cual normalmente se realiza en parejas.

1. El agua desmineralizada debe pasar primero por la resina débil y luego por la resina fuerte.
2. La solución de regeneración debe pasar primero por la resina fuerte y luego por la resina débil.
3. Las resinas deben permanecer siempre separadas.
 - En dos columnas distintas
 - En lechos estratificados
 - En columnas de dos compartimentos



Columnas separadas en producción. Columnas separadas en regeneración.

Figura 5. Flujo de agua en la desmineralización y contra flujo para la regeneración de las resinas.

La resina débil tiene una mayor capacidad y se regenera fácilmente, pero no elimina todos los iones del agua cruda. Por lo tanto, debe estar ubicada como la primera etapa y la resina fuerte eliminará todos los iones no eliminados en la resina débil. La resina fuerte necesita una cantidad en exceso de regenerante, mientras que la resina débil casi no lo necesita. El regenerante pasa por la resina fuerte y el exceso de sosa (o de ácido con resina intercambiadora de cationes) que regenera la resina débil. Si se mezclan las resinas, ambos efectos se pierden.

Tipos y concentración de los regenerantes

- El cloruro de sodio (NaCl) se emplea normalmente para regenerar las resinas fuertemente ácidas usadas en el ablandamiento del agua cruda y las resinas fuertemente básicas en la eliminación de nitratos.
- En el ablandamiento, el cloruro de potasio (KCl) puede también emplearse cuando la presencia de sodio en la solución tratada es indeseable.
- En ciertos procesos de tratamiento de condensados muy calientes, el cloruro de amonio (NH₄Cl) se puede utilizar de igual manera.
- En la eliminación de nitratos, la resina fuertemente básica se puede regenerar con otros compuestos que producen iones de cloruro, tales como el ácido clorhídrico (HCl).

- En el proceso de descationización (la primera etapa de la desmineralización) la resina fuertemente ácida (SAC) se debe regenerar con un ácido fuerte. Los regenerantes más comunes son ácido clorhídrico (HCl) y ácido sulfúrico (H₂SO₄):
 - El ácido clorhídrico (HCl) es muy eficaz y no produce precipitados en el lecho de la resina.
 - El ácido sulfúrico (H₂SO₄) es más fácil de trasportar, almacenar y de menor costo con respecto a otros ácidos, pero es menos eficaz que el clorhídrico, la capacidad útil de la resina SAC es menor.
Además su concentración se debe ajustar para impedir la precipitación de sulfato de calcio en la resina. Una vez precipitado en la columna el CaSO₄ es muy difícil de disolver nuevamente.
 - El ácido nítrico (HNO₃) se puede emplear, por lo menos en principio, pero no se recomienda porque puede producir reacciones exotérmicas, hasta explosiones. Por lo tanto se considera peligroso su uso en este tipo de procesos.
- En la descarbonatación, lo mejor es regenerar la resina débilmente ácida (WAC) con ácido clorhídrico (HCl). El sulfúrico se debe aplicar a concentraciones muy bajas (<0.8%) para que no precipite en sulfato de calcio. La cantidad de agua de dilución es por lo tanto muy alta. Otros ácidos más débiles pueden también regenerar resinas WAC, por ejemplo ácido acético (CH₃COOH) o el ácido cítrico, una molécula con tres grupos (C₆H₈O₇).
- En la desmineralización, las resinas fuertemente básicas se regeneran siempre con sosa cáustica (hidróxido de sodio NaOH) aunque la potasa cáustica (hidróxido de potasio KOH) es otra opción, por lo general es de mayor costo.
- La resina débilmente básica (WBA) se regenera normalmente con sosa cáustica, pero existen otras bases más débiles que se pueden emplear:
 - Amoníaco (NH₄OH)
 - Carbonato de sodio (Na₂CO₃)

- Concentraciones utilizadas en los regenerantes
- NaCl (ablandamiento y eliminación de nitratos): 10%
- HCl (descationización, descarbonatación y desmineralización): 5%
- NaOH (desmineralización): 4%

En el caso del ácido sulfúrico (H_2SO_4) con resinas fuertemente ácidas, se debe ajustar la concentración del ácido con mucho cuidado entre 0.7 y 6.0 % según la proporción de calcio en el agua cruda (la cual es la misma en la resina).

Con resinas débilmente ácidas, la concentración es en general del 0.7 %. Una concentración demasiado alta puede resultar en precipitados de sulfato de calcio. Con resinas fuertemente ácidas (SAC) la regeneración se hace generalmente en varias etapas, en concentraciones progresivas. Inicialmente con una concentración baja de ácido sulfúrico y luego se aplica una concentración más alta, una vez diluida la mayor parte de los iones de calcio.

Una tercera etapa se aplica a veces con una concentración aún más alta. La primera concentración es en general entre 1 y 2 % y la segunda concentración es doble, de tal manera que se puede reducir el volumen de agua que se utiliza para la dilución, la regeneración es más efectiva y útil.

2.4 Neutralización de aguas residuales

La cantidad de químicos usados en la regeneración de las resinas de intercambio iónico es proporcional a la cantidad de los iones que se encuentran en exceso saturando la resina misma. En las plantas de desmineralización es normal como parte del proceso, la generación de agua residual, debido a las características del proceso de desmineralización y de regeneración de las resinas de intercambio iónico.

En teoría la mezcla de las aguas residuales de la regeneración de las resinas de intercambio iónico, se consideran neutrales, esto es porque el pH que se tiene de este tipo de procesos se encuentra dentro de un rango de 6 a 9.

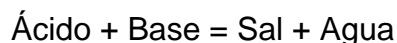
Pero en la práctica es necesario ajustar el pH del agua residual generada para cumplir con todos los parámetros establecidos en la norma mexicana, con esto se busca evitar afectar a procesos consecutivos y en el caso de ser desechada, evitar un daño severo a los cuerpos receptores de agua.

Dado que las soluciones que se tratan en los procesos de desmineralización comúnmente son diluidas, la concentración de ion hidrogeno es muy pequeña. Como resultado las concentraciones del ion hidrogeno en moles por litro son expresadas con frecuencia como potencias negativas de diez. Para lograr que la notación sea compacta y la expresión breve, es conveniente dar estas concentraciones en términos de sus logaritmos negativos. Es así como se define el pH

$$pH = -\log[H_3O^+] \quad ^4$$

El pH es una medida de acidez o alcalinidad de una disolución y la escala típicamente va de 0 a 14 en disolución acuosa, siendo ácidas las disoluciones con pH menores a 7 y alcalinas las que tienen pH mayores a 7. El pH=7 indica la neutralidad de la disolución (cuando el disolvente es agua).

La neutralización es la reacción de un ácido con una base para dar como productos sal más agua.



⁴ Cálculos Químicos BENSON, LIMUSA WILEY 2007, página 183.

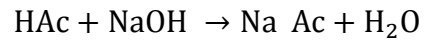
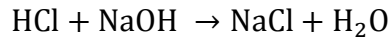
Una valoración ácido-base (también llamada volumetría ácido-base, o titulación ácido-base) es una técnica o método de análisis cuantitativo muy usada, que permite conocer la concentración desconocida de una disolución de una sustancia que pueda actuar como ácido o base, neutralizándolo.

La neutralización se lleva a cabo con una base o ácido de concentración conocida, la representación gráfica del pH medido en función del volumen añadido de sustancia valorante se obtienen curvas de valoración o curvas de titulación, el punto de inflexión de esta curva se llama punto de equivalencia y su volumen indica el volumen de sustancia valorante consumido para reaccionar con el analito (figura 6). En ausencia de sistema medidor del pH, se pueden usar indicadores ácido-base, sustancias que mediante un cambio de color nos indican que se ha llegado al punto de equivalencia.

En el caso de la valoración de un ácido fuerte con una base fuerte, como el caso del ácido clorhídrico (HCl) con el hidróxido de sodio (NaOH) el punto de equivalencia se produce a $\text{pH} = 7$. En ese punto la disolución es neutra, al ir añadiendo los mililitros de base, antes del punto de equivalencia hay exceso de ácido clorhídrico (HCl) y la disolución es ácida, en el punto de equivalencia se considera que la disolución es neutra y después del punto de equivalencia hay exceso de hidróxido de sodio (NaOH) entonces la disolución es básica.

En el caso de la valoración de un ácido débil con una base fuerte, como el caso del ácido acético ($\text{C}_2\text{H}_4\text{O}_2$) con el hidróxido de sodio (NaOH) el punto de equivalencia se produce a $\text{pH} > 7$ y en el mismo la disolución es básica, al sufrir hidrólisis el anión acetato de la sal, pues proviene de un ácido débil y una base fuerte. En la figura 6, en la gráfica del lado derecho se observa que al ir añadiendo los mililitros de base, antes del punto de equivalencia hay exceso de ácido acético por lo que la disolución es ácida, en el punto de equivalencia se ha producido la neutralización, aunque la disolución es básica, por el tipo de sal formada, y después del punto de equivalencia hay exceso de hidróxido de sodio, la disolución es más básica.

En el punto de equivalencia al ser la reacción de estequiometría entre el ácido y la base 1:1 en ambos casos

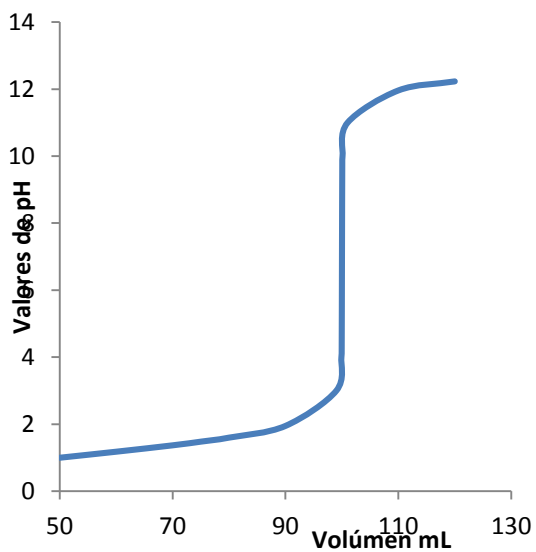


Se cumple que: Número de moles de ácido es igual al número de moles de base

$$V_a \cdot M_a = V_b \cdot M_b$$

Va: Volumen de ácido, **Vb:** Volumen de base, **Ma:** Moles de ácido, **Mb:** Moles de base.

Valoración Ácido Fuerte - Base Fuerte
(HCl y NaOH)



Valoración Ácido Débil- Base Fuerte (HAc y NaOH)

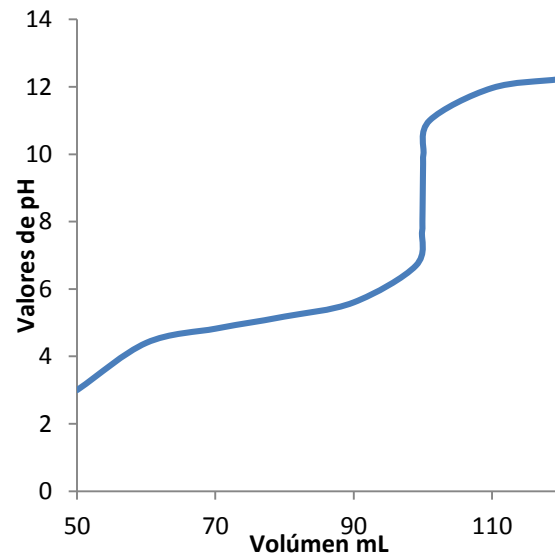


Figura 6. Comparación gráfica de la titulación ácido-base fuerte y ácido débil-base fuerte.

Autoneutralización de los residuos

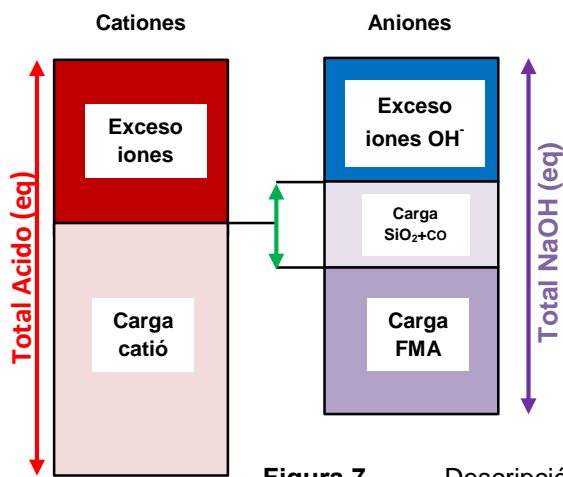


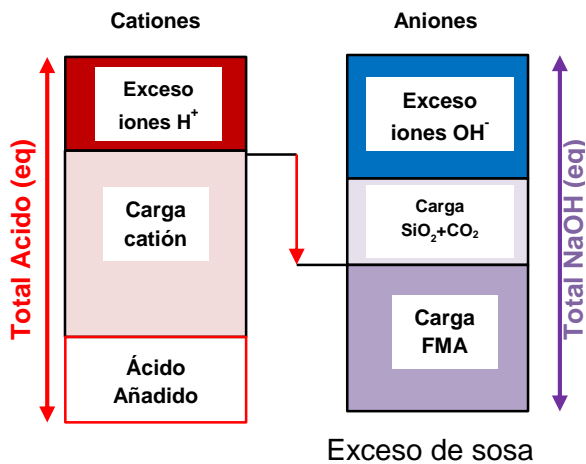
Figura 7. Descripción del sistema de auto neutralización

Debe existir un exceso de ácido, que supere la cantidad de hidróxido de sodio:

$$Ex(H) > Ex(OH) \text{ y } Ex(H) < Ex(OH) + CO_2 + SiO_2$$

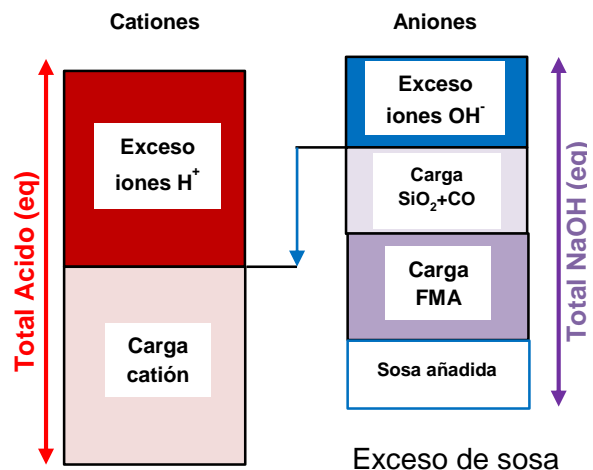
Se puede presentar el mismo efecto cuando el ácido tiene la misma cantidad de hidróxido, pero a diferencia del primer caso el hidróxido se encuentra acompañado de dióxido de carbono y óxido de silicio.

Exceso de alcalinidad



Exceso de sosa

Exceso de acidez



Exceso de sosa

Se presenta cuando el sistema de tratamiento de agua no incluye un sistema de desgasificación. Antes de llevar a cabo la neutralización debe existir lo siguiente:

$$Ex(OH) > Ex(H)$$

En este caso, el ácido se debe añadir hasta igualar la cantidad de hidróxido.

$$Ex(H) = Ex(OH)$$

Se presenta cuando existe en el proceso la desgasificación, también cuando hay un intercambiador de lecho mixto (AMB + SBA), para llevar a cabo la neutralización debe existir lo siguiente

$$Ex(H) > Ex(OH) + CO_2 + SiO_2$$

En este caso el hidróxido se debe añadir hasta igualar la cantidad de ácido:

$$Ex(OH) + CO_2 + SiO_2 = Ex(H)$$

Figura 8. Sistema de neutralización de agua residual de las resinas de intercambio iónico

En el caso de los procesos como la desmineralización existen tres formas de llevar a cabo la neutralización de los residuos que genera, la más común de ellas es la auto neutralización de los residuos ácidos y alcalinos mezclándolos entre ellos, por otra parte cuando existe en mayor cantidad de un ácido o una base se realiza el diseño de un sistema de neutralización, donde se ajusta el pH de la mezcla agregando de manera controlada un ácido o un álcali.

Con base en lo anterior, se pueden enumerar los pasos necesarios para diseñar un sistema de neutralización de aguas residuales, para que exista una buena neutralización es importante la homogenización de la solución para asegurar que el valor de pH cumple con el rango de neutralización.⁵.

- 1.- Se debe obtener de manera experimental una curva de valoración del agua residual problema, para obtener el valor del volumen de agente neutralizante que se requiere agregar.
- 2.- Determinar las reacciones químicas que pueden llevarse a cabo en la solución del agua residual (con el fin de saber los subproductos que se pueden obtener).
- 3.-Determinar la intensidad de la agitación que se requiere para tener una homogeneidad en el agua residual.
- 4.- Determinar el número de pasos o cárcamos requeridos para llevar acabo la neutralización.
- 5.- Determinar el volumen y la capacidad de la fosa de neutralización.

2.5 Aspectos industriales del control de pH

La neutralización de corrientes de agua residual o efluentes es un requerimiento común en estos días tanto en procesos de reciclaje como de manufactura. En el caso de aguas residuales, las normas establecidas exigen valores límite en el pH, ya sea para la descarga en sistemas de drenaje o en cuerpos receptores de agua.

⁵ Piero M. Armenante NJIT "Neutralization of Acid and Alkaline Wastewaters" USA, 1998.

En ambos casos el nivel debe mantenerse preferiblemente en 7 o cercano a este valor, por tres razones principales: minimizar el ataque químico sobre tuberías, bombas y otros sistemas; reducir la posibilidad de reacciones indeseables como los componentes de las aguas residuales; y proteger la vida de organismos acuáticos, particularmente de microorganismos utilizados en sistemas de tratamiento de aguas posteriores.

2.5.1 Selección del agente neutralizante

La mayoría de los efluentes industriales se caracterizan por ser ácidos y muchos reactivos alcalinos son comúnmente usados para su neutralización. El carbonato de calcio (CaCO_3) es el más económico, sin embargo, es ligeramente soluble por lo que para evitar problemas asociados con este hecho, este agente neutralizante debe estar en forma de una suspensión y debe adicionarse mediante un sistema especial.

La suspensión carbonato de calcio-agua no es muy estable (requiere agitación), por lo que se necesita un sistema de limpieza de las líneas de transporte para evitar la incrustación de este sólido, y evitar el daño de las bombas. Sin embargo el carbonato de calcio (CaCO_3), también tiene la ventaja de formar compuestos complejos con metales pesados, por lo que el uso para estos fines es eficiente.

Otro agente neutralizante que es más fácil de manejar que el carbonato de calcio es el amoníaco acuoso (NH_4^+), aunque tiene la desventaja de que sus vapores son tóxicos y requiere precauciones especiales. Su toxicidad aumenta en climas calientes, por lo que en estas situaciones se hace necesario el uso de un sistema de aspersión en recipientes que soportan altas presiones.

Adicionalmente, cuando el amoníaco acuoso es utilizado, muchos de los compuestos producidos son nutrientes para los organismos que se encuentran en los cuerpos de agua receptores. Esto puede permitir el desarrollo excesivo de los microorganismos, generando otros problemas ambientales.

Otro problema asociado con la neutralización en el caso de ácido como el sulfúrico (H_2SO_4), clorhídrico (HCl) o fosfórico (H_3PO_4) con carbonato de calcio (CaCO_3), es la formación de precipitados insolubles y con esto la necesidad de su remoción periódica.

El hidróxido de sodio (NaOH) es posiblemente el mejor agente neutralizante de todos, porque la mayoría de los compuestos formados en sus reacciones son solubles, además puede ser mantenido en solución (sin necesidad de agitación) o en forma sólida, requiriendo menos espacio de almacenamiento y menos precauciones de manejo que los otros agentes de neutralización.

2.5.2 Selección y mantenimiento del electrodo de pH

La experiencia escrita recopilada en los manuales de operación limita su atención al diseño de etapas, pero existen aún muchos problemas asociados con la operación. Muchos problemas operativos están frecuentemente relacionados con el sensor de pH utilizado. Los problemas físicos generalmente están relacionados con el cubrimiento del electrodo por precipitados insolubles y aceites o por abrasión de sólidos suspendidos. Para estos casos, se utilizan traductores ultrasónicos para reducir el cubrimiento del sensor, pero en muchos casos no es eficiente, sino que incrementa el problema.

El lavado por solventes también puede ser efectivo, pero tiene el inconveniente que tiene que interrumpirse las mediciones durante el ciclo de limpieza. El ataque químico de las sales de sodio sobre el vidrio del electrodo (a pH menores de 10) disminuye la vida útil de este equipo, en situaciones donde ácido fluorhídrico (HF) está presente y $\text{pH} < 3$, deben usarse electrodos de antimonio.

La rutina de mantenimiento es uno de los aspectos más importantes en el control de pH, sin embargo, en la práctica operativa muchas veces las consideraciones de mantenimiento son frecuentemente ignoradas. El electrodo de pH requiere limpieza y recalibración como mínimo dos veces por semana. La calibración debe ser llevada a cabo utilizando una solución amortiguadora cercana al valor de operación normal. Cada mes los sensores deben ser calibrados utilizando dos soluciones amortiguadoras diferentes.

En este punto cabe mencionar que para propósitos de control de pH, la medida de pH es fundamental y que desviaciones demasiado grandes (valores de 2 hasta 3 puntos por encima del valor de operación de su valor verdadero), genera problemas posteriores para la dosificación adecuada de agente neutralizante.

2.5.3 Problemas de implementación de control de pH

A nivel industrial, para la implementación de un control de pH no es suficiente determinar el flujo y valor del pH de la corriente de entrada al neutralizador. Para este fin, se realizan experimentos a nivel laboratorio y planta piloto para obtener datos correctos para el diseño del sistema de control. También se toman en consideración el espacio para los tanques, agitadores, el intervalo de carga, el tipo de neutralizante, la formación de lodos y la remoción de estos.

El paso de una unidad de pH a otra (de 3 a 4, de 4 a 5, etc.) requiere 10 veces más agente neutralizante que el previo. Sin embargo, esto se asume si ambos, ácido y base involucrados en la reacción son fuertes. Si la solución es débilmente básica (esto es solamente una pequeña cantidad de las moléculas se disocian), entonces una cantidad mayor de neutralizante será requerida para un cambio de pH. El punto de equivalencia (en una curva de titulación) indica cuando el residuo (ácido) ha sido consumido y el punto donde cualquier adición de neutralizante adicional causaría rápidos cambios en el pH. Cuando el punto de equivalencia es cercano a $\text{pH} = 7$, el sistema es menos estable y el pH cambia rápidamente.

Dada esta sensibilidad al cambio de pH en el punto de equivalencia, los sistemas de control utilizados en la industria son de dos tipos, on/off o continuo multimodal. El control on/off es utilizado cuando el tiempo de residencia es grande (tanques de neutralización o fosas voluminosos) o la adición de agentes amortiguantes auxilia a la neutralización (disminuye los cambios bruscos en el pH). El tipo multi-modo es muy popular en nuestros días porque puede usarse en pequeños tanques de neutralización.

Cuando se considera dos o más etapas de neutralización, debe considerarse el uso de tanques de diferentes tamaños. Un control en cascada es muy efectivo cuando las cargas varían considerablemente. La primera etapa hace una aproximación real a la neutralización en la segunda etapa se afina el acercamiento al valor de pH de neutralización, la información de pH es usada para regular la primera etapa. Debe evitarse el uso de tanques de igual tamaño dado que pueden producirse problemas de oscilación en el pH de salida. Esta última parte describe el actual sistema de neutralización descrito en el caso de estudio, esto es por la facilidad y efectividad con la que se puede neutralizar el agua residual.

2.5.4 Definición del problema de control de pH

El problema principal de control de pH, especialmente en aguas residuales industriales, es la adaptación a los cambios frecuentes en su composición y la gran sensibilidad que pueden presentar algunos sistemas no amortiguados al cambio de pH en la zona de neutralizada ($\text{pH}=7.0$). Como se observa en la figura 9 y 10, existe una pendiente muy pronunciada en esa región, lo que implica una gran sensibilidad al flujo del agente neutralizador.

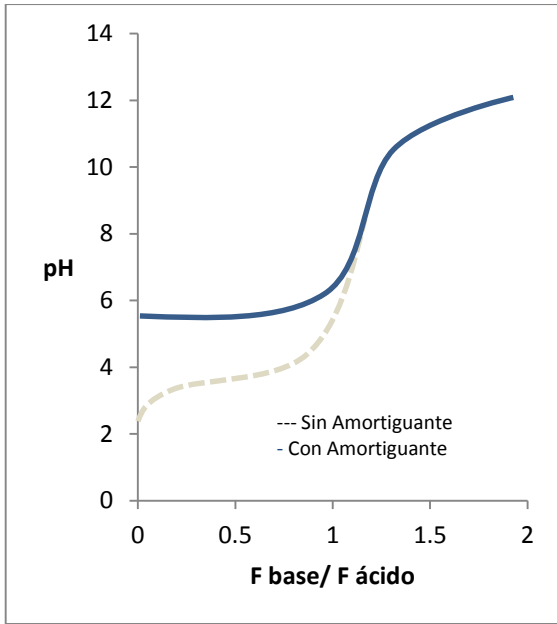


Figura 9. Efecto del agente amortiguante en la curva de titulación.

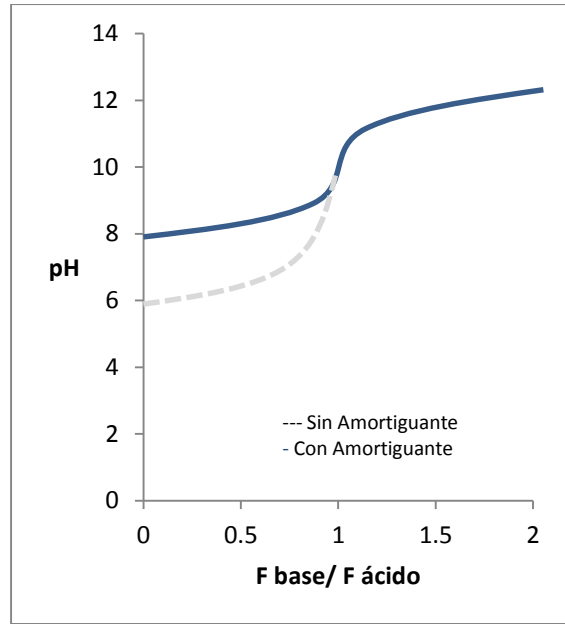


Figura 10. Ampliación de la zona de neutralización

El valor del inverso de la pendiente $d\left(\frac{F_{base}}{F_{ácido}}\right) dpH$, proporciona una medida de la sensibilidad o factor amortiguante. Esta sensibilidad puede ser reducida introduciendo al sistema agentes amortiguantes como los carbonatos y bicarbonatos como se muestra en la figura 10, en una ampliación de la zona de neutralización. La presencia de ácidos débiles, bases y sus sales, en las aguas residuales cambian su capacidad de amortiguamiento, lo que implica que para un pH deseado la cantidad de solución neutralizante varía notablemente.

3 CASO DE ESTUDIO

3.1 Descripción de la fosa de neutralización

El agua proveniente de la regeneración de las columnas catiónicas y aniónicas, de cada tren es enviado a la fosa de neutralización ubicada a un costado de la planta de desmineralización.

El análisis de la regeneración de la planta indica que el efluente ácido es mayor que el alcalino y en una mezcla de ellos el pH es ácido (entre 3.0 a 5.0), por lo que se necesita neutralizar este efluente antes de enviarlo al cuerpo receptor. El volumen de efluente generado por ciclo de regeneración es de 1,175 GPM.



Figura 11. Vista general de la Fosa de Neutralización.



Figura 12. Estructura del barandal.



Figura 13. Pasillo principal de la Fosa de Neutralización.



Figura 14. Mantenimiento de la Fosa de Neutralización.

Tabla 1. Equipos principales de la fosa de neutralización.

| EQUIPO | SERVICIO | CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS | INTRUMENTACIÓN ASOCIADA | OBSERVACIONES |
|---|---|---|---|---|
| Bomba de transferencia cárcamo de bombeo. | Bombea agua con pH de 7 a 9 al cuerpo receptor de agua. | Centrifuga Vertical. Capacidad: 1500 GPM. Presión de diseño: 3.5 kg/cm ² | Indicador de presión. | Se neutralizan efluentes en lado norte y sur de la fosa, con dos bombas continuas en la descarga y una de relevo. |
| Fosa de Neutralización | Neutralizar el efluente para enviarlo al cuerpo receptor. | Capacidad de 1800m ³ . Dimensiones: 30mx15mx4m. Temperatura ambiente y presión atmosférica | Medidor de pH y Temperatura. Medidor de nivel en el cárcamo de bombeo. | Los medidores de pH regula la dosificación de NaOH para la neutralización. |

Considerando que el agua contenida en la fosa de neutralización tiene como destino final la incorporación con la descarga hacia un río, se debe considerar una calidad cercana al cumplimiento de las especificaciones particulares de la descarga de este canal, incluyendo la DQO que está establecida en la Ley Federal de Derechos para la descarga a cuerpo tipo B (al cual pertenece el río).

Esta agua presenta pH básico (pH=10) de acuerdo a las especificaciones de diseño de la fosa de neutralización, mientras que la Temperatura, DBO₅, DQO, Fósforo Total y Nitrógeno Total, cumplen con las condiciones particulares de la descarga.

De acuerdo con análisis de calidad realizados a esta agua, se observa que los niveles conductividad son altos (< 15,000 µS/cm), lo que indica la presencia de sales, no mencionadas en las características particulares de la descarga. Los datos de caracterización que se cuentan, se puede decir que la corriente de agua de la fosa de neutralización no cumple con las especificaciones de diseño del control de pH, considerando que el objetivo es neutralizar el agua de desecho de las unidades desmineralizadoras por resinas de intercambio iónico para su descarga en el cuerpo receptor.

El agua procedente del proceso de desmineralización, llega con un valor alto de conductividad (10,000 $\mu\text{S}/\text{cm}$) y aunque no existe una especificación de referencia límite que indique o establezca un punto de control del mismo, el exceso de ácido o sosa en la corriente, eleva o disminuye significativamente el pH pudiendo incurrir en incumplimientos en la descarga.

3.2 Descripción del proceso

El caso de estudio se enfoca básicamente a la fosa de neutralización, lo que implica que dentro de los alcances no se encuentran modificaciones al proceso de desmineralización. Por tal motivo, el punto inicial del proceso de neutralización considerado en este trabajo comienza con la descarga del agua de enjuague y retrolavado de los tanques que contienen las resinas aniónicas, catiónicas y de lecho mixto. La planta de desmineralización cuenta con tres trenes de tratamiento de agua, mientras dos de ellos se encuentran operando tratando el agua proveniente de pretratamiento, el otro tren se encuentra en regeneración, es decir, se están utilizando ya sea agentes ácidos o básicos, según el caso, para restituir la capacidad de intercambio de las resinas. Toda el agua que se produce de este proceso se descarga de manera directa por gravedad a la fosa de neutralización a través de un canal donde se recolectan los efluentes ácidos y básicos, y se aplica una primera neutralización parcial de los mismos.

El efluente preneutralizado en el canal de entrada a la fosa, se colecta en un primer cárcamo, el cual está equipado de agitadores e instrumentos de medición de pH, el uso de los agitadores garantiza una homogenización del agua residual, lo que se traduce en un valor de pH cercano al valor real de la solución que está entrando. El valor de pH registrado en el agua residual que sale directamente de la planta de desmineralización es muy ácida con valores de pH entre 2 y 4, debido a que se utiliza una mayor cantidad de ácido al momento de regenerar las resinas, como se mencionó anteriormente, dependiendo directamente de las concentraciones de los iones del agua cruda que alimenta a la planta.

Una vez concretada la primera etapa de sistema de neutralización y de acuerdo a los valores de pH registrados por el equipo de medición, se inicia la dosificación de agente neutralizante, hidróxido de sodio con una concentración del cincuenta por ciento (conocido como sosa fresca). La elección de este agente neutralizante se justifica por la flexibilidad operativa que permite dosificar el químico en menores dosis y debido a su concentración, en el caso de que el efluente tenga un pH muy ácido se alcanza en menor tiempo un valor cercano a la neutralidad.

La fosa de neutralización se encuentra dividida en compartimentos o fosas más pequeñas, todas equipadas con su respectivo sistema de dosificación de agente neutralizante, agitación continua y medición de los valores de pH.

El proceso se considera del tipo batch, y la única función de subdividir el sistema de neutralización es ir ajustando la neutralización conforme lo requiera el agua a tratar hasta alcanzar el valor deseado (pH entre 6 y 9) en la figura 15 se muestra el sistema de neutralización del caso de estudio con sus respectivos equipos.

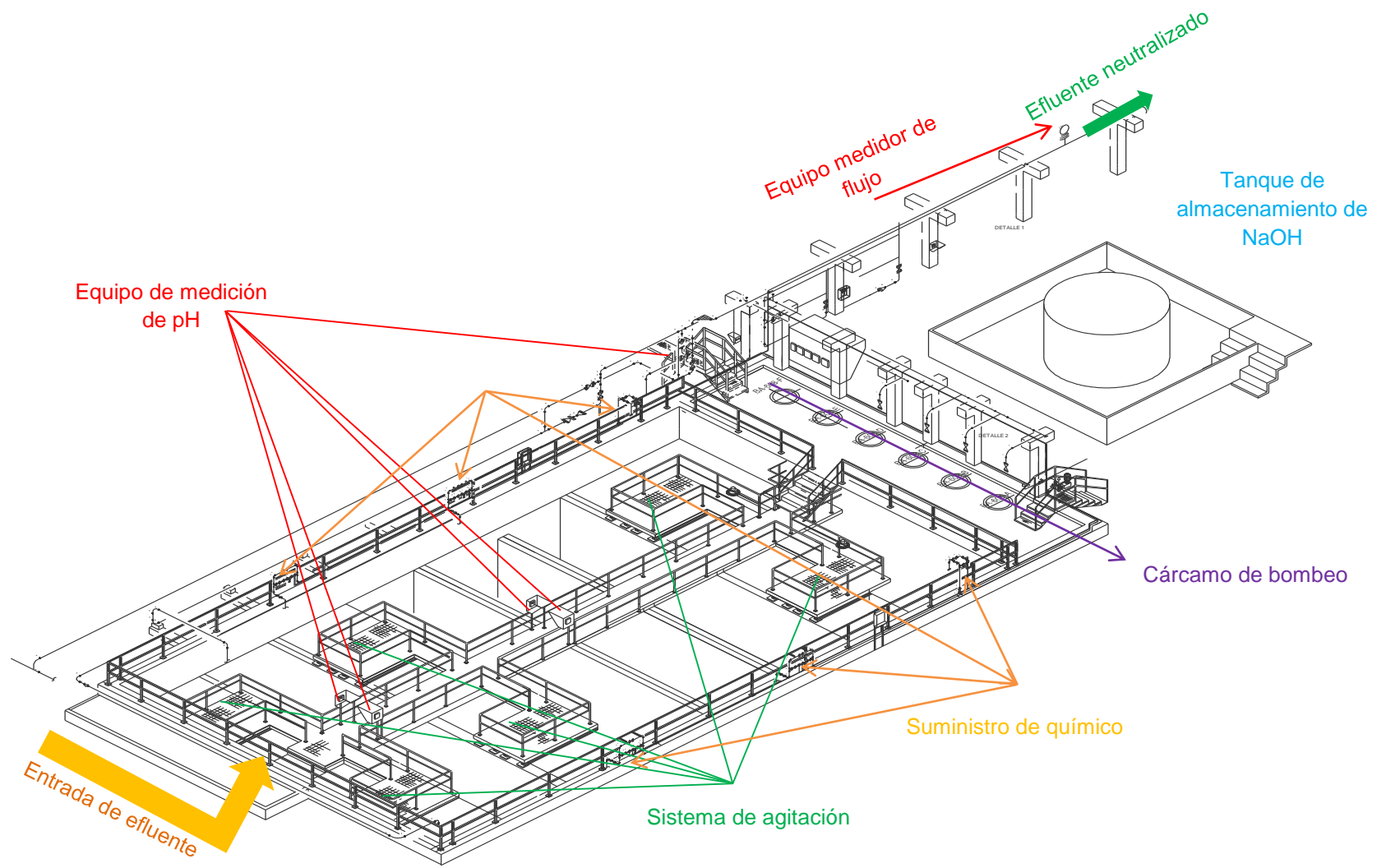


Figura 15. Fosa de neutralización

Una vez que se ha neutralizado el agua residual proveniente de la planta de desmineralización, es enviada al cárcamo de bombeo que se encarga de vaciar la fosa y de descargar el agua neutralizada directamente al cuerpo receptor de agua previa verificación del cumplimiento de las especificaciones de la norma mexicana NOM-001-SEMARNAT-1996.

Lo anterior resume la actual operación de la fosa de neutralización, sin embargo también existen condiciones atípicas en el proceso y esto va depender de la carga de agua que se tenga en la planta desmineralizadora, por lo que puede suceder que la corriente que sale de la planta a la fosa tenga condiciones mayormente básicas (pH > 9), cuando ocurre esto el proceso de neutralización se ve modificado, por lo que comienza a recircularse la corriente por toda la fosa, esperando que la siguiente carga de agua sea ácida y de esta forma neutralizarla, esto disminuye el consumo de agente neutralizante básico. Este tipo de operación puede modificar los tiempos de residencia y de operación, pero aun así el proceso y la calidad de neutralización se cumplen.

Tabla 2. Parámetros del agua a la descarga del sistema de neutralización

| Parámetro | Unidades | Resultados de la campaña de muestreo de la UNAM | | NOM-001-SEMARNAT-1996 |
|--|--------------|---|----------------------|-----------------------|
| | | Temporada de Estiaje | Temporada de Lluvias | |
| Temperatura | °C | 30.1 | 31.9 | 40 |
| pH | Unidad de pH | 1.02 | 9.47 | 6.5-7.5* |
| Conductividad | µS/cm | 11140 | 3740 | - |
| DBO5 | mg/L | 4.5 | 3.2 | 75 |
| DQO | mg/L | 35.57 | 157.44 | 200 |
| Fósforo Total | mg/L | <0.3 | 0.58 | 5 |
| Nitrógeno Total | mg/L | 1.24 | 3.2 | 15 |
| Sólidos Sedimentables | mg/L | <0.1 | NR | - |
| Sólidos Suspendidos totales | mg/L | NR | 24.0 | |
| NR. No realizado | | | | |
| *Valor considerado del manual de operación de la fosa de neutralización. | | | | |

Como se puede apreciar en la tabla 2, el agua residual de la fosa de neutralización cumple con algunos parámetros como lo son: temperatura, DBO₅, fósforo total y nitrógeno total, sin embargo el comportamiento del pH del sistema de neutralización varía de manera considerable en tiempo de estiaje y de lluvia, este comportamiento se debe a que en época de estiaje el volumen de agua que sale del sistema de desmineralización entra directamente a la fosa para su posterior neutralización, cuando es época de lluvias, el agua que cae por este fenómeno recae directamente en el sistema lo que hace que el agua entre en contacto con el efluente y ocurra un proceso de dilución al mismo tiempo que eleva el pH ácido a básico, pero el proceso es variable por lo que no se alcanza un valor que se considere de neutralización.

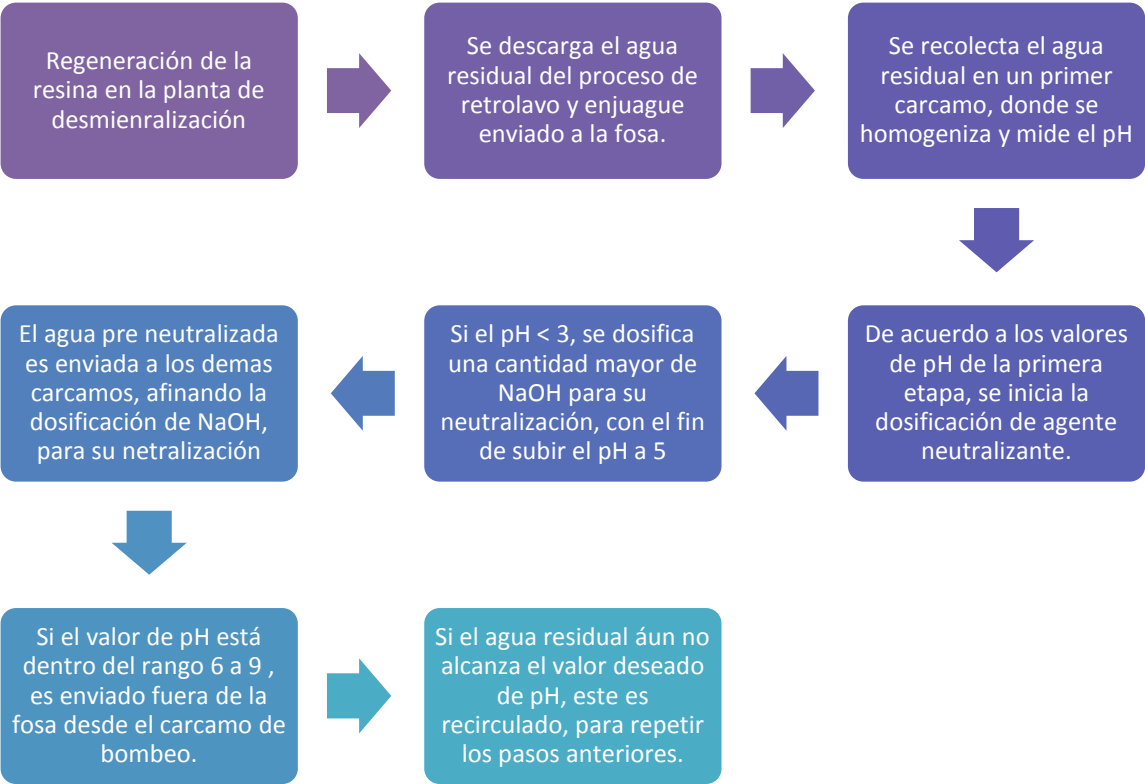


Figura 16. Operación del actual sistema de neutralización

Finalmente no se está considerando la conductividad, normalmente en este tipo de efluentes, cuando la neutralización existe entre un ácido y una base fuerte, existe un choque químico, el cual genera sales disueltas en alta concentración, el cuerpo receptor de esta agua residual, rompe con su equilibrio químico lo que afecta sus propiedades físicas y químicas, causando un impacto ambiental de consideración.

Un factor más a considerar, es la antigüedad de las instalaciones ya que estos equipos están presentes desde el arranque de la planta desmineralizadora en 1980 por lo que están llegando al final de su vida útil, además de que están incrementado sus fallas y por lo tanto su mantenimiento para evitar las mismas.

Debido a lo anteriormente planteado, es necesario realizar una serie de propuestas de modernización del sistema de dosificación, red de tubería, sistemas dinámicos y de control e instrumentación, ya sea con el cambio del sistema actual de dosificación, control e instrumentación y equipos dinámicos, o por el cambio total en el tipo de proceso de neutralización que igualmente permita asegurar el punto anterior, o inclusive que permita incrementar la capacidad de tratamiento de agua residual más allá de la capacidad de diseño actual.

4 METODOLOGÍA

RECOPIACIÓN Y ANÁLISIS DE INFORMACIÓN

Se realizó la recopilación de información bibliográfica y de los datos proporcionados por la Refinería y centro de trabajo, así como la hoja de datos de diseño de toda la planta desmineralizadora, los historiales de los flujos y la calidad del agua residual de entrada y salida. La recopilación de toda esta información permite tener una visión más completa del caso, haciendo un análisis preliminar con toda la información.

DIAGNÓSTICO DEL ESTADO ACTUAL DE LA FOSA DE NEUTRALIZACIÓN

Con la información obtenida se realizó un análisis del flujo de entrada y de salida de agua residual en la fosa, revisando los parámetros de calidad de acuerdo a la NOM-001-SEMARNAT-1996, al mismo tiempo que se analizaron los tiempos de residencia de los residuos a neutralizar, la dosificación y características del agente neutralizante, la revisión de la situación actual del estado físico de la fosa, equipos e instrumentos involucrados.

SELECCIÓN DE EQUIPO Y TECNOLOGÍA ADECUADA

De acuerdo a la evaluación técnica de los equipos y materiales, así como del estudio de las diferentes tecnologías aplicables, se selecciona la opción más adecuada que proporcione un mayor beneficio a la rehabilitación y mejora de la actual infraestructura.

EVALUACIÓN ECONÓMICA

Se efectuó un análisis económico de la posible inversión aplicada a la mejora de infraestructura, equipo, tubería e instrumentos que sean requeridos, considerando los costos de inversión y el ahorro en el consumo de químicos ácidos o básicos para efectuar la neutralización, generando la disminución de aguas residuales que contaminen al ambiente, cumpliendo con la normatividad y mejorando la calidad de agua para futuros aprovechamientos en otros procesos o plantas.

ANÁLISIS DE RESULTADOS

Se efectuó el análisis de resultados obtenidos en las opciones de mejora de infraestructura, material y equipo, realizando la evaluación técnica de las tecnologías alternativas que sustituyan al actual proceso con la finalidad de mejorar el mismo con costos rentables. Las conclusiones se basaron en el análisis de los resultados y objetivos planteados al inicio del presente trabajo.

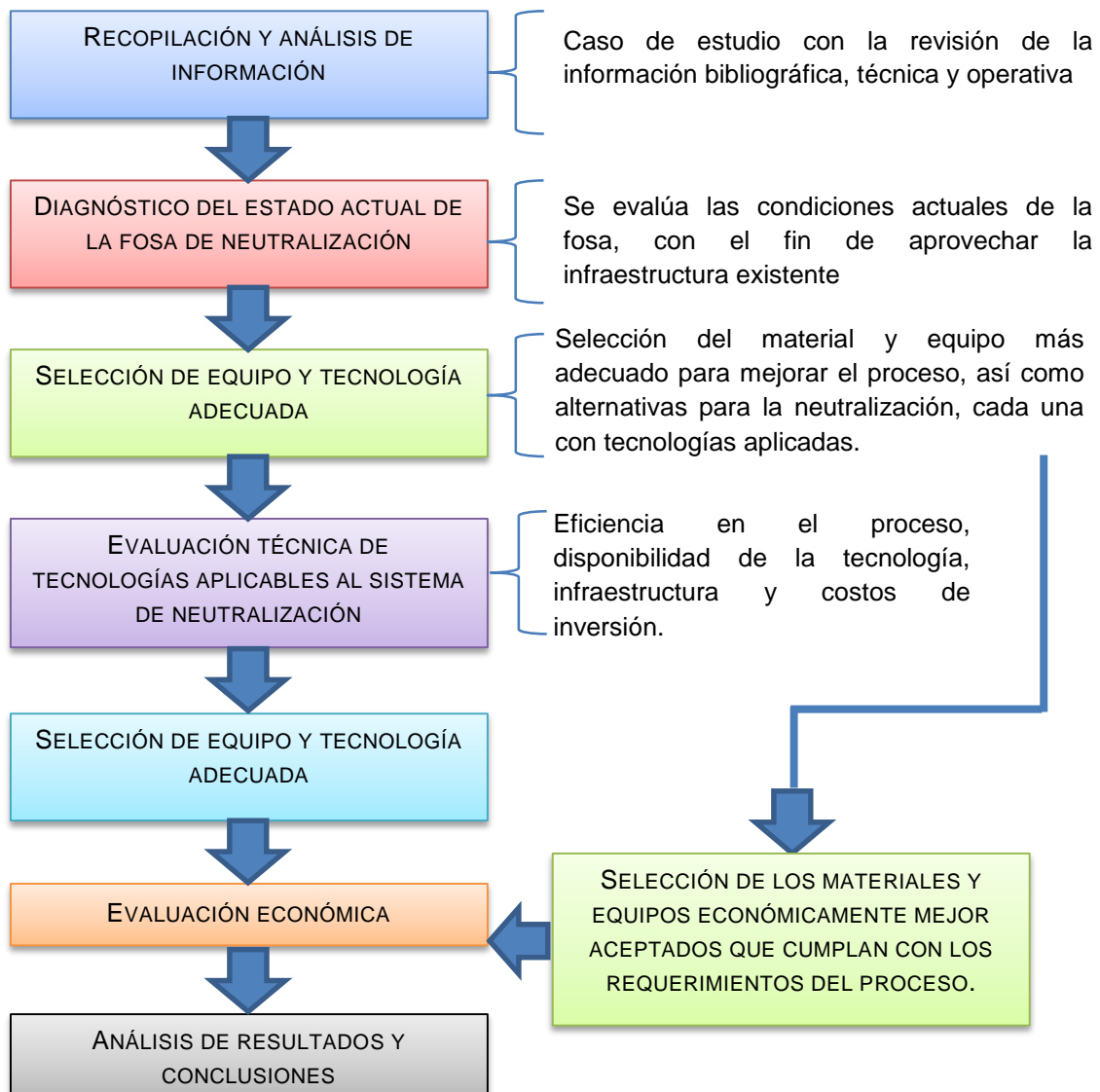


Figura 17. Diagrama de flujo de la metodología de trabajo

5 RESULTADOS Y DISCUSIÓN

5.1 Diagnóstico actual del sistema de neutralización.

Para que el actual sistema opere de acuerdo a sus condiciones originales de diseño, todo el sistema debe encontrarse en las condiciones ideales de operación, es por ello que la infraestructura debe estar acorde al diseño, que no existan deficiencias o modificaciones que no sean acordes al proceso. La red de tubería, instrumentación y control garantizan una operación continua y segura.

El sistema de neutralización caso de estudio está gradualmente deteriorado por el proceso de neutralización que es de carácter corrosivo, lo que afecta en gran medida a los materiales de los cuales está construida toda la fosa. La actual operación se hace de acuerdo a los flujos que se generan de agua residual en la fosa, destacando en este punto que se hace de manera manual, el equipo que se encarga de la medición de pH está dañado y las lecturas no son acordes a los valores reales del agua como consecuencia no se tiene un buen control de los parámetros que exige la norma para descargar este tipo de agua residual.

En 2005, se realizó una rehabilitación de la fosa de neutralización, la cual consistió en el cambio y mejora del recubrimiento de toda la fosa, colocación de loseta antiácido en áreas periféricas. Al mismo tiempo las plataformas marinas que contienen a los sistemas de agitación fueron sustituidas por nuevas con materiales resistentes a la oxidación y corrosión que predominan en el ambiente de la fosa.

Los agitadores se sustituyeron por equipo nuevo y de mejor calidad garantizando una homogenización del agua residual con agente neutralizante, lo que beneficia directamente a la neutralización de todo el proceso.

Todo lo anterior con la finalidad de prologar su vida útil de operación, sin embargo el sistema de bombeo, instrumentación, suministro y distribución de agente neutralizante, carece de mantenimiento y presenta deficiencias que se pueden traducir en malas prácticas operativas y riesgo para su operación.

Es necesario restablecer todo el sistema de instrumentación y control, de la red de dosificación de agente neutralizante, así como la misma de recirculación y descarga de agua neutralizada. Hay infraestructura de concreto y de soportería que se ha dañado y necesita ser removida para instalar una nueva, lo mismo ocurre con los sistemas de seguridad, barandales, escaleras, válvulas y bases para operar las mismas.

| Condiciones de diseño | Condiciones actuales de operación |
|---|--|
| 6 Equipos dinámicos de agitación (potencia en el motor de 10 HP) | Operan 4, el resto está en mantenimiento |
| 6 Equipos de medición de pH (Medidor de tipo membrana sumergido en la fosa) | Operan todos pero descalibrados la información no es precisa. |
| Equipo de medición de flujo a la descarga (tipo ultrasónico fijo en la tubería de descarga) | No opera actualmente y necesita ser sustituido |
| 6 Equipos dinámicos de bombeo (potencia de 100 HP, 1500 GPM, 65% de eficiencia) | Solo opera una bomba |
| 4 Válvulas de control por aire (tipo on/off) | Ninguna válvula funciona |
| Tanque de NaOH (capacidad de 10,000 litros) | Está muy deteriorado y representa un riesgo su actual operación |
| Sistema de dosificación de NaOH (tubería de acero al carbón) | Debe ser sustituido todo el sistema, deteriorado e inseguro para operar. |
| 10 Válvulas de control de suministro de NaOH | Ninguna válvula opera todo se hace por gravedad y sin bombeo. |
| Sistema de medición de nivel en el cárcamo de bombeo (medición ultrasónica) | Completamente inservible, representa un riesgo el operar con bombas sin nivel en fosa. |
| Capacidad de tratamiento 1800 m ³ /h | Tratamiento en promedio 900 m ³ /h |
| Tiempo de residencia en la fosa 40-60 minutos | Tiempo de residencia de 1.5 a 2 horas |
| Cumple con todos los parámetros exigidos por la Norma Oficial Mexicana | No cumple con los parámetros y existen problemas por la elevada conductividad. |

Tabla 3. Tabla comparativa de las condiciones de diseño contra la actual operación

5.2 Ingeniería Conceptual

5.2.1 Capacidad y diseño

El actual sistema de neutralización tiene el volumen y la capacidad necesaria para tratar el agua residual que se genera por la desmineralización de agua en la planta, para afirmar este punto se realizó un cálculo matemático para estimar el tiempo de residencia de acuerdo al flujo de entrada a la fosa y la capacidad de descarga del actual sistema de bombeo. El flujo de agua cruda que se alimenta al pretratamiento y posteriormente a la planta de desmineralización de acuerdo a los informes proporcionados por el centro de trabajo y la Refinería es de 1200 m³/h, la planta de desmineralización tiene una eficiencia del 95%, por lo que del total del flujo que se alimenta a la planta, 60 m³/h representa el agua que se utiliza para la regeneración y retrolavado de las resinas de intercambio iónico.

La fosa tiene una capacidad de 1800 m³, este volumen se encuentra dividido en dos fosas (lado norte y lado sur) de 900 m³, cada una cuenta con tres bombas con una capacidad de 1500 GPM (340.69 m³/h), de las cuales operan dos de manera continua dando una capacidad de 3000 GPM (681.38 m³/h), mientras que la otra bomba funciona de relevo. Actualmente la operación que se tiene en la planta de desmineralización es del 50%, con una proyección de aumentar este porcentaje de acuerdo a las modificaciones y la reconfiguración de la misma Refinería donde se encuentra. Es por ello la importancia de que la planta funcione de manera adecuada a las necesidades requeridas por los diferentes procesos y el tratamiento del agua residual que se genera, cumpla en su totalidad con lo establecido en la norma.

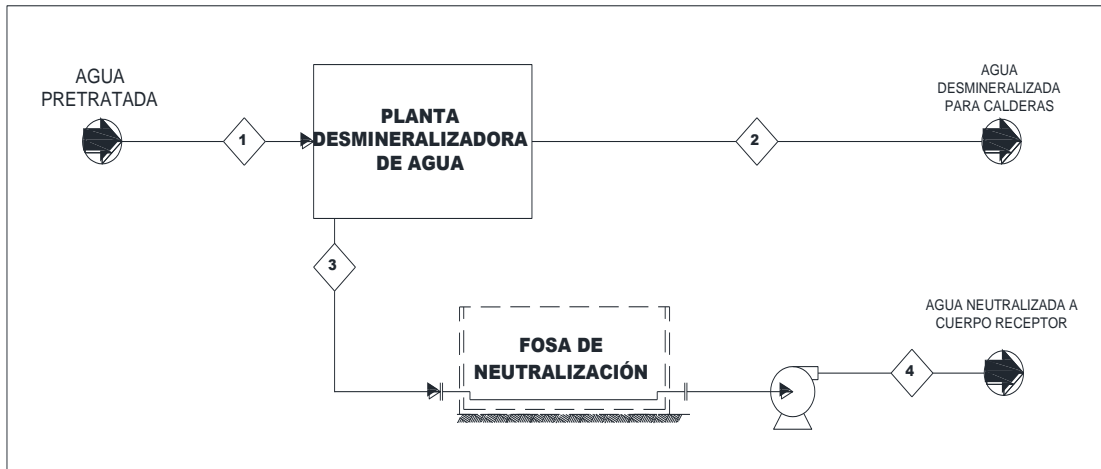


Figura 18. Diagrama de Flujo de Proceso de desmineralización – neutralización

El actual sistema de neutralización está diseñado para que en caso de que se tenga que hacer un paro de emergencia en la planta de desmineralización y toda el agua que se contiene en ella tenga que ser vaciada, esta pueda ir a la fosa sin peligro de desbordamiento, además de que las tres bombas se activan en automático para su pronto vaciado, del mismo modo el sistema de dosificación de agente neutralizante y agitadores funcionen cumpliendo con los parámetros requeridos por la norma mexicana.

Tabla 4. Tabla de flujos y valores de pH en el sistema de desmineralización

| DESCRIPCIÓN | 1 | 2 | 3 | 4 |
|-----------------|------------------------|------------------------|----------------------|----------------------|
| | PRE TRATAMIENTO | DES-MINERALIZACIÓN | NEUTRALIZACIÓN | CUERPO RECEPTOR |
| FLUJO DISEÑO | 1200 m ³ /h | 1140 m ³ /h | 60 m ³ /h | 60 m ³ /h |
| FLUJO OPERACIÓN | 600 m ³ /h | 570 m ³ /h | 30 m ³ /h | 30 m ³ /h |
| pH | 7.2 - 7.5 | 6.0 - 6.5 | 3.0 - 5.0 | 6.0 - 9.0 |

5.2.2 Normatividad y regulación

La Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales, es la encargada de establecer y difundir las normas que se aplican en materia de manejo de aguas residuales.

Tabla 5. Normas aplicadas para el manejo de aguas residuales-SEMARNAT

| Normas aplicadas para el manejo de aguas residuales |
|--|
| Norma Oficial Mexicana NOM-002-SEMARNAT-1996, que establece los límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales a los sistemas de alcantarillado urbano o municipal. |
| Norma Oficial Mexicana NOM-003-SEMARNAT-1997, Que establece los límites máximos permisibles de contaminantes para las aguas residuales tratadas que se reúsen en servicios al público. |
| Norma Oficial Mexicana NOM-001-SEMARNAT-1996, Que establece los límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales en aguas y bienes nacionales. |
| Norma Oficial Mexicana NOM-004-SEMARNAT-1997, Protección ambiental. Lodos y biosólidos; especificaciones y límites máximos permisibles de contaminantes para su aprovechamiento y disposición final. |

La norma que regula cumplimiento de los parámetros para la descarga de agua residual en los cuerpos receptores de la nación, es la NOM-001-SEMARNAT-1996 que establece los límites máximos permisibles de contaminantes en aguas en las descargas de aguas residuales en aguas y bienes nacionales, con el objeto de proteger su calidad y posibilitar sus usos.

El Sistema Nacional de Refinación, maneja actualmente un sistema de gestión de la calidad denominado SSPA (Seguridad Social y Protección Ambiental), el cual establece en su apartado de protección ambiental, el compromiso que asume la paraestatal para un manejo adecuado y seguro de los residuos que se generan en los diferentes procesos, esto incluye principalmente el manejo y reúso del agua en todos los procesos de refinación de petróleo.

5.2.3 Mejoras en la Infraestructura y proceso

Para la mejora del actual sistema de neutralización, se realizó una investigación sobre las tecnologías susceptibles de aplicarse para la mejora del actual proceso de neutralización.

Para el desarrollo de este punto primero se expondrán los motivos y equipo que se seleccionó para restablecer la capacidad de diseño de la fosa, posteriormente la mejora del proceso de neutralización y por último alternativas de nuevas tecnologías

Tabla 6. Lista de equipo y materiales que se requieren para restablecer el actual sistema de neutralización

| Descripción | Situación actual | Requerimiento | Costo estimado |
|---|---|---|-----------------|
| Equipo de bombeo | Actualmente solo opera una de 6 bombas. | Seis bombas con una capacidad de 1500 GPM | \$ 497,700 |
| Infraestructura civil | Columnas de rack deterioradas, sistemas de soporte de tubería, red de tubería y válvulas. | Se requiere que toda el área está protegida por recubrimiento contra ácido, del mismo modo que la soportería y tubería. | \$ 2,425,300 |
| Instrumentación | No opera el actual sistema de instrumentación, sobre todo los pH metros y medidores de nivel en la fosa | Debe estar en perfectas condiciones toda la instrumentación, sobre todo en la medición de pH y nivel de la fosa. | \$ 177,000 |
| Sistema de dosificación de agente neutralizante | El actual sistema opera de manera manual y presenta deficiencias en toda la red de distribución, instrumentación y control. | Se debe modificar el actual sistema por uno de mayor duración y seguridad, con nuevos materiales para el manejo de químicos corrosivos, esto aplicaría para la instrumentación y control del mismo. | \$ 1,850,000 |
| total | | | \$ 4,850,000.00 |

En el Anexo 3 se establece de manera detallada cada uno de los puntos, se incluyen los costos estimados, determinados a partir de una evaluación de equipos similares, escogiendo el de mejor calidad y precio, acorde a los requerimientos de proceso necesarios del sistema de neutralización.

5.2.4 Costos de inversión y costos unitarios

Para la presente evaluación económica se consideraron los costos de operación actuales del sistema de neutralización, comparando la rentabilidad que se obtiene al recuperar sus condiciones de diseño. La situación que se pueden presentar al interior de un proyecto para tomar decisiones económicas es muy diverso. En ocasiones es necesario seleccionar la mejor alternativa desde el punto de vista económico, pero no existen ingresos en el análisis. Algunas de las situaciones donde sólo se presentan costos para el análisis económico son:

1.-Seleccionar entre dos o más equipos alternativos para un proceso industrial o comercial, que elaboran una parte de un producto o servicio. El equipo no elabora un producto o servicio final que se pueda vender para obtener ingresos.

2.-Seleccionar entre dos o más procesos alternativos para el tratamiento de contaminante producido por una industria. Es forzoso instalar el proceso de tratamiento, ya que así lo exige la ley, pero esa inversión no producirá ingresos.

3.-Se requiere reemplazar un sistema de procesamiento manual de datos por un sistema computarizado. O bien, se requiere sustituir el procesamiento de datos, que actualmente se realiza con computadoras personales, por un procesamiento en red. La inversión que este cambio requiere no producirá ingresos; no obstante son inversiones necesarias en muchas industrias y negocios.

A continuación se expresa una tabla comparativa de los costos de operación actuales contra los de diseño, es relevante mencionar que el incumplimiento con las normas genera un costo el cual es representado por las multas que impone el gobierno, al mismo tiempo que se debe generar un gasto para corregir el daño ocasionado

Tabla 7. Costos de operación del actual sistema de operación

| Concepto | | | Costo de operación |
|---------------------------|-------------|-------------------|--------------------|
| Flujo | 6,422,832 | m ³ /a | - |
| Sosa | 15,472,300 | Kg | \$10,675,887 |
| Energía eléctrica | 2,450,553 | KW | \$245055 |
| Multas por incumplimiento | \$2,500,000 | | \$2,500,000 |
| Total | | | \$13,420,942 |

Se calcula la inversión inicial, la cual incluye la instalación de equipo nuevo; equipo dinámico, instrumentación y control; infraestructura, red de tubería con su respectiva soportaría y sistema de distribución de agente neutralizante. Se calculó el flujo de agua tratada anual con la capacidad nominal del sistema de neutralización y las horas efectivas de operación.

Tabla 8. Programa de Inversión Total

| | 2013 | Estimado de inversión de Propuesta |
|-------------------------------|---------------|------------------------------------|
| Fosa de Neutralización | \$ 4,850,000 | \$ 4,850,000 |
| Ingeniería y Arranque (18.0%) | \$ 873,000 | \$ 873,000 |
| Suma | \$ 5,723,00 | \$ 5,723,00 |
| Contingencias (7.0%) | \$ 400,610.00 | \$ 400,610.00 |
| Total | \$ 6,123,610 | \$ 6,123,610 |

Se calculó el costo variable de producción de acuerdo a los costos asociados a los productos químicos y el consumo de la energía eléctrica de la tabla 8 tomando como referencia los costos descritos en el diagnóstico del sistema de neutralización.

Tabla 9. Instalación del sistema de neutralización

| | | |
|---|-----------|---------------------|
| Premisas Generales | | |
| Tipo de cambio | 12.90 | Peso/dólar |
| Tasa de descuento | 12.00% | |
| Horizonte de evaluación | 20 | Años |
| Operación Anual | 365 | días |
| Tasa Impositiva (IRP) | 0.30 | |
| Volumen de Materia Prima, Reactivos y Servicios Auxiliares (base diaria) | | |
| Agua Neutralizada | 1128 | m ³ /día |
| Hidróxido de sodio | 46,089 | Kg/día |
| Energía Eléctrica | 83,466.27 | KW/d |
| Precios Unitarios | | |
| Hidróxido de sodios | 0.69 | USD Kg |
| Energía Eléctrica | 0.10 | USD/ KW-h |
| *Costos de Mantenimiento | | |
| | 14,240.95 | USD/ año |
| *Capital de trabajo | | |
| | 11.69 | USD/mes |
| *Costo de mantenimiento considera un 3% del ISBL y 1% del OSBL de la inversión. | | |
| *Capital de trabajo es el costo de reactivos por un mes. | | |

Tabla 10. Costos de operación del sistema de neutralización

| | | | | |
|---|--------|---------------------|-------------------|---------------|
| Neutralización | | | | |
| FLUJO DE PRODUCCIÓN | | m ³ /a | 411,720.00 | |
| | | m ³ /mes | 34,310.00 | |
| | | m ³ /d | 1,128.00 | |
| | | GPM | 206.93 | |
| | | BBL/d | 7,094.91 | |
| COSTOS VARIABLES DE OPERACIÓN (VARIABLES) | | | Agua Neutralizada | |
| QUÍMICOS | CVU | U/M | CONSUMO | IMPORTE |
| SOSA | 0.6900 | \$USD/kg | 560,749.50 | \$ 386,917.16 |
| ENERGÉTICOS Y OTROS | CVU | U/M | CONSUMO | IMPORTE |
| ENERGÍA ELÉCTRICA | 0.1000 | \$USD/kW-h | 1,015,506.65 | \$ 101,550.67 |
| COSTOS VARIABLES DE OPERACIÓN UNITARIOS (VARIABLES) | | | | |
| COSTOS VARIABLES DE OPERACIÓN TOTAL ANUAL (VARIABLES) | | | \$USD/anual | \$ 488,467.82 |

5.2.4.1 Análisis de la evaluación económica

En el presente trabajo se presenta una estimación de costos de la propuesta técnica más viable, el caso de inversión inicial considera la instalación de todo el equipo e infraestructura para dejar al sistema de neutralización en punto cero, con una inversión de \$ 6,123,610 USD.

La presente inversión para la rehabilitación del sistema de neutralización genera un beneficio a largo plazo, se recupera la inversión en un proyección a 20 años, el proceso en sí no genera una ganancia monetaria para la Refinería, el cumplimiento adecuado de los residuos que genera a parte de la importante contribución que genera para el medio ambiente, los ahorros económicos que se obtiene por multas y recargos es muy alta, sobre todo porque en muchas ocasiones existen beneficios fiscales que pueden contribuir en la utilidad total de toda la planta.

Como se observa en la tabla 7 y 9 la comparación de los costos de operación actuales con los de rehabilitación, es menor y además se trata una cantidad mayor de efluente que como la actual operación.

Tabla 11. Calculo de CAE para el tratamiento de agua residual del sistema de neutralización

| Año | VP | VP acumulado | Año | VP | VP acumulado |
|-----|-----------------|-----------------|-----|---------------|--------------|
| 0 | \$ 6,123,610.00 | \$ 6,123,610 | 11 | \$ 140,422.83 | \$ 16,850.74 |
| 1 | \$ 436,161.98 | \$ 5,687,478.02 | 12 | \$ 125,377.52 | \$ 15,045.80 |
| 2 | \$ 389,403.56 | \$ 46,728.43 | 13 | \$ 111,944.22 | \$ 13,433.31 |
| 3 | \$ 347,681.75 | \$ 41,721.81 | 14 | \$ 99,950.19 | \$ 11,994.02 |
| 4 | \$ 310,430.13 | \$ 37,251.62 | 15 | \$ 89,241.24 | \$ 10,708.95 |
| 5 | \$ 277,169.76 | \$ 33,260.37 | 16 | \$ 79,679.68 | \$ 9,561.56 |
| 6 | \$ 247,473.00 | \$ 29,696.76 | 17 | \$ 71,142.57 | \$ 8,537.11 |
| 7 | \$ 220,958.04 | \$ 26,514.96 | 18 | \$ 63,520.16 | \$ 7,622.42 |
| 8 | \$ 197,283.96 | \$ 23,674.08 | 19 | \$ 56,714.42 | \$ 6,805.73 |
| 9 | \$ 176,146.39 | \$ 21,137.57 | 20 | \$ 50,637.88 | \$ 6,706.55 |
| 10 | \$ 157,273.56 | \$ 18,872.83 | | | |
| CAE | \$ 1,308,289.26 | | | | |

*Tasa social de descuento 12%

*Proyección a 20 años

5.2.5 Beneficios

Los principales beneficios que se obtienen por la rehabilitación del actual sistema es el reúso de las actuales instalaciones, además de que la planta de desmineralización está diseñada para un volumen de agua que requiera la expansión de la Refinería con nuevas plantas y procesos. Se garantiza con la modernización el funcionamiento continuo y seguro del sistema de neutralización, esto garantiza el tratamiento adecuado del agua residual cumpliendo con los parámetros establecidos en la norma mexicana.

Con la mejora en el actual sistema la operación permite un ahorro en el consumo de químicos necesarios para la neutralización, se hace un ahorro económico en materia de normatividad, pues al cumplir con todo lo requerido por la norma se evitan multas y pago de indemnizaciones. Se aprovecha en su totalidad las obras previamente realizadas y se alarga la vida útil de toda la planta.

A parte de los beneficios económicos que representa para la Refinería donde se encuentra el sistema, el compromiso social y ambiental que se asume por parte del Sistema Nacional de Refinación se cumple y propicia las condiciones para mejorar a la larga todos los procesos en sus diferentes centros de procesamiento de petróleo y gas. Este tipo de obras garantiza un mejor futuro y uso racional del agua, la inversión que se genera para alcanzar este tipo de metas va más allá de lo económico, sobre todo en México que la demanda de agua cada día aumenta de manera exponencial, por lo que hay que buscar soluciones para reabastecer el vital líquido.

Con todo lo anterior se cumple lo siguiente:

- ✓ Se cumplen las necesidades de infraestructura en el sistema de tratamiento de agua residual de la planta de desmineralización.
- ✓ Se garantiza con la presente propuesta el cumplimiento de la calidad del agua residual que se trata en la fosa de neutralización.
- ✓ Se disminuyen los costos de tratamiento y garantiza una operación continua del proceso de neutralización.
- ✓ Se aprovechó al máximo la infraestructura existente.
- ✓ Se determinó con precisión la volumetría de los requerimientos para asegurar el óptimo funcionamiento del sistema de neutralización.
- ✓ Actualizar e identificar las necesidades de infraestructura en los sistemas de tratamiento de agua desmineralizada en la fosa de neutralización.
- ✓ Garantizar la calidad del agua residual que se trata en la fosa de neutralización.
- ✓ Disminuir los costos de tratamiento y prevenir paros innecesarios.
- ✓ Aprovechar al máximo la infraestructura existente.
- ✓ Determinar con precisión la volumetría de los requerimientos para asegurar el óptimo funcionamiento del sistema de neutralización.

6 Conclusiones

El presente trabajo abordó un problema real de la industria de refinación en México, en donde una fosa de neutralización se encuentra operando, por debajo de su capacidad de diseño y de forma deficiente, por lo que se planteó y se resolvió el problema, evaluando técnica y económicamente la mejor alternativa para restablecer su capacidad de diseño, asegurando el cumplimiento de la normatividad mexicana correspondiente y actuando de acuerdo a las políticas de calidad y control ambiental de la refinería.

El diagnóstico realizado a este sistema determinó que no hay una buena planeación en el mantenimiento de toda la infraestructura y equipos, lo que ocasiona que la vida útil de operación a la cual se planteó el diseño original se reduzca de manera considerable a casi más de la mitad.

Con la evaluación de las alternativas, se determinó que la opción más viable para la modernización de la fosa se considera la rehabilitación, sustitución de todo el equipo e infraestructura para dejar al sistema de neutralización en punto cero, con una inversión de \$ 6,123,610.00 USD, garantizando que los flujos de diseño y operación queden cubiertos sin problema alguno, proyectando un sobre diseño del 10% en caso de que exista una emergencia.

Esto incluye el uso de equipo y material adecuado para un ambiente corrosivo, equipo de control e instrumentación automático con una medición exacta y confiable del pH. Esto garantizaría un ahorro importante en el consumo de agente neutralizante, reduciendo el impacto ambiental por el uso excesivo de estos químicos. Dentro de las recomendaciones para complementar este trabajo, es la propuesta de un programa de mantenimiento preventivo de los equipos principales, así como un programa de capacitación del personal que opera, que incluya aspectos básicos del proceso de neutralización para evitar accidentes y mejorar las practicas operativas en momentos de alguna irregularidad en el proceso original.

También se sugiere combinar las corrientes ácidas y básicas práctica de neutralización, esto ahorraría químicos y beneficia al cuerpo receptor donde se vierten los productos de la neutralización.

Por otro lado se propone que una vez que el efluente se ha neutralizado, utilizar un proceso terciario como la cristalización o desalado, con la finalidad de eliminar la excesiva cantidad de sal disuelta y de esta manera reutilizar el agua para algún proceso secundario que no requiera una calidad de agua alta.

De manera general, cualquier problema que existe en la industria en cuanto a las deficiencias de determinados procesos, pueden ser corregidos, muchas veces los costos de una mala operación superan los costos que tendría una reinversión que garantice un proceso seguro, fácil de operar y sobre todo beneficie al medio ambiente.

Finalmente cabe señalar que el presente estudio cumple con los objetivos planteados y permite establecer las bases para una ingeniería más detallada para la ejecución de rehabilitación.

BIBLIOGRAFÍA

LIBROS

- ❖ Sidney W. Benson “Cálculos Químicos” LIMUSA WILEY, 2007
- ❖ Bruce H. Mahan “Química curso universitario” ADDISON-WESLEY IBEROAMERICA, Segunda edición, 1987.
- ❖ Guía de los Fundamentos de la Dirección de Proyectos (Guía del PMBOK^R) Tercera Edición.
- ❖ Gabriela Baca Urbina “Fundamentos de Ingeniería Económica” Mc Graw Hill 2007
- ❖ Hoyle, D.L.& McMillan, G.K “pH Control”, Instrument Engineers Handbook Process Control, (Ed: Liptak G.B)
- ❖ Peters, Max S. And Timmerhaus Klaus D. “Plant Design and Economics for Chemical Engineers” Fourth edition Physicochemical Treatment Processes, Volume 3, L.K Wang; Y. Illus, Hardcover 2005.

ARTICULOS

- ✓ Piero M. Armenante NJIT “Neutralization of Acid and Alkaline Wastewaters” USA, 1998.
- ✓ IPIECA “Petroleum refining water/wastewater use and management” Operation Good Practice Series 2010.
- ✓ Lunwig Hoehenberg “Water treatment, Cycle Chemistry, Boiler Operation and Related Problems/Failures on Steam Generator System” Munich, Germany.
- ✓ PANORAMA 2011 “Water in fuel production oil production and refining”
- ✓ Louis E. Otts, Jr. “ Water Requirements of the Petroleum Refining Industry”
- ✓ Tratamiento de agua para calderas, THERMAL Engineering LTDA, Santiago de Chile 2010.

- ✓ Evaluation of the effectiveness of neutralization accidental spills of acid waste water from holding ponds, Hitech Sclutions, Inc. December 2004.
- ✓ Factors Affecting pH Change alkaline waste water treatment-I, L. Lijklema, Twente University of Technology, The Netherlands 2005.
- ✓ Los conflictos por agua en México. Diagnóstico y análisis, Mariana Becerra Pérez, Kaime Sáinz Santamaria y Carlos Muños, Universidad Metropolitana Noviembre 2007.
- ✓ Modeling and control studies of wastewater neutralization process, Abdul Aziz Ishak, Mohamed Azlan Hussain and Elman Ekanki, Instrumental Conference on Engineering and Technology, Buda Seri 2007
- ✓ Implementation of neural control of neutralization process, Derar Issan Abd, University of Thecnology Chemical Engineering Department 2009.

ANEXOS

ANEXO 1. Diagrama de tubería e instrumentación del sistema de neutralización

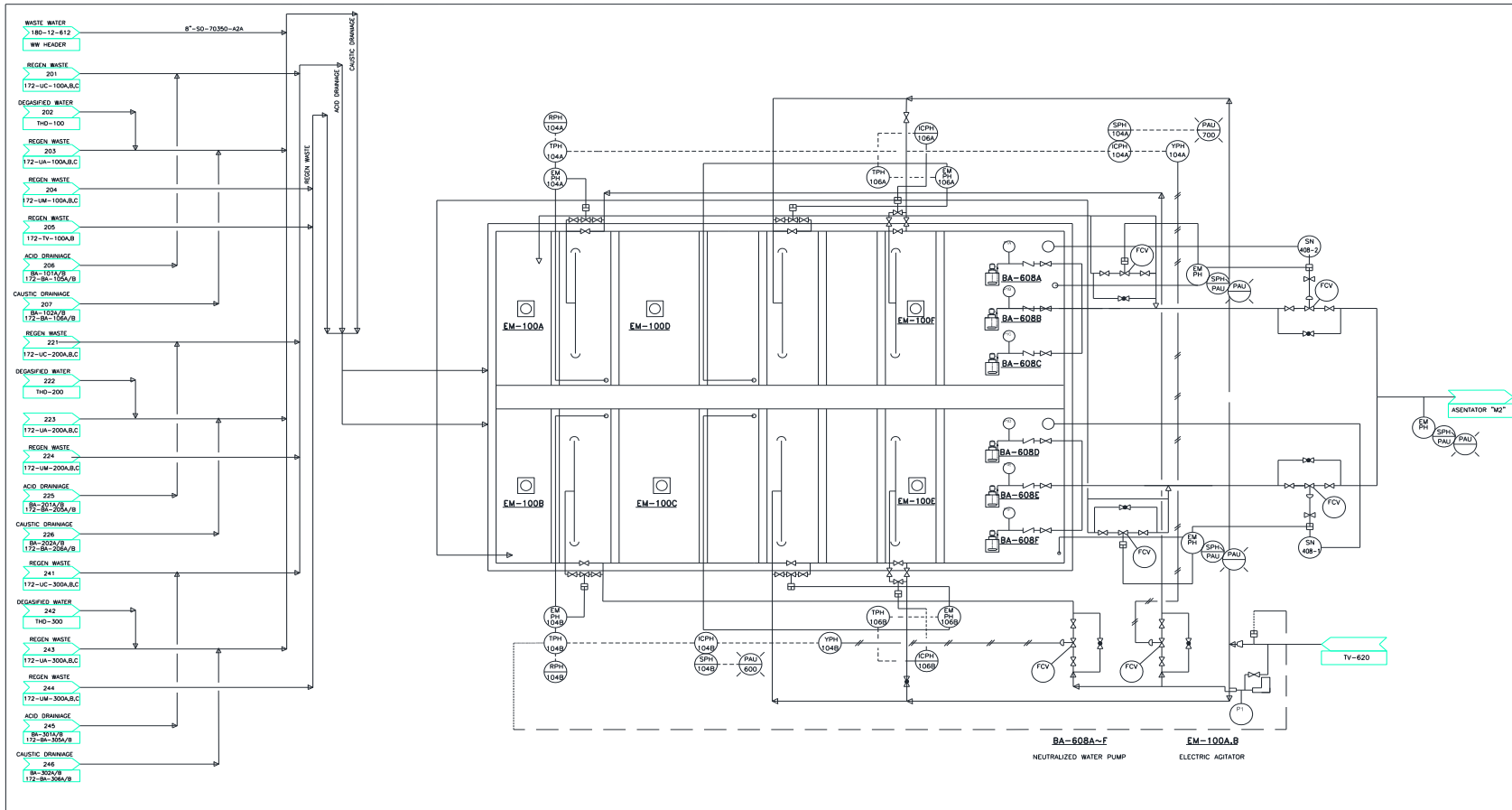


Figura 19. DTI (Diagrama de Tubería e Instrumentación)

ANEXO 2. Límite de calidad para el agua residual a la descarga en aguas y bienes nacionales

Tabla 12. Límites máximos permisibles para contaminantes básicos

| Parámetros (miligramos por litro, excepto cuando se especifique) | Ríos | | | | | | Embalses naturales y artificiales | | | | Aguas Costeras | | | | | |
|---|------------------------------|---------|---------------------------|---------|---------------------------------------|---------|--------------------------------------|---------|---------------------------|---------|--|---------|-------------------|---------|---------------|---------|
| | Uso de riego agrícola (A) | | Uso público urbano (B) | | Protección de vida acuática (C) | | Uso de riego agrícola (B) | | Uso público urbano (C) | | Explotación pesquera navegación y otros usos (A) | | Recreación (B) | | Estuarios (B) | |
| | P.M | P.D. | P.M. | P.D. | P.M. | P.D. | P.M | P.D. | P.D | P.M. | P.M. | P.D. | P.M. | P.D. | P.M. | P.D. |
| Temperatura °C (1) | N.A. | N.A. | 40 | 40 | 40 | 40 | 40 | 40 | 40 | 40 | 40 | 40 | 40 | 40 | 40 | 40 |
| Grasas y Aceites (2) | 15 | 25 | 15 | 25 | 15 | 25 | 15 | 25 | 15 | 25 | 15 | 25 | 15 | 25 | 15 | 25 |
| Materia Flotante (3) | Ausente | Ausente | Ausente | Ausente | Ausente | Ausente | Ausente | Ausente | Ausente | Ausente | Ausente | Ausente | Ausente | Ausente | Ausente | Ausente |
| Sólidos sedimentables (ml/l) | 1 | 2 | 1 | 2 | 1 | 2 | 1 | 2 | 1 | 2 | 1 | 2 | 1 | 2 | 1 | 2 |
| Sólidos suspensionados totales | 150 | 200 | 75 | 125 | 40 | 60 | 75 | 125 | 40 | 60 | 150 | 200 | 75 | 125 | 75 | 125 |
| Demanda Bioquímica de Oxígeno 5 | 150 | 200 | 75 | 150 | 30 | 60 | 75 | 150 | 30 | 60 | 150 | 200 | 75 | 150 | 75 | 150 |
| Nitrógeno Total | 40 | 60 | 40 | 60 | 15 | 25 | 40 | 60 | 15 | 25 | N.A. | N.A. | N.A. | N.A. | 15 | 25 |
| Fosfato Total | 20 | 30 | 20 | 30 | 5 | 10 | 20 | 30 | 5 | 10 | N.A. | N.A. | N.A. | N.A. | 5 | 10 |

(1) Instantáneo (2) Muestra Simple Promedio Ponderado (3) Ausente según el Método de Pruebas definido en la NMX-AA-006

P.D.= Promedio Diario P.M. Promedio Mensual; N.A. No aplica

*SEMARNAT Norma Oficial Mexicana 001 1996

ANEXO 3. Volumetría para la modernización del actual sistema de neutralización

Tabla 13. Catálogo de conceptos principales de la fosa de neutralización

| Partida No. | Descripción de conceptos | Cantidad | Unidad | Precio Unitario | Importe |
|-------------|--|----------|--------|-----------------|--------------------|
| 01 | Suministro e instalación de equipo de bombeo, para la descarga del sistema de neutralización. | 6 | PZ | \$73,200 | \$439,200 |
| 02 | Suministro e instalación de bomba para la dosificación de agente neutralizante. | 1 | PZ | \$58,500 | \$58,500 |
| 03 | Suministro e instalación de equipo de medición de pH | 6 | PZ | \$18,000 | \$108,000 |
| 04 | Suministro e instalación de equipo de medición de nivel en la fosa. | 2 | PZ | \$22,000 | \$44,000 |
| 05 | Suministro e instalación de equipo de medición de flujo a la descarga del sistema de neutralización. | 1 | PZ | \$25,000 | \$25,000 |
| 06 | Suministro e instalación de tubería de diferentes diámetros, para la rehabilitación de la red del sistema de neutralización. | 1 | LOTE | \$1,350,000 | \$1,350,000 |
| 07 | Suministro e instalación de válvulas de control de la red de agente neutralizante y descarga de agua neutralizada. | 1 | LOTE | \$1,600,000 | \$1,600,000 |
| 08 | Rehabilitación de la infraestructura de concreto y acero en el sistema de neutralización. | 1 | LOTE | \$67,700 | \$67,700 |
| 09 | Suministro e instalación de accesorios para toda la red de tubería del sistema de neutralización. | 1 | LOTE | \$1,157,600 | \$1,157,600 |
| | | | | Total | \$4,850,000 |

*Para los precios de los diferentes rubros, se realizaron cotizaciones con diferentes empresas que se encargan de suministrar los servicios y/o equipos ya mencionados, tomando en cuenta que para decidir cuál era la mejor opción, se buscó precio, calidad y sobre todo que cumpla con las normas internas del SNR.

ANEXO 4. Cálculo de los tiempos de residencia y tiempos de vaciado del actual sistema de neutralización

El flujo de alimentación de diseño de la planta de desmineralización es 1200 m³/h y tiene una eficiencia del 95%, es decir que el 5% del flujo que entra es agua residual generada por la regeneración lavado y enjuague de las resinas de intercambio iónico.

El sistema de bombeo que posee la fosa, tiene una capacidad de bombeo de agua neutralizada de 1362 m³/h (cada bomba opera con una capacidad de 1500 GPM, se utilizan 4 equipos con estas características) Pero la eficiencia de las bombas es de 62.5% por lo que la capacidad de cada bomba para desalojar el agua neutralizada es de 212.9 m³/h.

$$t_{\text{vaciado}} = \frac{1800m^3}{4 \left(212.9 \frac{m^3}{h} \right)} = 2 \text{ horas y } 12 \text{ minutos}$$

$$\text{Flujo de entrada a la fosa} = 1200 \frac{m^3}{h} (0.05)^* = 60 \frac{m^3}{h}$$

*La eficiencia de la planta es del 95%, es decir que el 5% restante representa el agua residual**

$$t_{\text{llenado}} = \frac{1800m^3}{60 \frac{m^3}{h}} = 30 \text{ horas es el tiempo que tarda en llenarse toda la fosa}$$

$$* t_{\text{neutralización}} = 1 \text{ hora } 30 \text{ minutos}$$

Con lo anteriormente expresado se puede concluir que el sistema de neutralización actualmente instalado y una vez rehabilitado cumple con las características del proceso mismo de neutralización y de vaciado. El tiempo de neutralización es de acuerdo a la concentración del agente neutralizante y del sistema de agitación, el cual también se puede determinar, pero no es parte de los objetivos del presente trabajo, sin embargo el sistema que se instaló en la reconfiguración garantiza la óptima homogenización, de acuerdo a revisiones de datos proporcionadas por el centro de trabajo.

ANEXO 5. Curva de titulación

Titulación ácido fuerte-base fuerte

En solución acuosa, los ácidos y las bases fuertes se encuentran totalmente disociados. Por lo tanto, el pH a lo largo de la titulación se puede calcular directamente de las cantidades estequiométricas de ácido y base que van reaccionando. En el punto de equivalencia el pH está determinado por el grado de disociación del agua; a 25°C el pH del agua pura es de 7,00. Las características que mayormente se presentan en el agua residual del sistema de neutralización tiene la peculiaridad de tener un valor de pH en promedio de 3.5 En la siguiente tabla se presentan los valores de pH a lo largo de la titulación de una solución con las características similares a la encontrada en el sistema de neutralización.

Tabla 14. Titulación de un ácido fuerte con NaOH (NaOH es de 0.1M)

| ml de NaOH | Volumen de solución | pH, HCl |
|------------|---------------------|---------|
| 0,00 | 50,0 | 1,00 |
| 10,00 | 60,0 | 1,18 |
| 20,00 | 70,0 | 1,37 |
| 25,00 | 75,0 | 1,48 |
| 30,00 | 80,0 | 1,60 |
| 40,00 | 90,0 | 1,95 |
| 49,00 | 99,0 | 3,00 |
| 49,90 | 99,9 | 4,00 |
| 49,95 | 99,95 | 4,30 |
| 50,00 | 100,0 | 7,00 |
| 50,05 | 100,05 | 9,70 |
| 50,10 | 100,10 | 10,00 |
| 51,00 | 101,0 | 11,00 |
| 60,00 | 110,0 | 11,96 |
| 70,00 | 120,0 | 12,23 |

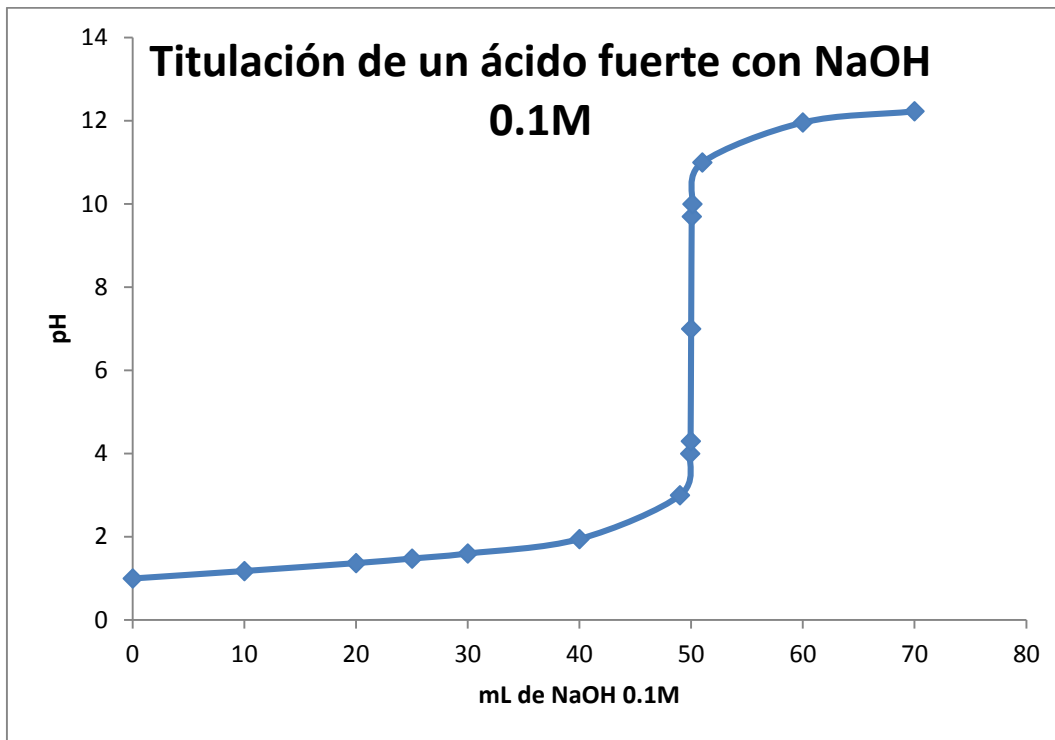


Figura 20. Curva de titulación de un ácido fuerte con un agente neutralizante fuerte (NaOH 0.1M)

En la figura 21 se muestra la curva de titulación. Nótese que al principio el pH se eleva en forma gradual a medida que se adiciona el titulante, se eleva con mayor rapidez cuando se aproxima al punto de equivalencia y luego se incrementa alrededor de 5.4 unidades con la adición de solo 0.1 mL de NaOH en el punto de equivalencia. Después del punto de equivalencia, el pH de nuevo se eleva en forma gradual a medida que se agrega más NaOH

La grafica describe de igual modo lo que sucede en el actual sistema de neutralización, la diferencia es que se busca mantener el pH entre 6-9, de acuerdo a lo establecido en la norma, para evitar daños al sistema y al cuerpo donde se vierten estos desechos, por otro lado es importante realizar este tipo de ejercicios de manera periódica para asegurar el buen funcionamiento del sistema, así como las modificaciones pertinentes que se requieren realizar en la concentración del agente neutralizante, dependiendo del comportamiento de nuestra agua residual.

ANEXO 6. CALCULO DE LA DOSIFICACIÓN DE AGENTE NEUTRALIZANTE

A continuación se desarrolla la metodología para determinar la cantidad de agente neutralizante que se necesita agregar para subir el valor de pH de una solución ácida. Retomando la información recabada en el presente trabajo el pH que se tiene en promedio de los enjuagues y retrolavados de las resinas es de un pH= 3.5, si la norma exige tener el valor de pH dentro de un rango de 6 a 9, por lo que para fines de cálculo el pH tiene un valor de 7.

El valor de pH de la solución es: $pH = 3.5$

El valor de pH que deseamos alcanzar: $pH = 7.0$

$$pH = 7.0 - 3.5 = 3.5$$

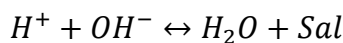
Retomando la definición de $pH = -\text{Log}[H^+]$

Despejamos al ión hidrogeno de la ecuación de pH

$$[H^+] = 10^{-pH}$$

$$[H^+] = 10^{-3.5} = 3.163 \times 10^{-4} \frac{\text{mol}}{\text{litro}}$$

Definición de reacción de neutralización



Esto significa que por cada mol de H^+ necesitamos 1 mol de OH^- , por lo que:

$$3.163 \times 10^{-4} \frac{\text{mol}}{\text{litro}} \text{ de } H^+ \text{ necesitan } 3.163 \times 10^{-4} \frac{\text{mol}}{\text{litro}} \text{ de } OH^-$$

$$\text{Por lo tanto se necesitan } 3.163 \times 10^{-4} \frac{\text{mol de } OH^-}{\text{litro}} \text{ por } \frac{1 \text{ mol NaOH}}{1 \text{ mol } OH^-}$$

$$\text{mol NaOH} = \text{Moles de } OH^- \times \text{Volúmen de la solución ácida}$$

El volumen de la fosa de neutralización con la solución ácida es de 1800 m³ que equivalen a 180,000 litros

$$3.163 \times 10^{-4} \frac{\text{mol de } OH^-}{\text{litro}} \left(\frac{1 \text{ mol NaOH}}{1 \text{ mol } OH^-} \right) = 3.163 \times 10^{-4} \frac{\text{mol}}{\text{litro NaOH}} (1.8 \times 10^6 \text{ litros})$$

$$569.34 \text{ mol NaOH}$$

$$569.34 \text{ mol NaOH} \left(39.9959 \frac{\text{g}}{\text{mol NaOH}} \right) = 22,771.26 \text{ g de NaOH}$$

Como la solución de NaOH que se utiliza tiene una concentración al 50 % en peso, se determinó los gramos que se necesitan de esta solución para bajar el pH al valor requerido:

$$50 \text{ g NaOH puro} = 11,385.63 \text{ g de solución NaOH 50\%}$$

Es decir que se necesitan 11.38 kilogramos de solución de NaOH al 50% para elevar el pH de 3.5 a 7.0 en 180,000 litros de solución ácida.

Teóricamente la densidad esta alrededor de 1.530 Kg/litro (@ 15.6 °C)

$$\frac{11.38 \text{ Kg de NaOH 50\%}}{1.53 \frac{\text{Kg}}{\text{litro}} \text{ NaOH 50\%}} = 7.437 \text{ litros de NaOH al 50\%}$$

De esta manera se puede determinar la cantidad de agente neutralizante que se necesita para obtener valores de pH específicos, esto aplica partiendo de que la homogenización es del 100% para poder manejar el volumen como una solución, es importante decir que el flujo puede estar dado en litros, metros cúbicos, días, etc. El volumen que se maneja para la neutralización no depende de esta unidad, como se observa el cálculo está basado en un volumen total de solución, para mayor practicidad al momento de determinar el valor exacto que se debe agregar al momento de neutralizar una solución.

ANEXO 7. Hoja de cálculo de las variables económicas

| | B | C | D | E | F | G | H | I | J | K | L | M | N | O |
|----|---|--------------|-----------|---|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|
| 4 | Horizonte de evaluación | | | | 0 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 |
| 5 | % Operación | | | | 0% | 0% | 100% | 100% | 100% | 100% | 100% | 100% | 100% | 100% |
| 6 | BALANCE DE MATERIA | | | | | | | | | | | | | |
| 7 | QUÍMICOS | CONSUMO | UNIDADES | | | | | | | | | | | |
| 8 | SOSA | 560,749.50 | m³/a | - | 560,749.50 | 560,749.50 | 560,749.50 | 560,749.50 | 560,749.50 | 560,749.50 | 560,749.50 | 560,749.50 | 560,749.50 | 560,749.50 |
| 9 | ENERGÉTICOS Y OTROS | | | | | | | | | | | | | |
| 10 | ENERGÍA ELÉCTRICA | 1,015,506.65 | kW/a | - | 1,015,506.65 | 1,015,506.65 | 1,015,506.65 | 1,015,506.65 | 1,015,506.65 | 1,015,506.65 | 1,015,506.65 | 1,015,506.65 | 1,015,506.65 | 1,015,506.65 |
| 11 | PRECIOS (USD\$/UNIDAD) | | | | | | | | | | | | | |
| 12 | QUÍMICOS | CVU | U/M | | | | | | | | | | | |
| 13 | SOSA | \$0.69 | SUSD/kg | - | \$0.69 | \$0.69 | \$0.69 | \$0.69 | \$0.69 | \$0.69 | \$0.69 | \$0.69 | \$0.69 | \$0.69 |
| 14 | ENERGÉTICOS Y OTROS | | | | | | | | | | | | | |
| 15 | ENERGÍA ELÉCTRICA | \$0.10 | SUSD/kW-h | - | \$0.10 | \$0.10 | \$0.10 | \$0.10 | \$0.10 | \$0.10 | \$0.10 | \$0.10 | \$0.10 | \$0.10 |
| 16 | IMPORTES ANUALES (\$USD) | | | | 2013 | 2014 | 2015 | 2016 | 2017 | 2018 | 2019 | 2020 | 2021 | 2022 |
| 17 | Horizonte de evaluación | | | | 0 | 0% | 100% | 100% | 100% | 100% | 100% | 100% | 100% | 100% |
| 18 | COSTOS VARIABLES DE PRODUCCIÓN (USD\$ ANUALES) | | | | | | | | | | | | | |
| 19 | QUÍMICOS | COSTO | U/M | | | | | | | | | | | |
| 20 | SOSA | \$386,917.16 | SUSD/a | - | \$386,917.16 | \$386,917.16 | \$386,917.16 | \$386,917.16 | \$386,917.16 | \$386,917.16 | \$386,917.16 | \$386,917.16 | \$386,917.16 | \$386,917.16 |
| 21 | ENERGÉTICOS Y OTROS | | | | | | | | | | | | | |
| 22 | ENERGÍA ELÉCTRICA | \$101,550.67 | SUSD/a | - | \$101,550.67 | \$101,550.67 | \$101,550.67 | \$101,550.67 | \$101,550.67 | \$101,550.67 | \$101,550.67 | \$101,550.67 | \$101,550.67 | \$101,550.67 |
| 23 | TOTAL COSTOS VARIABLES DE PRODUCCIÓN | | | | - | 488,467.82 | 488,467.82 | 488,467.82 | 488,467.82 | 488,467.82 | 488,467.82 | 488,467.82 | 488,467.82 | 488,467.82 |
| 24 | Costos Fijos Directos | | | | | | | | | | | | | |
| 25 | Mantenimiento preventivo 3% | 183,708.30 | | - | 183,708.30 | 183,708.30 | 183,708.30 | 183,708.30 | 183,708.30 | 183,708.30 | 183,708.30 | 183,708.30 | 183,708.30 | 183,708.30 |
| 26 | Total Costos Fijos Directos | 183,708.30 | | - | 183,708.30 | 183,708.30 | 183,708.30 | 183,708.30 | 183,708.30 | 183,708.30 | 183,708.30 | 183,708.30 | 183,708.30 | 183,708.30 |
| 27 | BALANCE DE PÉRDIDAS (\$USD) | | | | | | | | | | | | | |
| 28 | Costo Total en Efectivo de Operación | | | | - | 672,176.12 | 672,176.12 | 672,176.12 | 672,176.12 | 672,176.12 | 672,176.12 | 672,176.12 | 672,176.12 | 672,176.12 |
| 29 | Inversiones Totales y Capital de Trabajo | | | | 6,123,610.00 | - | - | - | - | - | - | - | - | - |
| 30 | VALOR PRESENTE | | | | 6,123,610.00 | 436,131.98 | 389,403.56 | 347,681.75 | 310,430.13 | 277,169.76 | 247,473.00 | 220,958.04 | 197,283.96 | 176,146.39 |
| 31 | | | | | | 5,687,478.02 | 46,728.43 | 41,721.81 | 37,251.62 | 33,260.37 | 29,696.76 | 26,514.96 | 23,674.08 | 21,137.57 |

| | | |
|--|-----------|-----------------------|
| CAE | | \$1,308,289.26 |
| $f_{costo} = \frac{i(1+i)^n * i}{(1+i)^n - 1}$ | | |
| i= Tasa social de descuento | 12% | |
| n= | 20 AÑOS | |
| f= | 0.1338788 | |

| | L | M | N | O | P | Q | R | S | T | U | V | W | X | Y | Z | AA |
|----|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|----|
| | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 | 15 | 16 | 17 | 18 | 19 | 20 | |
| 5 | 100% | 100% | 100% | 100% | 100% | 100% | 100% | 100% | 100% | 100% | 100% | 100% | 100% | 100% | 100% | |
| 6 | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 7 | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 8 | 560,749.50 | 560,749.50 | 560,749.50 | 560,749.50 | 560,749.50 | 560,749.50 | 560,749.50 | 560,749.50 | 560,749.50 | 560,749.50 | 560,749.50 | 560,749.50 | 560,749.50 | 560,749.50 | 560,749.50 | |
| 9 | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 10 | 1,015,506.65 | 1,015,506.65 | 1,015,506.65 | 1,015,506.65 | 1,015,506.65 | 1,015,506.65 | 1,015,506.65 | 1,015,506.65 | 1,015,506.65 | 1,015,506.65 | 1,015,506.65 | 1,015,506.65 | 1,015,506.65 | 1,015,506.65 | 1,015,506.65 | |
| 11 | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 12 | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 13 | \$0.69 | \$0.69 | \$0.69 | \$0.69 | \$0.69 | \$0.69 | \$0.69 | \$0.69 | \$0.69 | \$0.69 | \$0.69 | \$0.69 | \$0.69 | \$0.69 | \$0.69 | |
| 14 | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 15 | \$0.10 | \$0.10 | \$0.10 | \$0.10 | \$0.10 | \$0.10 | \$0.10 | \$0.10 | \$0.10 | \$0.10 | \$0.10 | \$0.10 | \$0.10 | \$0.10 | \$0.10 | |
| 16 | 2019 | 2020 | 2021 | 2022 | 2023 | 2024 | 2025 | 2026 | 2027 | 2028 | 2029 | 2030 | 2031 | 2032 | 2033 | |
| 17 | 100% | 100% | 100% | 100% | 100% | 100% | 100% | 100% | 100% | 100% | 100% | 100% | 100% | 100% | 100% | |
| 18 | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 19 | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 20 | \$386,917.16 | \$386,917.16 | \$386,917.16 | \$386,917.16 | \$386,917.16 | \$386,917.16 | \$386,917.16 | \$386,917.16 | \$386,917.16 | \$386,917.16 | \$386,917.16 | \$386,917.16 | \$386,917.16 | \$386,917.16 | \$386,917.16 | |
| 21 | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 22 | \$101,550.67 | \$101,550.67 | \$101,550.67 | \$101,550.67 | \$101,550.67 | \$101,550.67 | \$101,550.67 | \$101,550.67 | \$101,550.67 | \$101,550.67 | \$101,550.67 | \$101,550.67 | \$101,550.67 | \$101,550.67 | \$101,550.67 | |
| 23 | 488,467.82 | 488,467.82 | 488,467.82 | 488,467.82 | 488,467.82 | 488,467.82 | 488,467.82 | 488,467.82 | 488,467.82 | 488,467.82 | 488,467.82 | 488,467.82 | 488,467.82 | 488,467.82 | 488,467.82 | |
| 24 | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 25 | 183,708.30 | 183,708.30 | 183,708.30 | 183,708.30 | 183,708.30 | 183,708.30 | 183,708.30 | 183,708.30 | 183,708.30 | 183,708.30 | 183,708.30 | 183,708.30 | 183,708.30 | 183,708.30 | 183,708.30 | |
| 26 | 183,708.30 | 183,708.30 | 183,708.30 | 183,708.30 | 183,708.30 | 183,708.30 | 183,708.30 | 183,708.30 | 183,708.30 | 183,708.30 | 183,708.30 | 183,708.30 | 183,708.30 | 183,708.30 | 183,708.30 | |
| 27 | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 28 | 672,176.12 | 672,176.12 | 672,176.12 | 672,176.12 | 672,176.12 | 672,176.12 | 672,176.12 | 672,176.12 | 672,176.12 | 672,176.12 | 672,176.12 | 672,176.12 | 672,175.12 | 672,176.12 | 672,176.12 | |
| 29 | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | |
| 30 | 247,473.00 | 220,958.04 | 197,283.96 | 176,146.39 | 157,273.56 | 140,422.83 | 125,377.52 | 111,944.22 | 99,950.19 | 89,241.24 | 79,679.68 | 71,142.57 | 63,520.16 | 56,714.42 | 50,637.88 | |
| 31 | 29,696.76 | 26,514.96 | 23,674.08 | 21,137.57 | 18,872.83 | 16,850.74 | 15,045.30 | 13,433.31 | 11,994.02 | 10,708.95 | 9,561.56 | 8,537.11 | 7,622.42 | 6,805.73 | 6,076.55 | |