



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE QUÍMICA

PROCESO DE RECUPERACIÓN DE MONOETILENGLICOL

A PARTIR DE UN RESIDUO INDUSTRIAL

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL TITULO DE

I N G E N I E R O Q U Í M I C O

P R E S E N T A

A R T U R O N A V A G U E R R E R O



MÉXICO, DF.

2007



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 | Prof. Torres Merino Jesús |
| Vocal | Prof. Silva Pichardo Genovevo |
| Secretario | Prof. Galicia Pineda María Luisa |
| Primer Suplente | Prof. Gutiérrez Alejandro Aída |
| Segundo suplente | Prof. Vargas Hernández María de los Ángeles |

Sitio donde se desarrolló el tema:

Laboratorio de Ingeniería Química.
Facultad de Química.
UNAM.

Asesor

Dr. Jesús Torres Merino

Sustentante

Arturo Nava Guerrero

Expreso sincera gratitud:

A mis padres por su amor, comprensión y apoyo incondicional a lo largo de mi vida.

A mis hermanos y mi Tío por su gran apoyo.

A Silvia por su apoyo incondicional, confianza y tiempo.

Al Dr. Jesús Torres por su apoyo incondicional, asesoría, consejo y tiempo.

A mis amigos: Joaquín, Zapata, Miguel Ángel, Quique, Minerva, Adriana, Karla, Noemí, Liz, Rafa, Rene, Pancho, Mateo, Pirria, Rogelio, Nelly, Jhon, Rodrigo, Ale, Hugo, Horacio, Gerardo, Fernando.

Agradezco:

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE



MÉXICO

A la UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO por la oportunidad que me ha dado de realizar mis estudios.

Al Dr. Torres por su contribución como asesor en el presente trabajo de tesis y por los apoyos otorgados.

A los miembros del jurado por las observaciones y comentarios que sirvieron para mejorar este trabajo.

CONTENIDO

| | Página |
|---|-----------|
| <u>1 INTRODUCCIÓN</u> | 1 |
| 1.1 OBJETIVOS | 4 |
| 1.1.1 OBJETIVO | 4 |
| 1.1.2 OBJETIVOS PARTICULARES | 4 |
| <u>2 ANTECEDENTES</u> | 5 |
| 2.1 MONOETILENGLICOL (MEG) | 5 |
| 2.1.1 ALCOHOLES POLIHÍDRICOS | 6 |
| 2.1.2 USOS INDUSTRIALES DEL MONOETILENGLICOL | 7 |
| 2.1.3 TOXICIDAD DE MONOETILENGLICOL | 8 |
| 2.1.4 ALMACENAJE Y MANEJO DE GLICOLES | 8 |
| 2.2 DISPOSICIÓN DE GLICOLES | 9 |
| 2.3 PRODUCCIÓN NACIONAL DE GLICOLES | 9 |
| 2.4 RECUPERACIÓN DE DISOLVENTES | 11 |
| 2.4.1 DISOLVENTES COMO RESIDUOS INDUSTRIALES | 11 |
| 2.4.2 ESTRATEGIA DE MANEJO DE LOS RESIDUOS INDUSTRIALES | 13 |
| 2.5 SEPARACION DE DISOLVENTES EN RESIDUOS | 16 |
| 2.6 MANEJO SEGURO DE DISOLVENTES | 17 |
| 2.6.1 RIESGOS FÍSICOS | 18 |
| 2.6.2 RIESGOS DE REACTIVIDAD QUÍMICA | 20 |
| 2.6.3 RIESGOS A LA SALUD | 21 |
| <u>3 COAGULACIÓN</u> | 22 |
| 3.1 COLOIDES | 24 |

| | | |
|------------|--|-----------|
| 3.1.1 | CARACTERÍSTICAS COLOIDALES | 25 |
| 3.1.2 | COAGULACIÓN DE COLOIDES (DESESTABILIZACIÓN) | 27 |
| 3.2 | COAGULANTES | 29 |
| 3.2.1 | CARACTERÍSTICAS DE LOS COAGULANTES. | 30 |
| 3.2.2 | MECANISMOS DE COAGULACIÓN | 30 |
| 3.3 | COADYUDANTES | 35 |
| 3.4 | MEZCLADO RAPIDO | 35 |
| 4 | FLOCULACION | 40 |
| <hr/> | | |
| 4.1 | MECÁNICA DEL PROCESO | 41 |
| 4.2 | FLOCULACIÓN ORTOCINÉTICA | 41 |
| 4.3 | FACTORES QUE INFLUYEN EN LA FLOCULACIÓN | 42 |
| 4.3.1 | NATURALEZA DEL SOLVENTE | 42 |
| 4.3.2 | VARIACIÓN DEL CAUDAL | 43 |
| 4.3.3 | TIEMPO DE FLOCULACIÓN. | 43 |
| 4.3.4 | INFLUENCIA DEL GRADIENTE DE VELOCIDAD | 43 |
| 4.3.5 | FLOCULADORES | 44 |
| 5 | DESARROLLO EXPERIMENTAL. | 49 |
| <hr/> | | |
| 5.1 | MUESTRA DE RESIDUO | 49 |
| 5.2 | METODOLOGÍA DE PURIFICACIÓN | 50 |
| 5.3 | PROCEDIMIENTO | 53 |
| 5.4 | RESULTADOS EXPERIMENTALES | 55 |
| 5.4.1 | RESULTADOS COAGULACIÓN FLOCULACIÓN | 55 |
| 5.4.2 | RESULTADOS DE DESTILACIÓN A PRESIÓN REDUCIDA | 59 |
| 5.4.3 | ANÁLISIS DE MEG PURIFICADO | 62 |

| | | |
|------------|---|-----------|
| 5.5 | DISCUSIÓN DE RESULTADOS | 63 |
| 5.6 | CONCLUSIONES DE LA PARTE EXPERIMENTAL | 65 |
| 6 | <u>DISEÑO DE PROCESO</u> | 67 |
| 6.1 | GENERALIDADES | 67 |
| 6.1.1 | FUNCIÓN DE LA PLANTA | 67 |
| 6.2 | TIPO DE PROCESO | 67 |
| 6.2.1 | CAPACIDAD, RENDIMIENTO Y FLEXIBILIDAD | 67 |
| 6.3 | FLEXIBILIDAD | 68 |
| 6.3.1 | TIPO DE CARGA | 68 |
| 6.3.2 | FALLA DE ENERGÍA ELÉCTRICA | 68 |
| 6.3.3 | FALLA DE GAS COMBUSTIBLE | 68 |
| 6.3.4 | FALLA DE INSTRUMENTOS | 69 |
| 6.4 | ESPECIFICACIÓN DE LAS ALIMENTACIONES | 69 |
| 6.5 | ESPECIFICACIÓN DE LOS PRODUCTOS | 70 |
| 6.5.1 | MONOETILENGLICOL | 70 |
| 6.5.2 | ESPECIFICACIÓN DE LOS SUBPRODUCTOS | 71 |
| 6.5.3 | CONDICIONES DE LAS ALIMENTACIONES EN LÍMITES DE BATERÍA | 71 |
| 6.5.4 | CONDICIONES DE LOS PRODUCTOS EN LÍMITES DE BATERÍA | 71 |
| 6.5.5 | CONDICIONES DE LOS SUBPRODUCTOS EN LÍMITES DE BATERÍA | 71 |
| 6.5.6 | AGENTES QUÍMICOS | 72 |
| 6.6 | ELIMINACIÓN DE DESECHOS | 72 |
| 6.6.1 | DESCRIPCIÓN | 72 |
| 6.7 | SERVICIOS AUXILIARES | 72 |
| 6.7.1 | ACEITE TÉRMICO | 73 |

| | | |
|-------------|--|-----------|
| 6.7.2 | AGUA | 73 |
| 6.7.3 | AGUA DE ENFRIAMIENTO | 74 |
| 6.7.4 | AGUA PARA SERVICIOS | 74 |
| 6.7.5 | AGUA CONTRA INCENDIO | 74 |
| 6.7.6 | AGUA POTABLE | 74 |
| 6.7.7 | COMBUSTIBLE | 74 |
| 6.7.8 | ALIMENTACIÓN DE ENERGIA ELECTRICA | 75 |
| 6.7.9 | TELÉFONOS | 75 |
| 6.8 | SISTEMAS DE SEGURIDAD | 75 |
| 6.8.1 | SISTEMAS CONTRA INCENDIO | 75 |
| 6.8.2 | PROTECCIÓN DE PERSONAL | 76 |
| 6.8.3 | CONDICIONES CLIMATOLÓGICAS | 76 |
| 6.9 | LOCALIZACIÓN DE LA PLANTA | 78 |
| 6.10 | CRITERIOS Y BASES PARA DISEÑO DE EQUIPO | 78 |
| 6.10.1 | CALENTADORES A FUEGO DIRECTO | 78 |
| 6.10.2 | INTERCAMBIADORES DE CALOR | 79 |
| 6.10.3 | ENFRIADORES CON AIRE | 80 |
| 6.10.4 | TANQUES DE ALMACENAMIENTO | 79 |
| 6.10.5 | BOMBAS | 80 |
| 6.10.6 | SEDIMENTADOR | 80 |
| 6.10.7 | TANQUE DE COAGULACIÓN | 81 |
| 6.10.8 | TANQUE DE FLOCULACIÓN | 81 |
| 6.11 | CONSIDERACIONES GENERALES DE DISEÑO | 82 |
| 6.12 | NORMAS, CÓDIGOS Y ESPECIFICACIONES | 83 |

| | | |
|-------------|---|-------------|
| 6.13 | DESCRIPCION DEL PROCESO | 83 |
| 6.14 | ESTUDIO GENERAL DE FACTIBILIDAD | 87 |
| 7 | CONCLUSIONES | 89 |
| 8 | BIBLIOGRAFÍA | 91 |
| | ANEXO1 DIAGRAMAS | I |
| | ANEXO 2 SUPERFLOCULANTE-COAGULANTE | VI |
| | ANEXO 3 HOJA SE SEGURIDAD DE ETILENGLICOL | VIII |
| | ANEXO 4 MEMORIAS DE CALCULO: MEZCLADOR FLASH | IX |
| | ANEXO 5 MEMORIAS DE CALCULO: MEZCLADOR LENTO | XI |

1 INTRODUCCIÓN

El tema de los residuos industriales, su minimización y control, es de importancia creciente, a la luz de las necesidades concurrentes de protección ambiental y competitividad. De hecho es un tema por excelencia de interfase entre política industrial y medio ambiente. Abordar la problemática de los residuos industriales significa en el fondo examinar procesos, productos, tecnologías, insumos, diseño y administración de calidad en las empresas.

La industria utiliza materias primas para obtener productos finales con valor agregado, mediante procesos que básicamente separan, transforman y purifican los insumos.

Hoy en día es muy importante desarrollar procesos limpios, evitando la generación de residuos que dañen el ambiente, nuestro hábitat. La generación de residuos tanto en agua, aire y suelo se ven reflejados en cambios climáticos adversos al ecosistema. Hay que recordar que la naturaleza tiene la capacidad de procesar los residuos que generamos, ejemplo de esto es: el ciclo del carbono, ciclo del nitrógeno, ciclo del fósforo, por lo que se debe imitar en lo más posible a la naturaleza para diseñar ciclos productivos o de recuperación cerrados.

En la minimización de residuos en empresas industriales se plantea la opción de utilizar medidas administrativas y operativas que permitan disminuir, hasta niveles económicos y técnicamente factibles la cantidad y peligrosidad de los residuos que precisen un tratamiento o eliminación final.

De acuerdo a lo mencionado la presente tesis plantea un proceso en el cual se purifica monoetilenglicol a partir de un residuo industrial en la planta Disolventes del Río, ubicada en Tultitlán Estado de México, que se dedica a la recuperación y venta de este tipo de disolventes.

Como antecedente es importante mencionar que el monoetilenglicol se recuperaba por destilación "batch" y como producto resultante se obtenía un destilado contaminado con polímero.

Este producto al ser utilizado para la elaboración de anticongelantes producía efectos indeseables debido al gran porcentaje de polímero contenido como impureza.

El problema presentado por la empresa involucraba el tratamiento de un residuo proveniente de una reacción de polimerización, por lo que éste, al ser tratado preliminarmente, por diversos métodos de separación, tales como: la decantación, la filtración, la destilación, resultaron inapropiados para purificar el monoetilenglicol como producto a reciclar.

El problema consiste en recuperar el monoetilenglicol contenido en mezclas de desecho, eliminando los polímeros y otras impurezas.

Para determinar el método que permitiera eliminar las impurezas, constituidas fundamentalmente por polímeros se realizó una investigación bibliográfica para implementar un proceso limpio y eficiente.

De acuerdo con este estudio [14] se concluyó que el MEG forma emulsiones con una gran variedad de polímeros ya que se utiliza como disolvente, como reactante y como medio de reacción en procesos de polimerización.

Una de las técnicas más importantes para separar estas emulsiones principia por su desestabilización. Por lo que había que desestabilizar esta emulsión de este residuo industrial para que sedimentara más rápidamente.

El método de coagulación-floculación permite la desestabilización del polímero y aglomerarlo para su posterior sedimentación, logrando separar el polímero de la emulsión.

En esta tesis se propone desarrollar un proceso limpio de purificación técnica y económicamente factible que permita la recuperación de monoetilenglicol de alta pureza. También aporta herramientas útiles para futuras investigaciones, trabajos o problemas similares. Las herramientas fundamentales propuestas, son la metodología para determinar los parámetros de coagulación-floculación.

El presente trabajo nos muestra las pautas para la solución de un problema industrial, aportando al ingeniero Químico la capacidad de desarrollar metodologías para enfrentar problemas de purificación de residuos.

Este trabajo se ha desarrollado en seis capítulos: el primer capítulo se muestra una introducción y se plantean los objetivos de la tesis.

El segundo capítulo presenta generalidades del monoetilenglicol, como sus características físicas y químicas, sus usos, así como su producción. También se plantea un panorama general de sistemas de tratamiento de residuos y en particular de recuperación de disolventes, se analizan además las implicaciones de estos procesos.

El capítulo tres se refiere a la primera etapa de la estrategia de purificación, en particular es la coagulación, como operación preliminar para desestabilizar el polímero.

El capítulo cuatro concibe la floculación como procedimiento en el cual las partículas desestabilizadas se aglomeran (formación de flóculos) para su posterior sedimentación y finalmente su eliminación por decantación.

En el capítulo cinco se muestra la parte experimental, donde se obtienen los parámetros para las condiciones de operación.

En el capítulo seis se plantea el proceso de forma integral, que permite visualizar las diferentes etapas de recuperación y purificación del monoetilenglicol de alta pureza. También se aborda el análisis económico, que permite proponer a la empresa la implementación del proceso.

Finalmente se presentan las conclusiones y recomendaciones para la recuperación de monoetilenglicol de alta pureza a partir de un residuo industrial en particular.

1.1 OBJETIVOS

1.1.1 Objetivo

- ⊞ Recuperar monoetilenglicol a partir de un residuo industrial proveniente de una reacción de polimerización, para venta de monoetilenglicol como producto competitivo en el mercado.

1.1.2 Objetivos particulares

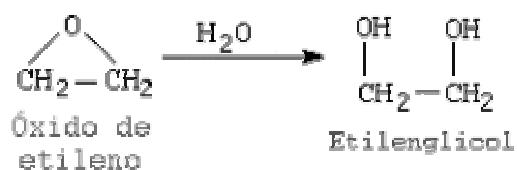
- ⊞ Eliminar el polímero disuelto en el monoetilenglicol para obtener un producto de alta calidad y competitividad para su comercialización como materia prima de anticongelantes.
- ⊞ Proponer el proceso de recuperación de monoetilenglicol y establecer las condiciones de operación para la obtención de monoetilenglicol libre de polímero.

2 ANTECEDENTES

2.1 MONOETILENGLICOL (MEG)

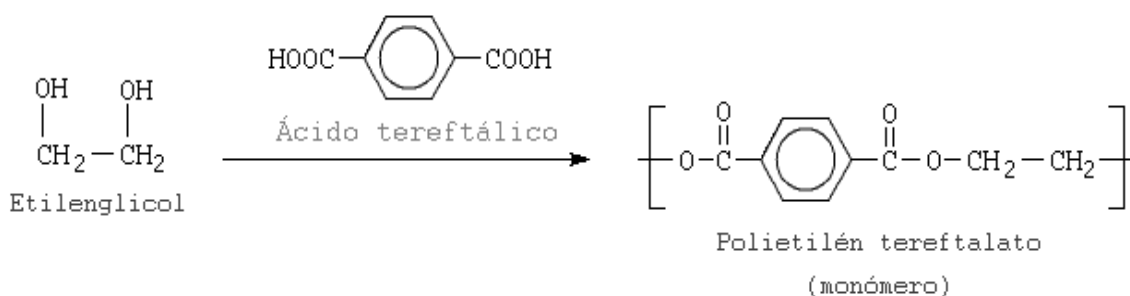
Al iniciarse la década de los 70 se incorporan las primeras plantas petroquímicas en México de escala mundial que se orientan por igual al mercado interno como al de exportación: Petrocel en Altamira (para producir Tereftalato de dimetilo o DMT), Tereftalatos Mexicanos en Coatzacoalcos, etilenglicol en Tlaxcala y luego Coatzacoalcos, fenol, acetona, y ésteres acrílicos en Cosoleacaque, etc. La producción de MEG ha alcanzado en los últimos años la cantidad de 170,000 toneladas anuales.

Para producir el MEG se utiliza como materia prima el óxido de etileno de acuerdo a la siguiente reacción:



El monoetilenglicol es un líquido incoloro, poco volátil, viscoso y soluble en agua y en muchos componentes orgánicos. Su punto de fusión es de -13°C , su punto de ebullición de 195°C @ 760 mmHg y su densidad es 1.1155 g/ml. Tiene dos aplicaciones principales. Una es como anticongelante en el circuito de refrigeración de los automotores y otra como diol para la obtención de poliésteres, entre éstos el más importante es el **tereftalato de polietileno (PET)**.

El tereftalato de polietileno o polietilén tereftalato (PET) se obtiene a partir de etilenglicol y ácido tereftálico mediante policondensación:



Se pueden distinguir dos tipos fundamentales de PET, el **grado textil** y el **grado botella**. Sus usos y aplicaciones más frecuentes son los siguientes: envases para bebidas gaseosas, aceites y agua mineral. Frascos varios. Películas transparentes. Fibras textiles. Envases al vacío. Bolsas para horno. Bandejas para microondas. Cintas de video y audio. Películas radiográficas.

2.1.1 Alcoholes polihídricos

Los alcoholes polihídricos que tienen dos o más grupos hidroxilos por molécula son comúnmente referidos como glicoles o dioles. La mayoría de los glicoles son completamente miscibles en agua y también disuelven algunos compuestos orgánicos. El glicol tratado en este capítulo es el producto de la hidratación del óxido de etileno. En la reacción de hidratación se agrega una molécula de agua a través del enlace carbono oxígeno en la estructura epóxica para dar grupos hidroxilos sobre el átomo de carbono adyacente.

La alta polaridad y el carácter muy alto de enlace del hidrógeno compartido por la serie de glicoles hace valiosos a los alcoholes polihídricos por su poder de disolución de sustancias poliméricas y resinas. El grupo funcional alcohólico es importante para muchas reacciones sintéticas en la industria química.

Tabla 2.1. Propiedades físicas de alcoholes polihídricos

| Propiedades Físicas | Disolvente | | | | |
|---------------------------------------|------------------|----------------|-----------------|-------------------|----------------|
| | Monoetilenglicol | Dietilenglicol | Trietilenglicol | Tetraetilenglicol | Propilenglicol |
| Peso molecular | 62 | 106 | 150 | 194 | 76 |
| Punto de ebullición (°C a 1 atm) | 197.4 | 245.5 | 287.8 | 325.6 | 187.4 |
| Punto de inflamación (°C) | 247 | 281 | 325 | 400 | 200 |
| Gravedad específica (25°C) | 1.11 | 1.111 | 1.12 | 1.123 | 1.032 |
| Densidad (kg/L) | 9.26 | 9.27 | 9.35 | 9.37 | 8.62 |
| Punto de congelación (°C) | -13.4 | -8.7 | -7.7 | -9.4 | Superfrío |
| Viscosidad (centipoises a 25°C) | 16.9 | 25.3 | 39.4 | 43 | 48.6 |
| Tensión superficial (dinas/cm a 25°C) | 48 | 44 | 45 | ---- | 36 |
| Presión de vapor (mmHg a 20°C) | <0.1 | <0.01 | <0.01 | <0.01 | 0.13 |
| Calor específico (Cal/ g °C) | 0.58 | 0.55 | 0.52 | 0.52 | 0.6 |
| Calor de vaporización (cal/g) | 449 | 393 | 270 | 273 | 379 |
| Solubilidad en agua | Completa | Completa | Completa | Completa | Completa |

Los glicoles tienen alto punto de ebullición y altos “punto de inflamación”; también son más densos que el agua y completamente miscibles en ésta. Se observa que la presencia de un grupo hidroxilo en los glicoles da una alta viscosidad y valores de tensión superficial mayores a los alcoholes monohídricos. Los glicoles son valiosos disolventes para algunas resinas y compuestos poliméricos por sus altos valores de polaridad y enlaces hidrógeno.

2.1.2 Usos industriales del monoetilenglicol

El monoetilenglicol se utiliza para formulaciones de anticongelante para automóviles, debido al abatimiento del punto de congelación del agua. Otra valiosa propiedad del monoetilenglicol es como refrigerante por su alto punto de ebullición, su baja presión de vapor, y su excelente capacidad de transferencia de calor.

Se utiliza el monoetilenglicol como intermediario químico para la fabricación de resinas de poliéster, tal como polietileno tereftalato y resinas alquídicas usadas en pinturas. El MEG se usa como un reactante en la producción de adhesivos, ésteres, éteres, dinitrato de etilenglicol, y como plastificante en la fabricación de celofán por sus propiedades higroscópicas.

Todos los glicoles son higroscópicos por naturaleza. Esta habilidad de absorber y retener humedad de la atmósfera es una propiedad usada en algunas aplicaciones donde el glicol es un

humectante y un agente deshidratante. Las soluciones glicol-agua se usan normalmente en estas aplicaciones.

El MEG también se usa como materia prima para pinturas látex; constituyente del electrolito de los condensadores electrolíticos de tipo seco.

2.1.3 Toxicidad de monoetilenglicol

Cada tipo de glicol tiene distintas propiedades físicas y químicas tal como características toxicológicas específicas.

El MEG, no presenta riesgos significativos en aplicaciones normales, el umbral del valor límite es 50 ppm para fase vapor y de 10 mg como partícula por metro cúbico de aire, en experiencias sobre humanos y en animales. La exposición al vapor de MEG puede producir un efecto anestésico y depresión del sistema nervioso central, mareos, y pérdida de coordinación.

Otras rutas de exposición al disolvente incluyen la ingestión, contacto con piel y ojos. Se recomienda el uso de guantes para prolongar la exposición. Los glicoles remueven aceites naturales de la piel y causan irritación con posible dermatitis.

El MEG y propilenglicol muestran baja toxicidad oral en pruebas de laboratorio con ratas. Sin embargo, experiencias muestran que el monoetilenglicol y dietilenglicol son más tóxicos en humanos que en los animales estudiados.

2.1.4 Almacenaje y manejo de glicoles

2.1.4.1 Tanques de Almacenamiento

Los tanques de almacenamiento para disolventes pertenecientes a glicoles pueden ser contruidos de acero dulce, acero al carbón o acero inoxidable. Para propilenglicol se recomienda acero inoxidable. No se recomiendan tanques de aluminio o plástico. Se sabe que todos los glicoles son higroscópicos, por lo que los tanques deberán contener un desecante en la línea de venteo. Una atmósfera de nitrógeno permite la protección del tanque, minimizando la humedad y oxígeno atmosférico que forma mezclas flamables aire/glicol. Se recomienda que las bombas, válvulas, líneas y adaptaciones sean de acero. Se recomiendan tapas y empaques de teflón o

asbesto. Los glicoles son muy viscosos a bajas temperaturas, por lo que el calentamiento del tanque podría ser necesario en climas fríos.

2.1.4.2 Consideraciones en el manejo

La seguridad en las emisiones es importante cuando se manejan disolventes orgánicos. Los trabajadores deben recordar que todos los glicoles tienen puntos de inflamación bajos. Los vapores son más pesados que el aire y pueden viajar distancias considerables hasta una fuente de ignición. Se recomienda el uso de dióxido de carbono o químicos secos para pequeños incendios y espumas o agua para grandes incendios. El agua puede ser inefectiva pero puede ser usada para enfriar estructuras y recipientes expuestos al fuego. Los glicoles también pueden formar mezclas explosivas con aire en áreas cerradas como tambos y tanques de almacenamiento. Los trabajadores deben usar ropa adecuada, guantes y lentes.

2.2 DISPOSICIÓN DE GLICOLES

Se aplica la regla principal de disposición para disolventes orgánicos. *No se deben descargar disolventes en el alcantarillado, sobre el suelo o dentro de un cuerpo de agua.*

2.3 PRODUCCIÓN NACIONAL DE GLICOLES

En las siguientes tablas se muestran: la capacidad instalada, el volumen de producción y el valor de la producción de petroquímicos intermedios.

Tabla 2.2. Capacidad Instalada para la Producción de Petroquímicos Intermedios por productos seleccionados de 1998 a 2003 (Toneladas).

| Producto | 1998 | 1999 | 2000 | 2001 | 2002 | 2003 |
|-----------------------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
| Glicoéteres | 27 000 | 27 000 | 25 000 | 26 420 | 24 100 | 24 100 |
| Glicoles etilénicos | 572 000 | 460 280 | 458 800 | 465 000 | 465 000 | 466 000 |
| Glicoles propilénicos | 30 000 | 30 000 | 30 000 | 30 000 | 30 000 | 30 000 |

NOTA: Respecto a la información proporcionada por la fuente para fines puramente estadísticos, se excluyeron los datos de los productos correspondientes a PEMEX. Esa información se presenta en el cuadro 1.3.

FUENTE: INEGI y SENER. Anuario Estadístico. Petroquímica (varios años).

Tabla 2.3. Volumen de la Producción de Petroquímicos Intermedios por Productos Seleccionados de 1998 a 2003 (Toneladas).

| Producto | 1998 | 1999 | 2000 | 2001 | 2002 | 2003 |
|-------------------------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
| Glicoéteres | 24 033 | 24 524 | 23 594 | 22 675 | 18 223 | 20 622 |
| Glicoles etilénicos (d) | 190 021 | 180 733 | 170 723 | 171 856 | 170 074 | 168 586 |
| Glicoles propilénicos | 15 480 | 16 948 | 13 233 | 29 | 0 | 0 |

NOTA: Respecto a la información proporcionada por la fuente para fines puramente estadísticos, se excluyeron los datos correspondientes a PEMEX

(d) Los datos de este producto pertenecen al sector privado y son complementarios a los del cuadro 1.4.

FUENTE: SENER. Anuario Estadístico. Petroquímica (varios años).

Tabla 2.4. Valor de la Producción de Petroquímicos Intermedios por Productos Seleccionados de 1998 a 2003 (Miles de pesos).

| Producto | 1998 | 1999 | 2000 | 2001 | 2002 | 2003 |
|-------------------------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| Glicoéteres | 163 782 | 164 500 | 149 540 | 142 420 | 108 770 | 157 546 |
| Glicoles etilénicos (d) | 1 224 473 | 1 089 725 | 1 415 969 | 1 215 909 | 1 078 987 | 1 895 295 |
| Glicoles propilénicos | 167 484 | 181 261 | 135 562 | 245 | 0 | 0 |

NOTA: Respecto a la información proporcionada por la fuente para fines puramente estadísticos, se excluyeron los datos de los productos correspondientes a PEMEX

FUENTE: SENER. *Anuario Estadístico. Petroquímica* (varios años).

2.4 RECUPERACIÓN DE DISOLVENTES

2.4.1 Disolventes como residuos industriales

En el sector industrial el empleo de disolventes es muy amplio. Cabe destacar la fabricación de automóviles, fibras artificiales, pinturas, barnices y similares, papel, tintas, vidrio, poliuretanos y piel artificial, electrodomésticos, laminados metálicos, lubricantes y aditivos, resinas y pigmentos, a lo que se debe añadir el sector del transporte y distribución de disolventes, la industria farmacéutica y laboratorios, procesos de impresión y artes gráficas, talleres de reparación de vehículos, industria química en general, etc. La tabla 2.5 nos muestra algunos ejemplos de residuos generados donde involucran disolventes.

Tabla 2.5 Ejemplos de residuos generados

| SECTOR | FUENTE | RESIDUO |
|-----------------------------|------------------------|-------------------------------|
| Comercio | Secado al vacío | Disolventes halogenados |
| Mediana y Pequeña Industria | Industria Fotográfica | Disolventes, ácidos, plata |
| | Impresión | Disolventes, tintas |
| | Curtidoras | Disolventes, cromo, sulfuros |
| Industria de gran escala | Química y Farmacéutica | Disolventes, residuos tóxicos |

Una medida preventiva que se aplica en la industria es la optimización de la aplicación del disolvente incorporando mejoras en los hábitos y en la organización del trabajo, maximizar la eficacia de su empleo, normalizar el uso de los disolventes, controlar las pérdidas por evaporación, mantener los residuos de disolventes lo menos contaminados posible para facilitar su reciclaje, evitar acumulación de sedimentos en los tanques de disolventes, etc. En cualquier caso, al final se obtendrá un residuo de disolvente que será preciso manipular y tratar adecuadamente. En este sentido, al igual que el resto de residuos peligrosos, la legislación vigente mantiene la figura del productor de residuos para aquel que genere ciertas cantidades de residuos en sus procesos y, la del gestor, para aquel que recoge, transporta y/o procesa o elimina el residuo.

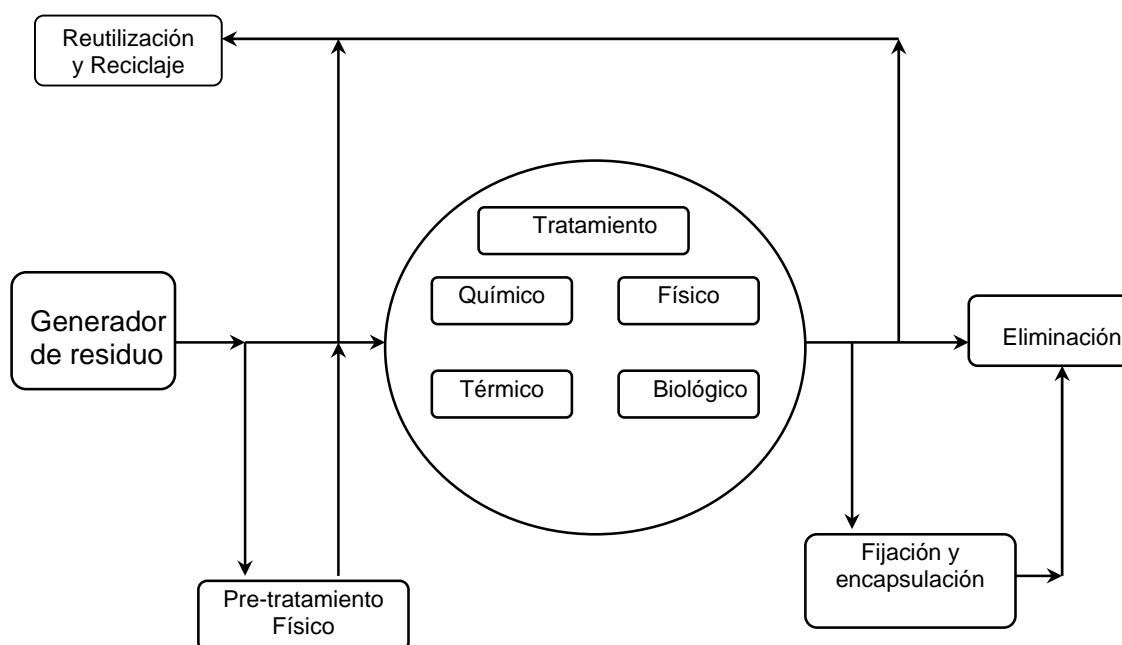


Figura 2.1. Sistemas de Tratamientos de Residuos.

Una vez recogidos y conducidos a una instalación de tratamiento adecuada, lo habitual es que sean sometidos a tratamientos, como se muestra en la figura 2.1, basados en su recuperación por destilación, especialmente los disolventes procedentes de limpiezas y, recuperación por rectificación o destilación fraccionada, para disolventes residuales de procesos químicos en general. En estos procesos de destilación se consiguen finalmente dos fracciones; la principal es la del disolvente regenerado, preparado para ser empleado de

nuevo ya que debe cumplir con los requisitos exigidos a estos productos y, por otro lado, una fracción residual compuesta por los residuos y elementos extraños contenidos en el disolvente usado y una parte mínima de este.

De este modo, el reciclado de disolventes se convierte en una solución viable y rentable que se refleja: por un lado, en la cantidad de residuos a eliminar y por parte del productor (generador de residuo) de optar por emplear disolvente reciclado y reducir al mínimo la adquisición de nuevos productos en el mercado.

Tabla 2.6. Métodos de tratamientos de residuos

| | |
|------------------------------|--------------------------------|
| Tratamientos Físicos | Tratamientos Químicos |
| Desorción con Aire | Calcinación |
| Congelamiento por Suspensión | Catálisis |
| Adsorción con Carbón | Electrólisis |
| Centrifugación | Hidrólisis |
| Diálisis | Descarga por Microondas |
| Destilación | Neutralización |
| Electrodiálisis | Oxidación |
| Electroforesis | Ozonólisis |
| Evaporación | Fotólisis |
| Filtración | Precipitación |
| Floculación | Reducción |
| Flotación | |
| Cristalización | Tratamientos Biológicos |
| Secado por Frío | Lodos Activados |
| Separación Magnética | Lagunas Aireadas |
| Intercambio Iónico | Digestión Anaeróbica |
| Destilación con Vapor | Composta |
| Adsorción con Resinas | Tratamiento Enzimático |
| Osmosis Inversa | Filtros de Chorro |
| Sedimentación | Piscinas de Estabilización |
| Extracción L-L de Orgánicos | |
| Ultrafiltración | |

2.4.2 Estrategia de manejo de los residuos industriales

El primer paso consiste en intensificar y estimular la reducción del residuo en la propia fuente de generación. Una manera de reducir el residuo en la fuente consiste en recuperar y recircular al mismo proceso o usarlo como materia prima en un proceso diferente. Otra estriba en utilizar el residuo como combustible sustituto, para recuperar energía. Minimizar la generación de residuo en la fuente de generación

Cuando sea posible recuperar y reutilizar el residuo, se debe proceder a estabilizarlo química, física y biológicamente con tratamientos específicos.

La incineración es otra posibilidad de tratamiento que permite la destrucción del residuo vía oxidación térmica y que convierte el residuo en gases de combustión y cenizas. Por último las celdas de seguridad para la disposición final del residuo en un confinamiento controlado, son la última morada del residuo, dónde quedará enterrado para siempre de manera estable.

2.4.2.1 Reducción en la fuente usando tecnología limpia

Podemos reducir la generación de residuos en la propia fuente al cambiar las condiciones de operación del proceso o por el empleo de otro proceso que no genere residuos peligrosos. Un cambio en el proceso puede ser parcial o total.

Es fundamental encontrar las condiciones de operación que permitan reducir a un mínimo la generación de residuos peligrosos en la fuente. Por lo tanto, será indispensable controlar en forma continua temperatura y presión de trabajo, así como el tiempo de residencia de los reactivos en el reactor y la limpieza de los equipos.

Las operaciones de limpieza o purificación de un producto terminado son ciertamente puntos de generación de residuos, ya que en cada una de las operaciones unitarias, se procede a retirar del producto terminado los vestigios de la materia prima, productos intermedios que se formen, así como aquellos insumos que no intervinieron en la reacción. Por lo tanto es necesario conocer en detalle las condiciones de operación y los rendimientos de cada una de las operaciones unitarias, para corregir la excesiva generación de residuos.

Otra causa de una generación excesiva de residuos en un proceso, se debe a la prolongación innecesaria de la vida de un catalizador, más allá de su vida útil y a que no se limpien equipos y recipientes antes de usarlos. Al dar mantenimiento preventivo y correctivo adecuado a las plantas evitaremos que se generen residuos peligrosos por falla o fuga en equipos y tuberías.

La instrumentación nos permite controlar las variables de un proceso en un intervalo dado y por ello es importante calibrar los instrumentos y mantenerlos en buen estado.

Cuando no sea posible reducir más la generación de residuos en la fuente, habrá de recurrir a otras opciones, como pudiera ser su reincorporación directa o después de un tratamiento, al proceso que los generó o a otros procesos industriales.

2.4.2.2 La recuperación y el rehusó (el reciclaje)

Para reciclar un material es necesario, en primer término, recuperar del residuo aquel material que tuviere algún valor comercial. Son muy variadas las tecnologías existentes de recuperación de componentes del residuo industrial. Las más comunes son la filtración, centrifugación, evaporación, neutralización, destilación y algunas otras operaciones unitarias, que pueden aplicarse por separado o en serie. Cabe hacer notar que en los procesos de separación siempre se obtendrán residuos, los cuales habrá que tratar para estabilizarlos. Un ejemplo se muestra en la figura 2.2, la cual presenta una solución residual que pasa por un proceso que recicla una solución y obtiene un lodo como residuo.

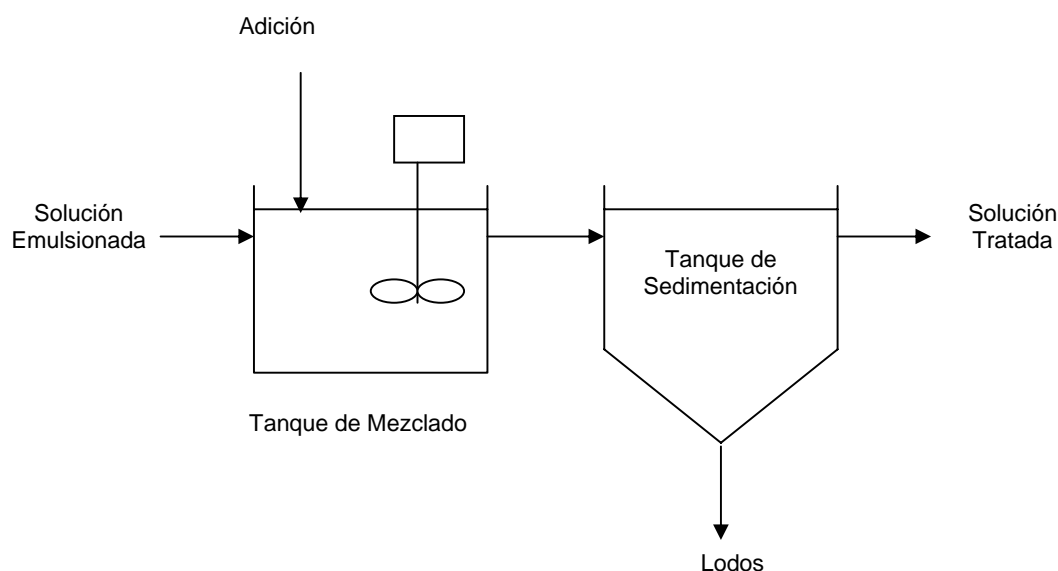


Figura 2.2. Sistema típico de rompimiento de la emulsión.

Es primordial que recordemos que el mercado tiene una cierta capacidad de reutilización de residuos recuperados y que una sobreproducción crearía problemas adicionales de almacenamiento, manejo y precio.

El reciclaje consiste entonces en la recuperación, comercialización y reutilización en un alto porcentaje de la mayoría de los componentes que conforman un residuo industrial peligroso.

No obstante que se encuentren en operación diez plantas que recuperan disolvente orgánico y orgánico clorado, los volúmenes recuperados representan todavía una baja proporción del generado. La misma situación existe con los aceites lubricantes gastados. Por otra parte, poco se hace para recuperar disolventes en talleres automotores y de servicios.

2.4.2.3 Beneficios al reducir y reciclar residuos

La reutilización de los materiales trae como consecuencia una serie de beneficios económicos y ecológicos. Al reducir la generación de residuos en la fuente se aprovecha un alto porcentaje de la materia prima y como consecuencia se mejoran los rendimientos globales y se reduce el ritmo de explotación del recurso natural.

Al reducir el volumen de generación de residuos se evitan gastos que repercutirían en el costo del producto terminado. Sería imposible competir en un mercado abierto si no controláramos la generación de residuos.

Es indudable que al reducir la generación de residuos o al recuperarlos, el beneficio más relevante descansa en la reducción del riesgo de impactar adversamente a la naturaleza o al ser humano, cuando su manejo es irresponsable.

2.5 SEPARACION DE DISOLVENTES EN RESIDUOS

Los disolventes recuperados se contaminan frecuentemente con componentes de baja presión de vapor y son trazas de materiales que no fue posible eliminar durante el proceso de recuperación. Estos componentes pueden provenir de:

- Líquidos madre, del cual un producto deseado ha sido recuperado por filtración o decantación.
- Equipo de lavado, ejemplo el molido de esferas en la fabricación de pintura, producirá disolventes con resinas y pigmentos inorgánicos.
- Una mezcla de disolvente-agua que puede contener sales inorgánicas en solución.

La recuperación de disolventes involucrados en mezclas plantea 3 problemas: exotérmicos, ensuciamiento en la superficie de calentamiento, reducción en la presión de vapor.

a) Exotérmicos

Han sido considerables el número de accidentes durante la recuperación de disolventes debido a las reacciones exotérmicas que pueden ocurrir, dañando estructura y equipo de

recuperación. La temperatura y tiempo de exposición dependen de factores importantes que contribuyen a éstas.

b) Ensuciamiento de la superficie de calentamiento

Cuando los disolventes son eliminados, la solución tiende a sobresaturarse provocando que los polímeros y las sales se depositen. En estas condiciones las disoluciones se concentran sobre la superficie de calentamiento provocando el depósito de sólidos, disminuyendo la rapidez de transferencia de calor.

Este problema puede ser evitado por diversos métodos, los cuales dependen de la naturaleza del soluto. Los métodos pueden clasificarse como:

- Eliminar la evaporación por transferencia de calor indirecta (por superficie).
- Limpiar mecánicamente la superficie de transferencia de calor.
- Eliminar por drene los sólidos formados.

c) Reducción en la presión de vapor

Además de los problemas de manejo de residuos antes y después de la recuperación del disolvente, los materiales no volátiles causan dificultades por la reducción de la presión de vapor de los disolventes.

2.6 MANEJO SEGURO DE DISOLVENTES

La hoja de seguridad (Material Safety Data Sheet, MSDS), que por ley debe acompañar a cualquier sustancia química sirve de guía para el manejo seguro de cualquier producto químico en el lugar de trabajo. La OSHA tiene disponible las MSDS para cada sustancia química. Cada MSDS debe contener la siguiente información acerca de la sustancia química:

1. El nombre químico y sinónimos junto con el número de Chemical Abstract Service (CAS).
2. Las propiedades físicas y químicas;

3. Riesgos físicos incluyendo reactividad inusual en compañía de riesgos de incendio y explosión.
4. Riesgos a la salud junto con síntomas y exposición;
5. Las posibles rutas de exposición al trabajador;
6. Los valores de exposiciones límites.
7. Si el químico es propenso a ser carcinogénico.
8. Sugerencia del manejo o medidas de control que deban usarse.
9. Medidas de emergencia y primeros auxilios.
10. Datos de la última revisión de la MSDS junto con el nombre, la dirección y número telefónico de la persona responsable.

El primer acto de trabajo seguro para el trabajador debería leer y entender la tarjeta del contenedor y la MSDS del químico antes de usarlo o manejarlo. Cada empleado debe estar enterado de la colocación de los extintores y de su uso apropiado en los incendios químicos pequeños. Los trabajadores deben conocer que tipo de extinguidor que debe usarse de acuerdo a al tipo de fuego, así como conocer las áreas de evacuación y permitir que personal especializado controle el incendio. Los trabajadores deben recordar que todos los disolventes tienen un punto de inflamación y que deben estar lejos de cualquier fuente de ignición, además de que los vapores que son más pesados que el aire puede viajar distancias considerables.

2.6.1 Riesgos Físicos

2.6.1.1 Riesgos de Incendio y Explosión

Los riesgos físicos de disolventes pueden ser clasificados como peligrosos en incendio, explosión y reactividad. Los riesgos de incendio o explosión dependen de tres componentes representados en las esquinas del triángulo de incendio donde el combustible (disolvente), oxígeno del aire, y una fuente de ignición de suficiente energía; éstos componentes son necesarios para llevar a cabo la combustión del disolvente. La eliminación de uno de estos componentes elimina el peligro de un incendio o explosión. Las dos vías de eliminar los riesgos de un incendio es el control de emisiones de vapores del disolvente y eliminar fuentes de ignición (flamas, electricidad estática, chispas, etc.).

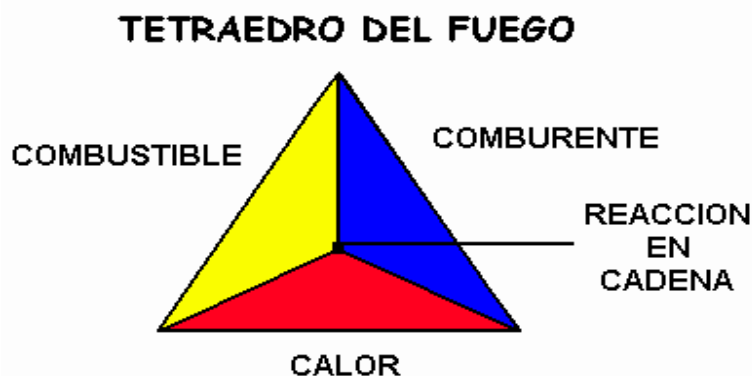


Figura 2.3. Tetraedro del Fuego.

Los vapores del disolvente emitidos al aire al calentarse hasta una cierta temperatura, pueden llegar al punto de inflamación.

El punto de inflamación es una propiedad física de un disolvente, determinado por su peso molecular, estructura y composición química. Un disolvente se clasifica como líquido flamable si su punto de inflamación es menor a 38°C y se denota como combustible líquido si su punto de inflamación está entre 38°C y 93°C. Un alto punto de inflamación es seguro si está sujeto a procesos de alta temperatura. También es importante entender que si los vapores del disolvente en el aire están por debajo de los límites bajos de inflamabilidad (LFL) en la mezcla disolvente-aire no se quemará. Similarmente, si la concentración del disolvente en fase vapor en el aire está por encima del límite más alto de inflamabilidad (UFL) la mezcla no se quemará. La concentración del disolvente en fase vapor en el aire entre LFL y UFL sostendrá la combustión y es una característica propia de cada disolvente.

Los riesgos de incendio pueden ser evitados previniendo algún exceso de vaporización de disolvente, controlando las concentraciones vapor-aire, eliminando las fuentes de ignición y por eliminación de derrames de disolvente. Los vapores se pueden almacenar en áreas bajas y viajar a través de superficies hasta una fuente de ignición. Otro riesgo puede ser que algunos disolventes tengan gravedades específicas más bajas que el agua y estas pueden flotar sobre superficies acuosas.

El flujo de líquidos a través de tubería de una operación a otra puede causar la acumulación de cargas de electricidad estática sobre los componentes del sistema tal como tubería, mangueras, boquillas, tanques o sobre el líquido. Las prácticas de trabajo en seguridad indican que:

1. Todo el equipo, tubería, tanques y equipo auxiliar deben contar con conexión a tierra.
2. Cuando se transfiera líquido a un contenedor a otro, éstos deben contar con conexión a tierra, además debe mantenerse el contacto entre el inyector de la manguera y el envase durante la operación de llenado.
3. No se debe permitir que se abran los contenedores de disolvente en el área de trabajo.
4. Se debe evitar salpicar y rociar al transferir el líquido al tanque.

Los disolventes en presencia de aire, que entran en contacto con una superficie caliente o sujetos a altas temperaturas arriba de la temperatura de “auto-ignición” encenderán espontáneamente.

El trabajador químico debe mirar siempre cualquier tambor o envase disolvente vacío como un riesgo potencial de explosión. La ignición de una mezcla inflamable del disolvente-aire dentro de un espacio confinado (un tanque o un tambor cerrado) dará lugar a una explosión mortal. El uso de la soldadura en un tanque o tambor cerrado que contenga un disolvente flamable es una práctica altamente riesgosa. El método más fácil y seguro a seguir con los tambores vacíos que hayan contenido disolventes es: *no cortar, no soldar, no perforar ningún envase vacío*.

2.6.2 Riesgos de Reactividad Química

Un riesgo real de la reactividad de disolventes es la formación de peróxidos en ciertos tipos de disolventes. El disolvente reacciona con oxígeno atmosférico para formar compuesto de peróxido que contiene un ligante O-O. El disolvente propenso a la formación de peróxido puede o no contener un átomo de oxígeno en su estructura. Algunos de los ligandos O-O son concluidos por un átomo de hidrógeno dando una estructura de hidroperóxidos R-O-O-H. Estos peróxidos derivados son peligrosos por que tienen la tendencia a descomponerse violentamente cuando son sujetos a calentamiento o un impacto violento. La cristalización y depositación de peróxido como cristales en el disolvente o sobre el filo de los botes vacíos pueden ser peligrosos. La evaporación o destilación de un disolvente que contenga trazas de un peróxido puede derivar en la precipitación de cristales de peróxido.

2.6.3 Riesgos a la Salud

2.6.3.1 Absorción por la Piel e Inhalación de Disolventes

El gran riesgo a la salud para la mayoría de los químicos orgánicos es la exposición a la inhalación del vapor o absorción del químico a través de la piel. Otro riesgo es por la ingestión del disolvente a través del tracto digestivo, o por contacto con los ojos. Si la absorción química es a través de la piel se recomienda usar equipo de protección adecuado, tal como lentes, guantes y cualquier otro tipo de ropa necesaria para proteger al trabajador.

2.6.3.2 Riesgos crónicos a la salud

Algunos químicos pueden causar daño a órganos específicos en el cuerpo, lo cual se debe especificar en la MSDS. Algunos disolventes pueden dañar la sangre y el sistema linfático produciendo un gran efecto sobre el sistema circulatorio. Otros disolventes pueden envenenar órganos, causar la degradación del sistema nervioso, así como dañar órganos reproductivos.

2.6.3.2 Otros Riesgos a la Salud

Los químicos pueden ser corrosivos y causar daños en la piel, ojos, nariz, tracto gastrointestinal, o sistema respiratorio. Ciertos químicos pueden actuar como un sensibilizador en algunos trabajadores y causar una reacción de alergia en su primera exposición al químico. Las alergias típicas pueden incluir dermatitis o asma. El empleado debería asegurar que el químico sea manejado y usado con la debida protección y control de ventilación, y que los trabajadores practiquen la higiene personal en el lugar de trabajo.

3 COAGULACIÓN

La coagulación es el proceso de desestabilización química de partículas coloidales provocadas por la adicción de un coagulante al agua, el cual neutraliza las cargas responsables de la estabilidad de las partículas cargadas que generan fuerzas de repulsión superficial, las cuales están impidiendo la sedimentación por gravedad en tiempos cortos. De acuerdo al tamaño y naturaleza del coloide esta partícula puede demorar 100 años para sedimentar naturalmente por la acción de la gravedad.

La coagulación es el proceso de adición y mezclado rápido de un coagulante, resultando la desestabilización del coloide y la formación inicial de agregados llamados flocs.

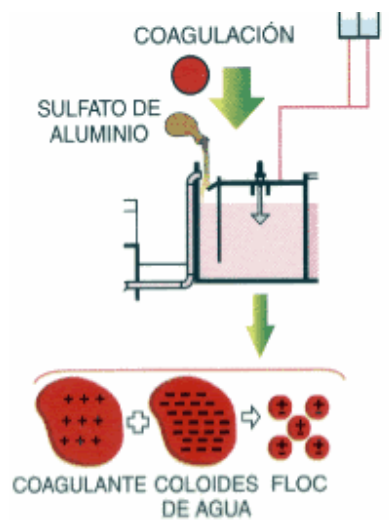


Figura 3.1. Coagulación

Este proceso es muy rápido, toma desde décimas de segundo hasta cerca de 100 segundos, de acuerdo con las demás características del agua: pH, temperatura, cantidad de partículas, etcétera. Se lleva a cabo en una unidad de tratamiento denominada *mezcla rápida*. De allí en adelante, se necesitará una agitación relativamente lenta, la cual se realiza dentro del floculador. En esta unidad las partículas chocarán entre sí, se aglomerarán y formarán otras mayores denominadas *flóculo*; estas pueden ser removidas con mayor eficiencia por los procesos de sedimentación, flotación o filtración rápida.

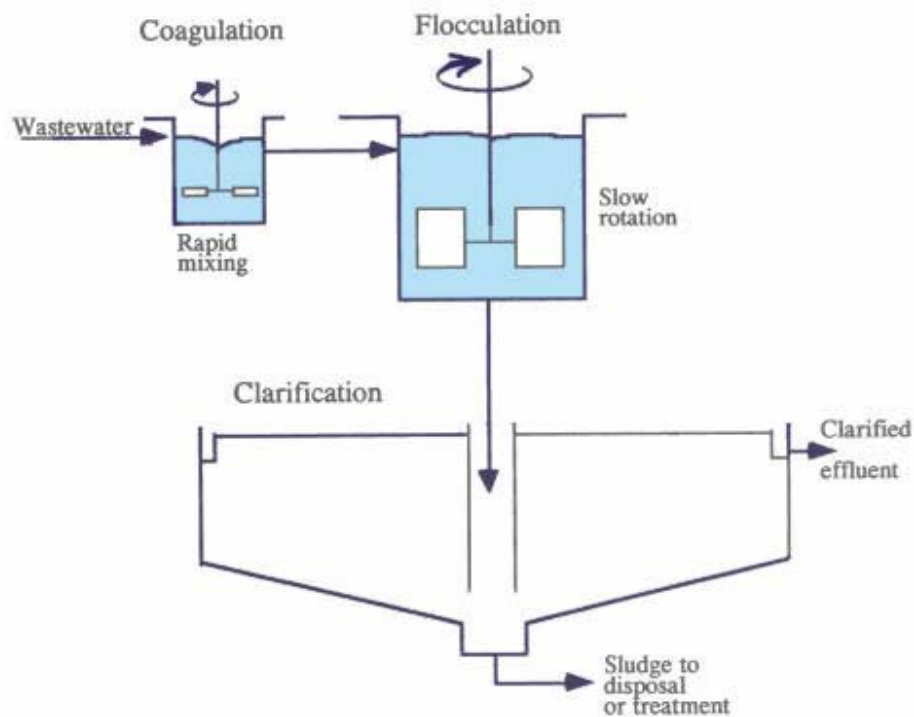


Figura 3.2. Proceso de Coagulación-Floculación

La remoción de las partículas coloidales está relacionada estrictamente con una adecuada coagulación, pues de ella depende la eficiencia de las siguientes etapas: floculación, sedimentación y filtración.

3.1 COLOIDES

Al hablar de coagulación tenemos que hablar de coloides, donde un coloide, llamado también suspensión coloidal o dispersión coloidal es un sistema físico que está compuesto por dos fases: una *continua*, normalmente fluida, y otra *dispersa* en forma de partículas. Las partículas que se encuentran en suspensión con el líquido gracias al equilibrio termodinámico, son llamadas micelas. Los agregados de moléculas no disueltas forman coloides y no son apreciables a simple vista.

Una porción de los sólidos dispersos en residuos es material suspendido no sedimentable que tiene un tamaño de partícula de 0.1 milimicrómetro (10^{-7} mm) a 100 micrómetros (10^{-1} mm). Los coloides tienen tamaños de partícula entre 1 milimicrómetro (10^{-6} mm) a 1 micrómetro (10^{-3} mm), una cantidad significativa de materia no sedimentable es materia coloidal. Los supracoloides tienen un tamaño de 1 (10^{-3} mm) micrómetro a 100 micrómetros (10^{-1} mm), algunas de estas partículas tienen ciertas características coloidales como velocidades de sedimentación insignificantes.

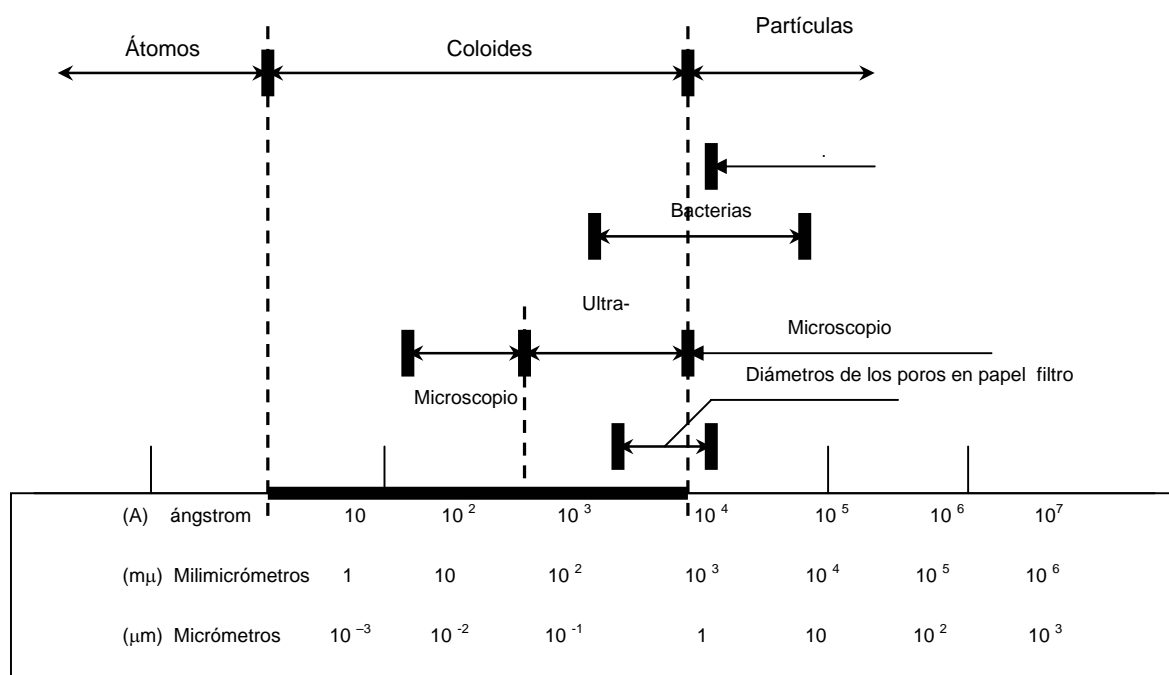


Figura 3.3 Tamaño de partículas

3.1.1 Características coloidales

Las dispersiones coloidales están clasificadas de acuerdo a la fase dispersa y al medio disperso. Los principales sistemas involucran sólidos dispersos en líquidos (*sols*) y líquidos dispersos en líquidos (emulsiones). En tratamientos de agua y residuos, sólidos dispersos en líquidos (*sols*) son de particular interés. Un importante rasgo de un coloide sólido disperso en un residuo líquido es que las partículas sólidas no sedimentaran por la fuerza de gravedad. Cuando un coloide sólido esta en suspensión y no sedimenta, el sistema se encuentra en una condición estable.

Los coloides tienen una gran área superficial por unidad de volumen de las partículas. Debido a esta gran área superficial, los coloides tienden a absorber sustancias, como iones y moléculas de agua. También los coloides desarrollan o tienen una carga electrostática relativa.

Tabla 3.1. Efecto al disminuir el tamaño de las esferas

| Diámetro de la Partícula (mm) | Escala de tamaños | Área superficial total | Tiempo requerido para sedimentar |
|--------------------------------------|--------------------------|-------------------------------|---|
| 10 | Grava | 3.15 cm ² | 0.3 seg. |
| 1 | Arena gruesa | 31.50 cm ² | 3.0 seg. |
| 0.1 | Arena fina | 315.00 cm ² | 38.0 seg. |
| 0.01 | Sedimento | 3 150.00 cm ² | 33.0 min |
| 0.001 | Bacteria | 3.15 m ² | 55.0 hrs |
| 0.0001 | Partícula coloidal | 31.50 m ² | 230.0 días |
| 0.00001 | Partícula coloidal | 0.283 ha | 6.3 años |
| 0.000001 | Partícula coloidal | 2.83 ha | 63.0 años |

En el tratamiento del agua, es común referirse a los sistemas coloidales como hidrófobos, cuando repelen el agua, e hidrófilos, cuando presentan afinidad con ella.

Obviamente, los coloides hidrófobos no repelen completamente al agua, pues una película de ella es absorbida por los mismos. En los sistemas coloidales hidrófobos, las propiedades de la superficie de las partículas son muy importantes, principalmente en las aguas naturales, que pueden contener varios tipos de arcillas.

En la mayoría de los sistemas coloidales, el coloide se mantiene en suspensión (en otras palabras, estabilizado) como un resultado de las fuerzas electrostáticas de los mismos coloides. Es

más común encontrar coloides que estén cargados negativamente y atraen cargas de signo opuesto, permaneciendo los coloides en suspensión por la acción de fuerzas repulsivas.

Un coloide negativo atraerá a su superficie iones de carga opuesta –contraiones- que estén disueltos en el seno del líquido. La capa compacta de contraiones es frecuentemente llamada capa fija o de Stern y fuera de ésta se encuentra la capa difusa. Ambas capas contienen iones positivos y negativos. La concentración de contraiones es mayor sobre la superficie de la partícula y va decreciendo al acercarse al seno de la solución. El potencial zeta es el potencial electrostático que se encuentra entre las dos capas mencionadas, este potencial se relaciona con la estabilidad del coloide en suspensión.

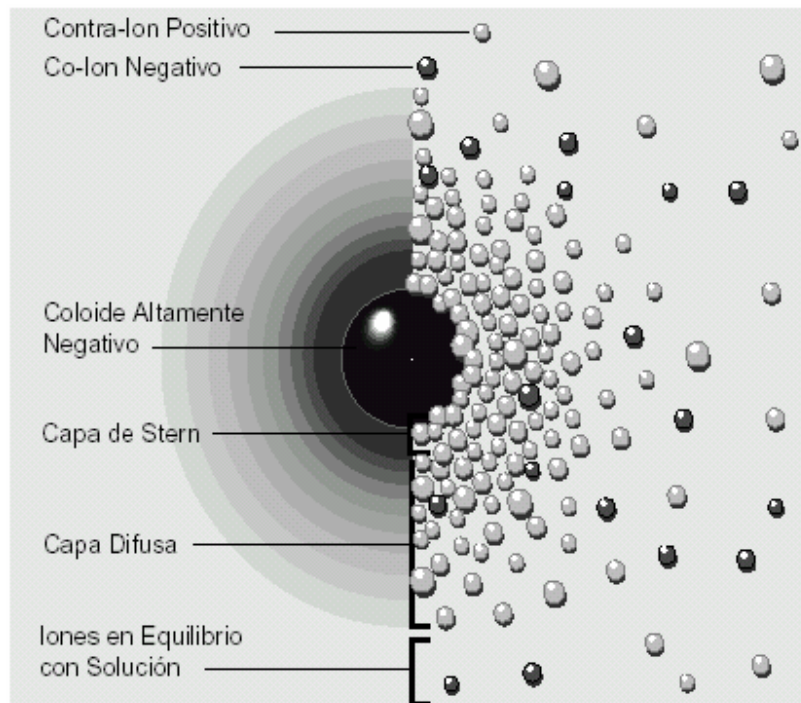


Figura 3.4. Visualización de la doble capa.

3.1.1.1 Estabilidad e inestabilidad de los coloides

Las suspensiones coloidales están sujetas a ser estabilizadas y desestabilizadas.

- Entre las fuerzas de estabilización o repulsión podemos mencionar las siguientes:
 - a) La carga de las partículas.
 - b) La hidratación, que generalmente es importante para los coloides hidrofílicos, aunque tienen menor importancia en este caso.

- Los factores de atracción o desestabilización son los siguientes:
 - a) *La gravedad*. Es insignificante en la desestabilización de las partículas coloidales y, por lo tanto, no se tratará con mayor detalle.
 - b) *El movimiento browniano*. Permite que las partículas entren en contacto, lo que constituye un requerimiento para la desestabilización.
 - c) *La fuerza de Van der Waals*. Una fuerza débil de origen eléctrico, postulada por primera vez por el químico holandés Johann Diderick van der Waals. Es un factor muy importante, pues constituye la principal fuerza atractiva entre las partículas coloidales. Estas fuerzas de atracción, que decrecen rápidamente con la distancia, se deben a la interacción de dipolos permanentes o inducidos en las partículas.

3.1.2 Coagulación de coloides (desestabilización)

Cuando un coagulante se agrega al agua o a un agua residual, la desestabilización del coloide ocurre con la formación de pequeños flóculos. Las interacciones resultantes son

- 1) La reducción del potencial zeta al grado donde las fuerzas de atracción de van der Waals y la agitación provocan coalescencia de las partículas.
- 2) La unión de partículas por puentes entre grupos reactivos sobre los coloides
- 3) La precipitación del flóculo formado.

Las fuerzas de repulsión son función del potencial zeta, y las fuerzas de atracción son debidas a las fuerzas de van der Waals que actúan sobre las partículas. La fuerza resultante es atractiva fuera de una cierta distancia entre coloides, en este caso donde empieza la barrera de energía; y antes de este punto la fuerza resultante es repulsiva.

Originalmente se pensaba que la reducción del potencial zeta era causada por la adsorción de iones metálicos. Sin embargo, ahora se sabe que la principal acción es la adsorción de cargas altamente positivas.

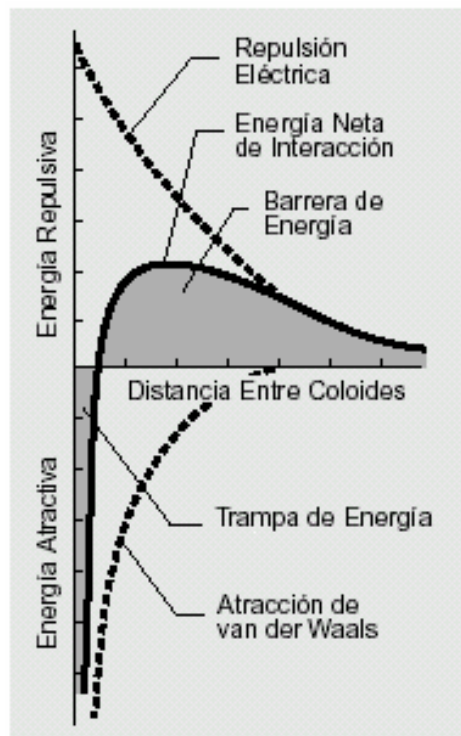


Figura 3.5. Curva de energía neta de interacción

Para suspensiones coloidales diluidas, la coagulación puede ser extremadamente lenta por la baja concentración de partículas, causando un inadecuado contacto inter-partícula; por lo que se debe mantener la concentración de coloide a un nivel donde la rápida coagulación y floculación ocurra. En suspensiones diluidas, una gran cantidad en la dosis de coagulante, relativamente, puede causar la reestabilización del coloide. Esto es debido a que las cargas negativas del coloide se vuelven positivas, esto se cree que es debido a que existen reactivos cargados positivamente en la superficie del coloide.

La coagulación de coloides con polímeros ocurre por una interacción química o puentes. Los polímeros tienen grupos ionizables tales como carboxilos, amino y sulfónico, y estos grupos se ligan a sitios reactivos o grupos sobre la superficie del coloide. De esta manera varios coloides pueden ser ligados a una simple molécula de polímero formando una estructura unida con puentes.

Frecuentemente en coagulación, los términos coagulación electrocinética, coagulación pericinética y coagulación ortocinética son mencionados. La *coagulación electrocinética* se refiere a la coagulación que resulta de la reducción del potencial zeta. En cuanto a la *coagulación pericinética* es consecuencia del contacto inter-partícula provocado por el movimiento browniano. Por último, en la coagulación ortocinética el contacto inter-partícula es causado por el movimiento del fluido debido a la agitación.

3.1.2.1 Factores que influyen en el proceso de la coagulación

Los principales factores que afectan a la coagulación y floculación son:

1. Tipo de coagulante.
2. Cantidad de coagulante que se requiere para llevar una coagulación óptima. La cantidad exacta sólo puede ser determinada mediante ensayos (Jar-test, electrofóresis), aún así la cantidad puede variar con otros factores como el tiempo de mezcla, la temperatura de agua, entre otros.
3. pH. Existe para cada coagulante una zona de pH, donde se produce una buena floculación a un plazo corto y con una dosis dada de coagulante. La coagulación debe efectuarse dentro de esta zona óptima siempre que sea posible.
4. Tiempo de mezcla y floculación. Al conjunto se le suele denominar “período de coagulación” y se define como el tiempo transcurrido entre la adición del coagulante y el final de la agitación a una velocidad que impida la decantación de las materias floculadas.
5. Efecto de la temperatura. La influencia principal de la temperatura en la coagulación es su efecto sobre el tiempo requerido para una buena formación del flóculo.
6. Fuerza de la agitación.
7. Presencia de núcleos. Las partículas sólidas en suspensión actúan como núcleos para la formación inicial de flóculos.

3.2 COAGULANTES

Un coagulante es una sustancia que ayudan a la precipitación más rápida de partículas suspendidas y coloides durante el tratamiento.

3.2.1 Características de los coagulantes.

De acuerdo con las misiones que deben cumplir los coagulantes deberán tener las siguientes características:

1. Carga opuesta al coloide con objeto de que, al agregar a la solución coloidal cargas opuestas, las fuerzas electrostáticas puedan ser neutralizadas, punto isoeléctrico o potencial zeta nulo.
2. Deben ser lo más “fuerte” en carga (valencia) para que la rotura de la estabilidad coloidal sea lo más rápida posible.
3. Deben ser muy pesados, para que los flóculos formados puedan separarse lo más rápidamente posible, por precipitación.

3.2.2 Mecanismos de coagulación

Como se ha visto anteriormente, las partículas coloidales, las sustancias húmicas y algunos microorganismos presentan una carga negativa en el agua, lo cual impide la aproximación de las mismas. En el tratamiento del agua será necesario alterar esta fuerza iónica mediante la adición de sales de aluminio o de hierro o de polímeros sintéticos que provoquen el fenómeno de la coagulación.

Actualmente se considera la coagulación como el resultado de la acción de cuatro mecanismos:

1. Compresión de capa difusa;
2. adsorción y neutralización;
3. barrido;
4. adsorción y formación del puente.

3.2.2.1 Compresión de la doble capa

Este modelo físico de doble capa puede explicar el fenómeno de la desestabilización de un coloide por un coagulante y la figura 3.5 ayuda a explicar el fenómeno de desestabilización: la curva de atracción de van der Waals es fija mientras que la de repulsión eléctrica disminuye si se incrementan en la solución los iones de carga opuesta. En consecuencia, si se reduce el potencial

repulsivo, decrece también la curva resultante de interacción. Por lo tanto, las partículas pueden acercarse suficientemente para ser desestabilizadas por la energía de atracción de van der Waals.

La adición de un electrolito a un sistema coloidal produce un incremento de la densidad de cargas en la capa difusa y disminución de la “esfera” de influencia de las partículas, y ocurre la coagulación por compresión de la capa difusa. Las concentraciones elevadas de iones positivos y negativos (fuerza iónica grande) en el agua acarrearán un incremento del número de iones en la capa difusa que, para mantenerse eléctricamente neutra, necesariamente tiende a reducir su volumen, de modo tal que las fuerzas de van der Waals sean dominantes, y se elimine la estabilización electrostática.

3.2.2.2 Adsorción y neutralización de la carga

La desestabilización de una dispersión coloidal está en función de las interacciones entre coagulante-coloide, coagulante-solvente y coloide-solvente.

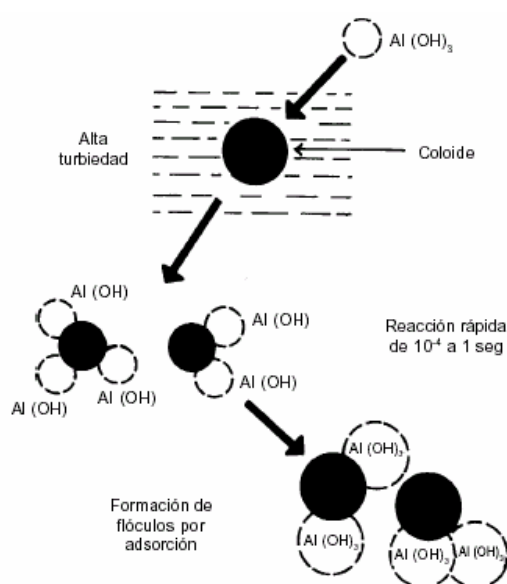


Figura 3.6. Coagulación por adsorción.

El efecto de adsorción y neutralización de la carga se encuentra estrechamente ligado al de compresión de la doble capa.

3.2.2.3 Captura en un precipitado de hidróxido metálico o captura por barrido

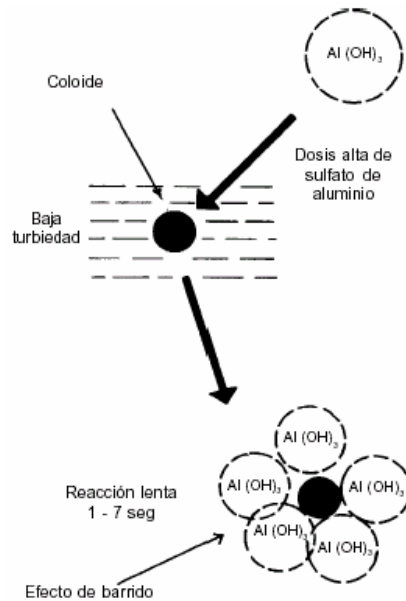


Figura 3.7. Coagulación por barrido.

Cuando la dosis de un coagulante de sales metálicas en solución como el $Al_2(SO_4)_3$ y $FeCl_3$ excede el producto de solubilidad de sus hidróxidos metálicos como el $Al(OH)_3$ y el $Fe(OH)_3$, se produce una precipitación rápida de los hidróxidos gelatinosos.

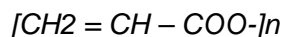
En este caso, las partículas coloidales son envueltas por los precipitados y, como este mecanismo no depende de la neutralización de la carga de los coloides, la condición óptima de la coagulación puede no corresponder a aquella donde es mínimo el potencial zeta.

3.2.2.4 Adsorción y puente inter-partícula

La coagulación puede realizarse también usando una variedad significativa de compuestos orgánicos sintéticos y naturales caracterizados por grandes cadenas moleculares, que gozan de la propiedad de presentar sitios ionizables a lo largo de la cadena y de actuar como coagulantes. Los polímeros pueden ser clasificados como:

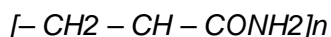
- a) Aniónicos: presentan sitios ionizables negativos

Ejemplo: ácido poliacrílico



- b) No iónicos: no presentan sitios ionizables

Ejemplo: poliacrilamida



- c) Anfóliticos: presentan sitios ionizables positivos y negativos

Se ha observado que muchas veces los polímeros con carga negativa son efectivos para coagular coloides con carga negativa, fenómeno que no puede ser explicado de acuerdo con modelos basados en la neutralización de cargas. Se ha desarrollado la teoría del “puente” que, al menos, explica cualitativamente este fenómeno.

La figura 3.8 describe gráficamente la teoría de La Mer:

Reacción 1. Un polímero tiene ciertos grupos que interaccionan con la superficie de las partículas coloidales y se deja que el resto de la molécula se extienda hacia la solución.

Reacción 2. Si una segunda partícula con algunos sitios de adsorción vacíos entra en contacto con los segmentos extendidos, puede realizarse una unión. El polímero sirve de puente en el complejo partícula-polímero-partícula.

Reacción 3. Si no se dispone de una segunda partícula, los segmentos dispersos del polímero pueden eventualmente adsorberse en otros lados de la partícula original, lo que hace imposible que el polímero sirva de puente y se produce la reestabilización de las partículas.

Reacción 4. El modelo de puente puede explicar cualitativamente la reestabilización como resultado de la saturación de las superficies coloidales por el polímero, sin dejar lugar para la formación de puentes inter-partículas.

Reacciones 5 y 6. En algunos casos, los sistemas coloidales desestabilizados pueden ser reestabilizados por medio de agitación intensa, debido a que se rompen las uniones polímero-superficie, y ocurre una adsorción secundaria de los fragmentos de los flóculos.

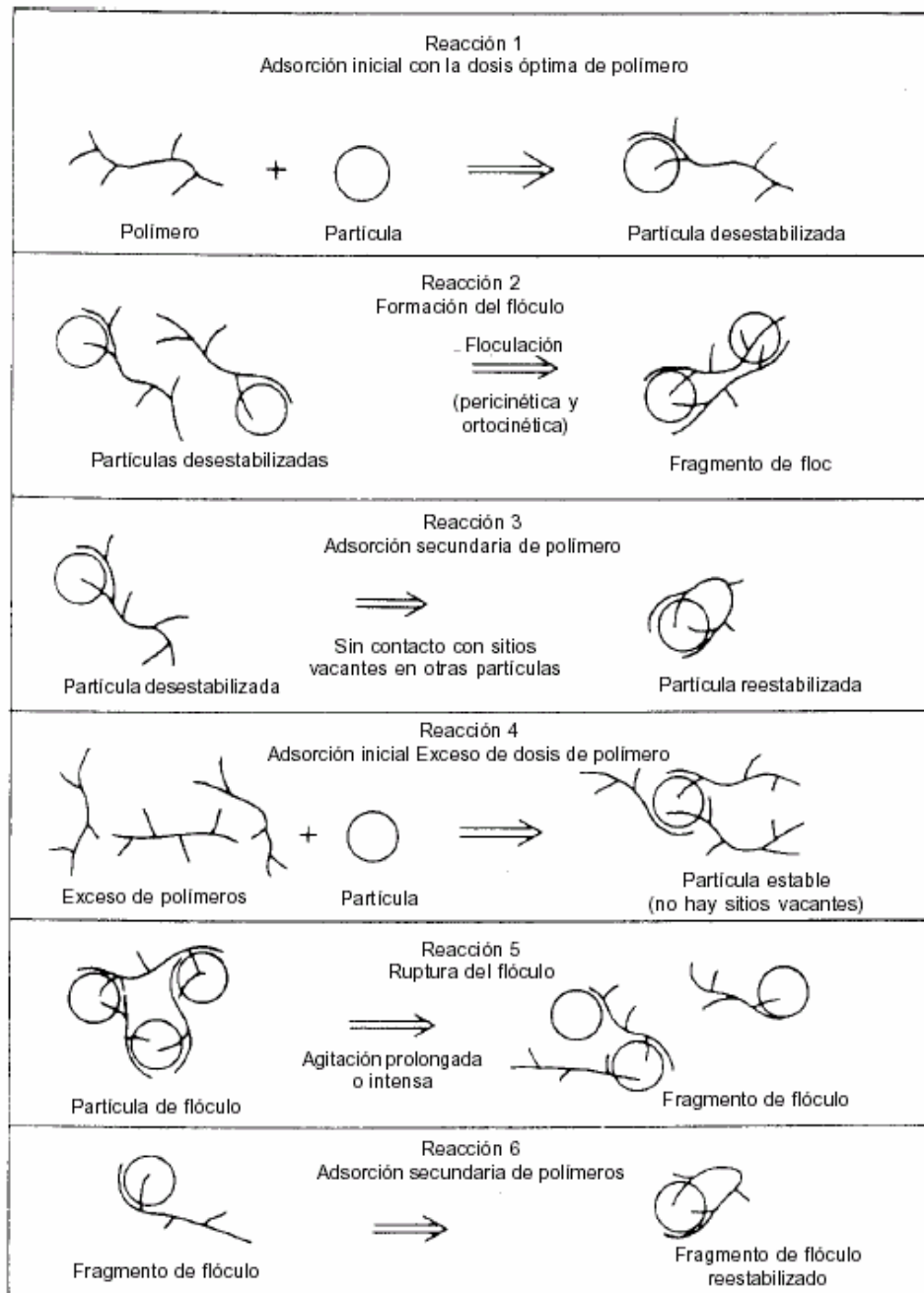


Figura 3.8. Representación esquemática para el modelo de puentes en la desestabilización de coloides mediante polímeros

3.3 COADYUDANTES

Los coadyudantes, contribuyen o potencia la acción de otros agentes, se usan algunas veces para una sedimentación rápida del floculo formado y asegurar la óptima coagulación.

Adición de químicos para obtener la alcalinidad deseada y producir un buen floculo.

Poliectrolitos cuando son usados como coadyudantes, su principal función es asistir como puente químico o interaccionando entre grupos reactivos del polielectrolito y el floculo. En algunos casos los polielectrolitos son usados como coagulantes, sin requerir de otros químicos.

Incremento de la turbidez. Una adecuada distribución de partículas provee suficientes colisiones inter-partícula y así tener una óptima coagulación.

Ajuste de pH. El incremento de pH se hace por adición de óxido de calcio (cal); y su reducción se consigue por la adición de un ácido mineral, tal como el ácido sulfúrico.

3.4 MEZCLADO RAPIDO

Para tener un mezclado rápido de los químicos, se requiere una agitación intensa en el tanque, que asegure un contacto adecuado entre el coagulante y las partículas suspendidas. Si solo se agrega un químico, se requerirá un tanque de mezclado con un solo compartimiento. Sin embargo, si se requiere más de un químico y de acuerdo a la secuencia de aplicación y dispersión se necesitaran compartimientos múltiples.

El mezclado se debe a que dos capas de líquido viajan a diferente velocidad. El gradiente de velocidad (dv/dy) es proporcional a la cantidad de energía disipada en el fluido. Camp y Stein [8] desarrollaron la teoría básica de potencia para el mezclado, la cual es la mas usada en nuestros días.

La relación (dv/dy) a la potencia requerida para la agitación resulta de un balance de fuerzas. La ley de viscosidad de Newton será de gran ayuda para calcular la energía de disipación. Para un flujo en una dimensión se tiene:

$$\tau_{yx} = -\mu \frac{dv_x}{dy} \quad (3.1)$$

τ_{yx} es el esfuerzo cortante, esto es la fuerza por unidad de área en dirección x o la transferencia de momentum en la dirección y y resultado del movimiento en dirección x .

μ es la viscosidad dinámica.

v_x es la velocidad en dirección x

y es la dirección vertical

Asumiendo un flujo laminar en una sola dirección para un elemento de volumen (figura 3.9),

$$\sum F_x = 0 = p\Delta y\Delta z - \left(p + \frac{\partial p}{\partial x} \Delta x \right) \Delta y\Delta z + \tau\Delta x\Delta z - \left(\tau + \frac{\partial \tau}{\partial y} \Delta y \right) \Delta x\Delta z \quad (3.2)$$

Expandiendo y simplificando la ecuación (2),

$$\frac{\partial p}{\partial x} = -\frac{\partial \tau}{\partial y} \quad (3.3)$$

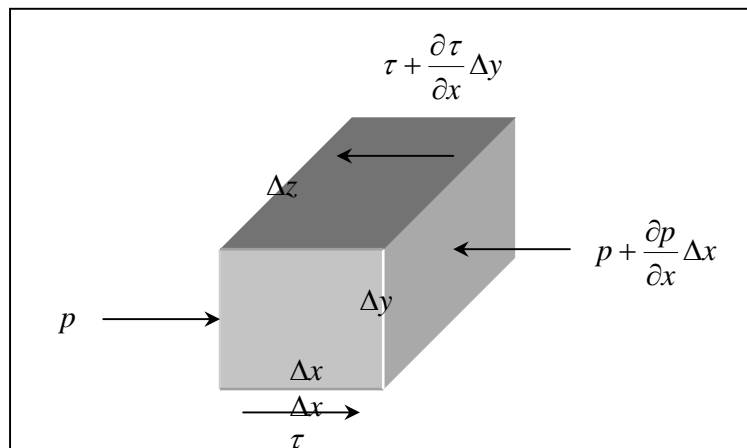


Figura 3.9. Balance de fuerzas en un elemento de volumen del fluido

El balance de fuerzas se lleva a cabo de forma similar para las otras dos direcciones, sin embargo se incorpora la fuerza de gravedad dentro del balance para la dirección y.

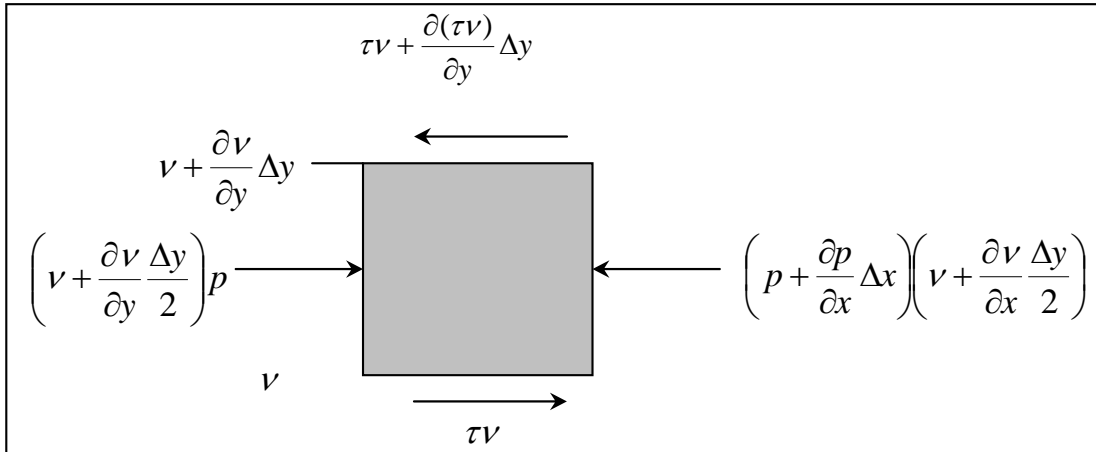


Figura 3.10. Balance de fuerzas sobre un elemento de volumen

Un esquema para el balance de fuerzas en un elemento (flujo unidimensional) se muestra en la figura 3.8 la potencia esta expresada por $P = \vec{F} \cdot \vec{v}$. El balance en la dirección x para la fuerza dentro y fuera del elemento,

$$\begin{aligned}
 P_{in} - P_{out} = \Delta P = & \left(v + \frac{\partial v}{\partial y} \frac{\Delta y}{2} \right) p \Delta y \Delta z - \left(p + \frac{\partial p}{\partial y} \frac{\Delta y}{2} \right) \Delta y \Delta z \\
 & + \tau v \Delta x \Delta z - \left(\tau v + \frac{\partial(\tau v)}{\partial y} \Delta y \right) \Delta x \Delta z
 \end{aligned} \tag{3.4a}$$

Expandiendo y simplificando la ecuación 3.4a

$$-v \frac{\partial p}{\partial x} \Delta x \Delta y \Delta z - v \frac{\partial \tau}{\partial y} \Delta x \Delta y \Delta z - \tau \frac{\partial v}{\partial y} \Delta x \Delta y \Delta z = \Delta P \tag{3.4b}$$

sustituyendo la ecuación 3 en la ecuación anterior y sabiendo que $\Delta x \Delta y \Delta z = \Delta V$,

$$-\tau \frac{\partial v}{\partial y} = \frac{\Delta P}{\Delta V} \quad (3.4c)$$

aplicando la ecuación de la ley de viscosidad de Newton (ecuación 3.1)

$$\mu \left(\frac{\partial v}{\partial y} \right)^2 = \frac{\Delta P}{\Delta V}$$

asumiendo que el elemento de volumen es el mismo en el tanque de mezclado,

$$\frac{\Delta P}{\Delta V} = \frac{P}{V}$$

y definiendo a G como el gradiente de velocidad, dv / dy ,

$$\mu G^2 = \frac{P}{V} \quad \text{y} \quad G = \left(\frac{P}{\mu V} \right)^{1/2} \quad (5)$$

P es la potencia neta disipada en el elemento. De hecho, la potencia será disipada en las tres direcciones. Para mezcladores, la potencia disipada debe ser alta con tiempos de reacción relativamente cortos.

El cálculo de la energía disipada depende del dispositivo usado para el mezclador. La ecuación para la disipación de potencia en dispositivos hidráulicos es

$$P = \rho g Q h_L \quad (3.6)$$

donde

h_L son las pérdidas de cabeza en el dispositivo

ρ es la densidad del líquido

g es la aceleración de gravedad

Q es el flujo volumétrico

Una vez que se calcula P de la ecuación (3.6) este se inserta en la ecuación (3.5) para encontrar el gradiente de velocidad.

Frecuentemente los tanques de mezclado rápido tienen tiempos de residencia y gradientes de velocidad como los que se muestran en la tabla 2. Los tiempos de residencia de 20 a 60 segundos son los que se usan por lo general, aunque hay tanques de mezclado que tienen tiempos de residencia más cortos como 10 segundos o relativamente grandes que van de 2 a 5 minutos [9, 13, 22].

Tabla 3.2. Tiempos de residencia y gradientes de velocidad de tanques de mezclado rápido

| Tiempos de residencia (s) | G (s^{-1}) |
|---------------------------|------------------|
| 20 | 1000 |
| 30 | 900 |
| 40 | 790 |
| 50 o más | 700 |

AWWA (1990) [1]

4 FLOCULACION

La floculación es el proceso mediante el cual las moléculas ya desestabilizadas entran en contacto entre sí, aumentando el tamaño de los flocs, de modo de facilitar la precipitación. Siendo la aglutinación de materia en suspensión coloidal y finamente dividida después de la coagulación.

El objetivo principal de la floculación es reunir las partículas desestabilizadas para formar aglomeraciones de mayor peso y tamaño que sedimenten con mayor eficiencia.

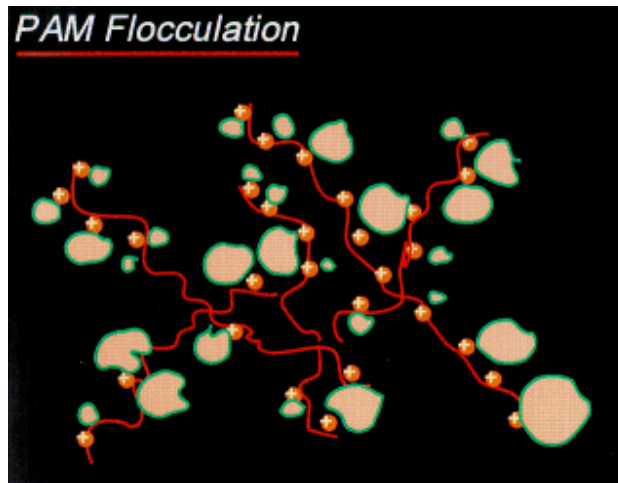


Figura 4.1. Flóculo

La floculación tiene relación con los fenómenos de transporte dentro del líquido para que las partículas hagan contacto. Esto implica la formación de puentes químicos entre partículas de modo que se forme una malla de coágulos, la cual sería tridimensional y porosa. Así se formaría, mediante el crecimiento de partículas coaguladas, un flóculo "floc" suficientemente grande y pesado como para sedimentar.

4.1 MECÁNICA DEL PROCESO

Normalmente, la floculación se analiza como un proceso causado por la colisión entre partículas. En ella intervienen, en forma secuencial, tres mecanismos de transporte:

- 1) Floculación pericinética o browniana. Se debe a la energía térmica del fluido.
- 2) Floculación ortocinética o gradiente de velocidad. Se produce en la masa del fluido en movimiento.
- 3) Sedimentación diferencial. Se debe a las partículas grandes, que, al precipitarse, colisionan con las más pequeñas, que van descendiendo lentamente, y ambas se aglomeran.

Al dispersarse el coagulante en la masa de agua y desestabilizarse las partículas, se precisa de la floculación pericinética para que las partículas coloidales de tamaño menor de un micrómetro empiecen a aglutinarse. El movimiento browniano actúa dentro de este intervalo de tamaño de partículas y forma el microfloculo inicial. Recién cuando este alcanza el tamaño de un micrómetro empieza a actuar la floculación ortocinética, promoviendo un desarrollo mayor del microfloculo. Se encontró que si los gradientes de velocidad en el agua son mayores de 5 s^{-1} y las partículas tienen un diámetro mayor de un micrómetro, el efecto de la floculación pericinética [4,8] es despreciable.

4.2 FLOCULACIÓN ORTOCINÉTICA

La floculación ortocinética nos indica que el número de choques es proporcional a la concentración de las partículas, al gradiente de velocidad (G) y al tamaño de estas. A medida que aumenta el tamaño de las partículas debido a choques entre ellas, su número disminuye, por lo que en definitiva disminuye el número de choques posibles. Además a medida que los flocs crecen se hace posible una posible ruptura de ellos por fuerzas de corte existentes en el líquido, lo cual limita por una cota superior el valor de 'G'.

Si existen 'n1' partículas de diámetro 'd1' y 'n2' partículas de diámetro 'd2' por unidad de volumen y éstas son cantidades fijas y el gradiente de velocidad constante en toda la masa líquida, se puede expresar el número de choques entre los dos tipos de partículas por medio de:

$$\frac{dN_1}{dt} n_2 = \frac{dN_2}{dt} n_1 = \frac{1}{6} G n_1 n_2 (d_1 + d_2)^3 \quad (4.1)$$

Este factor G es sobre el cual uno puede actuar en la floculación y de ahí su importancia. Se ha estimado el valor de G para varias plantas de Estados Unidos y se concluyó que su valor se mueve en el intervalo de 10 – 100 seg⁻¹.

Se considera un valor inferior de G ya que mientras mayor es G hay mayor probabilidad de floculación y por otro lado se toma un valor superior debido a que un valor muy grande de G puede generar ruptura de los flocs ya formados por la acción de fuerzas de corte del líquido.

4.3 FACTORES QUE INFLUYEN EN LA FLOCULACIÓN

Los principales factores que influyen en la eficiencia de este proceso son:

- La naturaleza del disolvente;
- las variaciones de caudal;
- la intensidad de agitación;
- el tiempo de floculación, y
- el número de compartimentos de la unidad.

4.3.1 Naturaleza del solvente

La coagulación y, por consiguiente, la floculación son extremadamente sensibles a las características fisicoquímicas tales como la alcalinidad, el pH y la turbiedad.

La concentración y la naturaleza de las partículas que producen la turbiedad también tienen una notable influencia en el proceso de floculación, en la práctica: por regla general, es más fácil flocular aguas con elevada turbiedad y que presenten una amplia distribución de tamaños de partículas. Mientras que las partículas de mayor tamaño, pueden ser removidas en tanques de sedimentación simple.

4.3.2 Variación del caudal

Al disminuir el caudal, aumenta el tiempo de retención y disminuye el gradiente de velocidad. Al aumentar el caudal, el tiempo de retención disminuye, el gradiente de velocidad se incrementa.

4.3.3 Tiempo de floculación.

En todos los modelos la permanencia del agua en el floculador durante un tiempo inferior o superior al óptimo produce resultados mediocres, tanto más acentuados cuanto más se aleje este del tiempo óptimo de floculación.

Es necesario, por lo tanto, que se adopten medidas para aproximar el tiempo real de retención en el tanque de floculación al tiempo nominal escogido. Esto se puede obtener si se secciona el tanque floculación en compartimientos, mediante pantallas deflectoras. Cuanto mayor sea el número de compartimientos, menores serán los cortocircuitos del agua.

Con el seccionamiento y la elección de valores adecuados para los gradientes de velocidad, se aumenta la eficiencia del proceso y o se reduce el tiempo necesario de floculación.

4.3.4 Influencia del gradiente de velocidad

Cuanto mayor es el gradiente de velocidad, más rápida es la velocidad de aglomeración de las partículas. Mientras tanto, a medida que los flóculos aumentan de tamaño, crecen también las fuerzas de cizallamiento hidrodinámico, inducidas por el gradiente de velocidad. Los flóculos crecerán hasta un tamaño máximo, por encima del cual las fuerzas de cizallamiento alcanzan una intensidad que los rompe en partículas menores.

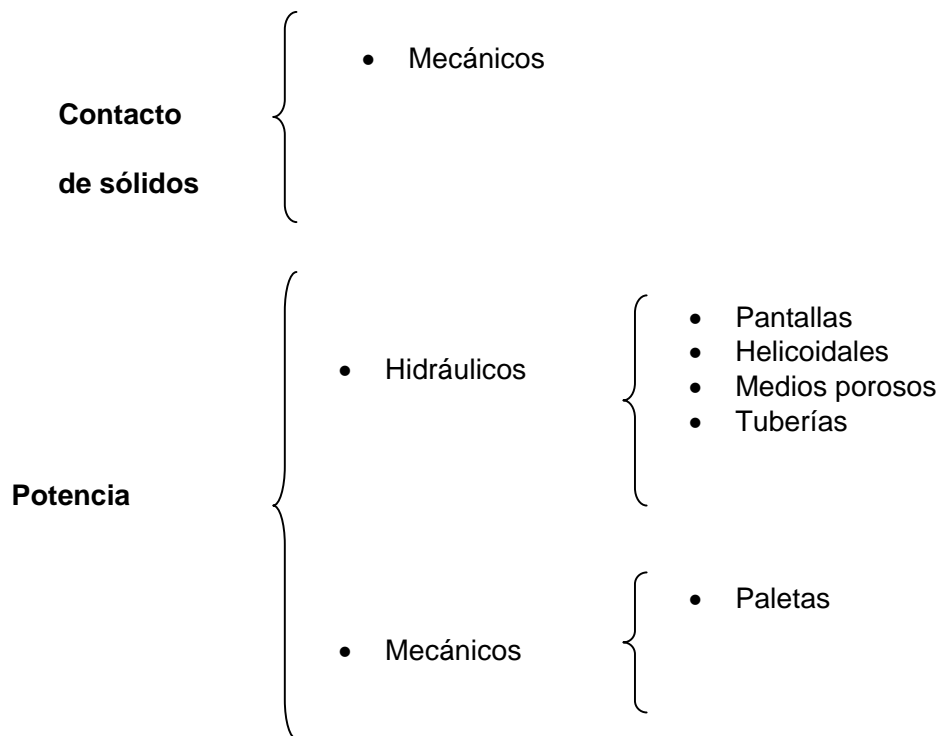
Los valores recomendados de gradientes de velocidad para la floculación se encuentran dentro de un rango de 100 a 10 s^{-1} . Naturalmente, conviene realizar el seccionamiento del tanque con gradientes escalonados en forma decreciente. Por ejemplo, se pueden disponer cuatro cámaras de floculación en serie a las que se les aplican gradientes de 90, 50, 30 y 20 s^{-1} , respectivamente, en la primera, segunda, tercera y cuarta cámaras.

4.3.5 Floculadores

Se acostumbra clasificar a los floculadores como mecánicos o hidráulicos de acuerdo con el tipo de energía utilizada para agitar la masa de agua. Puede hacerse una clasificación más amplia si se tiene en cuenta el modo como se realiza la aglomeración de las partículas. De acuerdo con este principio, podemos clasificarlos del siguiente modo:

- Floculadores de contacto de sólidos, y
- Floculadores de potencia o de disipación de energía.

Cuadro 4.1. Clasificación de floculadores



Como se puede observar en el cuadro anterior hay una gran variedad de flocladores donde se requiere un mezclado ligero o suave. Por lo regular los tanques de mezclado para este propósito son mecánicos con paletas, los cuales son los más comunes y eficientes.

El grado de éxito de la floculación depende de la comodidad con que los pequeños microfloculos se aglomeran dentro de una gran partícula (floculo) y del número total de colisiones entre partículas durante la floculación. El éxito del proceso de floculación terminado depende de las características del floc, el gradiente de velocidad (G), y del valor de GT .

El parámetro GT esta relacionado con el número total de colisiones durante la aglomeración en el proceso de floculación. Un alto valor de GT indica un gran número de colisiones durante la aglomeración.

Los tanques de floculación se diseñan con los valores de GT que se encuentran en el intervalo de 10^4 a 10^5 [1, 13, 22]. Los valores del gradiente de velocidad (G) varían de 10 a 60 seg^{-1} [1, 13, 22] y los tiempos de retención (T) son de 15-45 minutos [1, 13, 22]. Además estos dispositivos tienen dos o más tanques en serie para asegurar que todas las partículas están expuestas al mezclado.

4.3.5.1 Flocladores de paletas

Los flocladores de paletas tienen compartimentos los cuales tienen uno o más juegos de paletas. Las paletas deben se orientan como se muestra en la figura 4.2 y 4.3. La potencia de salida suministrada por la paleta al fluido, depende de la fuerza de arrastre y de la velocidad relativa del fluido con respecto al de la paleta.

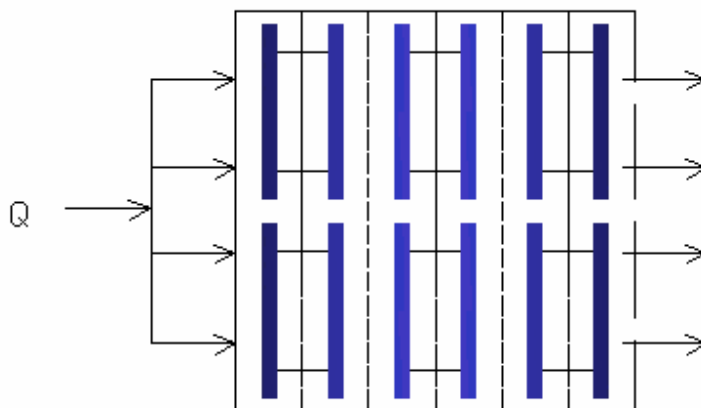


Figura 4.2. Floclador de paletas con un flujo perpendicular a las paletas.

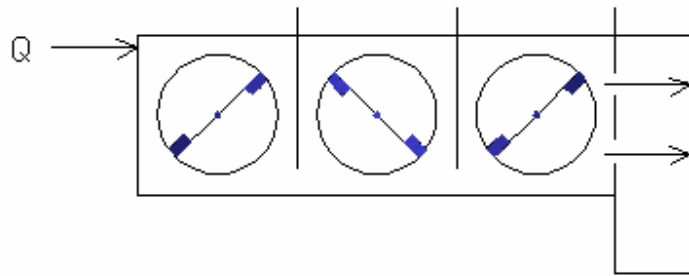


Figura 4.3. Floculador de paletas con compartimentos de igual profundidad.

La figura 4.4 muestra una paleta con la siguiente simbología:

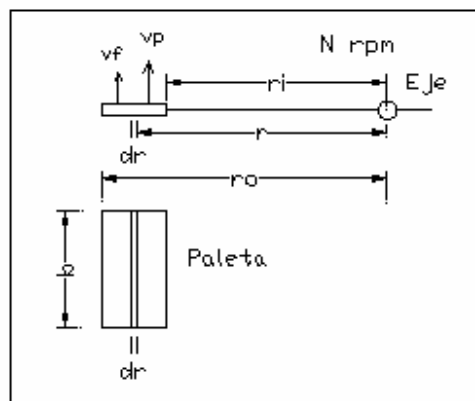


Figura 4.4. Paleta en un floculador.

v_f = velocidad del fluido

v_p = velocidad de la paleta

r_i = distancia del centro de la flecha al borde interior de la paleta

r_o = distancia del centro de la flecha al borde exterior de la paleta

b = largo de la paleta

N = revoluciones de la flecha

La velocidad del fluido será menor que la velocidad de la paleta, por un factor k , por que resbala la paleta. La disipación de energía por fricción depende de la velocidad relativa, v .

$$v = v_p - v_f = v_p - k v_p = v_p (1 - k) \quad (4.2)$$

Siendo la velocidad de la paleta a una distancia r ,

$$v_p = \frac{2\pi N}{60} r \quad (4.3)$$

La ecuación de la fuerza de arrastre de la paleta sobre el fluido es:

$$F_D = \frac{1}{2} \rho C_D A v^2 \quad (4.4)$$

donde

A : es el área de la paleta

F_D : es la fuerza de arrastre

C_D : es el coeficiente de arrastre

La potencia impartida al fluido por un elemento de área de la paleta es

$$dP = dF_D v = \frac{1}{2} \rho C_D v^3 dA \quad (4.5a)$$

conociendo que $dA = b dr$ además sustituir la ecuación (4.3) en (4.2) y la ecuación resultante se sustituye en (5a) para obtener:

$$dP = \frac{1}{2} \rho C_D b \left[\frac{2\pi N}{60} (1 - k) \right]^3 r^3 dr \quad (4.5b)$$

integrando

$$P = \frac{1}{2} \rho C_D b \left[\frac{2\pi N}{60} (1 - k) \right]^3 \int_{r_i}^{r_o} r^3 dr$$

$$P = (1.44 \times 10^{-4}) C_D \rho b [N(1 - k)]^3 (r_o^4 - r_i^4) \quad (4.5c)$$

Por lo regular hay más de un juego de paletas por flecha. La ecuación (4.5c) puede ser aplicada individualmente para cada paleta y sumar los resultados para obtener la potencia total de disipación. Los parámetros recomendados para diseño de flocladores de paleta son los siguientes:

Velocidad periférica de las paletas: 0.09-0.9 m/s (0.3-3 ft/s)

$k = 0.25$ sin baffles, $k = 0-0.15$ con baffles [13]

$C_D \approx 1.8$ por paleta [13]

El área de las paletas es 15-20% del área de la sección transversal del tanque.

La relación de profundidad-área no debe ser mayor de 5m.

Los compartimentos en el floclador de paletas están frecuentemente separados por un baffle para igualar la distribución del flujo. Cuando los tanques de sedimentación están directamente abajo del tanque de floclación es preferible tener un baffle (también conocida como pared difusora) dentro del tanque floclador. El área del orificio del baffle es aproximadamente 3-6% del área del baffle para tener una velocidad de 0.3 m/s bajo condiciones de flujo máximo. El tamaño de un orificio debería ser entre 40 y 175 cm² (6-27 in²) [9, 13, 22].

5 DESARROLLO EXPERIMENTAL.

La planta Disolventes del Río se dedica a la recuperación y venta de disolventes, estos disolventes son de usos variables, en nuestro caso el solvente que nos ocupa es Monoetilenglicol (MEG) que se encuentra en un residuo proveniente de una reacción de polimerización.

El problema que presenta el empresario involucra el tratamiento del residuo industrial con una alta concentración de MEG: Las pruebas de destilación sin un tratamiento previo, llevadas a cabo por personal de la empresa no permitían obtener un producto (MEG) puro, ya que la destilación simple no era capaz de eliminar el polímero disuelto, no hay separación total del polímero.

El producto así obtenido usado en la elaboración de anticongelantes producía efectos indeseables debido al gran porcentaje de polímero contenido como impureza. Esta impureza se hacía visible al realizar una prueba simple de disolución con agua, dando una solución turbia, inconveniente para su comercialización como anticongelante y consecuentemente el rechazo y devolución del mismo.

5.1 MUESTRA DE RESIDUO

La muestra con la que se experimento proviene de un contenedor de 40 000 litros de capacidad que almacena el residuo industrial, la muestra se obtiene con un toma-muestra que

asegura que ésta sea representativa, puesto que el toma-muestra cuenta con un dispositivo el cual recolecta muestra desde el fondo del contenedor hasta el domo del mismo.

Tabla 5.1. Caracterización del residuo industrial:

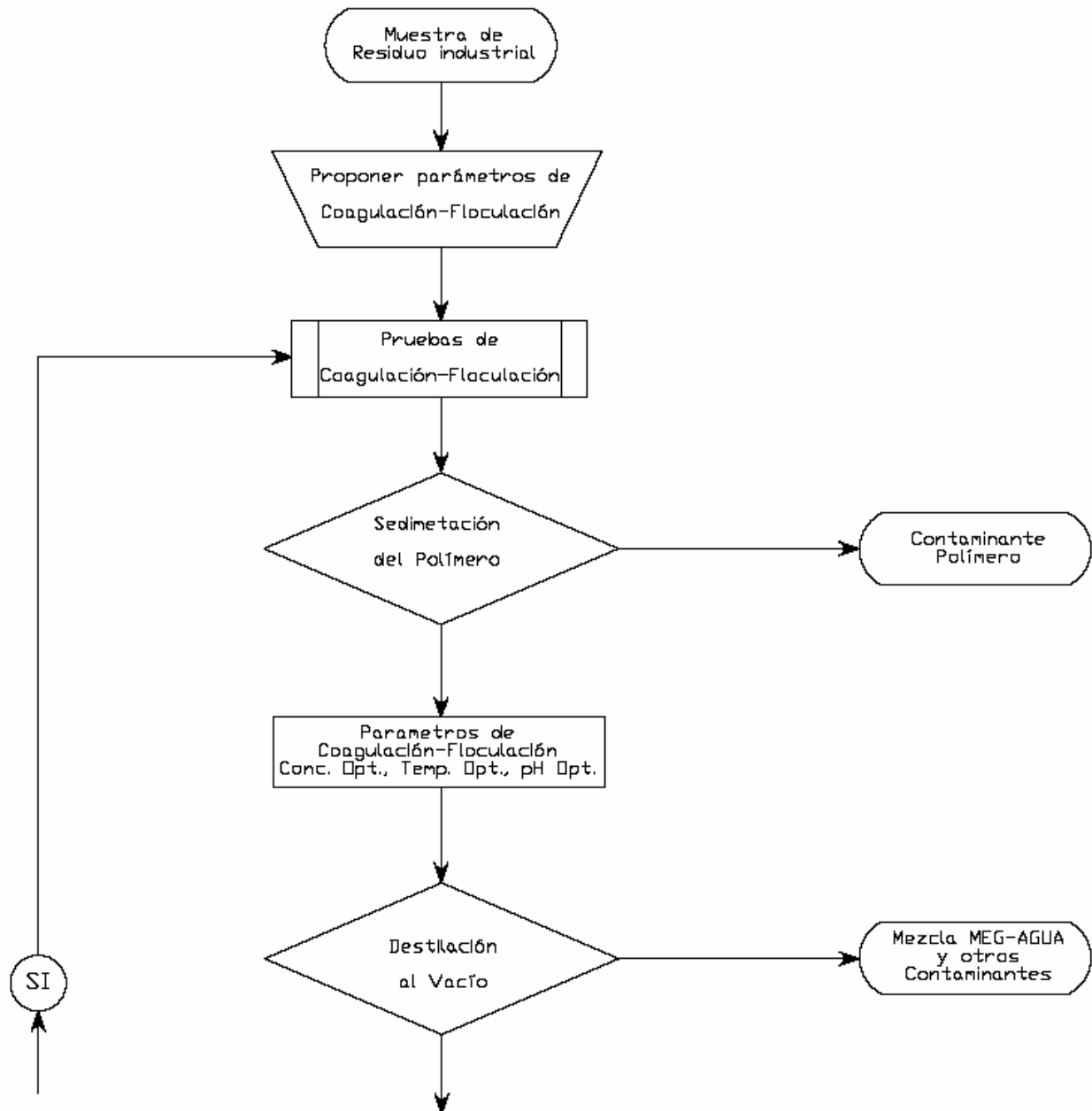
| Especificaciones del Residuo industrial conteniendo, MEG ⁽¹⁾ | |
|--|-----------------|
| Apariencia | Líquido viscoso |
| Olor | Característico |
| Color | Café oscuro |
| PH | 5-6 |
| Flamable | No |
| Densidad relativa @ 20°C /4°C | 1.153 |
| Etilenglicol % peso | 56.9 ± 4.4 |
| Agua % peso | 14.8 ± 1.4 |
| Lodos % peso | 17.4 ± 1.5 |
| Otros ⁽²⁾ % peso | 10.9 ± 1.6 |

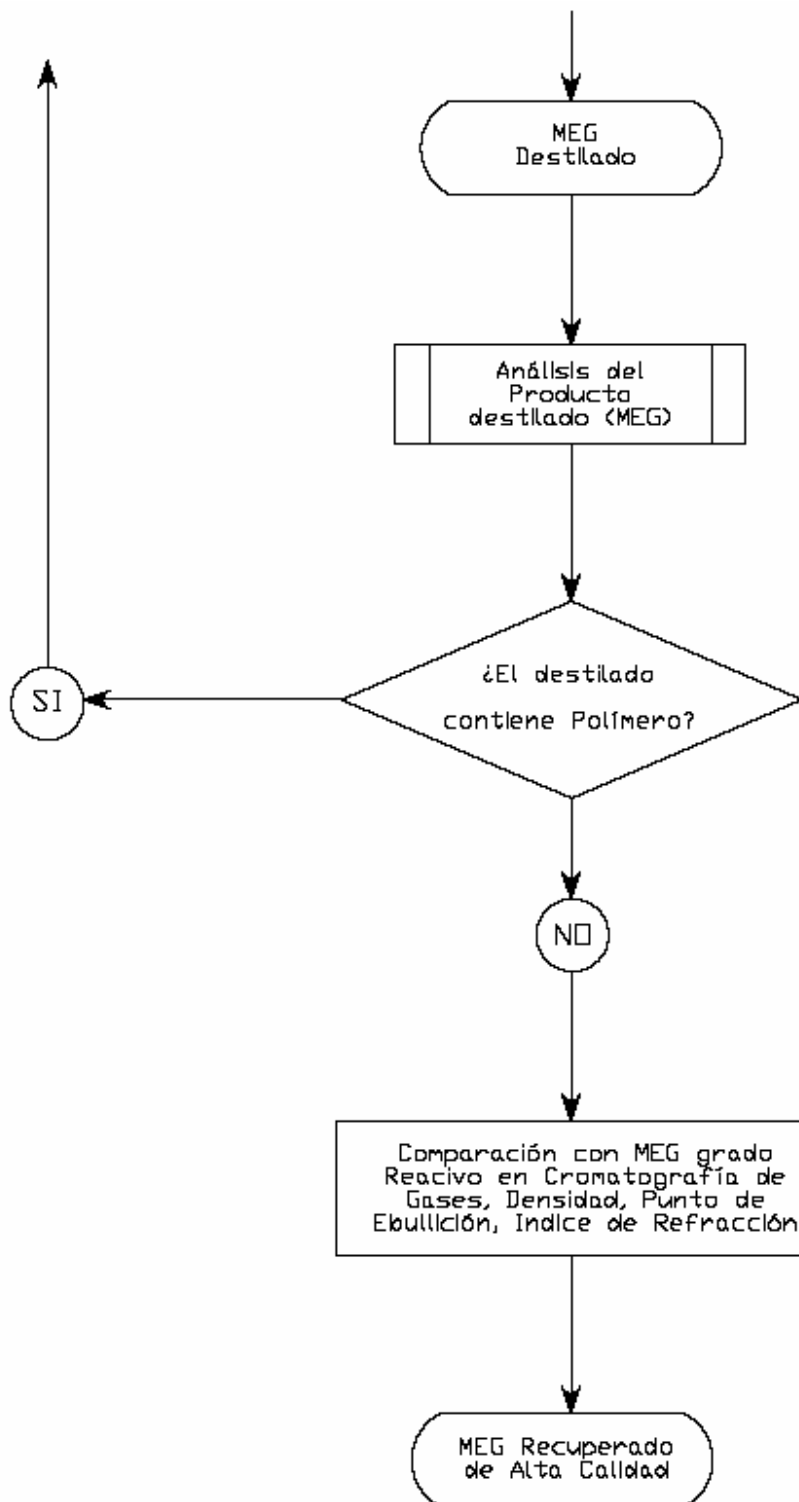
1. Estas especificaciones fueron determinadas con muestras representativas de 1.2 y 1.5 litros.
2. Otros: dietilenglicol, polímero, sólidos sedimentables.

5.2 METODOLOGÍA DE PURIFICACIÓN

La metodología propuesta en la purificación de MEG en estos residuos industriales, que una de sus impurezas es el polímero emulsionado, tiene como objetivo determinar las bases de diseño del proceso para la obtención de MEG puro y los parámetros requeridos en las operaciones de separación por lo que se propone la siguiente metodología:

Diagrama 5.1. Metodología de Purificación de MEG





El procedimiento presentado a continuación resultó de varias pruebas realizadas siguiendo el diagrama de flujo anterior en la metodología de separación.

5.3 PROCEDIMIENTO PARA TRATAMIENTO DEL RESIDUO

1. Ajustar el pH del residuo, agregando hidróxido de potasio (KOH) con una agitación intensa, hasta obtener un pH de 8-9.
2. Se agrega el coagulante. En este paso la solución debe estar en una agitación violenta, para que se distribuya uniformemente el coagulante en la solución.

La dosis de coagulante que se recomienda debe estar entre 0.3 % – 0.5 % volumen/volumen. Con un tiempo de agitación no mayor a 5 minutos.

3. Una vez transcurridos los 5 minutos esperar de 30 a 60 minutos para dejar que se lleve a cabo la floculación (aglomeración de los flocs).
4. Al término de la etapa coagulación-floculación se realiza la destilación a presión de vacío, la cual se efectúa en un recipiente de 2 000 ml, se dispone de medidores de temperatura entre fondo y domo, una columna (vigreaux), un condensador, un medidor de presión en tubo de U de mercurio y, un dispositivo para separar el destilado en fracciones (ver figura 5.1).

Durante la destilación se mide continuamente la temperatura del destilado en el domo de la columna, este dato se compara con el dato correspondiente al del equilibrio a la presión absoluta del sistema (diagrama P-T para el componente puro), si la temperatura es menor o mayor que la que se obtendría para esa condición, el producto no ha alcanzado la pureza de MEG deseada.

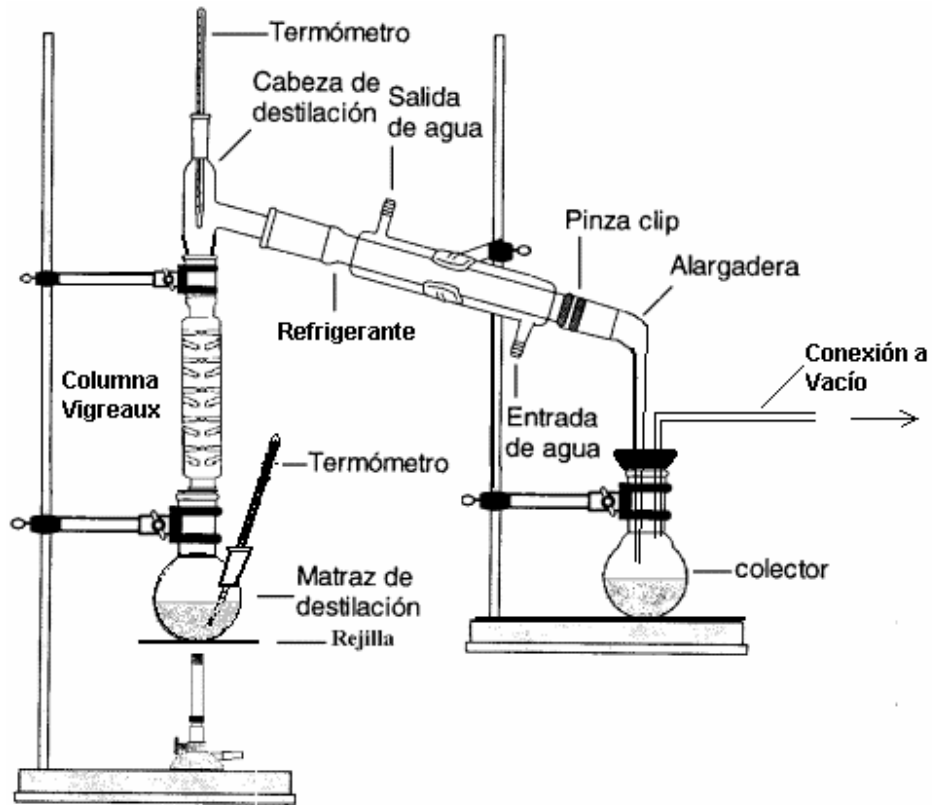
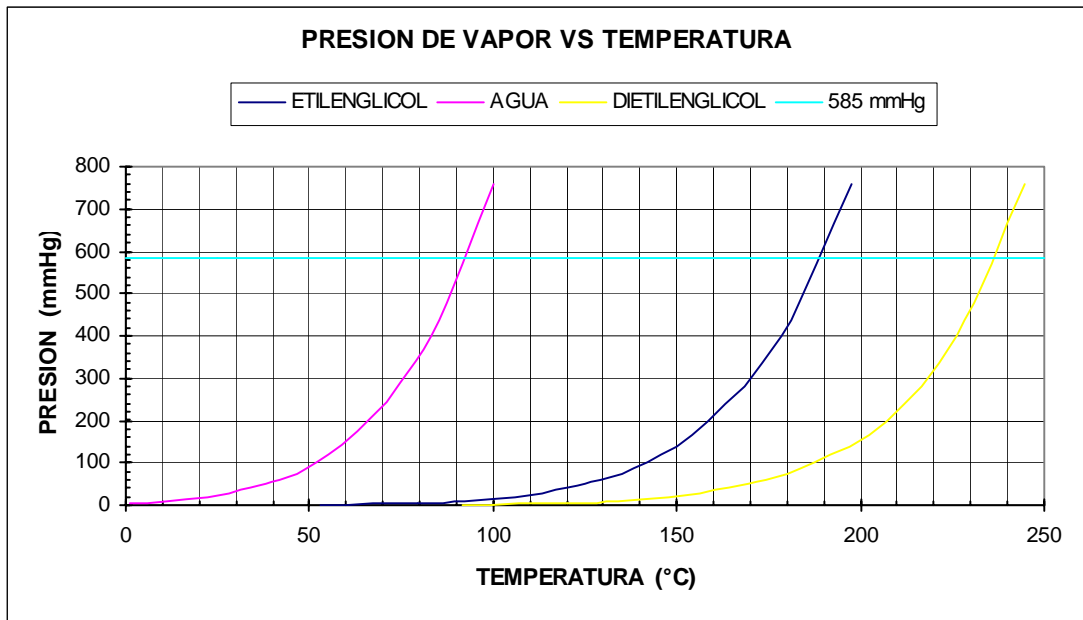


Figura 5.1. Equipo de destilación a presión de vacío.



Gráfica 5.1

Al finalizar la destilación al vacío se recomienda dejar enfriar y desconectar el equipo con cuidado.

5. Se pesa el producto obtenido (MEG), las colas del destilado y los lodos para cuantificar el contenido residual de producto en el residuo.
6. Una vez teniendo el producto se realizan los análisis para caracterizarlo: densidad, índice de refracción, punto de ebullición y cromatografía.

5.4 RESULTADOS EXPERIMENTALES

5.4.1 Resultados Coagulación Floculación

La coagulación-floculación tiene como objetivo determinar las condiciones (parámetros) de desestabilización del polímero y así obtener un buen flóculo que sedimente fácilmente. Estos parámetros suelen ser: dosis óptima de coagulante, pH, temperatura. La experimentación se realizó de acuerdo a la bibliografía [13, 22] y tomando como referencia las pruebas de jarra.

Como primer paso se determina el intervalo de pH donde el coagulante muestre gran eficiencia. Ya que algunos coagulantes trabajan a pH básicos, neutros, ácidos o en un intervalo determinado de pH.

Tabla 5.2. Efecto producido por los reactivos ensayados en la muestra de residuo industrial

| Muestra ⁽¹⁾ | pH | KOH ⁽²⁾ (ml) | Coagulante ⁽³⁾ (ml) | Solución |
|------------------------|----|----------------------------|-----------------------------------|----------|
| 1 | 6 | 1.0 | 0.1 | Mala |
| 2 | 8 | 1.25 | 0.1 | Regular |
| 3 | 9 | 1.5 | 0.1 | Buena |
| 4 | 9 | 1.5 | 0.1 | Buena |
| 5 | 9 | 1.5 | 0.1 | Buena |
| 6 | 11 | 2.0 | 0.1 | Mala |
| 7 | 11 | 2.0 | 0.1 | Buena |
| 8 | 11 | 2.0 | 0.1 | Regular |

- 1) Muestras de 20 ml.
2) Solución de KOH 1M
3) Coagulante SUPERFLOC (CYTEC INDUSTRIES INC.)

De acuerdo a la observación visual en la cantidad sedimentada de polímero se hacen las siguientes afirmaciones.

La solución se cataloga como “mala” cuando:

- no hay una buena formación de flóculos
- la solución se gelifica
- hay formación de 2 o más fases.

Se considera regular cuando:

- se observa una pequeña cantidad de sedimento.

Al decir que es buena se refiere a que:

- el flóculo se forma rápidamente y este sedimenta con facilidad, obteniéndose una cantidad considerable de sedimento.

Una vez que se tiene el intervalo de pH -donde se observa la formación de del coágulos- se determina la dosis óptima del coagulante, esto es con el propósito de formar un buen flóculo de fácil sedimentación. La dosis propuesta comienza de acuerdo a lo reportado en la bibliografía [4, 8, 12], 0.3 – 0.5% v/v, hasta obtener la dosis indicada para nuestro caso.

Tabla 5.3 Efecto de la cantidad de coagulante utilizada respecto a la temperatura y a pH constante.

| Muestra ⁽¹⁾ | pH | Coagulante (ml) | Cantidad de Sedimento (polímero) | Características de la solución |
|------------------------|----|-----------------|----------------------------------|---|
| 1 | 9 | 0.12 | Mala | ----- |
| 2 | 9 | 0.12 | Mala | ----- |
| 3 | 9 | 0.10 | Buena | Se observa alta concentración de Flóculos |
| 4 | 9 | 0.10 | Buena | Se observa alta concentración de Flóculos |
| 5 | 9 | 0.08 | Buena | Se observa lo mismo que la concentración de muestra 3 y 4 |
| 6 | 9 | 0.08 | Buena | Se observa lo mismo que la concentración de muestra 3 y 4 |
| 7 | 9 | 0.06 | Buena (+) | Se observa una leve mejoría con respecto a la muestra 3 y 4 |
| 8 | 9 | 0.06 | Buena (+) | Se observa una leve mejoría con respecto a la muestra 3 y 4 |
| 9 | 9 | 0.04 | Mala | ----- |
| 10 | 9 | 0.04 | Mala | ----- |

1) Muestras de 20 ml

Teniendo el pH y la dosis de coagulante, se observa el efecto de la temperatura, la cual puede provocar variaciones en la coagulación-floculación.

Tabla 5.4 Efecto de la temperatura en la coagulación-floculación a pH constante y cantidad de coagulante constante

| Muestra ⁽¹⁾ | pH | Coagulante (ml) | Temperatura (°C) | Calidad de Solución |
|------------------------|----|-----------------|------------------|---------------------|
| 1 | 9 | 0.1 | 10 | Buena |
| 2 | 9 | 0.1 | 20 | Buena |
| 3 | 9 | 0.1 | 30 | Buena |
| 4 | 9 | 0.1 | 40 | Buena |
| 5 | 9 | 0.1 | 50 | Buena |

1. Muestras de 20 ml

5.4.2 Rendimiento óptimo

En esta etapa de la experimentación se obtienen los parámetros para el rendimiento óptimo del coagulante en el proceso de coagulación, donde se observa que el coagulante trabaja a un pH básico y; se observa que la temperatura no juega un papel importante en este caso para la etapa de coagulación, por lo que se tomara la temperatura ambiente como temperatura de trabajo.

Tabla 5.5. Parámetros de Coagulación.

| | |
|---------------------|-------------------|
| Parámetro | |
| pH | 9 |
| Temperatura | Ambiente |
| Dosis de coagulante | 0.35 – 0.40 % v/v |
| Presión | 585 mmHg |

5.4.3 Resultados de destilación a presión de vacío

La destilación con rectificación a presión de vacío es utilizada para:

- bajar la temperatura de ebullición
- no tener un producto que contenga sustancias quemadas como contaminante
- recuperar un producto de alta calidad

Una vez que en el proceso de coagulación-floculación se separa el polímero disuelto se obtiene como producto una solución translúcida coloreada levemente (amarillo claro), que contiene MEG, agua y algunos componentes solubles. Esta mezcla (sin sólidos suspendidos) multicomponente se lleva al matraz de destilación como se observa en la figura 5.1.

La destilación se lleva a cabo a baja presión con el propósito de separar el MEG a “baja” temperatura.

El equipo donde se realiza la destilación es similar a la figura 5.1

En el laboratorio se hicieron dos corridas experimentales y se obtuvieron los siguientes resultados:

Corrida # 1

Cantidad de mezcla: 1200 ml.

Presión Manométrica: 509 mmHg

Presión Absoluta: 76 mmHg

Hora de inicio: 13:10 hrs

Tabla 5.6. Datos de destilación a presión de vacío de la muestra 1.

| HORA | TEMPERATURA (°C) | | MATRAZ |
|-------|------------------|-------|--------|
| | Domo | Fondo | |
| 13:10 | 22 | 22 | # 1 |
| 13:20 | 42 | 50 | # 1 |
| 13:23 | 42 | 52 | # 1 |
| 13:48 | 44 | 64 | # 1 |
| 13:56 | 46 | 78 | # 1 |
| 14:01 | 100 | 134 | # 1 |
| 14:04 | 124 | 136 | # 2 |
| 14:16 | 124 | 136 | # 3 |
| 14:23 | 126 | 140 | # 4 |
| 14:28 | 128 | 140 | # 4 |

Corrida # 2

Cantidad de mezcla: 1500 ml.

Presión Manométrica: 479 mmHg

Presión Absoluta: 106 mmHg

Hora de inicio: 14:24 hrs

Tabla 5.7. Datos de destilación a presión de vacío de la muestra 2.

| HORA | TEMPERATURA (°C) | | MATRAZ |
|--------|------------------|-------|--------|
| | Domo | Fondo | |
| 14:24 | 24 | 24 | ---- |
| 14:44 | 40 | 60 | ---- |
| 14:56 | 43 | 62 | ---- |
| 15:15 | 49 | 89 | ---- |
| 15:31 | 83 | 101 | ---- |
| 15:45 | 108 | 117 | ---- |
| 15:50 | Pausa | | |
| 16:33 | Reanudación | | |
| 16:47 | 100 | 132 | # 1 |
| 16:50 | 105 | 132 | # 1 |
| 16:55 | 110 | 132 | #2 |
| 16:59 | 109 | 132 | # 2 |
| 17:02 | 112 | 135 | # 2 |
| 17:03 | 114 | 140 | # 3 |
| 17:010 | 114 | 140 | # 3 |

Una vez obtenidas las fracciones separadas como a continuación se muestran, se observan el de mayor y menor contenido de MEG.

Tabla 5.8. Relación de % w/w de entidades contenidas en el residuo.

| Muestra | Sustancia | Masa (g) | Contenido de MEG en el residuo industrial (% w/w) |
|---------------|-----------|----------|---|
| # 1 1200 g | MEG | 630.0 | 52.5 |
| | Agua | 193.4 | 16.1 |
| | Lodos | 227.1 | 18.9 |
| | Otros | 149.5 | 12.5 |
| # 2 1500 g | MEG | 919.3 | 61.3 |
| | Agua | 201.7 | 13.4 |
| | Lodos | 238.5 | 15.9 |
| | Otros | 140.5 | 9.4 |

Otros: partículas suspendidas, polímeros de alto peso molecular, dietilenglicol, trietilenglicol.

5.4.4 Análisis de MEG purificado

Una vez obtenido el MEG purificado por destilación se hace un análisis usando el cromatógrafo de gases.

Se comparan el producto destilado y el MEG de grado analítico de marca MERK INDEX.

Por cromatografía de gases se constató que las dos muestras son productos de calidad semejante. En la tabla 5.9 y 5.10 se muestran los resultados del análisis obteniéndose para la muestra de de MERK INDEX un valor promedio de 99.84 % (w/w) y para la muestra MEG destilado un valor promedio de 99.85% (w/w) de pureza.

Tabla 5.9. Resultados de la cromatografía de MEG grado analítico

| Caso | Tiempo de retención | Área | % Área |
|------|---------------------|---------|--------|
| 1 | 0.483 | 9.21 | 0.16 |
| | 0.816 | 5782.90 | 99.84 |
| 2 | 0.483 | 5.80 | 0.10 |
| | 0.816 | 5695.18 | 99.90 |
| 3 | 0.500 | 15.75 | 0.22 |
| | 0.816 | 7060.15 | 99.78 |

Tabla 5.10. Resultados de la cromatografía de MEG destilado

| Caso | Tiempo de retención | Área | % Área |
|------|---------------------|---------|--------|
| 1 | 0.466 | 4.79 | 0.09 |
| | 0.816 | 5324.44 | 99.85 |
| | 3.133 | 3.19 | 0.06 |
| 2 | 0.483 | 7.15 | 0.12 |
| | 0.800 | 6114.15 | 99.81 |
| | 3.216 | 4.27 | 0.07 |
| 3 | 0.500 | 2.58 | 0.04 |
| | 0.800 | 6437.44 | 99.88 |
| | 3.233 | 5.16 | 0.08 |
| 4 | 0.483 | 4.59 | 0.07 |
| | 0.816 | 6557.95 | 99.86 |
| | 3.183 | 4.60 | 0.07 |

5.5 DISCUSIÓN DE RESULTADOS

En la etapa de coagulación-floculación obtenemos los parámetros de óptimos; donde se obtiene la dosis óptima del coagulante, se encuentra en un intervalo de 0.5% a 0.3%. Se observa que la dosis es óptima al 0.3%, pero también se puede observar en la tabla 5.3 que por debajo de esta concentración la formación de coágulos es mala, por lo que se trabajará en una concentración de 0.35% - 0.4%, para un proceso a gran escala.

Tabla 5.11. Parámetros de Coagulación.

| Parámetro | |
|---------------------|-------------------|
| pH | 9 |
| Temperatura | Ambiente |
| Dosis de coagulante | 0.35 – 0.40 % v/v |
| Presión | 585 mmHg |

El pH donde trabaja mejor es a un pH 9, es un parámetro importante debido a que el coagulante utilizado tiene un intervalo de trabajo de pH: 5 a 8; pero esto solo es una recomendación del fabricante y aunque estemos trabajando por arriba de este límite se observa una buena formación de flóculos.

Hay que recordar que esta prueba se debe practicar a cada lote a procesar, puesto que la concentración de sólidos y polímero varía de lote a lote, teniendo como consecuencia una ligera desviación de la dosis de coagulante. Además como se observa, se tiene un máximo en la tabla 5.3 y se puede ver que por debajo de este máximo la coagulación es mala.

Al comparar el MEG recuperado por nuestro procedimiento con los productos comerciales de MERK INDEX grado analítico y MEG grado fibra de grupo IDESA; se observa que puede competir puesto que, muestra características similares a productos de alta calidad, tabla 5.12.

Tabla 5.12. Comparación de resultados de análisis de MEG

| Prueba | MEG grado analítico (MERK INDEX) | Grupo IDESA Petroquímica Coatzacoalcos, Ver. | MEG recuperado |
|-------------------------------------|----------------------------------|--|---------------------------------|
| Punto de ebullición (°C) @ 585 mmHg | 186 min | 196 min @ 760 mmHg | 186 min |
| | 188 max | 199 max @ 760 mmHg | 188 max |
| densidad Kg/l, @ 20°C | 1.113 | 1.1151 min | 1.11 |
| | | 1.1154 max | |
| Índice de Refracción @ 20°C | 1.4310 ⁽¹⁾ | 1.4290 mín | 1.4305 mín⁽¹⁾ |
| | | 1.4330 max | 1.4310 max⁽¹⁾ |
| Cromatografía de gases (% área) | 99.78 min ⁽²⁾ | 99.8 min | 99.81 mín⁽²⁾ |
| | 99.90 max ⁽²⁾ | | 99.88 max⁽²⁾ |

1. Refractómetro de ABE ATAGO 1T con termómetro digital.
2. Cromatógrafo de gases GOW MAC Instrument Company serie 580.

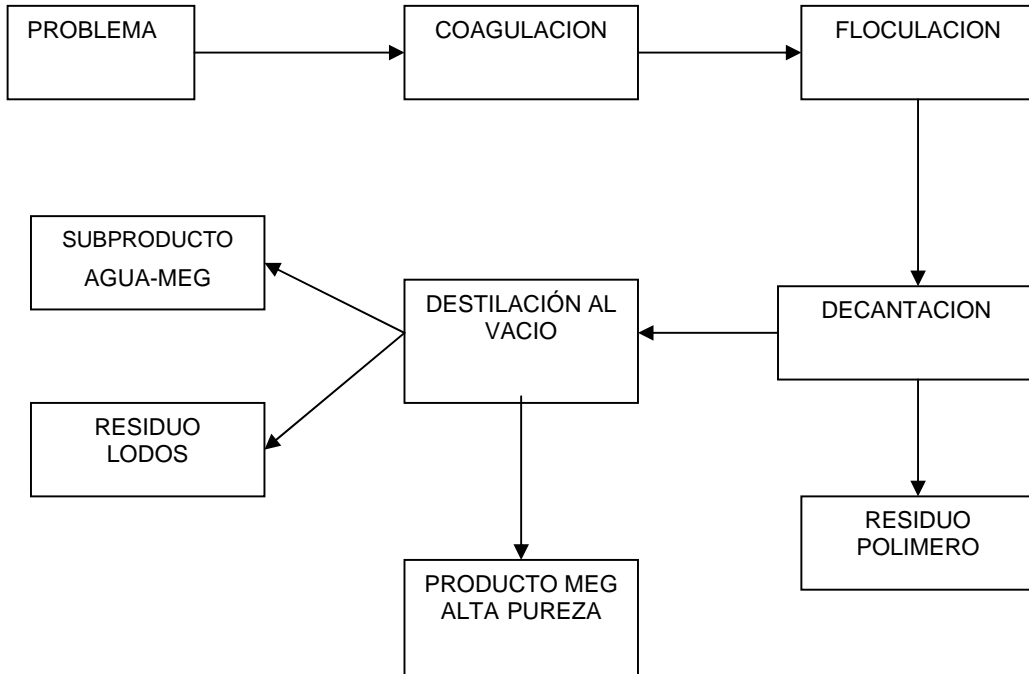
5.6 CONCLUSIONES DE LA PARTE EXPERIMENTAL

De acuerdo con los resultados reportados, se concluye que la pureza del producto recuperado es comparable a la de los productos del mercado: el MEG recuperado: (99.85 %), el MEG grado analítico de MERK INDEX: 99.84%, el MEG del Grupo IDESA es de 99.80 %.

A la luz de los resultados experimentales a escala de laboratorio estamos en la posibilidad de proponer un proceso a escala industrial que permitiría recuperar MEG grado analítico a partir de un residuo Industrial.

El proyecto planteado en el capítulo VII que permitiría la recuperación del residuo a escala industrial se podría implementar en un futuro próximo y requiere tomar en cuenta el trabajo experimental que ha permitido obtener un producto de alta calidad.

Diagrama 5.2. Proceso propuesto



6 DISEÑO DE PROCESO

6.1 GENERALIDADES

6.1.1 Función de la planta

El objetivo de esta planta es recuperar monoetilenglicol (MEG) con calidad suficiente para entregarse como producto final, utilizando como cargas un residuo industrial proveniente de una reacción de polimerización.

6.2 TIPO DE PROCESO

Es un proceso batch que involucra un proceso de Coagulación-Floculación como antecedente al proceso de Destilación a vacío.

6.2.1 Capacidad, rendimiento y flexibilidad

6.1.3.1 Factor de servicio

La planta operará durante 330 días al año, lo cual equivale a un factor de servicio de 0.90.

6.1.3.2 Capacidad y rendimiento

- La capacidad de diseño es de 13 500 litros diarios.
- La planta tendrá un 10% de sobrediseño.
- La capacidad mínima de la planta será el 100% de la capacidad de diseño.

6.3 FLEXIBILIDAD

6.3.1 Tipo de carga

La planta se diseñará para procesar una carga consistente en residuo industrial proveniente de una reacción de polimerización procedente de PEMEX.

La planta se diseñará para procesar esta corriente cuando se adquieran de los tanques de almacenamiento, es decir, contemplará en su diseño alimentaciones frías. Dichas corrientes serían enviadas directamente a proceso dentro de límites de batería.

6.3.2 Falla de energía eléctrica

A falla de energía eléctrica la planta no operará pero se efectuará un paro ordenado de la misma.

6.3.3 Falla de gas combustible

A falla de gas combustible la planta no operará pero se efectuará un paro ordenado de la misma.

6.3.4 Falla de instrumentos

A falla de instrumentos la planta no operará pero se efectuará un paro ordenado de la misma.

6.1.4.5 Falla de agua de enfriamiento

A falla de agua de enfriamiento la planta no operará pero se efectuará un paro ordenado de la misma.

6.1.4.6 Previsión de aumentos de capacidad

Se prevé un aumento de capacidad de 10% dentro de los próximos cinco años.

6.4 ESPECIFICACIÓN DE LAS ALIMENTACIONES

Tabla 6.1. Caracterización del residuo industrial:

| Especificaciones del Residuo industrial conteniendo, MEG ⁽¹⁾ | |
|--|-----------------|
| Apariencia | Líquido viscoso |
| Olor | Característico |
| Color | Café oscuro |
| pH | 5-6 |
| Flamable | No |
| Densidad relativa @ 20°C /4°C | 1.153 |
| Etilenglicol ⁽³⁾ % peso | 56.9 ± 4.4 |
| Agua ⁽³⁾ % peso | 14.8 ± 1.4 |
| Lodos % peso | 17.4 ± 1.5 |
| Otros ⁽²⁾ % peso | 10.9 ± 1.6 |

3. Estas especificaciones fueron determinadas con muestras representativas de 1.2 y 1.5 litros.

4. Otros: dietilenglicol, polímero, sólidos sedimentables.

6.5 ESPECIFICACIÓN DE LOS PRODUCTOS

6.5.1 Monoetilenglicol

| PROPIEDAD | VALOR | UNIDAD |
|---|-----------|-------------------|
| Peso molecular | 62.0682 | g/gmol |
| Densidad de líquido a 20°C | 1113.70 | Kg/m ³ |
| Densidad del gas (aire = 1) | 2.14 | Kg/m ³ |
| Peso específico (agua =1) | 1.11 | 1 |
| Punto de fusión | -12.96 | °C |
| Punto de ebullición | 197.34 | °C |
| Calor de fusión | 160.30 | KJ/Kg |
| Calor de vaporización a 25°C | 1063.14 | KJ/Kg |
| Calor de vaporización a 197.34°C | 849.60 | KJ/Kg |
| Temperatura crítica | 446.59 | °C |
| Presión crítica | 77.00 | bar |
| Densidad crítica | 324.78 | kg/m ³ |
| Tensión superficial a 25°C | 0.04798 | N/m |
| Índice de refracción (η_D^{20}) | 1.4318 | 1 |
| Conductividad eléctrica a 20°C | 1.07E-04 | S/m |
| Viscosidad dinámica a 25°C | 1.722E-02 | kg/m·s |
| Solubilidad en agua a 20°C | 100 | % en peso |
| Límite inferior de inflamabilidad en aire | 3.2 | % en mol |
| Límite superior de inflamabilidad en aire | 100 | % en mol |
| Temperatura de inflamación | 116 | °C |
| Temperatura de autoignición | 400 | °C |
| Entalpía de formación del líquido | 387.180 | kJ/mol |
| Capacidad calorífica del líquido a 25°C | 149.33 | J/mol·K |
| Capacidad calorífica del gas a 25°C | 97.11 | J/mol·K |
| Calor de vaporización a 25°C | 65.987 | kJ/mol |
| Calor de combustión a 25°C | 1058.13 | kJ/mol |

6.5.2 ESPECIFICACIÓN DE LOS SUBPRODUCTOS

| SUBPRODUCTO | ESPECIFICACIÓN |
|--------------|----------------------|
| Agua con MEG | Líquido transparente |
| | |

6.5.3 CONDICIONES DE LAS ALIMENTACIONES EN LIMITES DE BATERÍA

| ALIMENTACIÓN | ESTADO FÍSICO | TEMPERATURA (°C) | | | FORMA DE RECEPCION |
|---------------------|---------------|------------------|----------|--------|--------------------|
| | | Máxima | Normal | Mínima | |
| Residuo industrial | Líquido | 35 | AMBIENTE | 10 | Tubería |
| Coagulante | Líquido | 35 | AMBIENTE | 10 | Tubería |
| Hidróxido de calcio | Sólido | 35 | AMBIENTE | 10 | Tolva |

6.5.4 CONDICIONES DE LOS PRODUCTOS EN LIMITES DE BATERÍA

| PRODUCTO | ESTADO FÍSICO | TEMPERATURA (°C) | | |
|------------------|---------------|------------------|----------|--------|
| | | Máxima | Normal | Mínima |
| Monoetilenglicol | Líquido | 35 | AMBIENTE | 10 |

6.5.5 CONDICIONES DE LOS SUBPRODUCTOS EN LÍMITES DE BATERÍA

| SUBPRODUCTO | ESTADO FÍSICO | TEMPERATURA (°C) | | |
|--------------|---------------|------------------|----------|--------|
| | | Máxima | Normal | Mínima |
| Agua con MEG | Líquido | 35 | AMBIENTE | 10 |

6.5.6 AGENTES QUÍMICOS

| PRODUCTO REQUERIDO | PUNTO DE INYECCIÓN |
|---------------------|---|
| Hidróxido de Calcio | Tanque estabilizador de pH |
| Coagulante | Tanque de coagulación (Mezclado rápido) |

6.6 ELIMINACIÓN DE DESECHOS

6.6.1 Descripción

El agua se manejará por drenaje pluvial. La planta contará con filtros de arena y de carbón activado.

La chimenea deberá contar con tomas de muestra para control de emisiones, y filtro para partículas de emisión.

Los lodos generados serán puestos a disposición de las autoridades competentes para su confinamiento.

6.7 SERVICIOS AUXILIARES

Los servicios auxiliares son aquellas materias que, aunque no forman parte directa del proceso, participan en el mismo. En el caso de la instalación objeto de este Proyecto, los servicios auxiliares son el agua de enfriamiento y aceite térmico usado en la caldera, ambas utilizadas en los procesos de transferencia de energía en los intercambiadores de calor.

6.7.1 Aceite Térmico

| PARÁMETRO | MÍNIMO | NORMAL | MÁXIMO |
|-----------------------------------|--------------|--------|--------|
| Presión (kg/cm ² man.) | 1 | 1.3 | 2 |
| Temperatura (°C) | 240 | 270 | 300 |
| Calidad | 250-280°C | | |
| Disponibilidad | La requerida | | |

6.7.2 Agua

| AGUA DE ENFRIAMIENTO | | | |
|---|--------------|------------------------|------|
| Sistema de enfriamiento | | Torres de enfriamiento | |
| CONDICIONES DENTRO DE LIMITES DE BATERÍA | | | |
| | mín. | nor. | máx. |
| Presión, kg/cm ² man. | 4.0 | 4.5 | 6.0 |
| Temperatura, °C | 15 | 22.0 | 35 |
| Disponibilidad | La requerida | | |
| CONDICIONES DE RETORNO DENTRO DE LIMITES DE BATERÍA | | | |
| | mín. | nor. | máx. |
| Presión, kg/cm ² man | 2.1 | 2.8 | 3.0 |
| Temperatura, °C | 40 | 46 | 49 |
| AGUA PARA SERVICIOS (AGUA PRETRATADA) | | | |
| CONDICIONES DENTRO DE LIMITE DE BATERÍA | | | |
| Presión, kg/cm ² man. | 3.0 | | |
| Temperatura, °C | Ambiente | | |
| Disponibilidad | La requerida | | |
| Fuente | Hidrante | | |
| AGUA CONTRA INCENDIO | | | |
| CONDICIONES DENTRO DE LIMITES DE BATERÍA | | | |
| Presión, kg/cm ² man. | 10.0 | | |
| Temperatura, °C | Ambiente | | |
| Disponibilidad | La requerida | | |
| AGUA POTABLE | | | |
| Disponibilidad | La requerida | | |
| Suministro en: | Garrafones | | |

6.7.3 AGUA DE ENFRIAMIENTO

El agua de enfriamiento será la requerida por el proceso, la cual proviene de una torre de enfriamiento que esta fuera de límites de batería a una temperatura de alrededor de 18 °C.

6.7.4 AGUA PARA SERVICIOS

El agua para servicios será en su mayoría pretratada y se complementará de la toma de la red municipal a temperatura ambiente a una presión manométrica de 3.5 Kg/cm².

6.7.5 AGUA CONTRA INCENDIO

Estará dentro de límites de batería, su disposición será la requerida a temperatura ambiente y a una presión manométrica de 10 Kg/cm².

6.7.6 AGUA POTABLE

Será la requerida y se suministrara por medio de garrafones de 19 litros.

6.7.7 COMBUSTIBLE

6.7.7.1 Gas.

El consumo de gas L.P. se abastecerá por medio de tanques estacionarios para servicios sanitarios, cocina, etc., alimentados por una línea troncal de la distribución de este servicio en esta zona.

| | |
|--|--------------------------|
| Fuente de suministro | Red General de Refinería |
| Tipo | Gas L.P. |
| Presión, kg/cm ² man. | 3.5 |
| Temperatura, °C | Ambiente |
| Poder Calorífico Inferior, Kcal/m ³ | 8483.37 |
| Peso Molecular | 19.04 |
| Disponibilidad, m ³ /hr | La requerida |

6.7.8 ALIMENTACIÓN DE ENERGIA ELECTRICA

6.7.8.1 Fuente de Suministro.

El suministro de energía eléctrica será proporcionado por la CFE a través de una subestación con un voltaje de 220 V, 60 ciclos/s.

6.7.8.2 Alimentación de energía eléctrica de emergencia.

Para la alimentación de instrumentos y alumbrado, a falla de energía eléctrica se deberá contar con un banco de baterías independiente, con capacidad suficiente para mantener energizado el sistema durante 30 minutos.

6.7.9 TELÉFONOS

Criterios de comunicación interna y externa.

6.8 SISTEMAS DE SEGURIDAD

6.8.1 Sistemas contra incendio

Este sistema consistirá de una red de agua contra incendio presurizada (hidrantes).

El sistema de seguridad y protección contra incendio contará con detección y alarmas que actuarán en forma manual y automática en caso de incendio o cualquier otra emergencia.

La instalación de los sistemas de contra incendio y alarma deberán basarse en la Norma API-RP-14G

Se deberán identificar las líneas de servicios auxiliares y de proceso mediante código de colores conforme a las normas NOM-14, NOM-15 y NOM-34.

Los letreros de seguridad y rutas de escape, se distribuirán en lugares estratégicos.

En materia de seguridad se deberá cumplir con la normatividad de STPS y con la norma internacional NFPA.

6.8.2 Protección de personal

Se deberá cumplir con la normatividad de STPS.

6.8.3 Condiciones climatológicas

El clima típico de Tultitlán es el mismo que predomina en la Cuenca y en la ciudad de México, es decir, el llamado subtropical de altura o semiseco, cuya clave es BS(c)wk'g. Este clima se caracteriza por ser templado, semiseco y sin invierno muy marcado. Las lluvias por lo general ocurren en los meses de mayo a octubre. Enero es el mes más frío y las heladas se presentan de diciembre a febrero.

6.8.3.1 Temperatura ambiente (fuente INEGI 2005)

| Temperatura | Extrema | Promedio (°C). |
|--------------|---------|----------------|
| Máxima (°C). | 18.7 | 15.6 |
| Mínima (°C). | 10.7 | 14.2 |
| Promedio | | 14.9 |

6.8.3.2 Humedad relativa

| | |
|----------|------|
| Máxima | 67 % |
| Mínima, | 32 % |
| Promedio | 52 % |

6.8.3.3 Viento

| Tipo | Dirección | Característica | Vel. Máxima m/s |
|--------------------|----------------------------------|------------------------------|--------------------|
| Vientos Reinantes | <i>Provenientes Noroeste</i> | Son los de mayor frecuencia | 3.0 |
| Vientos Dominantes | <i>N- Noroeste</i> | Son los de máxima intensidad | 5.0 |

6.8.3.4 Precipitación pluvial anual

| | |
|---------------|----------------|
| Precipitación | Promedio (mm). |
| Máxima (°C). | 885.3 |
| Mínima (°C). | 503.3 |
| Promedio | 623.9 |

6.8.3.5 Nevadas

| | |
|-------------|---------|
| Máxima, cm. | Ninguna |
|-------------|---------|

6.8.3.6 Terremotos

| | |
|--------------|------|
| Zona sísmica | Alta |
|--------------|------|

6.9 LOCALIZACIÓN DE LA PLANTA

Coordenadas en límite de batería

19° 39' 44" de latitud norte y 99° 10' de longitud oeste

Localización de la planta sobre el nivel del mar

2248 MSNM

Datos generales de localización general de la planta

País: México

Estado: Estado de México

Municipio: Tultitlán, las coordenadas geográficas en el centro de la cabecera son 19° 39' 44" de latitud norte y 99° 10' de longitud oeste.

Aproximadamente a 20 m de Vías del Ferrocarril

Altitud: Altura promedio de 2,248 metros sobre el nivel del mar.

6.10 CRITERIOS Y BASES PARA DISEÑO DE EQUIPO

6.10.1 Calentadores a fuego directo

Para el diseño de estos equipos se considerará un sobrediseño del 20% en carga térmica y flujos. Las chimeneas incluirán la toma de muestra isocinéticas y los analizadores de gases de combustión necesarios para cumplir con las normas ecológicas vigentes.

Los equipos tendrán la flexibilidad de seguir operando bajo las condiciones de tiro natural. Se incluirá la instrumentación necesaria para evaluar la eficiencia térmica de los equipos así como

también las instalaciones requeridas para el descoquizado. Las chimeneas estarán diseñadas de tal forma que la altura resultante sea la mayor entre la requerida por el proceso y la mínima necesaria para lograr una adecuada dispersión de contaminantes a la atmósfera. En el caso de que el nivel de piso terminado de la chimenea sea menor que el de los edificios administrativos actuales, la diferencia se deberá adicionar a la altura calculada.

6.10.2 Intercambiadores de Calor

La recuperación de energía térmica deberá ser maximizada donde se justifique económicamente.

En los equipos que utilizarán agua de enfriamiento se deberán considerar las facilidades para retrolavados.

Los equipos de intercambio térmico deberán incluir la instrumentación necesaria para realizar análisis estadísticos de sus eficiencias. Estos equipos deberán diseñarse con placas de choque cuando se requiera, en la corriente de entrada, con un 10% de sobre diseño en flujo para su diseño hidráulico y un 10% de sobre diseño en carga térmica para el diseño térmico.

La temperatura en los rehervidores que usan aceite térmico como medio de calentamiento, deberá controlarse mediante el flujo de entrada.

6.10.3 Tanques de almacenamiento

Tanques de almacenamiento

Almacenan los subproductos de la planta: monoetilenglicol grado anticongelante (MEG AF, 79.80% w/w). Deben ser vaciados periódicamente (cada 28 días). Tienen un volumen de 177.2 m³, con un porcentaje de utilización del 82.7%. Construidos en acero al carbono.

Tanques de almacenamiento ST

Almacenan el producto principal de la planta: monoetilenglicol grado fibra (MEG F, 99.92 % w/w). Deben ser vaciados periódicamente (cada 15 días). Tienen un volumen de 1206 m³, con un porcentaje de utilización del 84.5 %. Construidos en acero al carbono.

6.10.4 Bombas

El tipo de accionador de operación normal y de relevo de las bombas en su mayoría deberá ser de motor eléctrico de alta eficiencia; sólo para servicios críticos, como son las bombas de carga a los calentadores a fuego directo, se deberá considerar como accionador de relevo, turbina de vapor, y en operación normal motor eléctrico, con un sobre diseño del 20%.

6.10.5 Sedimentador

El sedimentador circular es alimentado por la parte inferior con un tubo colocado en la parte central que en su parte superior debe presentar un deflector. Las dimensiones recomendadas son: un diámetro de 3 a 45 metros y una altura de 1 a 3.5 metros, la pendiente recomendada esta entre 30° y 40° . También se recomienda una velocidad de 1.00 a 3.00 m/min.

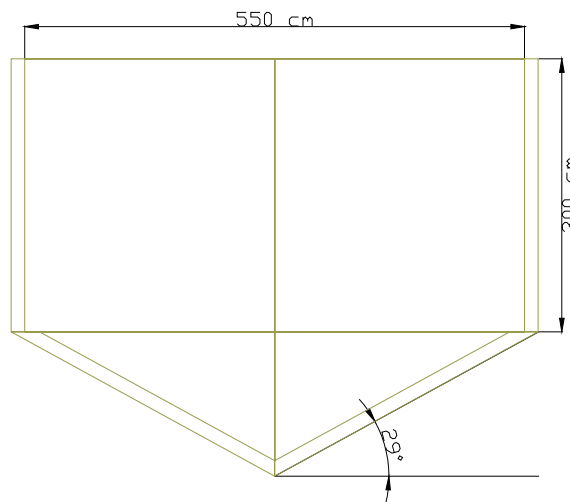


Figura 6.1 Sedimentador

6.10.6 Mezclador Flash de Coagulación

Un mezclador flash por medio de una bomba de difusión debe tener como mínimo una presión de 10 psi, además conviene seguir el siguiente criterio de diseño:

- $G \times t = 400 - 1600$ (1000 promedio)
- $t = 30 - 180$ seg.
- Velocidad en orificio $6 - 7.6$ m/s

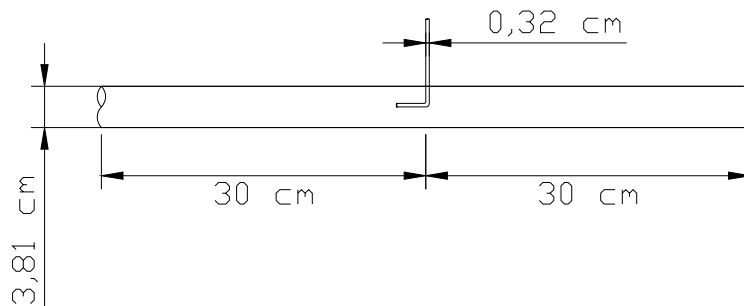


Figura 6.2 Mezclador Flash

6.10.7 Tanque de Floculación

El criterio de diseño que debe contar el mezclador mecánico con paletas es el siguiente:

- $G \times t = 1 \times 10^4$ a 1×10^5 , t en segundos y $G = 10$ a 70 s^{-1} (30 s^{-1})
- Tiempo de detención de 20 a 30 minutos como máximo.
- Área total de las paletas deberá ser de 10 a 25 % del área transversal del tanque.
- La velocidad periferia de las paletas debe estar comprendida entre 0.15 a 1 m/s.

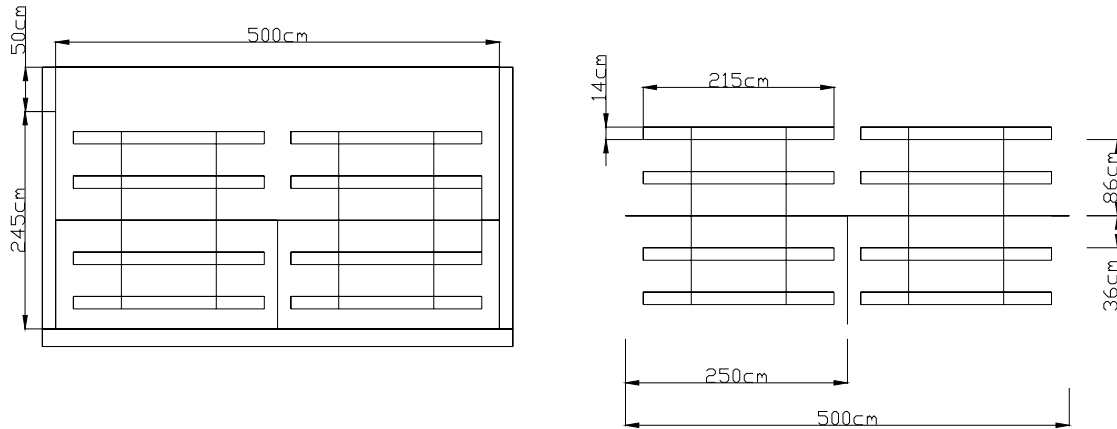


Figura 6.3 Floculador de Paletas

6.11 CONSIDERACIONES GENERALES DE DISEÑO

Se considerará el “directo” y los bloqueos necesarios para aislar los equipos y las válvulas de control, para permitir dar mantenimiento a la planta en operación. Se deberán considerar las facilidades para retrolavar los equipos que utilicen agua de enfriamiento, la instalación de testigos de corrosión y el sistema de recuperación del agua de.

En las tomas de muestra se considerarán sistemas de muestreo cerrado para evitar derrames al drenaje, también deberá tenerse los sistemas requeridos para el vaciado de equipos en paros y/o arranques de la unidad, es decir, los equipos de confinamiento de materiales y circuitos cerrados necesarios.

Se especificarán las pruebas de laboratorio y el equipo requerido para realizarlas, indicando el punto de muestreo, método y periodicidad.

6.12 NORMAS, CÓDIGOS Y ESPECIFICACIONES

Deberá observarse la aplicación de la última edición de los siguientes estándares:

| | |
|------------------------------|--|
| Recipientes a presión | ASME Sección VIII |
| Tubería | ANSI |
| Calentadores a Fuego Directo | NFPA, API, ASME Sección IX, ANSI |
| Intercambiadores de calor | TEMA, ASME, ANSI |
| Aeroenfriadores | API VIII |
| Edificios | CFE, IIE y PEMEX |
| Electricidad | NEMA, NEC, ANSI, NOM-SEMARNAP |
| Ruido | STPS |
| Contaminación | SEMARNAP, INE, EPA |
| Seguridad | PEMEX, API VIII Edición, ASME, OSHA |
| Bombas y Compresores | API |
| Instrumentación | ISA, API, ASME, NACE, NEC, ISO, Normas PEMEX |
| Desechos | EPA, NOM de la SEMARNAP |
| Materiales | ASTM |

6.13 DESCRIPCION DEL PROCESO

El proceso de recuperación de monoetilenglicol a partir de un residuo industrial comienza estabilizando el pH del residuo, asegurando el óptimo rendimiento del coagulante. Para estabilizar el pH se agrega hidróxido de calcio sólido con una bomba de cavidad progresiva, ésta es accionada por medio de una señal que envía un sensor de pH, este sensor se localiza en el tanque TA-101.

Una vez que el residuo tiene el pH apropiado para la coagulación, el residuo se bombea al mezclador flash, donde ocurre la desestabilización del polímero emulsionado. Al mezclador flash se agrega el coagulante con una bomba dosificadora.

El flujo del coagulante es regulado por una válvula de control modulante que se acciona con la señal del sensor de flujo, el sensor esta en línea en la corriente del residuo, esto es para

asegurar la dosis del coagulante. Al salir del mezclador flash se tiene un tubo venturi, el cual nos sirve para asegurar el buen mezclado del coagulante.

Al dispersar el coagulante en el residuo, proseguimos con la etapa de floculación. En el tanque de floculación se lleva a cabo la aglomeración de flocs, para la formación de flóculos de buen tamaño que sean sedimentables. Después del tanque de floculación tenemos el tanque sedimentador, que es el lugar donde sedimenta el flóculo formado del polímero.

Se lleva a cabo un proceso de destilación a baja presión después de que se elimino el polímero disuelto en el producto. El producto es conducido al destilador por medio de una bomba centrífuga que es accionada manualmente pero con paro automático. La destilación es llevada a al vacío para abatir el punto de ebullición, obteniendo una temperatura de ebullición. Además que se tenía el problema de inflamación del producto al destilar a presión atmosférica. En el aspecto económico se redujo el consumo de gas. Y en calidad del producto se logra una mejor separación entre el monoetilenglicol y el dietilenglicol.

El vapor generado en el destilador llega a un intercambiador de calor de tubos y coraza, donde es condensado y recibido en el tanque. Aquí se tienen dos tanques, uno es para recibir el agua y la mezcla meg-agua que destilan en primer término, mientras que el otro recibe el producto (MEG). Se tiene un sistema de control que permite separar las corrientes por medio de una válvula de tres vías con un puerto común, esta válvula es accionada por un sensor de presión y un sensor de temperatura. La válvula de tres vías envía el condensado al tanque de subproducto o al de producto, según sea el caso.

Al terminar el proceso en uno de los dos tanques, se comienza a vaciarlos para el siguiente lote de destilación. El producto MEG se envía al tanque de almacenamiento, mientras que el del subproducto se envía a tratamiento.

Se cuenta con un sistema de seguridad en el tanque de destilación, donde se prevé una posible inflamación del solvente (MEG). Se tiene un sensor de presión en el tanque y uno cerca de la bomba de vacío, lo cual una diferencia significativa entre las dos lecturas de presión puede causar el enfriamiento.

El sistema de vacío se logra utilizando una bomba tipo Nash, donde la presión de vacío es controlada por una válvula de control modulante que se encarga de mantener la presión en un punto de control establecido por el operador.

Figura 6.4 Diagrama de Flujo de Proceso (DFP)

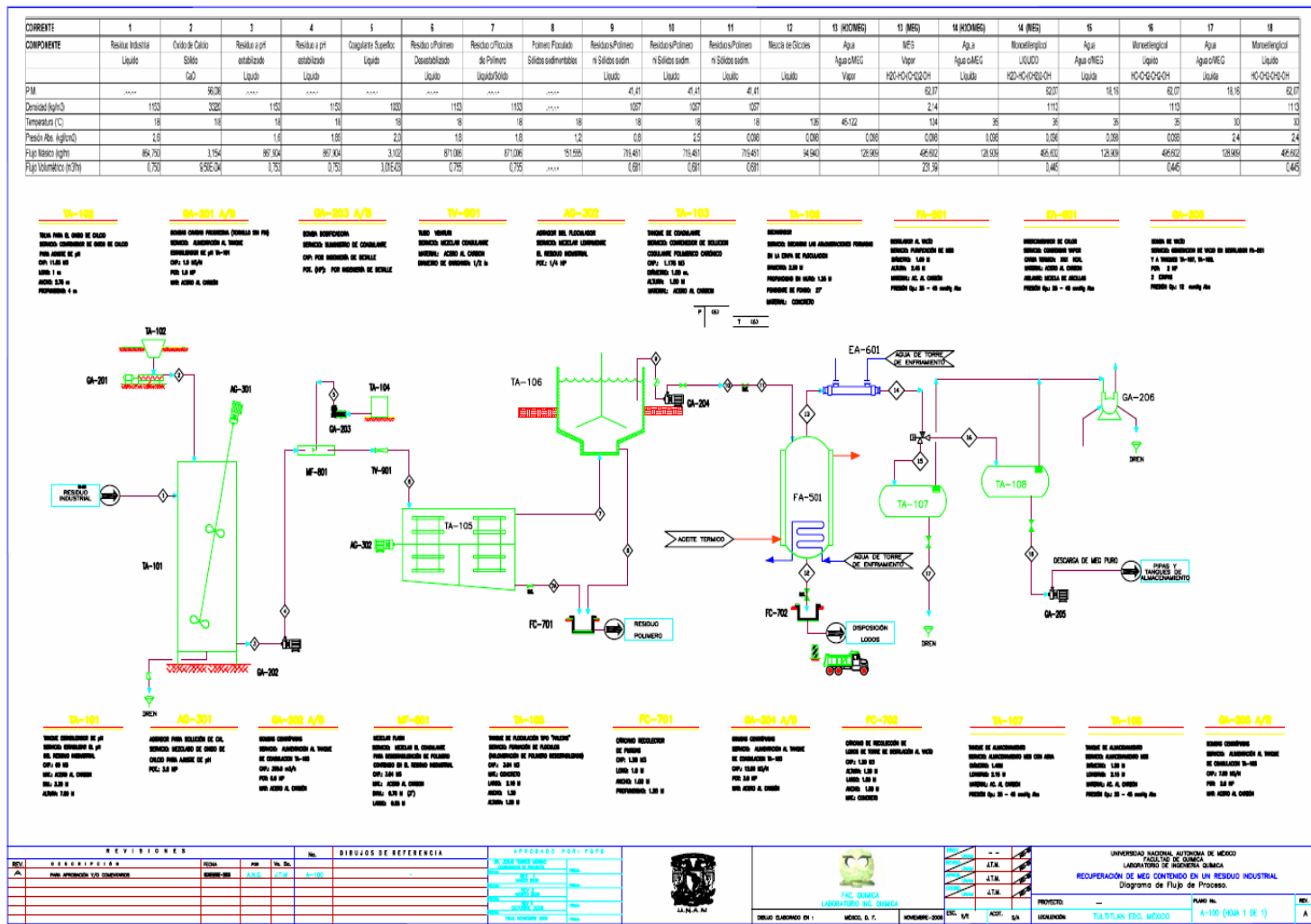
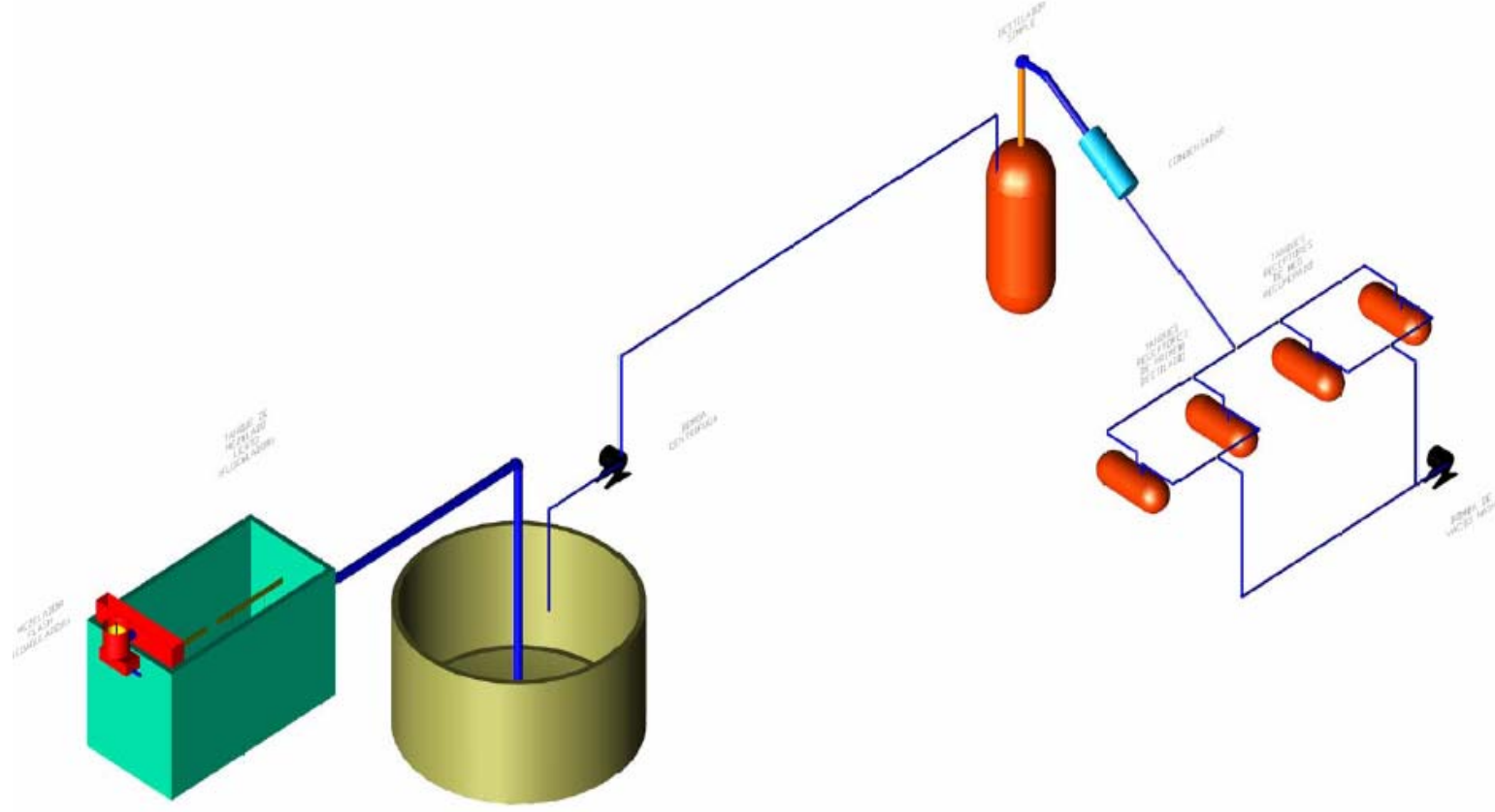


Figura 6.5 Vista Isométrica de la Planta



6.14 ESTUDIO GENERAL DE FACTIBILIDAD

Para llevar a cabo el presente estudio, se realizó un balance preliminar de materia, llegando a la conclusión de crear una planta que recupere 2,970,000 de litros de MEG al año.

Tabla 6.14.1 Utilidades Brutas (cantidades en dólares).

| PRODUCTO | CANTIDAD ANUAL | PRECIO UNITARIO | TOTAL ANUAL |
|--------------|----------------|-----------------|---------------------|
| MEG | 2,970,000 L | 1.13 | \$ 3,356,100 |
| TOTAL | | | \$ 3,356,100 |

Tabla 6.14.2 Costos Variables (cantidades en dólares).

| CONCEPTO | CANTIDAD | PRECIO UNITARIO | TOTAL ANUAL |
|---------------------|-------------|-----------------|-------------------|
| Residuo | 4,455,000 | 0.17 | \$ 757,350 |
| Coagulante | 22,300 L | 1.13 | \$ 25,199 |
| Oxido de Calcio | 100,000 kg | 0.06 | \$ 6,000 |
| Mano de obra | 4 p | 20 | \$ 26,400 |
| Aportaciones varias | | | \$ 60,500 |
| Electricidad | 192,000 kWh | 0.04 | \$ 7,680 |
| Gas | 140,600 ton | 0.03 | \$ 4,218 |
| Mantenimiento | | | \$ 23,200 |
| T O T A L | | | \$ 910,547 |

Tabla 6.14.3 Operaciones fiscales (cantidades en dólares).

| CONCEPTO | TASA ANUAL | TOTAL ANUAL |
|--------------------------------|------------|-------------------|
| Impuesto sobre inmobiliario | 1.8 % | \$ 3,960 |
| Impuesto sobre activos | 1.8 % | \$ 14,193 |
| Impuesto sobre Ingresos Brutos | 29 % | \$ 895,752 |
| NETO A PAGAR | | \$ 913,905 |

Sobre la base de los datos del trabajo, el interés para el 1er año es de 15 % sobre el total de la deuda a dicha fecha, o sea 15 % sobre los \$ 70,000.00 USD de inversión, suponiendo que el desembolso del préstamo haya sido realizado al inicio del ejercicio económico analizado. Este

costo financiero ira disminuyendo a través de los meses en base a la forma de amortización del préstamo.

De todas formas la deducción del interés dependerá del sistema de amortización adoptado, ya que para cada caso habrá que determinar cuál es la cuota de interés contenida en la cuota de servicio desembolsada.

Tabla 6.14.4 Inversión y Tasa de Retorno (cantidades en dólares).

| CONCEPTO | TOTAL |
|--------------------------------------|----------------------|
| Inversión inicial | \$ 70,000.00 |
| Amortización 3 años | \$ 23,333.33 |
| Interés sobre capital | \$ 17,500.00 |
| Administración y ventas | \$ 503,415.00 |
| Otros Gastos | \$ 544,248.33 |
| Costos Totales | \$ 2,371,700.33 |
| Ingeniería | \$ 237,170.03 |
| Resultado Final del ejercicio | \$ 747,229.64 |

Sobre un costo anual de \$2,608,870.36 se obtiene un beneficio de \$747,229.64; o sea una renta anual próxima al 28.6% (incluye amortización de la planta). Al precio de venta del MEG a la salida de la planta se le asigna un precio de MEG para uso en anticongelante, sin embargo, se obtiene un MEG grado fibra con precio de \$1.65 USD. Por esta razón, el tiempo de retorno real de la inversión es de 0.09 años (1-1/2 mes aprox.).

Debe aclararse que dicho cálculo se ha hecho suponiendo un precio de MEG con de \$12.50 pesos por kilogramo. En todo caso, podría decirse que la proyección de la planta se ha diseñado siguiendo precios internacionales.

Es interesante recalcar que el MEG recuperado con pureza 99.98 tiene un precio en planta superior al vendido para uso de refrigerante (pureza de 78.5), por lo que el MEG recuperado con una pureza superior le permite en general adquirir un precio competitivo en el mercado.

7 CONCLUSIONES

El objetivo principal se cumplió, se puede purificar monoetilenglicol a partir de las materias primas utilizadas en la planta Disolventes del Río S.A. de C.V., obteniendo un producto altamente competitivo. Esta competitividad se observa en la pureza del monoetilenglicol que se recupera, se obtiene monoetilenglicol con pureza de 99.98 % a partir de un residuo que contenía 58 % de monoetilenglicol.

El monoetilenglicol que se obtiene no contiene polímetro, además de lograr una pureza mayor a la esperada. Se obtiene un producto con calidad de monoetilenglicol grado fibra, 99.98 % pureza, siendo que el monoetilenglicol para materia prima de anticongelante requiere de una pureza mayor o igual a 79.8 %.

El monoetilenglicol que se obtiene por medio de este proceso es de alta competitivo en el mercado, debido a que puede compararse con monoetilenglicol grado analítico marca Merk Index así como también con monoetilenglicol del Grupo Idesa. Siendo que su precio de venta como materia prima de anticongelante es de \$ 12.50 pesos y éste puede llegar a ser de \$ 18.50 a \$22.30 pesos si se vende como monoetilenglicol grado fibra.

La etapa de coagulación-floculación es crucial para la eliminación del polímero en el tratamiento de recuperación de monoetilenglicol, ya que pruebas experimentales tales como centrifugación, destilación, sedimentación, filtración, no lograron eliminar por completo al polímero.

Se propone el proceso de recuperación de monoetilenglicol y se establecen las condiciones de operación para la obtención de monoetilenglicol libre de polímero de acuerdo al Diagrama de Flujo de Proceso Y Diagrama de Tuberías e Instrumentación desarrollados en esta tesis.

Proceso de recuperación de monoetilenglicol a partir de un residuo industrial

El proceso de recuperación propuesto representa una síntesis de las diversas técnicas requeridas para la recuperación de un producto de alta calidad, teniendo en mente la limpieza y baja generación de residuos. Esta tecnología contrasta con el procedimiento primitivo utilizado anteriormente por la empresa.

La recuperación de disolventes de acuerdo al procedimiento planteado permite minimizar los desechos al drenaje, sólidos suspendidos que pueden ir a confinamiento, contribuyendo así al mejoramiento del ambiente.

8 BIBLIOGRAFÍA

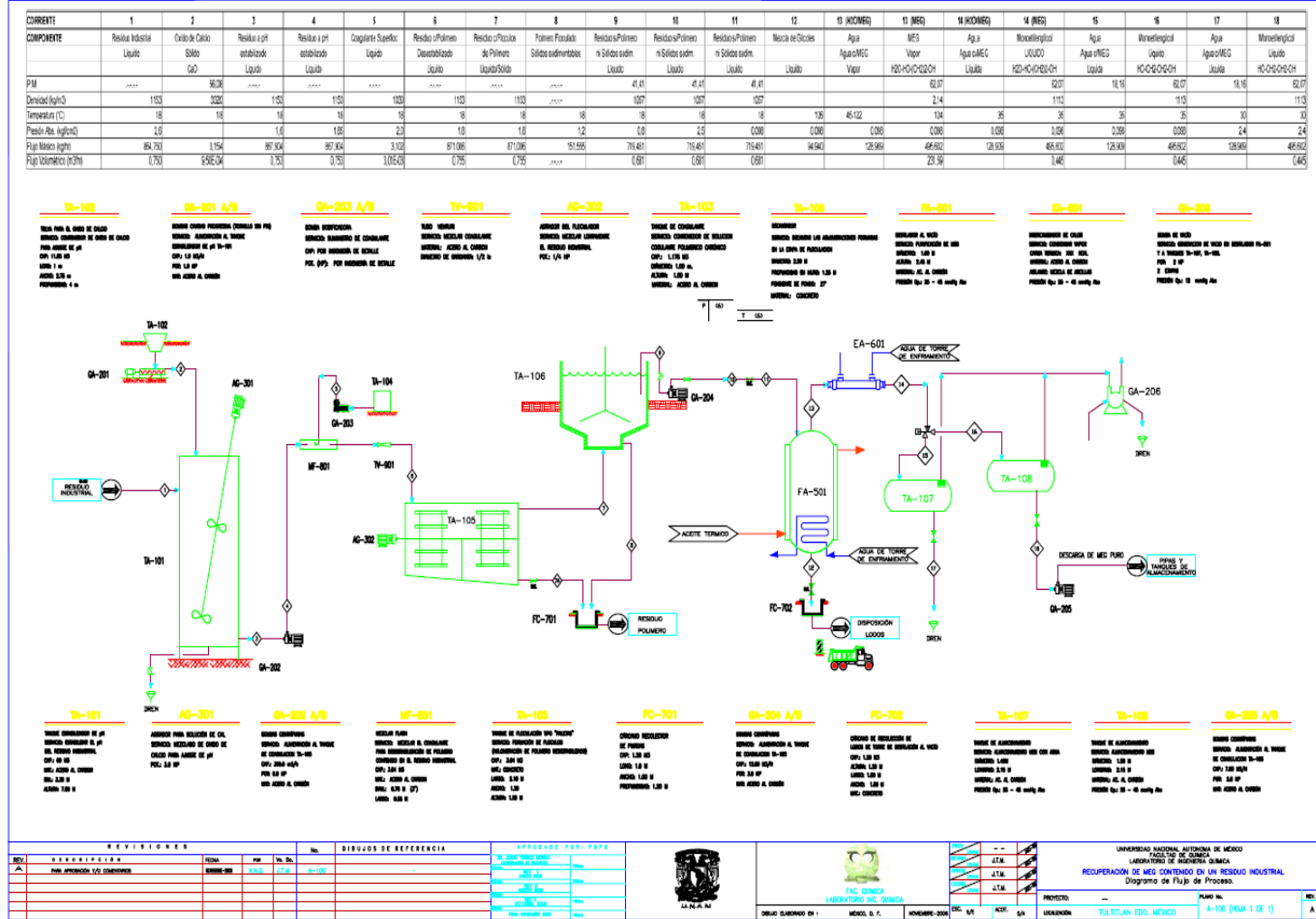
1. **American Water Works Association (AWWA).** Water Treatment Plant Design. 2nd edition. AWWA. New York. 1990.
2. **APV, Engineered Systems.** Distillation Handbook. 4th edition. A Siebe Group Company. New York. 1996.
3. **ARCHER, Wesley L.** Industrial Solvents Handbook. Marcel Dekker, Inc. New York, USA. 1996.
4. **BRATBY, J. R.** Interpreting laboratory results for the design of rapid mixing and flocculation systems. *Journal of the American Water Works Association*, vol. 73, no. 6, June, 1981, pp. 312–318.
5. **COULSON, J. M.** Chemical Engineering. 4a edición. Editorial Pergamon Press. New York, USA. 1991. vol. 2.
6. **CRANE.** Flujo de Fluidos en válvulas, accesorios y tuberías. McGraw-Hill. México. 1996.
7. **CHEREMISINOFF, Paul N.** Handbook of Water and Wastewater Treatment Technology. Marcel Dekker, Inc. New York, USA. 1995.
8. **DE VARGAS, Lidia.** Tratamiento de agua para consumo humano. Plantas de Filtración Rápida. Organización Panamericana de la Salud (OPS) / Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria y Ciencias del Ambiente (CEPIS). Lima, Perú. 2004. Tomo 1.
9. **DROSTE, Roland L.** Theory and Practice of Water and Wastewater Treatment. John Wiley & Sons Inc. U.S.A. 1997.
10. **FLEMING, J. L.** Volatilization Technologies for Removing Organics from Water. Noyes Data Corporation. U.S.A. 1989.
11. **HARNBY, N.** Mixing in the Process Industries. 2nd edition. Butterworth-Heinemann Ltd. U.K. 1992.

12. **HERNADEZ**, Aurelio. *Depuración de Aguas Residuales*. 2ª edición. Colección Seinor. Madrid, España. 1992.
13. **KAWAMURA**, S. *Integrated Design of Water Facilities*. John Wiley. New York, USA. 1991.
14. **LOVEL**, Peter A. *Emulsion Polymerization and Emulsion Polymers*. John Wiley & Sons Inc. England. 1997.
15. **LUDWIG**, Ernest E. *Applied Process Design for Chemical and Petrochemical Plants*. 3rd edition. USA. 1997.
16. **MASSCHELEIN**, Liliane. *Los Disolventes*. Centro Nacional de Conservación y Restauración. Chile. 2004.
17. **McCABE**, Warren L. *Operaciones Básicas de Ingeniería química*. Editorial Reverte. España. 1981.
18. **OCÓN**, Joaquín. *Problemas de Ingeniería*. 3ª edición. Ediciones Aguilar. Madrid, España. 1980. Tomo 1.
19. **PEDRERO**, P. S. *Fisicoquímica para Farmacia y Biología*. Ediciones científicas y técnicas. Barcelona, España. 1992.
20. **PERRY**, *Manual del Ingeniero Químico*. McGraw-Hill. México. 1992.
21. **PETERS**, T. W. *Plant Design and Economics for Chemical Engineers*. 5th edition. McGraw-Hill. USA 2003.
22. **REYNOLDS**, T. D. *Unit Operation and Processes in Environmental Engineering*. 2ª edición. PWS Publishing Company. USA. 1996.
23. **SMALLWOOD**, Ian. *Solvent Recovery Handbook*. McGraw-Hill, Inc. London, U.K. 1993.
24. **TATTERSON**, Gary B. *Scaleup and Design of industrial Mixing Processes*. McGraw-Hill Inc. USA. 1994.
25. **VILBRANDT**, Frank C. *Ingeniería Química del Diseño de Plantas Industriales*. Editorial Grijalbo. México. 1963.

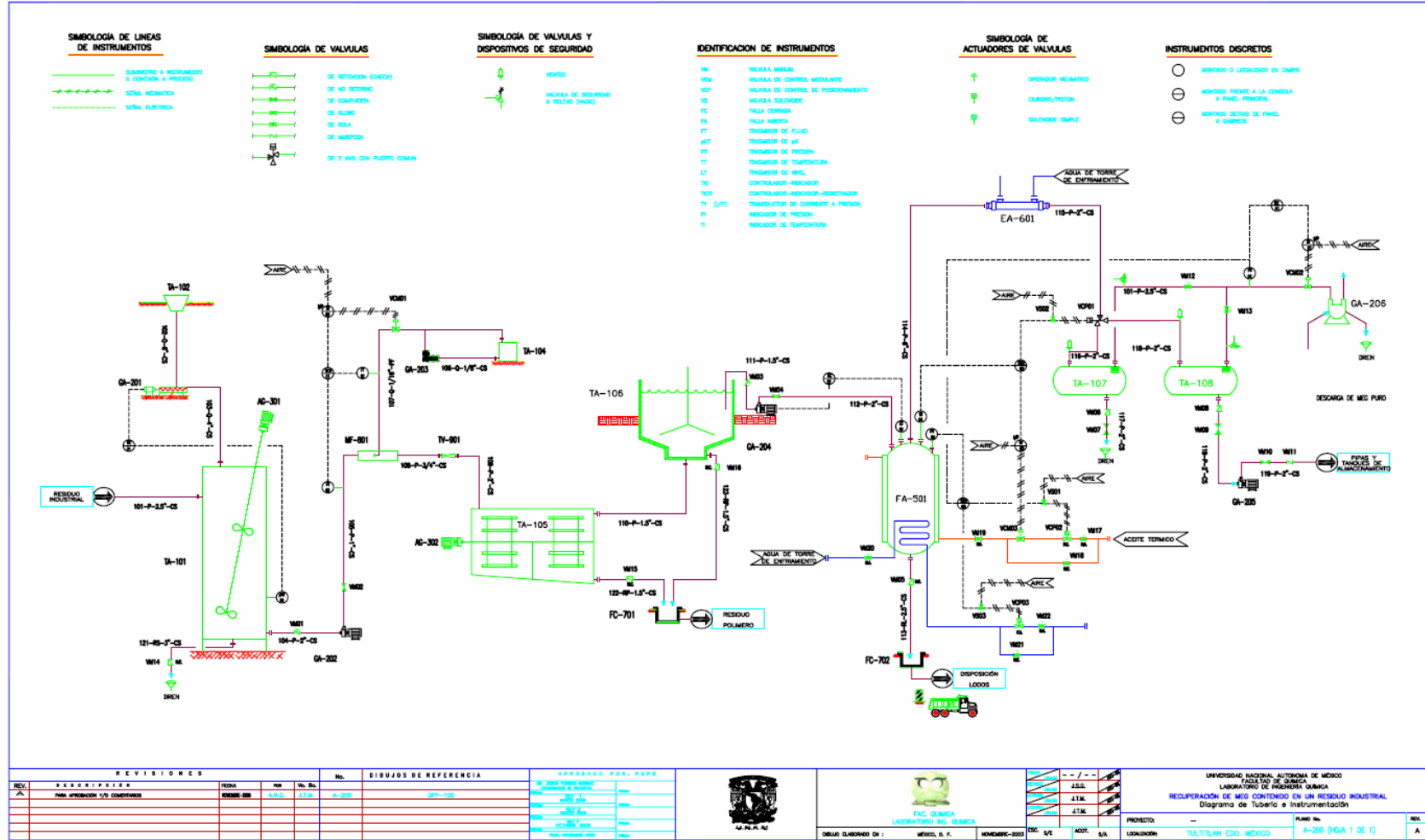
Páginas web visitadas:

26. <http://es.wikipedia.org/>
27. <http://laguna.fmedic.unam.mx/~evazquez/0403/a.html>
28. <http://www.americansolventscouncil.org>.
29. <http://www.cec.uchile.cl/~cabierta/revista/15/educacion/edu4/>
30. <http://www.ine.gob.mx>
31. <http://www.osha.gov/SLTC/pel/>
32. http://www.tecnologia.mendoza.edu.ar/materiales/materiales_enlaces.htm
33. <http://www.tramfloc.com/>
34. <http://www.zeta-meter.com>

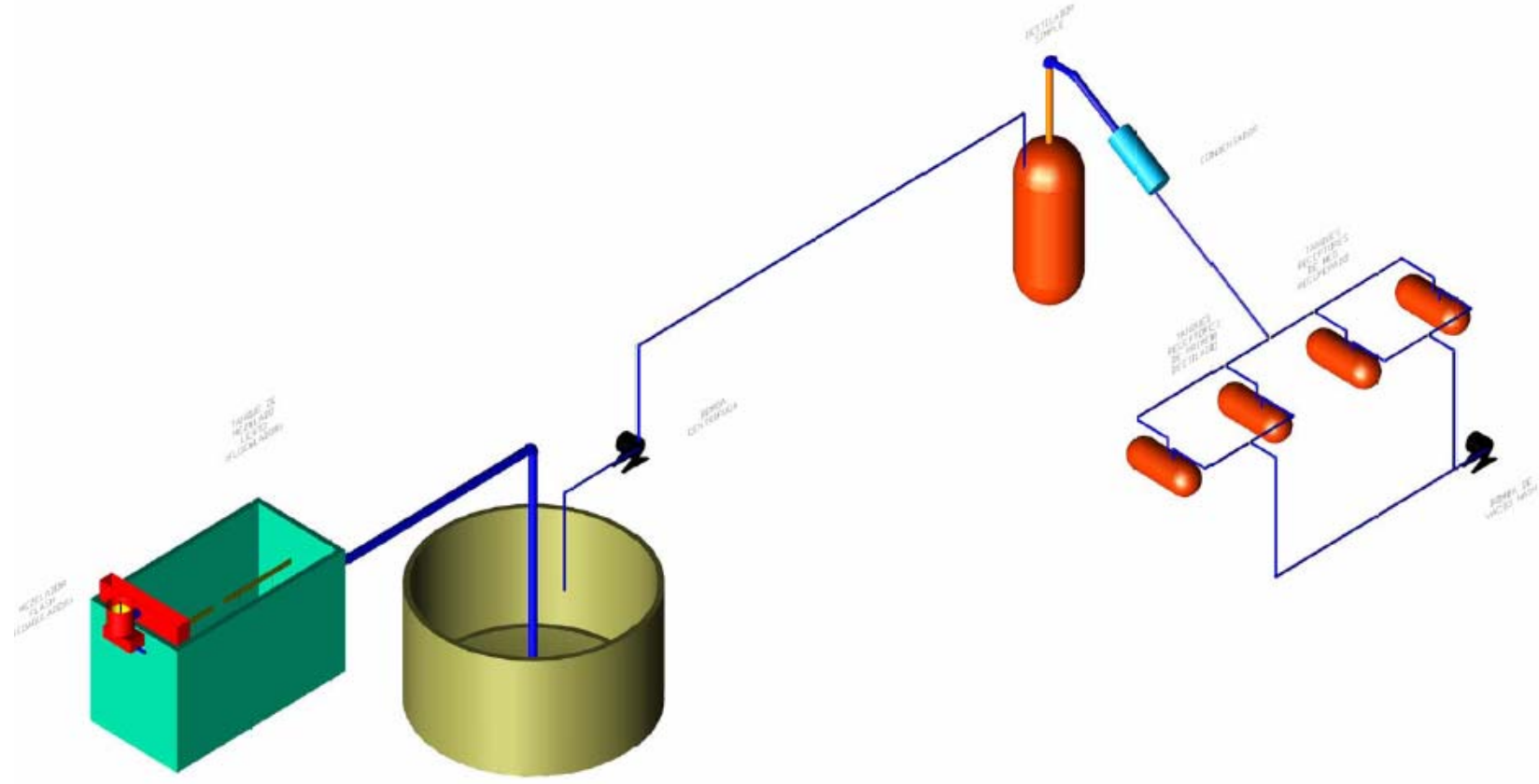
ANEXO1 DIAGRAMAS



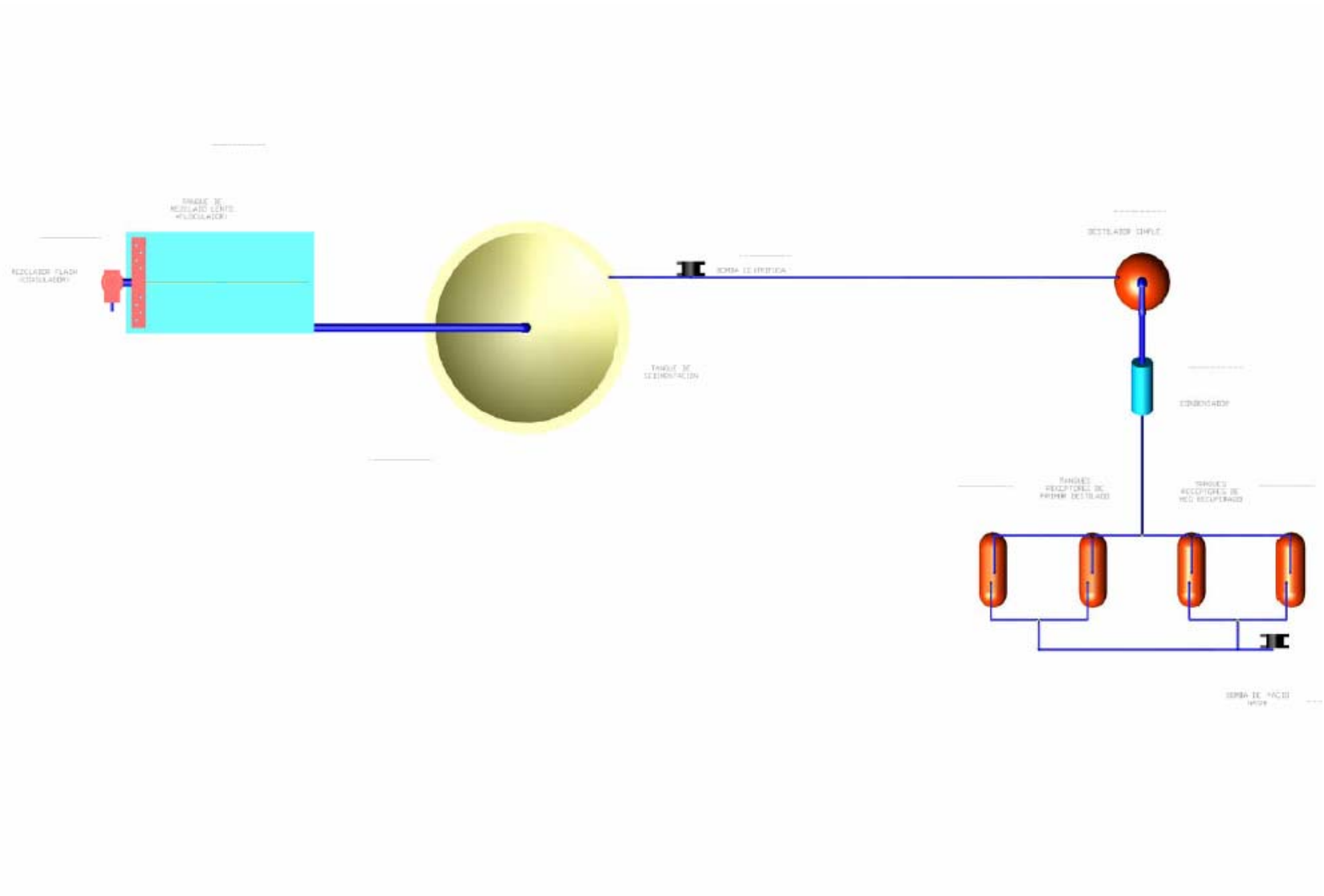
Proceso de recuperación de monoetilenglicol a partir de un residuo industrial



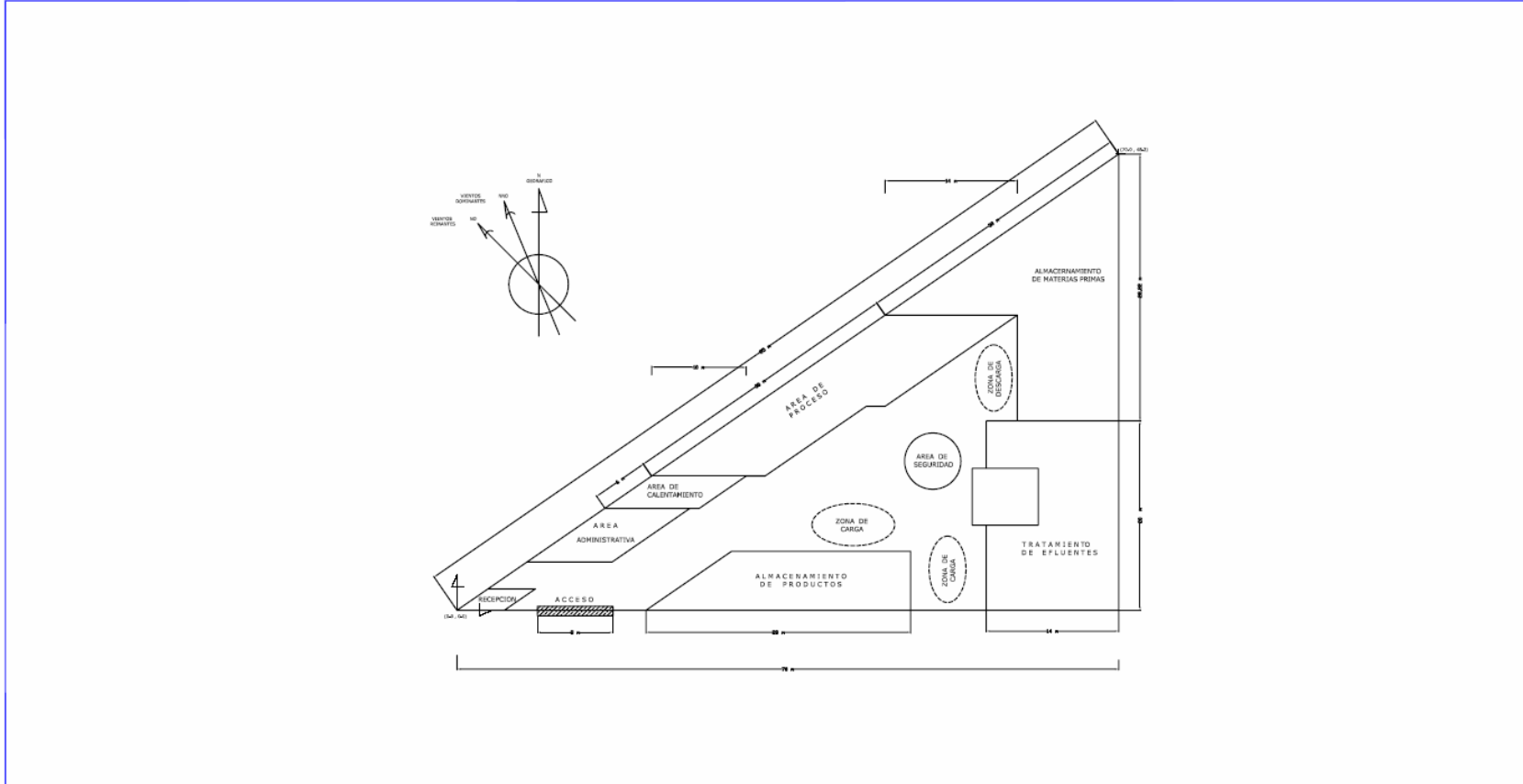
Proceso de recuperación de monoetilenglicol a partir de un residuo industrial



Proceso de recuperación de monoetilenglicol a partir de un residuo industrial



Proceso de recuperación de monoetilenglicol a partir de un residuo industrial



| REVISIONES | | | | No. | | DIBUJOS DE REFERENCIA | | APROBADO POR: PAPA | |
|------------|---------------------------------|---------|-----|------|-------|-----------------------|-----|--------------------|-------|
| REV. | DESCRIPCIÓN | FECHA | POR | VAL. | NO. | DI. | ES. | FECHA | FECHA |
| 1 | UNA APLICACIÓN Y/O CORRECCIONES | 2008-08 | AAS | JLP | A-300 | | | | |
| | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | |



FAC. QUÍMICA
LABORATORIO IND. QUÍMICA

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO
FACULTAD DE QUÍMICA
LABORATORIO DE QUÍMICA QUÍMICA
RECUPERACIÓN DE MEO CONTENIDO EN UN RESIDUO INDUSTRIAL
Plano de Localización General

DISEÑO ELABORADO EN: MÉXICO, D. F., NOVIEMBRE-2008. ESC. QUÍMICA, ADQ. QUÍMICA, QUÍMICA, TIAUTLAN, EDU. MÉXICO. PLANO No. A-300 (HOJA 1 DE 1) ESC. A

ANEXO 2 SUPERFLOCULANTE-COAGULANTE

Coagulantes

SUPERFLOC®

PoliDADMAC líquido, catiónico: **Serie C-500**

La serie C-500 de coagulantes SUPERFLOC tipo poliDADMAC (cloruro de polidialil-dimetil amonio) son polímeros catiónicos líquidos de diferentes pesos moleculares que actúan con eficacia como coagulantes primarios y neutralizadores de carga en procesos de separación líquido-sólido en una amplia variedad de industrias. La gama disponible química asegura que existe un producto adecuado para cada aplicación individual.

Ventajas

- Uso económico: eficaz a dosis bajas.
- No se ven afectados por el pH del sistema.
- Son eficaces en un amplio rango de pH.
- Son resistentes al cloro.
- Pesos moleculares moderado a alto para determinadas aplicaciones.
- Pueden sustituir o reducir el uso de sales inorgánicas.
- Se pueden administrar directamente: simplifica el equipo de dilución, dosificación y manipulación.
- Solubles de manera inmediata a todas las concentraciones.

Usos principales:

Los coagulantes SUPERFLOC tipo poliDADMAC de la serie C-500 son polímeros catiónicos muy eficaces, recomendados para los siguientes procesos de separación de líquido-sólido:

- Clarificación del agua: mejora el agua de entrada, de proceso y efluente reduciendo el color, los sólidos suspendidos y la turbidez.
- Flotación por medio de aire disuelto: da como resultados subnadales más claros, incremento de los sólidos flotantes y mayor rendimiento.
- Deshidratación de sólidos por medio de filtros-bando, centrifugas o filtros prensa: puede usarse como coagulante primario en programas poliméricos dobles para aumentar las tasas de producción, la captura de sólidos y el porcentaje de sólidos en la torta.
- Filtración: mejorar la calidad del agua filtrada y el rendimiento de la planta.

Las anteriores son aplicaciones primarias para estos productos, que pueden resultar beneficiosos en cualquier proceso de separación sólido-líquido.

Aplicación

Los coagulantes SUPERFLOC tipo poliDADMAC se deben dosificar en el sistema utilizando una bomba de desplazamiento positivo resistente a la corrosión. Para lograr la mayor eficacia, añada agua de dilución hasta lograr una relación de al menos 10:1. Los mejores resultados se obtienen dispersando la corriente de alimentación y promoviendo una alta turbulencia para lograr un mezclado rápido más allá del punto de aplicación. Lograr un máximo tiempo de residencia antes del proceso de separación da lugar a una mayor eficacia.

Seguridad e higiene

Estos productos pueden irritar los ojos y la piel. Al manipularlos, se recomienda utilizar guantes de caucho, gafas de protección y ropas protectoras. No muestran toxicidad aguda en administración oral y dérmica en animales de laboratorio, aunque mostraron capacidad para irritar los ojos. Consulte los datos completos de seguridad, higiene y medio ambiente en la Hoja de Seguridad.

Manipulación y almacenamiento

Los materiales recomendados para la construcción de recipientes incluyen el acero inoxidable, la fibra de vidrio, el plástico, tanques con recubrimientos epóxicos o de vidrio. No utilice hierro, cobre ni aluminio. **Los derrames de polímeros son muy escurridizos y se deben recoger por absorción en un material inerte antes de lavar con agua.** La vida útil de estos productos es de 12 a 24 meses cuando se almacenan a temperaturas comprendidas entre 5 y 30°C. Si el material se congela, descongele y mezcle antes de usar.

Distribución

La serie C-500 de coagulantes SUPERFLOC tipo poliDADMAC viene en tambores de 200 litros, contenedores 1000 litros o envíos a granel.

CYTEC

CYTEC INDUSTRIES INC.
<http://www.cytec.com>

WTT-1145-SP-A

| Productos* | Coagulantes SUPERFLOC | | | |
|--|-----------------------------|-----------|-----------|------------|
| | C-587 | C-591 | C-592 | C-595 |
| Propiedades típicas | ← Líquido ámbar → | | | |
| Apariencia | ← Catiónica → | | | |
| Carga | Catiónica | Catiónica | Catiónica | Catiónica |
| Peso molecular relativo | Medio | Alto | Medio | Muy alto |
| Densidad, a 25°C | 1,01-1,05 | 1,01-1,05 | 1,02-1,06 | 1,06-1,10 |
| Punto de congelación | -5°C | -5°C | -5°C | -5°C |
| Temperatura de inflamación, copa cerrada | >93°C | >93°C | >93°C | >93°C |
| Vida útil (almacenado a <38°C) | 2 años | 2 años | 2 años | 2 años |
| Especificaciones de ventas del producto | | | | |
| Sólidos totales, % (método KZ 102, CBV 00764) | 19 Min | 19 Min | 39 Min | 39 Min |
| pH (método KZ 103, CBV 00466) | 5-8 | 5-8 | 5-8 | 5-8 |
| Viscosidad en bruto a 25°C, cps (método KZ 101; CBV 00616) | 300 máx. | 3200 máx. | 3200 máx. | 6000-13000 |
| Permisos normativos (las siguientes denominaciones cumplen estos requisitos normativos) | ← Véase Hoja de Seguridad → | | | |
| Control de inventario químico | ← Véase Hoja de Seguridad → | | | |
| NSF International | C-587 | C-591 | C-592 | (ninguno) |
| Drinking Water Inspectorate (UK) | C-587 | (ninguno) | C-592 | (ninguno) |

**Nota: Estos productos están disponibles. Solicite a nuestro representante de Cytec información sobre otros productos que tal vez no se hayan mostrado aquí.*

Permiso gubernamental/información sobre normativa

Determinados productos polyDADMAC (véase el cuadro) han sido certificados conforme a la norma ANSI/NSF 60 para su uso en agua potable por el organismo "NSF International" y también han sido aprobados en el Reino Unido por el "Drinking Water Inspectorate." También se pueden utilizar como agentes decolorantes y como producto auxiliar para refinar licores y jugos de melaza según aprobación por la FDA (21 CFR 173.5). Para obtener información sobre listados de control sobre normas de inventario químico para EE.UU., Canadá y la Unión Europea, consulte la Hoja de Seguridad.

AVISO IMPORTANTE

La información y las declaraciones realizadas en este documento se consideran confiables, pero no se pueden entender como garantía o representación mediante la cual asumamos ninguna responsabilidad legal o como una suposición de obligación por parte nuestra. Los usuarios deben realizar una verificación y prueba suficiente para determinar que una determinada información, producto o proveedor mencionado aquí es adecuado para el uso particular que le pretende dar. NO SE REALIZA NINGUNA GARANTÍA DE ADECUACIÓN PARA UN USO PARTICULAR. Nada de lo afirmado en este documento se puede considerar como permiso, inducción o recomendación para utilizar una invención potencial sin licencia.

Aviso de marca registrada

El símbolo ® indica Marca registrada en el Reino Unido y la ™ o * indica Marca registrada en los Estados Unidos. La marca también puede ser registrada, ser el tema de una petición de registro o marca registrada en otros países.

CYTEC

• **Asia/Pacific** - Cytec Industries Pte. Ltd., Singapore, 65-733-6788 • **Canada** - Cytec Canada Inc., Markham, Ontario, 905-470-3700 • **Europe** - Cytec Industries B.V., Botlek, the Netherlands, 31-181-29-54-00 • **Latin America** - Coral Gables, Florida, U.S.A., 305-569-3260 • **South America** - Cytec de Argentina S.A., Buenos Aires, 541-231-5088; Cytec do Brasil LTDA, Sao Paulo, Brazil, 55-11-5505-4588 • **United States** - Cytec Industries Inc., West Paterson, NJ, 973-357-3100.

©1997 Cytec Industries Inc. All Rights Reserved.

.5k 7/98 HDR

ANEXO 3 HOJA SE SEGURIDAD DE ETILENGLICOL



Nombre común: **ETILENGLICOL**

Número CAS: 107-21-1

Número DOT: No tiene

(ETHYLENE GLYCOL)

Número de la sustancia RTK: 0878

Fecha: Febrero de 1989

Revisión: Junio de 1996

RESUMEN DE LOS RIESGOS POSIBLES

- * El **etilenglicol** puede afectarle al respirarlo y cuando pasa a través de su piel.
- * El **etilenglicol** debe tratarse como un **TERATÓGENO — CON MUCHO CUIDADO.**
- * La exposición al **etilenglicol** puede irritar los ojos, la nariz y la garganta.
- * La exposición puede causar sensación de “embriaguez,” náuseas, vómitos y dolores de cabeza.
- * La exposición repetida puede causar daños a los riñones y al cerebro.

IDENTIFICACIÓN

El **etilenglicol** es un líquido espeso, sin color ni olor. Se utiliza como anticongelante en sistemas de calefacción y enfriado, para descongelar alas de aviones, como solvente industrial y en pinturas y plásticos.

RAZONES PARA SU MENCIÓN

- * El **etilenglicol** está en la Lista de Sustancias Peligrosas porque ha sido citado por ACGIH, NFPA, NIOSH, DEP, HHAG y EPA.
- * Las definiciones se encuentran en la página 5.

CÓMO DETERMINAR SI ESTÁ EN RIESGO DE EXPOSICIÓN

La Ley del Derecho a Saber de New Jersey exige a todos los empleadores que rotulen los envases de las sustancias químicas en el lugar de trabajo, y a los empleadores públicos, que provean a sus empleados la información y el entrenamiento adecuados acerca de las sustancias químicas peligrosas y las medidas para su control. La norma federal de Comunicación de Riesgos de la Administración para la Salud y Seguridad Ocupacionales (OSHA) 1910.1200 exige a los empleadores privados que provean entrenamiento e información similares a sus empleados.

- * La exposición a sustancias peligrosas debe ser evaluada en forma rutinaria. Esto puede incluir la recolección de muestras de aire localizadas y generales. Ud. puede solicitar copias de los resultados del muestreo a su empleador, de acuerdo al derecho legal que le otorga la norma OSHA 1910.20.

- * Si Ud. cree que tiene cualquier problema de salud relacionado con su trabajo, vea a un doctor especializado en enfermedades ocupacionales. Llévelo esta Hoja Informativa sobre Sustancias Peligrosas.

LÍMITES DE EXPOSICIÓN EN EL LUGAR DE TRABAJO

PEOSHA: El límite de exposición para las partículas aéreas (PEL) que nunca se debe exceder es de **50 ppm.**

ACGIH: El límite recomendado de exposición en el aire es de **39.5 ppm**, el cual no debe excederse en ningún momento.

- * Los límites de exposición mencionados arriba son para los niveles en el aire solamente. Cuando también ha habido contacto con la piel, es posible que Ud. haya sufrido una sobreexposición, aunque los niveles en el aire sean menores que los límites mencionados arriba.

MANERAS DE REDUCIR LA EXPOSICIÓN

- * Donde sea posible, limite las operaciones a un lugar cerrado y use ventilación de escape local en el lugar de las emisiones químicas. Si no se usa un lugar cerrado o ventilación de escape local, deben usarse respiradores (máscaras protectoras).
- * Lleve ropa de trabajo que le proteja.
- * Lávese muy bien inmediatamente después de exponerse al **etilenglicol** y al término de su jornada de trabajo.
- * Exhiba la información acerca de los riesgos y precauciones en el lugar de trabajo. Además, y como parte del proceso de educación y entrenamiento, comunique a los trabajadores que podrían estar expuestos al **etilenglicol** toda la información necesaria acerca de los riesgos para su salud y su seguridad.

ANEXO 4 MEMORIAS DE CALCULO: MEZCLADOR FLASH

Bomba de difusión como Mezclador Flash

Flujo de la planta $Q := 6000 \cdot \frac{\text{L}}{\text{hr}}$

Flujo de Coagulante $q := 0.004 \cdot Q$

$$q = 6.667 \times 10^{-6} \frac{\text{m}^3}{\text{s}}$$

G x t $Gt := 1000$ promedio

$ef := 0.80$

$v := 6.5 \cdot \frac{\text{m}}{\text{s}}$ (1),(4),(7),(13),(22)

$$H := \frac{v^2}{2 \cdot 9.81 \cdot \frac{\text{N}}{\text{kg}}} \quad H = 2.153 \text{ m}$$

$$P := \frac{9.81 \cdot \frac{\text{N}}{\text{kg}} \cdot q \cdot H \cdot 1120 \cdot \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}}{ef} \quad P = 0.197 \text{ W}$$

$$P = 2.644 \times 10^{-4} \text{ hp}$$

$G := 684 \cdot \text{s}^{-1}$

$$\mu := 1.336 \cdot 10^{-3} \cdot \frac{\text{N} \cdot \text{s}}{\text{m}^2}$$

$$V := \frac{P}{G^2 \cdot \mu} \quad V = 3.154 \times 10^{-4} \text{ m}^3$$

$L := 0.30 \cdot \text{m}$

$$D := \left(\frac{V \cdot 4}{\pi \cdot L} \right)^{0.5} \quad D = 0.037 \text{ m} \quad D = 1.441 \text{ in } (1 - 1/2 \text{ in})$$

$$At := \frac{\pi \cdot D^2}{4} \quad At = 1.051 \times 10^{-3} \text{ m}^2$$

$$v_r := \frac{Q}{At}$$

$$v_r = 1.585 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

$$d := \left(\frac{q}{0.785 \cdot v} \right)^{0.5}$$

$$d = 0.045 \text{ in} \quad \text{aprox. } 1 / 20 \text{ in}$$

$$V_1 := \left(\frac{\pi \cdot D^2}{4} \right) \cdot L$$

$$V_1 = 3.154 \times 10^{-4} \text{ m}^3$$

ANEXO 5 MEMORIAS DE CALCULO: MEZCLADOR LENTO

CALCULO DE MEZCLADOR LENTO ETAPA DE FLOCULACION

Flujo

$$Q := 6000 \cdot \frac{\text{L}}{\text{hr}} \qquad Q = 1.667 \times 10^{-3} \frac{\text{m}^3}{\text{s}}$$

Tiempo de retención por compartimento

$$tr := 30 \cdot \text{min} \qquad tr = 1.8 \times 10^3 \text{ s}$$

Valores de gradientes de velocidad por compartimento

$$G1 := 20 \cdot \text{s}^{-1} \qquad G1 \cdot tr = 3.6 \times 10^4$$
$$G2 := 20 \cdot \text{s}^{-1}$$

Temperatura promedio de operación

$$T_{\text{prom}} := 293.15 \cdot \text{K}$$

Número de compartimentos propuesto

$$N_{\text{comp}} := 1$$

Volumen Total

$$V := tr \cdot Q \qquad V = 3 \text{ m}^3$$

Volumen por compartimento

$$V_{\text{comp}} := \frac{V}{N_{\text{comp}}} \qquad V_{\text{comp}} = 3 \text{ m}^3$$

Proponer profundidad de tanque entre 2 a 3 m

$$h := 1.20 \cdot \text{m}$$

Calcular el area transversal del tanque

$$At := \frac{V_{\text{comp}}}{h} \qquad At = 2.5 \text{ m}^2$$

Calcular el ancho del tanque

$$w := \frac{At}{h} \qquad w = 2.083 \text{ m}$$

Calcular el largo del tanque

$$l := \frac{V_{\text{comp}}}{w \cdot h} \qquad l = 1.2 \text{ m}$$

El compartimento tendrá las siguientes dimensiones

Ancho = 5.00 m
Largo = 2.45 m
Profundidad = 2.45 m
Borde libre = 0.45 m

Calcular la posición de la flecha y el soporte de la flecha

$$\frac{h}{2} = 0.6 \text{ m} \quad \text{La flecha se encontrara a una altura de 1.225 m}$$

$$\frac{w}{2} = 1.042 \text{ m} \quad \text{el soporte se encontrara a 2.499 m sobre lo ancho con una altura de 1.225 m}$$

A continuación se hace el dimensionamiento de las paletas

Largo de la paleta

$$w_p := w - 0.30 \cdot m - (2 \cdot 0.20 \cdot m) \quad w_p = 1.383 \text{ m}$$

$$L_p := \frac{w_p}{2} \quad L_p = 0.692 \text{ m}$$

El área total de las paletas debe estar entre 15-20% del área transversal y el ancho de la paleta debe estar entre 10-20 cm

$$A_{tp} := A_t \cdot 0.20 \quad A_{tp} = 0.5 \text{ m}^2$$

Se propone un cierto número de paletas

$$N_p := 4$$

Se calcula el ancho de la paleta

$$a_{cp} := \frac{\left(\frac{A_{tp}}{N_p}\right)}{L_p} \quad a_{cp} = 0.181 \text{ m}$$

La paleta tendra las siguientes dimensiones

Largo = 2.15 m
Ancho = 0.14 m

se contara con 2 sets de paletas
teniendo un total de 8 paletas

Se calcula la potencia del compartimento

$$\mu := 0.021 \cdot N \cdot \frac{s}{m^2}$$

$$P_t := G1^2 \cdot V_{comp} \cdot \mu \qquad P_t = 0.034 \text{ hp}$$

$$P_r := \frac{P_t}{0.75} \qquad P_r = 0.045 \text{ hp}$$

P_r es la potencia real transmitida
se comparará un motor de **1/2 Hp**

La potencia expedida por cada paleta esta dada por la ecuación

$$P_p := \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot CD \cdot b \cdot \left[\frac{2 \cdot \pi \cdot N}{60} \cdot (1 - k) \right]^3 \cdot \int_{r_i}^{r_o} r^3 dr$$

$$P_p := (1.44 \cdot 10^{-4}) \cdot CD \cdot \rho \cdot b \cdot [N \cdot (1 - k)]^3 \cdot (r_o^4 - r_i^4)$$

P_p : Potencia expedida por paleta (watts)

ρ : densidad (kg/m³)

CD : coeficiente de arrastre depende de la geometría de la paleta

b : longitud de la paleta (m)

N : velocidad relativa de la paleta (rpm)

k : coeficiente depende si hay o no estator

r_o : distancia del centro de la flecha al borde exterior de la paleta (m)

r_i : distancia del centro de la flecha al borde interior de la paleta (m)

$$\rho := 1121 \cdot \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

$$CD := 1.8$$

$$b := L_p \qquad b = 0.692 \text{ m}$$

$$k := 0.25$$

$$r_{o1} := 0.50 \cdot \text{m} \qquad r_{o2} := 1.00 \cdot \text{m}$$

$$r_{i1} := 0.36 \cdot \text{m} \qquad r_{i2} := 0.86 \cdot \text{m}$$

$$P_{p1} := (1.44 \cdot 10^{-4}) \cdot CD \cdot \rho \cdot b \cdot [N1 \cdot (1 - k)]^3 \cdot (r_{o1}^4 - r_{i1}^4)$$

$$P_{p1} := 1.44 \cdot 10^{-4} \cdot 1.8 \cdot 1121 \cdot 2.149 \cdot [N1 \cdot (1 - 0.25)]^3 \cdot (0.50^4 - 0.36^4)$$

$$P_{p1} \rightarrow 1.2039640137468216000 \cdot 10^{-2} \cdot N1^3$$

$$P_{p2} := (1.44 \cdot 10^{-4}) \cdot CD \cdot \rho \cdot b \cdot [N1 \cdot (1 - k)]^3 \cdot (r_{o2}^4 - r_{i2}^4)$$

$$P_{p2} := 1.44 \cdot 10^{-4} \cdot 1.8 \cdot 1121 \cdot 2.149 \cdot [N1 \cdot (1 - 0.25)]^3 \cdot (1.00^4 - 0.86^4)$$

$$P_{p2} \rightarrow .11933042691400941600 \cdot N1^3$$

$$4 \cdot (P_{p1} + P_{p2}) \rightarrow .52548026820591052800 \cdot N1^3$$

$$P_t = 25.2 \text{ W}$$

$$P_t \equiv 4 \cdot (P_{p1} + P_{p2})$$

$$N1 := \left(\frac{252}{0.52548} \right)^{\frac{1}{3}} \quad N1 = 7.827 \text{ rpm}$$

calculamos ahora la velocidad periférica

$$v_p := \left(\frac{2 \cdot \pi \cdot N1}{60 \cdot s} \right) \cdot r_{o2} \quad v_p = 0.82 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

$$P_t := \frac{1}{2} CD \cdot A_{tp} \cdot \rho \cdot N2^3$$

$$N2 := \left(\frac{P_t \cdot 2}{CD \cdot A_{tp} \cdot \rho \cdot \pi^3 \cdot 1\text{m}^3} \right)^{\frac{1}{3}} \quad N2 = 0.117 \text{ Hz}$$

$$N2t := N2 \cdot 60 \cdot s$$

$$N2t = 7.034 \text{ rpm}$$